



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



ESCOLA DE MINAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**O MAGMATISMO PLUTÔNICO EDIACARANO-CAMBRIANO
DO SISTEMA OROGÊNICO ARAÇUAÍ-RIBEIRA
REVISITADO, SE DO BRASIL**

Pedro Vieira Armond

MONOGRAFIA nº 492

Ouro Preto, Outubro de 2023

**O MAGMATISMO PLUTÔNICO EDIACARANO-
CAMBRIANO DO SISTEMA OROGÊNICO ARAÇUAÍ-
RIBEIRA REVISITADO, SE DO BRASIL**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof. Dr. Adilson Pereira dos Santos

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. José Alberto Naves Cocota Junior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Dr. Geraldo Magela Sampaio

Vice-Chefe

Prof. Dr. Leonardo Eustáquio da Silva Gonçalves

MONOGRAFIA

Nº 492

O MAGMATISMO PLUTÔNICO EDIACARANO-CAMBRIANO DO SISTEMA OROGÊNICO ARAÇUAÍ-RIBEIRA REVISITADO, SE DO BRASIL

Pedro Vieira Armond

Orientador

Prof. Dr. Leonardo Gonçalves

Co-Orientadores

MSc. Syro Gusthavo Lacerda

e

Prof.^a Dr.^a Cristiane Gonçalves

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2023/2.

OURO PRETO

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A733m Armond, Pedro Vieira.

O magmatismo plutônico Ediacarano-Cambriano do Sistema Orogênico Araçuaí-Ribeira revisitado, SE do Brasil. [manuscrito] / Pedro Vieira Armond. - 2023.

145 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Eustáquio da Silva Gonçalves.

Coorientadores: Profa. Dra. Cristiane Paula de Castro Gonçalves, Me. Syro Gusthavo Lacerda.

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

1. Geoquímica. 2. Granitogênese. 3. Aprendizado de máquina. I. Gonçalves, Leonardo Eustáquio da Silva. II. Gonçalves, Cristiane Paula de Castro. III. Lacerda, Syro Gusthavo. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 550.4:004.8

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Vieira Armond

O magmatismo plutônico Ediacarano-Cambriano do sistema orogênico Araçuaí-Ribeira revisitado, SE do Brasil

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 23 de Outubro de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. Leonardo Eustáquio da Silva Gonçalves - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. André Danderfer Filho - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Jr. - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. Dr. Leonardo Gonçalves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/10/2023



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Eustaquio da Silva Goncalves, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/10/2023, às 09:28, 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 **0613017** e o código CRC **CEF73625**.

AGRADECIMENTOS

“Há entre as pedras e as almas afinidades tão raras, como vou dizer? Elas têm cheiro de gente queira ou não queira se sente: têm esse poder. Pedra e homem comovem sobem e descem e somem e ninguém sabe bem. O homem desce do os céus e a pedra nasce de Deus que tudo contém – Granito (João Bosco)”.

Assim como são fundamentais as grandes rochas que compõe e sustentam a arquitetura terrestre, os meus alicerces são os meus pais Rosana e Lúcio, e a minha irmã, Anna Catharina. Agradeço profundamente por todo o amor, paciência e pelo esforço monolítico para me criar e amparar por toda a minha jornada de vida, e também por viabilizar irrestritamente a perseguição de todos os meus sonhos. Amo vocês com profundidade.

Agradeço à minha família, os Vieira e os Armond, pela união, comunhão, fraternidade e apoio incondicional sempre!

Durante este caminho tive a sorte e o privilégio de encontrar mentores e amigos especialíssimos como o Léo e a Cris, a quem devo abraços e obrigados eternos pela confiança e motivação em me desenvolver pessoal e academicamente! E também agradeço sinceramente a todos do laboratório LMic, especialmente a Syro, Geraldin, Stéphaney, Luiza, Wilker, Cachu, Robert Smith, Carol e Jéssyca pelas parcerias, risadas e carinhos por esses anos. A geologia me presenteou com conexões sinceras e edificantes, e minha gratidão se estende a todos que fizeram parte dessa jornada. Destaco a atenção, a fraternidade e o carinho do Mestre Hokage, Lucão, Luís, Douglão, Jorgin e Gabriel por toda a jornada!

Agradeço a todos da CPRM/SGB, especialmente ao Paulo, Marcin, Lombello, Vinícius, Denise, Jabuti, Dudu, Everton, pelo acolhimento, discussões e ensinamentos seja sobre a Geologia ou sobre a vida!

Torno-me quem eu sou e continuarei a me transformar eternamente... Fatalmente, essa metamorfose (ou *metamorfismo*) não é obra exclusiva minha, mas sim de todos àqueles que estiveram ao meu lado ao longo destes anos. Carrego comigo fragmentos de tudo e de todos, e sou profundamente grato por isso.

Agradeço aos meus irmãos, conterrâneos, amigos queridos, pela parceria que se estenderá por toda a minha vida.

A Tainá, minha companheira e meu amor, agradeço por todo apoio, carinho, compreensão e amor.

Às serras, ruas, poemas, músicas, gavetas e memórias, agradeço à minha terra, Mariana.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	xii
SUMÁRIO	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE TABELAS	xxiii
RESUMO	xxiv
ABSTRACT	xxv
1 CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	2
1.1 APRESENTAÇÃO	2
1.2 LOCALIZAÇÃO	3
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 JUSTIFICATIVA	3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS	5
1.5.1 Revisão Bibliográfica	5
1.5.2 Organização do Acervo de Dados Geoquímicos.....	5
1.5.3 Linguagem Python	7
1.5.4 Análise Estatística	8
1.5.5 Confeção de Diagramas de Classificação e Discriminação.....	9
1.5.6 Etapas de execução do trabalho	10
2 CAPÍTULO 2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	11
2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO	11
2.2 ORÓGENO ARAÇUAÍ	14
2.2.1 Estratigrafia do Orógeno Araçuaí	17
2.2.2 Magmatismo Plutônico do Orógeno Araçuaí	19
2.3 ORÓGENO RIBEIRA	23
2.3.1 Estratigrafia do Orógeno Ribeira	26
2.4 MODELOS EVOLUTIVOS DO SISTEMA OROGÊNICO ARAÇUAÍ-RIBEIRA	
31	
2.4.1 Síntese da História Evolutiva do Orógeno Araçuaí sob a Perspectiva da Tectônica de ‘Quebra-Nozes’	32
2.4.2 Síntese da História Evolutiva do Cinturão Ribeira sob a Perspectiva da Tectônica de Margem Continental Ativa.....	37

2.4.3 O Modelo de Orogenia Intracontinental.....	40
3 CAPÍTULO 3 ESTADO DA ARTE DA CLASSIFICAÇÃO GRANÍTICA E TÉCNICAS ESTATÍSTICAS	44
3.1 CLASSIFICAÇÃO PARA GRANITOIDES	44
3.2 BANCO DE DADOS COMPARATIVO DE BONIN <i>ET AL.</i> (2020) E MOYEN <i>ET AL.</i> (2021).....	48
3.3 TIPOS E SUBTIPOS DEFINIDOS POR BARBARIN (1999)	48
3.4 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA GEOQUÍMICA DAS ROCHAS MAGMÁTICAS PLUTÔNICAS	53
3.4.1 Análise Discriminante Linear (LDA).....	53
4 CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 ETAPA DE TRATAMENTO DOS DADOS GEOQUÍMICOS	59
4.1.1 Normalização das Concentrações Dos Óxidos	59
4.1.2 Transformação Centered Log-Ratio (CLR).....	60
4.2 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS (EDA).....	61
4.2.1 Teste de Correlação de Pearson.....	62
4.2.2 Teste de Correlação de Spearman	62
4.2.3 Resultados nos Testes de Correlação de Pearson e Spearman.....	63
4.3 MATRIZ DAS DISTÂNCIAS INTRA- E INTER-CLASSES	66
4.4 RESULTADOS DA LDA.....	68
4.4.1 Diagramas Scatterplot e Boxplot para os Coeficientes LD	70
4.5 TREINAMENTO DE UM MODELO PELO MÉTODO LDA SOB A PERSPECTIVA CLASSIFICATÓRIA DE BONIN <i>ET AL.</i> (2020) E JACOB & MOYEN (2021).....	74
4.6 RESULTADO DA MODELAGEM LDA PARA OS BANCO DE DADOS DA LITERATURA.....	76
4.7 RESULTADO DA MODELAGEM LDA PARA O BANCO DE DADOS DO PRESENTE TRABALHO.....	80
4.8 PARÂMETROS E DIAGRAMAS GEOQUÍMICOS	83
5 CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO.....	102
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
Anexo 1	117
Anexo 2	118
Anexo 3	119

INDÍCE DE FIGURAS

- Figura 1.1** – Representação teórica dos elementos em diagramas Boxplot: 50% dos dados se concentram nos limites interquartis e 99,3% estão compreendidos pelos limites mínimo e máximo ($Q1 - 1.5 \cdot IQR$ e $Q3 + 1.5 \cdot IQR$, respectivamente), imagem retirada de: <https://www.kdnuggets.com/2019/11/understanding-boxplots.html>. 9
- Figura 2.1** – Modelo de elevação digital do relevo, das porções justapostas do Sudeste Brasileiro e Oeste da África Central, na configuração paleogeográfica do Gondwana Ocidental. Nota-se que o núcleo cristalino se encontra totalmente dentro do território brasileiro. AWCO – Araçuaí-West Congo Orogen. Cidades: RJ – Rio de Janeiro, V – Vitória, S – Salvador, L – Luanda e C – Cabinda (extraído de Alkmim et al. 2017). 12
- Figura 2.2** – Mapa geológico simplificado da Província Mantiqueira Central-Setentrional – modificado de Heilbron et al. 2004). 14
- Figura 2.3** – Em A) Mapa geofísico gravimétrico (anomalia Bouguer) evidenciando a zona de sutura do Orógeno Araçuaí; B) Um perfil esquemático cujo traçado ‘A-B’ se encontra em A) por Amaral et al. 2020; C) Comparativo entre os perfis de respostas de anomalia Bouguer de zonas de sutura ao redor do mundo, por Thomas, 1992 exceto o perfil Riacho do Pontal por Oliveira e Medeiros, 2018). Imagem extraída de Caxito et al. 2020. 16
- Figura 2.4** – Coluna estratigráfica esquemática do Grupo Macaúbas e outras unidades do Orógeno Araçuaí. 1, conglomerados; 2, arenitos; 3, pelitos; 4, diamictitos; 5, formação ferrífera diamictítica; 6, basalto transicional; 7, calcário dolomítico; 8, sedimentos exalativos (chert sulfetado, sulfeto maciço, formações ferríferas e outros); 9, rochas máficas (com veios de plagiogranito) e ultramáficas oceânicas; 10, wackes e pelitos; 11, rochas piroclásticas e vulcanoclásticas dacíticas; 12, seixos e blocos pingados. (esquema extraído de Pedrosa-Soares et al. 2008). 18
- Figura 2.5** – Mapa geológico simplificado do sistema orogênico Araçuaí-Ribeira, e sua localização na porção ocidental do Paleocontinente Gondwana (extraído de Tedeschi et al. 2016). 1, Cobertura sedimentar cenozoica; 2, Cobertura do cráton São Francisco. Unidades do AROS (Araçuaí-Ribeira orogenic system): 3,

Plutonismo pós-colisional; 4, Plutonismo colisional; 5, Arco magmático Rio Doce e possíveis correlativos; 6, Assembleia de rochas “Ophiolite-bearing”; 7, Domínio do arco Rio Negro; 8, Sucessões metassedimentares e metavulcânicas Neoproterozoicas; 9, Rochas magmáticas Tonianas e Criogenianas associadas a rift; 10, Porção sul do Cinturão Brasília; 11, Unidades pré-Neoproterozoicas. WCB, Cinturão Congo Ocidental. CSF, Cráton São Francisco. PP-LA-RP, bloco cratônico Paranapanema-Luiz Alves-Rio de la Plata. 21

Figura 2.6 – Estrutura tectônica do Cinturão Ribeira e da zona de interferência com o Cinturão Brasília, extraído de Heilbron et al. 2016. Em A-B uma seção transversal esquemática regional. 1) Cobertura Fanerozoica; 2) Plutons alcalinos do Cretáceo Superior; 3 e 4) Unidades com orientação E do Cinturão Brasília, incluindo a nappe de Guaxupé e nappes inferiores; 5–7) Unidades do Cráton São Francisco: 5- Embasamento Paleoproterozoico a Arqueano; 6- Cobertura cratônica Neoproterozoica, Grupo Bambuí; 7- Metassedimentos Mesoproterozoicos a Neoproterozoicos do domínio autóctone; 8–17) Terrenos e domínios estruturais do Cinturão Ribeira: 8- Domínios de Andrelândia e 9- Juiz de Fora do terreno Ocidental, 10- Nappe de Socorro; 11- Terreno de Apiaí; 12- Terreno de Embú; 13- Terreno Paraíba do Sul, 14- Terreno de Cambuci; 15- Arco magmático do Criogeniano-Ediacarano, 16- Sucessões metassedimentares Neoproterozoicas e arco magmático Toniano do Terreno Oriental; 17- Terreno de Cabo Frio; CTB – Contato Tectônico Central; SFC: cráton São Francisco; OCT: Terreno Ocidental; TPSE: Terreno Paraíba do Sul-Embu; TOR: Terreno Oriental e TCF: Terreno Cabo Frio. 25

Figura 2.7 – Desenvolvimento da bacia Macaúbas, precursora do Orógeno Araçuaí (700 Ma). Em A - Elementos tectônicos visto em mapa. B - Seção através do setor setentrional ensialítico. C - Seção através do setor meridional oceânico (extraído de Alkmim et al. 2007)..... 35

Figura 2.8 – Evolução da bacia Macaúbas, precursora do Orógeno Araçuaí por volta de 600 Ma na fase inicial de convergência; deposição da unidade metassedimentar, a Formação Salinas e desenvolvimento do arco magmático Rio Doce. Em A - Elementos tectônicos visto em mapa. B - Seção através do setor setentrional ensialítico. C - Seção através do setor meridional oceânico (extraído de Alkmim et al. 2007)..... 36

Figura 2.9 – Estágios (a) colisional, por volta de ca. 560 Ma e (b) de colapso gravitacional após escape lateral da porção sul do orógeno por volta de 500 Ma (extraído de Alkmim et al. 2007)..... 37

Figura 2.10 – Modelo tectônico simplificado do desenvolvimento do Orógeno Ribeira. 1 – Complexos Serra da Bolívia e Marceleza e suíte Leopoldina, representantes do Sistema Interno de Arcos; 2-6 – Rochas do Sistema Externo de Arcos; 2 – rochas cálcio-alcálicas do arco Serra da Prata; 3 – Gabros tholeiíticos associados aos arcos; 4 – Rochas de médio a alto-K da série Cálcio-alcálica; 5 – Rochas da série Shoshonítica do arco Rio Negro; 6 – Magmatismo máfico de backarc (Figura extraída de Heilbron et al. 2020b..... 39

Figura 2.11 – a) Seção transversal esquemática do Orógeno Araçuai durante o momento de fusão parcial da crosta média. b) Ilustração de como a bacia pré-orogênica de Macaúbas pode ter sido. A descontinuidade de Moho foi arbitrariamente colocada a 20 km de profundidade. O retângulo pontilhado em a) reflete a espessura média da crosta na parte espessada do Orógeno, e a forma pré-orogênica correspondente desta área é apresentada pelo retângulo em b) (figura extraída de Cavalcante et al. 2019). 42

Figura 2.12 – Em a, b e c, tem-se a representação da geodinâmica dos sistemas orogênicos brasileiros, das etapas entre os períodos Criogeniano (aproximadamente 800-650 Ma), final do Criogeniano e início do Ediacarano (aproximadamente 650-600 Ma) e Ediacarano (aproximadamente 600-560 Ma), respectivamente. AM, Cráton da Amazônia; ANG, Bloco de Angola; CO, Cráton do Congo; GO, Bloco de Goiás; KA, Cráton de Kalahari; LA, Cráton Luis Alves; PP, Bloco Paranapanema; RA, Bloco Rio Apa; RP, Cráton Rio de La Plata; SF, Cráton São Francisco; SL, Cráton São Luís; WA, Cráton da África Ocidental; TL, Lineamento Transbrasileiro (figura extraída de Meira et al. 2019a). 43

Figura 3.1 – Síntese proposta por Barbarin (1999), onde se observa: A) uma síntese sobre a relação entre os tipos/subtipos petrogenéticos, suas origens e o ambiente geodinâmico dominante; B) diagrama esquemático dos tipos/subtipos petrogenéticos em relação as suas assembleias minerais típicas, e proporções dos componentes crustal e mantélico em sua gênese; C) as principais características de cada tipo/subtipo. 52

Figura 3.2 – Diagrama bidimensional ilustrando a separação de dois grupos distintos utilizando Análise Discriminante Linear (LDA). Os pontos azuis e vermelhos representam os dados de dois grupos diferentes. A linha pontilhada verde é a linha de separação determinada pela LDA, que tenta maximizar a distância entre os centroides dos grupos enquanto minimiza a variação dentro de cada grupo. Os parâmetros LD1 e LD2 são eixos ortogonais entre si, que definem um hiperplano hipotético, e que durante a análise LDA se mostraram eficientes em observar o contraste da distribuição multivariada entre as classes, enquanto minimiza a distância intra-classe..... 54

Figura 3.3 – À esquerda, temos diagrama tridimensional do Espaço de Características Original (3D), que representa as três características originais dos dados. Os pontos azuis e vermelhos representam os dados de dois grupos diferentes. À direita, temos diagrama bidimensional do Espaço Transformado pela LDA (2D). Depois de aplicar a Análise Discriminante Linear, os dados são projetados em um espaço de menor dimensão (neste caso, 2D). Note que, neste espaço transformado, a separação entre os grupos é mais clara, o que é o objetivo da LDA. Estas imagens ajudam a visualizar como a LDA opera, transformando os dados de um espaço de alta dimensão para um espaço de menor dimensão, onde a separação entre grupos é maximizada. 55

Figura 3.4 – Na figura a esquerda, a relação Intra-classe do Grupo A e seu centroide; à direita, distância Inter-classes dos grupos A e B. 58

Figura 4.1 – Gráfico representativo do quantitativo de amostras e/ou dados químicos de rocha total compilados da literatura e individualizados nos diferentes grupos (supersuítes). 59

Figura 4.2 – Diagrama Heatmap, ou mapa de calor - do termo em inglês, ilustrando a matriz de correlação de Pearson para os elementos (após transformação Centered-log-ratio (**clr**)) no conjunto de dados. as cores variam de azul a vermelho, onde azul indica correlações negativas e vermelho indica correlações positivas..... 64

Figura 4.3 – Matriz Heatmap ilustrando os valores obtidos para as distâncias: Intra-classe (à esquerda) e Inter-classes (à direita). Cores claras indicam valores baixos e cores escuras valores altos..... 67

Figura 4.4 – Diagramas Scatterplots e Boxplots dos parâmetros LD1-LD2 (88,72% da variância) e LD1-LD3 (83,46% da variância).....	71
Figura 4.5 – Histogramas suavizados pelo método de KDE (Kernel Density Estimate) para os parâmetros LD1 e LD2, usamos a KDE para visualizar a probabilidade de densidade dos coeficientes LD1 e LD2 para cada grupo. Isso nos ajuda a entender a forma e a extensão da distribuição dos dados. Ao comparar as KDEs de diferentes grupos, podemos avaliar o grau de sobreposição entre eles. Grupos com KDEs mais sobrepostas podem ser mais difíceis de distinguir com base nos coeficientes LDs.....	72
Figura 4.6 – Representação da Matriz de Confusão (Confusion Matrix) utilizada para analisar a eficácia classificatória do algoritmo desenvolvido.....	77
Figura 4.8 – Reclassificação do banco de dados do SOAR. Parte superior, tabela com os valores em porcentagem (%), porção inferior, gráficos de barras representando a taxa de classificação para cada supersuíte entre os diferentes tipos de grantoides propostos por Bonin et al. (2020).....	81
Figura 4.9 – Gráfico de barras representando a quantidade de amostras por supersuíte para a análise subsequente através dos diagramas geoquímicos.	86
Figura 4.10 – Diagrama TAS (Middlemost 1985). Os 6 grupos/supersuítes foram representados individualizadamente, onde G1 = PreCol; G2 = SinCol; G3 = SinTardiCol; G4 = TardiCol; G5 = PosCol; G5dif = PosColdif. As cores de referência para cada supersuíte mantiveram-se padronizadas como nos demais diagramas do trabalho. No canto superior direito, está representada a distribuição geral de todas as supersuítes no diagrama em questão, abaixo, legendas referentes aos campos e no canto inferior direito, estão os trends/posicionamento “médio” dos diferentes tipos e subtipos (ACG/ATG, CPG/MPG e KCG - extraído de Bonin et al. 2020) de granitoides, relevantes para a discussão do banco de dados do SOAR. Usou-se a mesma simbologia para os demais diagramas que serão apresentados.....	90
Figura 4.11 - Diagrama Q'ANOR (Streckeisen & Le Maitre, 1979).....	91
Figura 4.12 – Diagrama binário entre os parâmetros multicatiônicos $P = K - (Na+Ca)$ & $Q = Si/3 - (K+Na+2Ca/3)$ de Debon & LeFort (1983, 1988).....	92

Figura 4.13 – Diagrama binário multicatiônico entre $B = Fe+Mg+Ti$ e $\#Mg$ (número de magnésio) = $Mg/(Fe+Mg)$ – valores em milicátions, por Debon & LeFort (1983, 1988).	93
Figura 4.14 – Diagrama de $SiO_2 - FeOt\#$ (“número de Ferro”) por Frost et al. (2001, 2008).	94
Figura 4.15 – Diagrama de SiO_2 (em % em peso) vs. Índice de álcali-lime modificado (MALI), definido como Na_2O+K_2O-CaO (em % em peso) por Frost et al. (2001, 2008).	95
Figura 4.16 – Diagrama binário entre Al_2O_3/Na_2O+K_2O (A/NK) $Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$ (A/CNK) de Shand (1943).	96
Figura 4.17 – Diagrama multicatiônico B-A (modificado por Villaseca et al. 1998), onde $B = Fe+Mg+Ti$ e $A = Al - (K+Na+2Ca)$	97
Figura 4.18 – Diagrama triangular projetado na composição da Biotita (Moyen et al. 2017), $xms1 = Al - Ca - NK$, $xfsp = -2Al - 2Ca + 3NK - 1/3 FM$ e $xCaAl = Ca$ (FM = Fe + Mg e NK = Na + K). Linha tracejada expressa a relação 2:1 entre os ápices $3Al+2(Na+K)$ e $(Ca+Al)$	98
Figura 4.19 – Diagrama ternário de feldspatos Ab-An-Or de O’Connor (1965).	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais características das supersuítes G1 a G5 do Orógeno Araçuaí. Dados obtidos por: Pedrosa-Soares <i>et al.</i> (2011); Gonçalves (2015); Gonçalves <i>et al.</i> (2016); Tedeschi <i>et al.</i> (2016); Melo <i>et al.</i> (2016, 2017); Araujo <i>et al.</i> (2020); Soares <i>et al.</i> (2020).....	22
Tabela 2.2 – Unidades metassedimentares e litologias associadas com o desenvolvimento dos arcos no Cinturão Ribeira (retirado de Heilbron <i>et al.</i> 2016).	30
Tabela 2.3 – Unidades tectonoestratigráficas do Cinturão Ribeira (retirado de Heilbron <i>et al.</i> 2016);	31
Tabela 4.1 – Tabela com as análises das correlações e seus coeficientes relativos, entre os elementos maiores através da matriz de correlação de Pearson.	65
Tabela 4.2 – Tabela com as relações de distância (grande, moderada e pequena) entre os grupos do banco de dados.	68
Tabela 4.3 – Tabela dos coeficientes LD para os elementos maiores do banco de dados.	69
Tabela 4.4 – Relatório de Classificação do modelo classificador LDA treinado.	78
Tabela 4.5 – Concentrações médias/desvio padrão (σ) para os 10 elementos-maiores e razões importantes dos 6 grupos analisados.	85
Tabela 4.6 – Tabela com valores médios/desvio padrão (σ) de parâmetros geoquímicos importantes para os 6 grupos.	86
Tabela 4.7 – Síntese da frequência de ocorrências nos campos dos diagramas explorados dos 6 grupos.	88

RESUMO

O paradigma da classificação granítica é tema central de intensos debates na literatura geocientífica. Identificam-se duas correntes principais de pensamento, frequentemente opostas, sobre os mecanismos subjacentes à granitogênese. A corrente 'crustalista', sustenta que os granitos se originam primariamente através dos processos de fusão ou retrabalhamento crustal. Em contrapartida, tem-se a corrente que postula que os *melts* graníticos provêm de líquidos basálticos mantélicos que, ao passarem por um processo de diferenciação magmática e interação com rochas crustais (e/ou *melts* provenientes dessas rochas), em zonas MASH (Melting-Assimilation-Storage-Homogenization), evoluem para composições intermediárias e ácidas, resultando na formação dos granitoides. É crucial considerar que a granitogênese seja influenciada por um equilíbrio, e por vezes dominância, entre as contribuições de ambos os processos centrais, variando conforme os estágios e ambientes geodinâmicos. Nesse contexto, o Sistema Orogênico Araçuaí-Ribeira (SOAR – Brasileiro-Pan-Africano) no sudeste do Brasil emerge como um laboratório propício para investigar rochas dessa natureza. Isto é justificado pelo expressivo magmatismo plutônico Ediacarano-Cambriano da região, nominalmente subdividido de G1 a G5, que se acredita ter sido formado em diferentes estágios evolutivos. Existem dois modelos principais que se contrapõem e discutem a natureza geodinâmica do SOAR. De um lado, destaca-se o modelo que propõe uma orogenia colisional subsequente a uma margem continental ativa, com ocorrência de subducção de crosta oceânica sob crosta continental. Por outro lado, existe a defesa de um modelo de orogenia intracontinental, cuja principal força motriz responsável por desencadear o processo orogênico, seria dominada por uma tensão compressiva distante dos limites das margens ativas, atuando em uma massa litosférica coesa. Visando investigar tais controvérsias, empregou-se uma metodologia de *Machine Learning* com análise estatística supervisionada, utilizando o método de Análise Discriminante Linear (LDA) na categorização de 1243 amostras de rochas graníticas do SOAR. A adoção pioneira do LDA neste contexto, revelou agrupamentos sutis e evidenciou as variáveis mais discriminantes para a separação dos grupos pré-definidos. Os resultados mostram distinções inter-classe claras entre as supersuítas. Uma reclassificação subsequente, sustentada no modelo treinado a partir de 6851 amostras da literatura, identificou as rochas G1 como ACG; G2, G3 e G4 como CPG/MPG típicas; e G5 como bimodais, com predomínio de KCG sobre CPG/MPG. A partir de diretrizes propostas por Bonin e colaboradores (2020), empregaram-se diagramas geoquímicos convencionais centrados nos 10 elementos maiores (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , TiO_2 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O e P_2O_5), para se realçar parâmetros fundamentais na classificação granítica (Nomenclatura, Aluminosidade, Maficidade, Alcalinidade) e validar os resultados obtidos pelo modelo treinado. Ao comparar a distribuição das amostras com bando de dados global, observou-se que as 5 supersuítas apresentam padrões semelhantes aos seus correspondentes: G1 com ACG; G2, G3, G4 e G5 dif com CPG/MPG; e G5 com KCG. Portanto, tais resultados corroboram majoritariamente os processos petrogenéticos alinhados ao modelo de orogenia colisional de margem continental ativa.

Palavras-chave: Granitogênese, Geoquímica, Sistema Orogênico Araçuaí-Ribeira.

ABSTRACT

The paradigm of granite classification remains a central theme of intense debates in geoscientific literature. Two main schools of thought are identified, often opposing, regarding the underlying mechanisms of granitogenesis. The 'crustalist' school contends that granites primarily originate through processes of remelting or crustal reworking. In contrast, another school postulates that granitic melts come from mantle-derived basaltic liquids that, upon undergoing magmatic differentiation and interaction with crustal rocks (and/or melts from these rocks) in MASH (Melting-Assimilation-Storage-Homogenization) zones, evolve into intermediate and acidic compositions, resulting in granitoid formation. It's essential to consider that granitogenesis might be influenced by a balance, and sometimes dominance, between the contributions of both central processes, varying according to geodynamic stages and environments. In this context, the Araçuaí-Ribeira Orogenic System (SOAR – Brasiliano-Pan-African) in southeastern Brazil emerges as a favorable laboratory for investigating such rocks. This is justified by the region's significant Ediacaran-Cambrian plutonic magmatism, nominally subdivided from G1 to G5, believed to have formed at different evolutionary stages. Two main models counter and discuss the geodynamic nature of SOAR. On one hand, there's the model proposing a collisional orogeny subsequent to an active continental margin, with the occurrence of oceanic crust subduction beneath the continental crust. On the other hand, there's the defense of an intracontinental orogeny model, where the main driving force responsible for triggering the orogenic process would be dominated by compressive stress far from the boundaries of active margins, acting on a cohesive lithospheric mass. To investigate such controversies, a Machine Learning methodology with supervised statistical analysis was employed, using Linear Discriminant Analysis (LDA) to categorize 1243 samples of SOAR granitic rocks. The pioneering adoption of LDA in this context revealed subtle groupings and highlighted the most discriminating variables for the separation of predefined groups. The results show clear inter-class distinctions among the supersuites. A subsequent reclassification, based on the model trained from 6851 samples from literature, identified the G1 rocks as ACG; G2, G3, and G4 as typical CPG/MPG; and G5 as bimodal, predominantly KCG, and secondarily as CPG/MPG. Following guidelines proposed by Bonin *et al.* (2020), conventional geochemical diagrams centered on the 10 major elements (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO_t , TiO_2 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O e P_2O_5), were used to highlight fundamental parameters in granite classification (Nomenclature, Aluminosity, Maficity, Alkalinity) and validate the results obtained by the trained model. When comparing the sample distribution with a global database, it was observed that the 5 supersuites exhibit patterns similar to their counterparts: G1 with ACG; G2, G3, G4, and G5dif with CPG/MPG; and G5 with KCG. Therefore, such results predominantly corroborate the petrogenetic processes aligned with the collisional orogeny model of an active continental margin.

Keywords: Granitogenesis, Geochemistry, Araçuaí-Ribeira Orogenic System.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A história evolutiva do Gondwana Ocidental é marcada por sucessivos episódios de geração crustal e aglutinação continental, que são caracteristicamente agrupados no chamado ciclo orogênico “Brasiliano-Pan Africano”, que se inicia no período Toniano estendendo-se até o Cambriano-Ordoviciano (Brito-Neves *et al.* 2014). Esse ciclo é caracterizado pelo desenvolvimento de inúmeras faixas móveis e cinturões orogênicos de cavalgamento-dobramento, edificados nas bordas e terrenos adjacentes de massas cratônicas mais antigas que 1,8Ga (Brito-Neves *et al.* 2014).

Nesse cenário, a Província Mantiqueira compartimenta parte dos representantes dos orógenos neoproterozoicos diacrônicos, que se medraram nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, tais como o Sistema Orogrênico Araçuaí-Ribeira (SOAR – Heilbron *et al.* 2004). Assim como em diversos cinturões orogênicos Brasilianos-Pan Africanos, reconhece-se no SOAR: a) sequências meta-vulcanossedimentares e metassedimentares de margem passiva; b) arcos magmáticos oceânicos e continentais; c) suítes graníticas pré-, sin-, tardi-, e pós-colisionais, relacionadas com seus diferentes estágios evolutivos; d) desenvolvimento de bacias orogênicas crono-correlatas: *foreland*, ante- e retro-arco (Pedrosa-Soares *et al.* 2011; Gonçalves *et al.* 2014, 2018; Gradim *et al.* 2014; Heilbron *et al.* 2020).

Dada a diversidade e complexidade geológica do SOAR, o presente trabalho se concentra na compilação geoquímica do magmatismo plutônico Ediacarano-Cambriano desse sistema orogênico, almejando-se revisitar, reclassificar e re-discutir a gênese dessas rochas.

Para efeito de simplificação, o termo: "magmatismo plutônico", será utilizado ao longo do texto como sinônimo de: "magmatismo plutônico Ediacarano-Cambriano do SOAR, no Sudeste do Brasil".

1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo, de onde advém os dados geoquímicos compilados, abrange os estados da Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro. Tem-se nesta região a delimitação aproximada do Orógeno Araçuaí entre os paralelos 15° e 21° S, e cuja terminação meridional estabelece-se a conexão com o Orógeno Ribeira, que se estende pelos estados do Rio de Janeiro e de São Paulo, até as proximidades do paralelo x S (e.g., Heilbron *et al.* 2000; Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000; Pedrosa-Soares *et al.* 2001).

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos centrais deste trabalho são:

1. Confirmar ou refutar a classificação e compartimentação tradicionais do magmatismo plutônico do Sistema Orogênico Araçuaí-Ribeira em Supersuítes, conforme proposto por Pedrosa-Soares *et al.* (2001);
2. Discutir quais foram os processos petrogenéticos dominantes na gênese de cada uma Supersuíte, com base nos resultados obtidos pela técnica de análise estatística LDA, visando principalmente mensurar a contribuição entre os componentes manto-crosta envolvidos na geração dessas rochas;
3. Avaliar e debater as potencialidades dos modelos de Orogenia de Margem Continental Ativa/Colisional em comparação ao modelo de Orogenia Intracontinental.

1.4 JUSTIFICATIVA

Este estudo visa contribuir para o avanço do entendimento sobre a natureza do magmatismo plutônico no contexto geológico do Araçuaí-Ribeira, e, por conseguinte, para a compreensão da geodinâmica associada à amalgamação dos continentes no Gondwana Ocidental. A discussão em torno dos modelos potencialmente 'ideais' para a evolução do Sistema Orogênico Araçuaí-Ribeira (SOAR) permanece sendo objeto de importantes debates na literatura (vide Konopásek *et al.* 2020, dentre outros). Neste momento, torna-se pertinente uma reavaliação e atualização da classificação geoquímica do magmatismo plutônico do SOAR, tendo em vista as diferentes abordagens. De um lado, destaca-se o

modelo que propõe uma orogenia colisional subsequente a uma margem continental ativa, com ocorrência de subducção da crosta oceânica sob a crosta continental (ver Pedrosa-Soares *et al.* 1998, Alkmim *et al.* 2006, Gonçalves *et al.* 2014, 2016, 2018 e Tedeschi *et al.* 2016). Por outro lado, existe a defesa de um modelo de 'orogenia intracontinental', dominado por uma tensão compressiva “*far field*” – distante dos limites das margens ativas (ver Porada, 1989; Trompette, 1994, 1997; Cavalcante *et al.* 2019 e Fossen *et al.* 2020). Esses modelos contrapostos serão avaliados sob o ponto de vista geoquímico do magmatismo plutônico do SOAR, por meio de uma análise sistemática e criteriosa, com o objetivo de atualizar a classificação dessas suítes granitoides, conforme delineado nos trabalhos de Bonin *et al.* 2020 e Jacob *et al.* 2021.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram realizadas as seguintes etapas:

1.5.1 Revisão Bibliográfica

Os trabalhos de Alkmim *et al.* 2006, 2007, 2017; Pedrosa-Soares *et al.* 2007, 2011, 2020; Tupinambá *et al.* 2007; Heilbron *et al.* 2003, 2004, 2016, 2020a,b; Gonçalves *et al.* 2010, 2014, 2016, 2018 e Tedeschi *et al.* 2016, são alguns artigos que nortearam a familiarização com a bem compartimentada história geológica do SOAR. Tais trabalhos foram de suma importância para o entendimento da compartimentação tectonoestratigráfica e evolução histórica do que hoje se conhece por sistema orogênico Araçuaí-Ribeira. Inúmeros trabalhos de TCC, dissertações de mestrado e teses de doutorado foram igualmente essenciais para a consolidação do conhecimento acerca do objeto de estudo.

Os trabalhos paradigmáticos de Barbarin, 1999; Bonin *et al.* 2020; Debon & Le Fort, 1988; Moyen *et al.* 2017, 2020, 2021; Jacob & Moyen, 2021; Rollinson, 1993 e Rollinson *et al.* 2021, tiveram uma importância inestimável para o avanço do conhecimento acerca dos processos que governam a petrogênese, assim como serviram de alicerce teórico sobre geoquímica, geotectônica e granitogênese.

Destacam-se ainda os trabalhos de Trompette, 1994, 1997, Konopásek *et al.* 2020; Meira, 2014; Meira *et al.* 2019a; Porada, 1989; Fossen *et al.* 2020 e Cavalcante *et al.* 2019, que serviram como referencial teórico base para o entendimento acerca do modelo de orogenia intracontinental.

1.5.2 Organização do Acervo de Dados Geoquímicos

Foram compilados dados de litoquímica de aproximadamente **1250** amostras (obtidos pelos métodos analíticos de XRF e ICP-OES, para elementos maiores e ICP-MS, para menores e traço) dos trabalhos: **vide Anexo 3**. Ao compilar os dados, priorizou-se amostras que apresentavam dados de concentração dos principais elementos maiores (SiO₂, Al₂O₃, FeO, Fe₂O₃, TiO₂, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O e P₂O₅), podendo ou não conter dados de concentração dos

elementos menores e traço. O conjunto de dados geoquímicos foi organizado em uma planilha no *software* Excel no formato (.xlsx) e posteriormente foi submetido a processos de consistência, tratamento (e.g. todos os dados de concentração dos estados de oxidação do Ferro, nas formas de FeO, Fe₂O₃, foram recalculados para valores de FeO_(t), Fe₂O_{3(t)}) e rotulagem, conforme é comumente realizado para o magmatismo plutônico do Orógeno Araçuaí, como proposto por Pedrosa-Soares *et al.* 2007.

É importante observar que as suítes graníticas pertencentes ao Orógeno Ribeira diferentemente das “Supersuítes” do Orógeno Araçuaí, são tratadas na literatura seguindo a prática usual: suítes pré-, sin-, tardi- e pós-colisionais, para referir-se à etapa da evolução geodinâmica da orogenia na qual melhor se enquadram. Essa classificação leva em consideração suas relações de campo, petrografia, dados de litoquímica elemental e datação isotópica. A fim de unificar e integrar o magmatismo plutônico do SOAR, optou-se por padronizar a rotulagem das suítes graníticas analisadas, seguindo as diretrizes anteriormente propostas (G1 a G5) e amplamente aceitas pela comunidade científica, conforme descrito nos trabalhos de Pedrosa-Soares *et al.* 2007, 2011.

Partindo-se do seguinte pressuposto:

- rochas pertencentes ao estágio pré-colisional foram agrupadas na 'Supersuíte G1';
- rochas pertencentes ao estágio sin-colisional foram agrupadas na 'Supersuíte G2';
- rochas pertencentes ao estágio tardi-, tardi-pós-colisional foram agrupadas nas 'Supersuítes G3 e G4';
- rochas pertencentes ao estágio estritamente pós-colisional foram agrupadas na 'Supersuíte G5', as quais foram subdividas em “G5 comuns” e “G5 diferenciadas”, em função de haverem dissimilaridades expressas nos elementos maiores analisados através da distribuição em histogramas.

1.5.2.1 Compilação de Dados e Suposições Necessárias

A etapa de compilação de dados não foi tarefa trivial, de maneira que alguns pressupostos são e foram de suma importância para a avaliação prévia

dos dados, e subsequente validação dos resultados obtidos no presente trabalho. É fundamental que liste esses pressupostos, uma vez que podem (ou não, caso estejam todos corretos) interferir na credibilidade, verificabilidade e replicabilidade, principalmente, do modelo estatístico (através da técnica LDA) realizado, dos quais lista-se:

1. Supõe-se que não haja erros analíticos nos dados;
2. Supõe-se que as análises não estejam com amostras dissonantes;
3. Os diferentes estados da oxidação do Fe (II ou III) foram tratados e transformados em FeO_t e tal decisão não impacta o modelo negativamente;
4. Existe uma limitação inerente ao processo de compilação quando se utiliza compilados já existentes, que pressupõe que os autores desses compilados tenham tomado devidamente os cuidados necessários ao lidar com os dados durante o processo de compilação;
5. Supõe-se que os dados foram compilados de maneira correta, seguindo uma metodologia rigorosa e restrita. A compilação incluiu apenas dados obtidos por meio das técnicas analíticas de XRF (para elementos maiores) e ICP-MS (para elementos menores e traços). As amostras do Orógeno Araçuai foram selecionadas a partir das Supersuítas já classificadas, enquanto as amostras do Orógeno Ribeira foram escolhidas com base em unidades tectonicamente correlatas pré-definidas.

1.5.3 Linguagem Python

No presente trabalho, a linguagem de programação *Python* foi utilizada para realizar o tratamento geoquímico estatístico das amostras, incluindo a análise pelo método de Análise Discriminante Linear (*LDA – Linear Discriminant Analysis*). Por meio de bibliotecas como *Pandas*, *Numpy*, *Matplotlib*, *Seaborn* e *Scikit-Learn*, foi possível manipular os dados geoquímicos, calcular estatísticas relevantes e implementar o método de Análise Discriminante Linear (LDA). O *Python* proporcionou flexibilidade e facilidade na execução dessas análises estatísticas complexas, contribuindo para a compreensão da composição geoquímica das amostras.

1.5.3.1 Bibliotecas Python

Em síntese, as bibliotecas utilizadas para executar as análises do trabalho foram:

- **Pandas** é uma biblioteca para manipulação de dados tabulares, permitindo carregar, limpar e analisar dados de forma eficiente usando estruturas de dados como DataFrames;
- **NumPy** é essencial para computação numérica em Python, oferecendo *arrays* multidimensionais para realizar operações matemáticas e estatísticas avançadas em grandes conjuntos de dados;
- **Matplotlib** é uma biblioteca de visualização de dados que permite criar gráficos personalizados e estáticos em Python, sendo amplamente utilizada para representar resultados em pesquisas científicas e análises de dados. Essa biblioteca foi empregada tanto para geração do material gráfico das análises e resultados, quanto para ilustração conceitual do presente trabalho;
- **Seaborn** é uma extensão do Matplotlib que simplifica a criação de visualizações estatísticas complexas, facilitando a identificação de padrões e tendências em dados;
- **Scikit-Learn** é uma biblioteca de aprendizado de máquina (*Machine Learning*) que oferece uma vasta gama de algoritmos para tarefas de classificação, regressão, *clustering* e pré-processamento de dados.

1.5.4 Análise Estatística

Explorou-se a utilização de *Machine Learning* via biblioteca do *Python* (*Scikit-learn* e *Matplotlib*) para análise de modelagem estatística através do método de Análise Discriminante Linear (LDA). Gerou-se diversos diagramas de dispersão (*scatterplots*) em combinação com diagramas do tipo *boxplots* (**Figura 1.1**) para ilustrar a variabilidade da distribuição amostral do banco de dados nos diagramas gerados.

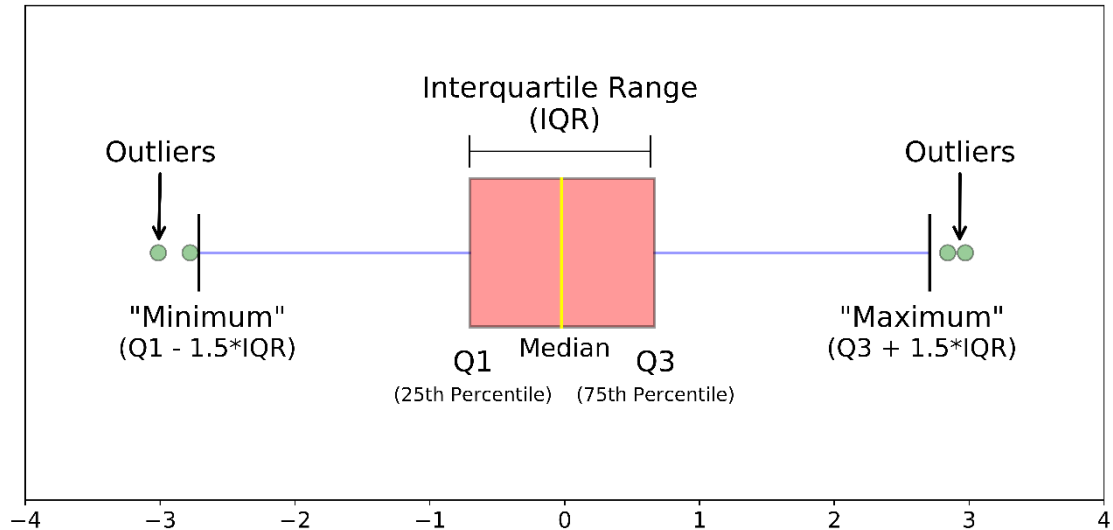


Figura 1.1 – Representação teórica dos elementos em diagramas *Boxplot*: 50% dos dados se concentram nos limites interquartis e 99,3% estão compreendidos pelos limites mínimo e máximo ($Q1 - 1.5 \cdot IQR$ e $Q3 + 1.5 \cdot IQR$, respectivamente), imagem retirada de: <https://www.kdnuggets.com/2019/11/understanding-boxplots.html>.

1.5.5 Confeção de Diagramas de Classificação e Discriminação

Para realizar o tratamento, análise e plotagem dos dados geoquímicos disponíveis, foi utilizado o software gratuito *GCDkit* (Janoušek *et al.* 2006).

O *GCDkit* (*Geochemical Data Toolkit*) é um pacote baseado na linguagem computacional R para Windows, desenvolvido por Ihaka & Gentleman, 1995. Esse pacote consiste em um conjunto de *scripts* utilizados para o tratamento, recálculo e plotagem de diagramas com base em dados geoquímicos de rochas ígneas e metamórficas. O *software* oferece uma variedade de funções, desde o tratamento de dados até uma variedade de cálculos e esquemas normativos, como CIPW e mesonorma. Além disso, o *GCDkit* fornece parâmetros para a criação de gráficos geoquímicos, como gráficos binários, ternários, diagramas *Harker*, diagramas *spider*, entre outros diagramas para classificação petrogenética e discriminação de ambiente geotectônico.

Os arquivos dos diagramas gerados através do *GCDkit* foram posteriormente manipulados graficamente utilizando o *software CorelDraw Graphics Suite*, para efeito de montar os *plates* (conjuntos de diagramas) que serão aqui apresentados.

1.5.6 Etapas de execução do trabalho

Conforme discutido nos tópicos anteriores, para a execução do presente trabalho destacam-se as seguintes etapas:

- compilar dados da literatura, de litoquímica de rocha total das suítes magmáticas plutônicas pertencentes ao SOAR;
- padronizar e tratar os dados com o uso do Excel;
- avaliar e consistir o banco de dados obtido com o uso de ferramentas como *GCDkit* (Janousek *et al.* 2006) e *scripts* na linguagem computacional *Python*, filtrando 'outliers' anômalos e preparando os dados para serem utilizados;
- plotar os dados utilizando-se de uma sistemática padronizada, em diagramas geoquímicos de notória aceitação e relevância entre a comunidade científica, no que tange a classificação de rochas granitoides (Debon & LeFort, 1983, 1988; Barbarin, 1999; Bonin *et al.* 2020, e referências neles contidas). Garantindo a consistência, comparabilidade e relevância dos resultados, com a utilização de um banco de dados robusto, algo até então inédito para o SOAR;
- desenvolver um modelo estatístico baseado em LDA (Linear Discriminant Analysis), que inicialmente analise as diferenças entre as supersuítes, em seguida, reclassifique as amostras pertencentes às supersuítes com base em um modelo treinado;
- avaliar, discutir e interpretar os resultados à luz de trabalhos clássicos e de síntese globais, tais como os de Bonin *et al.* (2020) e Jacob *et al.* (2021).

CAPÍTULO 2

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

O Sistema Orogênico Araçuaí-Ribeira (SOAR – ver **Figura 2.1**) está inserido nos segmentos setentrional e central da Província Mantiqueira (Almeida, 1967; Cordani *et al.* 1967), e situa-se nas margens Sul e Leste-Sudeste do Cráton São Francisco (CSF) até o Oceano Atlântico, iniciando-se na altura do paralelo 15° e seguindo-se para sul até o paralelo 25°S (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000). Essa entidade litotectônica foi originalmente definida por Almeida (1967, 1977) como um cinturão de dobramentos e falhamentos do Neoproterozoico. Este cinturão apresenta uma forma arqueada, delimitado pelas bordas rígidas do CSF no sentido NW e N, que resistiram e determinaram o limite norte da terminação do SOAR. É importante ressaltar que o SOAR, assim como outros cinturões móveis do Ciclo Orogênico Brasileiro-Pan Africano, possuem uma contraparte no continente Africano, representada, neste caso, pelo Cinturão Orogênico do Congo Ocidental (**Figura 2.1** – Alkmim *et al.* 2017).

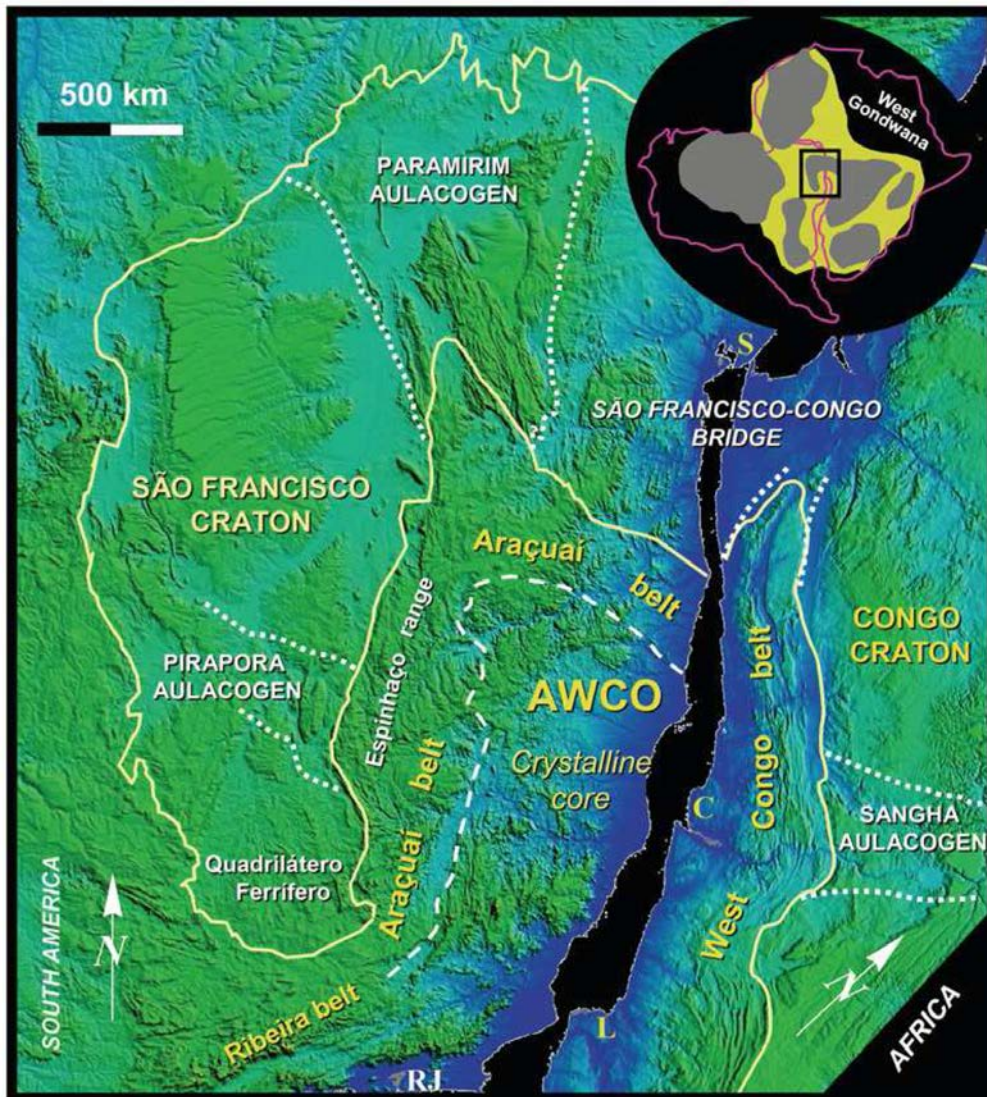


Figura 2.1 – Modelo de elevação digital do relevo, das porções justapostas do Sudeste Brasileiro e Oeste da África Central, na configuração paleogeográfica do Gondwana Ocidental. Nota-se que o núcleo cristalino se encontra totalmente dentro do território brasileiro. AWCO – Araçuaí-West Congo Orogen. Cidades: RJ – Rio de Janeiro, V – Vitória, S – Salvador, L – Luanda e C – Cabinda (extraído de Alkmim *et al.* 2017).

Os orógenos Araçuaí e Ribeira são aqui entendidos como uma entidade tectônica contínua (**Figura 2.2**), constituindo o que se chama por Sistema Orogênico Araçuaí-Ribeira (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000), uma vez que não se observa descontinuidades metamórficas, estruturais e/ou geofísicas na transição entre os mesmos. A conexão dos dois orógenos se dá na altura do paralelo 21°S, balizada pela extremidade meridional do CSF, e cuja zona transicional é caracteristicamente marcada por uma variação no *trend* estrutural de N-S (segmento Araçuaí) para NE-SW (segmento Ribeira – Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000). A compreensão da conexão

geotectônica desta região e dos orógenos como um todo, depende crucialmente, do papel fundamental desempenhado pelos arcos magmáticos (Novo *et al.* 2010), que ajudam a delimitar a concatenação e prosseguimento do sistema orogênico.

Ainda que definido como uma entidade tectônica contínua, vale ressaltar algumas diferenças entre os cinturões Araçuaí e Ribeira, dentre elas:

- o segmento setentrional do Orógeno Ribeira é marcado por maior abundância de rochas na fácies anfibolito-alto a granulito, quando em comparação com o segmento meridional do Orógeno Araçuaí, onde dominam sequências metamórficas supracrustais de fácies xisto-verde a anfibolito-inferior. A implicação dessa diferença trata-se do fato que o Orógeno Ribeira é marcado por rochas de níveis crustais mais profundos que o Orógeno Araçuaí, ao menos para esse segmento transicional (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000);
- o cinturão Ribeira é notavelmente marcado por zonas de cisalhamento transcorrentes-transpressivas dextrais com direção NE. Embora essas zonas continuem em direção ao segmento sul do cinturão Araçuaí, a tectônica de empurrão permanece o regime mais importante no contexto do Araçuaí (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000);
- a contraparte africana do cinturão Ribeira é composta exclusivamente por rochas pré-Neoproterozoicas, conhecidas como embasamento policíclico (Trompette, 1994) e pelo “fragmento Cabo Frio”, que seria parte do Cráton Angola, amalgamado durante o evento Brasileiro (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000; Heilbron *et al.* 2016);
- é consenso de que em comparação com o cinturão Araçuaí, o cinturão Ribeira é resultado de um processo tectônico mais complexo, envolvendo a interação de ao menos mais um terreno para além dos Crátons São Francisco e Congo.

Observe que a nomenclatura de ‘Cinturão’ e ‘Orogênese/Orógeno’ é utilizada aqui de forma intercambiável e ampla, porém com conotações equivalentes.

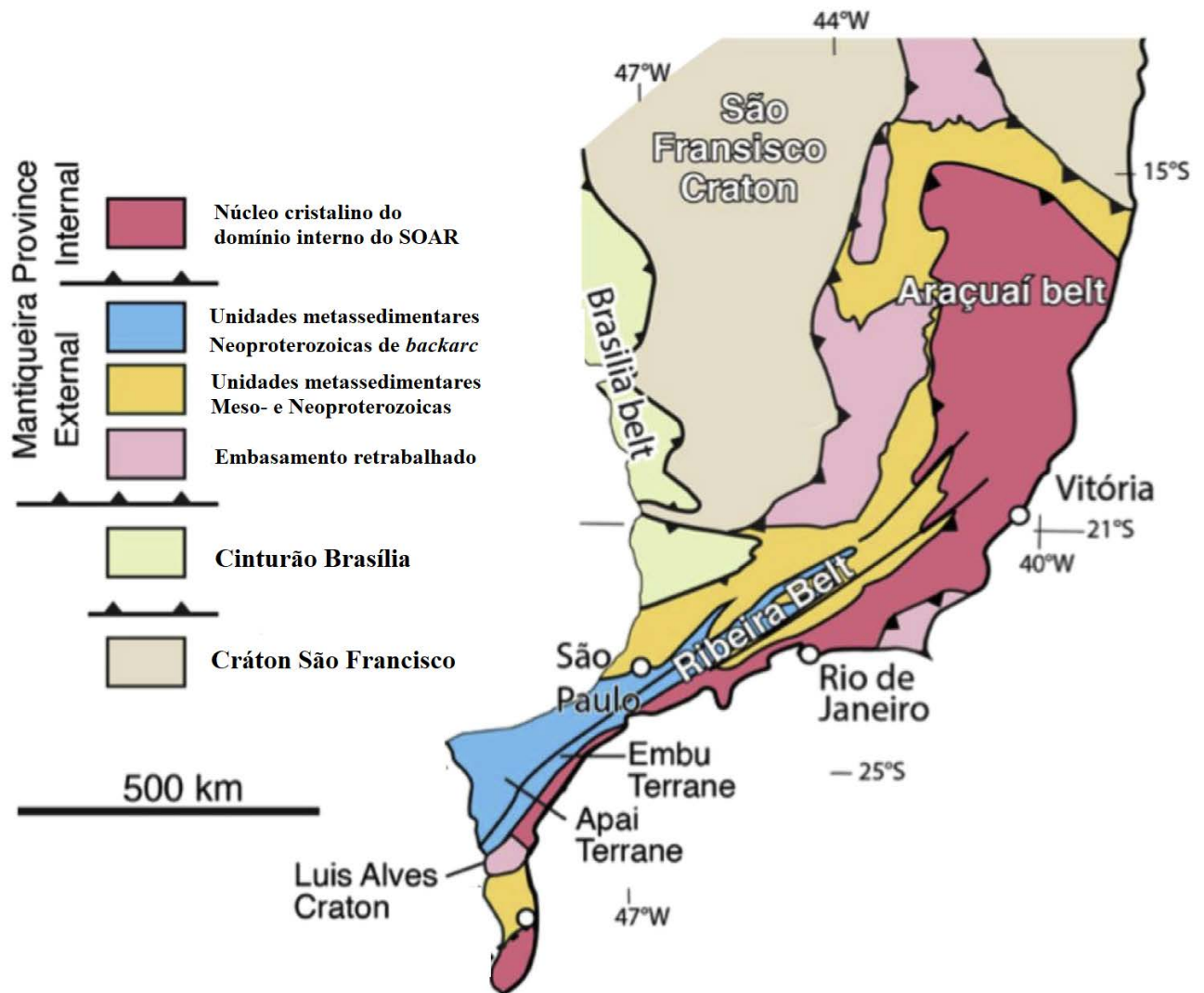


Figura 2.2 – Mapa geológico simplificado da Província Mantiqueira Central-Setentrional – modificado de Heilbron *et al.* 2004).

2.2 ORÓGENO ARAÇUAÍ

O trabalho pioneiro de Almeida (1977) estabeleceu limites e direcionou as subsequentes investigações geotectônicas sobre a Faixa Araçuaí, que posteriormente foi definida como o Sistema Orogênico Araçuaí-Congo Ocidental (Alkmim *et al.* 2006). Após estudos detalhados, foram examinadas questões essenciais dessa orogenia, como a ocorrência de fragmentos ofiolíticos remanescentes da dinâmica geossinclinal (vide a sequência ofiolítica de Ribeirão

da Folha), conforme descrito por Pedrosa-Soares *et al.* 1992 e Queiroga *et al.* 2007. Além disso, foi constatada a existência de um arco magmático cálcio-alcalino associado ao consumo da litosfera oceânica, sendo o batólito tonalítico Galiléia o elemento central dessa comprovação (Barbosa *et al.* 1964). Análises geoquímicas e isotópicas detalhadas desse mesmo batólito confirmaram as afinidades e hipóteses levantadas, sugerindo a formação de um arco magmático cálcio-alcalino continental, o Arco Rio Doce, com idade aproximada de 594 ± 6 Ma (idade obtida pelo método TIMS por Nalini Jr., 1997).

Assim, tornando-se inevitável estabelecer uma correspondência entre o desenvolvimento do Arco Rio Doce e o consumo da litosfera oceânica durante a orogênese Araçuaí, conforme destacado por Pedrosa-Soares *et al.* 1998.

O Orógeno Araçuaí é então caracterizado e identificado por diversos componentes geotectônicos, tais como depósitos de margem passiva, zona de sutura (vide Zona de Cisalhamento de Abre Campo – ver **Figura 2.3**), fragmentos ofiolíticos (vide sequências vulcanossedimentares de Ribeirão da Folha, São José da Safira e Santo Antônio do Gramma – **Figura 2.3**), arco magmático cálcio-alcalino (vide Arco Rio Doce) e plutonismo granítico pré-, sin-, tardi- e pós-colisional. Esses elementos configuram um orógeno de natureza colisional, sucessor de um orógeno acrescionário de margem continental ativa (Alkmim *et al.* 2017, Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000; Gonçalves *et al.* 2014, 2018; Tedeschi *et al.* 2016; Pedrosa-Soares *et al.* 2020).

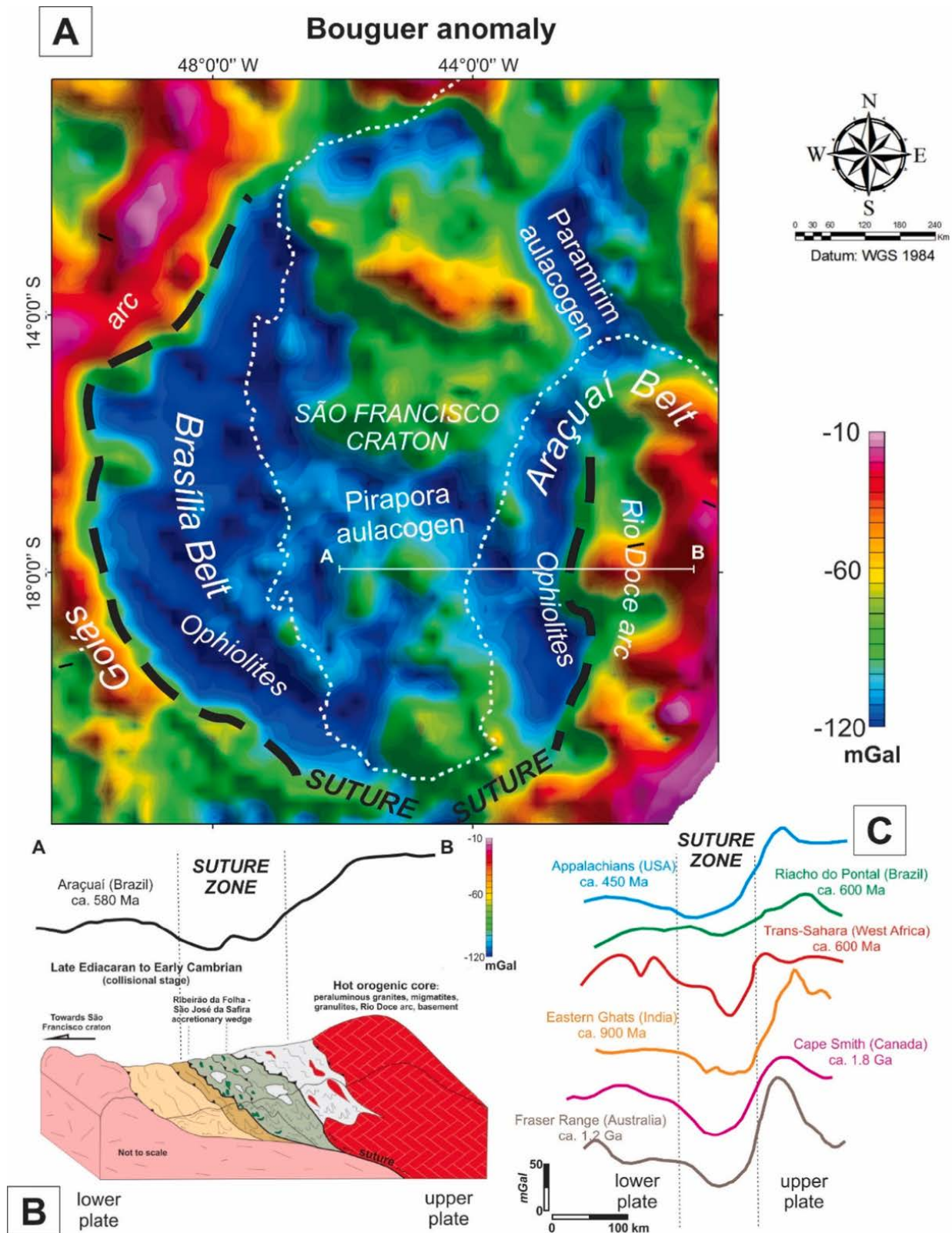


Figura 2.3 – Em A) Mapa geofísico gravimétrico (anomalia Bouguer) evidenciando a zona de sutura do Orógeno Araçuaí; B) Um perfil esquemático cujo traçado 'A-B' se encontra em A) por Amaral *et al.* 2020; C) Comparativo entre os perfis de respostas de anomalia Bouguer de zonas de sutura ao redor do mundo, por Thomas, 1992 exceto o perfil Riacho do Pontal por Oliveira e Medeiros, 2018). Imagem extraída de Caxito *et al.* 2020.

2.2.1 Estratigrafia do Orógeno Araçuaí

Podemos identificar as principais unidades litoestratigráficas e litodêmicas do Orógeno Araçuaí (**Figura 2.4**) da seguinte maneira:

- o Embasamento cristalino compreende os complexos Guanhães, Gouveia, Porteirinha, Mantiqueira, Juiz de Fora, com idades mais antigas que 1,8 Ga, e se tratam de complexos metamórficos, gnaisses TTGs (tonalito-trondhjemito-granodiorito) e terrenos supracrustais Arqueanos e Paleoproterozoicos (Alkmim *et al.* 2006; Gonçalves *et al.* 2014);
- o Supergrupo Espinhaço, encontrado na região ocidental, é constituído por arenitos, rochas vulcânicas ácidas e básicas, conglomerados, pelitos e rochas carbonáticas associadas subordinadamente. A sucessão sedimentar/vulcânica abrange uma pilha de cerca de 6 km e acredita-se que tenha sido formada em uma bacia resultante de um processo de rifteamento ocorrido por volta de 1,75 Ga atrás, sendo posteriormente sobreposta por uma sucessão de rift-sag Mesoproterozoica (Alkmim *et al.* 2006);
- o Grupo Macaúbas e unidades correlatas (957-600Ma), que incluem rochas plutônicas, vulcânicas e metassedimentares, representam as fases *rift* e a fase de margem passiva Neoproterozoica, eventos precursores do Orógeno Araçuaí (Pedrosa-Soares *et al.* 2001, 2007);
- rochas plutônicas graníticas com idades Neoproterozoicas a Cambrianas, agrupadas em cinco ‘Supersuítes’, identificadas de G1 a G5, cujas idades estão compreendidas no intervalo de aproximadamente 630 a 480 Ma (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos 2000; Pedrosa-Soares *et al.* 2011; Gonçalves *et al.* 2014, 2016, 2018);
- o Grupo Rio Doce, que é constituído por rochas metavulcânicas e metassedimentares, com idades compreendidas no intervalo de 608 a 584 Ma (Vieira 2007; Pedrosa-Soares *et al.* 2008, 2011);
- complexos paragnáissicos, com idades compreendidas no intervalo de 630 e 585 Ma. Sendo o complexo paragnáissico Nova Venécia um importante representante da porção distal da bacia de retro-arco do Orógeno Araçuaí (Noce *et al.* 2004);

- a Formação Salinas, constituída predominantemente por metarenitos, metapelitos e metaconglomerados grauvaquianos com idades máximas de 588 ± 24 Ma, concordante e representativo de uma assembleia sin-orogênica do tipo *flysh* (Lima *et al.* 2002; Santos *et al.* 2009).

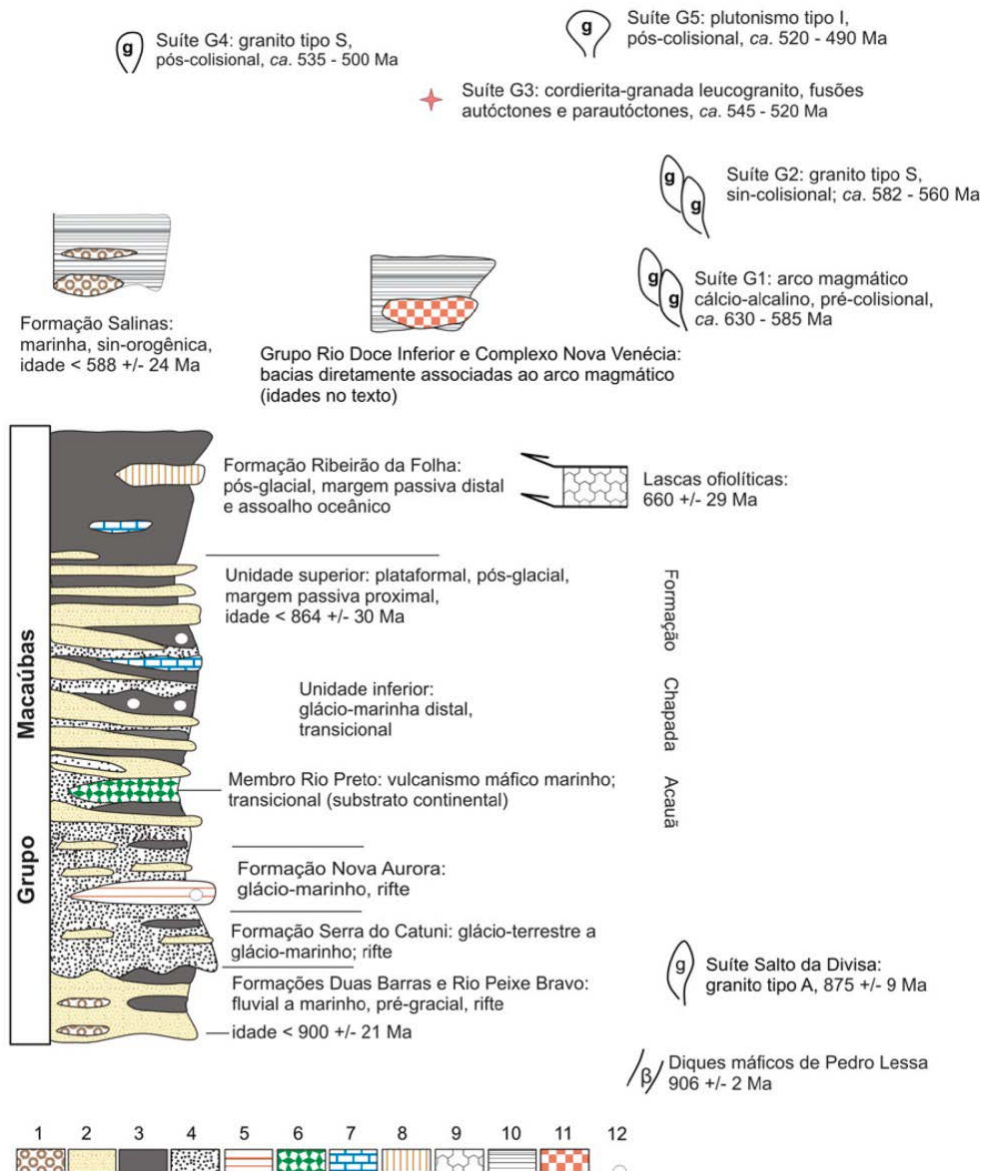


Figura 2.4 – Coluna estratigráfica esquemática do Grupo Macaúbas e outras unidades do Orógeno Araçuaí. 1, conglomerados; 2, arenitos; 3, pelitos; 4, diamictitos; 5, formação ferrífera diamictítica; 6, basalto transicional; 7, calcário dolomítico; 8, sedimentos exalativos (chert sulfetado, sulfeto maciço, formações ferríferas e outros); 9, rochas máficas (com veios de plagiogranito) e ultramáficas oceânicas; 10, wackes e pelitos; 11, rochas piroclásticas e vulcanoclásticas dacíticas; 12, seixos e blocos pingados. (esquema extraído de Pedrosa-Soares *et al.* 2008).

2.2.2 Magmatismo Plutônico do Orógeno Araçuaí

O magmatismo plutônico do Orógeno Araçuaí foi descrito e analisado com base em relações de campo, características e feições estruturais, dados geoquímicos e geocronológicos por Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos (2000), e posteriormente atualizado por Pedrosa-Soares *et al.* (2011). Nesses estudos, as suítes graníticas foram identificadas e agrupadas em cinco ‘Supersuítes’ (G1, G2, G3, G4 e G5 – ver **Tabela 2.1**). O agrupamento de diferentes unidades de rochas em Supersuítes baseou-se estritamente em similaridades petrológicas e geoquímicas, embora guiado primariamente por dados/relações de campo e natureza petrográfica desses corpos. Tais classificações foram então apoiadas e restringidas pelas idades de, em sua maioria, U-Pb em zircão. As supersuítes englobam batólitos, stocks e outros corpos magmáticos com nomes locais específicos (consulte Pedrosa-Soares *et al.* 2011 para maiores detalhes).

Essas Supersuítes são amplamente reconhecíveis, cobrindo extensas áreas (**Figura 2.5**), e registram os diferentes estágios tectonomagmáticos do Orógeno Araçuaí (**Tabela 2.1**), formados durante o evento orogênico Brasileiro. Identificam-se quatro estágios geotectônicos principais: pré-colisional (aproximadamente 630-585 Ma), sin-colisional (aproximadamente 585-560 Ma), tardi-colisional (aproximadamente 560-530 Ma) e pós-colisional (aproximadamente 530-480 Ma). Para se entender o complexo magmatismo plutônico associado ao Orógeno Araçuaí, tomaram-se prolongados períodos de transição, levando em consideração os diferentes estágios tectônicos, uma vez que os processos e o *timing* influenciam diretamente na gênese dos magmas fonte dessas suítes (Winter, 2014; Pedrosa-Soares *et al.* 2011). As principais características das Supersuítes G1 a G5 são:

- A Supersuíte G1 é pré-colisional, representa a edificação do arco magmático cálcio-alcálico (Arco Rio Doce), formado através da subducção da litosfera oceânica entre c. 630 a c. 580 Ma;
- A Supersuíte G2 é sin-colisional, gerada predominantemente através da fusão parcial de material metassedimentar associado a um grande espessamento crustal ocasionado por esforços

tectônicos de contração (ex. cavalgamento, dobramento), entre c. 585 a c. 540 Ma;

- As Supersuíte G3 e G4 (c. 530 – 490 Ma) são tardi-, a pós-colisional (c 545 – 540 Ma). Entende-se por tardi-colisional o período de diminuição e abrandamento das forças convergentes até o relaxamento extensional do orógeno, geralmente acompanhado de delaminação e remoção convectiva do manto litosférico mais frio. Já o estágio pós-colisional representa o clímax do colapso gravitacional do orógeno, processo este, coevo com a ascensão da astenosfera;
- A Supersuíte G5 (c. 525 – 480 Ma) é pós-colisional e inclui plútons que apresentam contatos de corte e discordantes do *trend* tectônico regional, além de incluir também corpos intrusivos concordantes com diversas estruturas de idades distintas (Pedrosa-Soares *et al.* 2011).

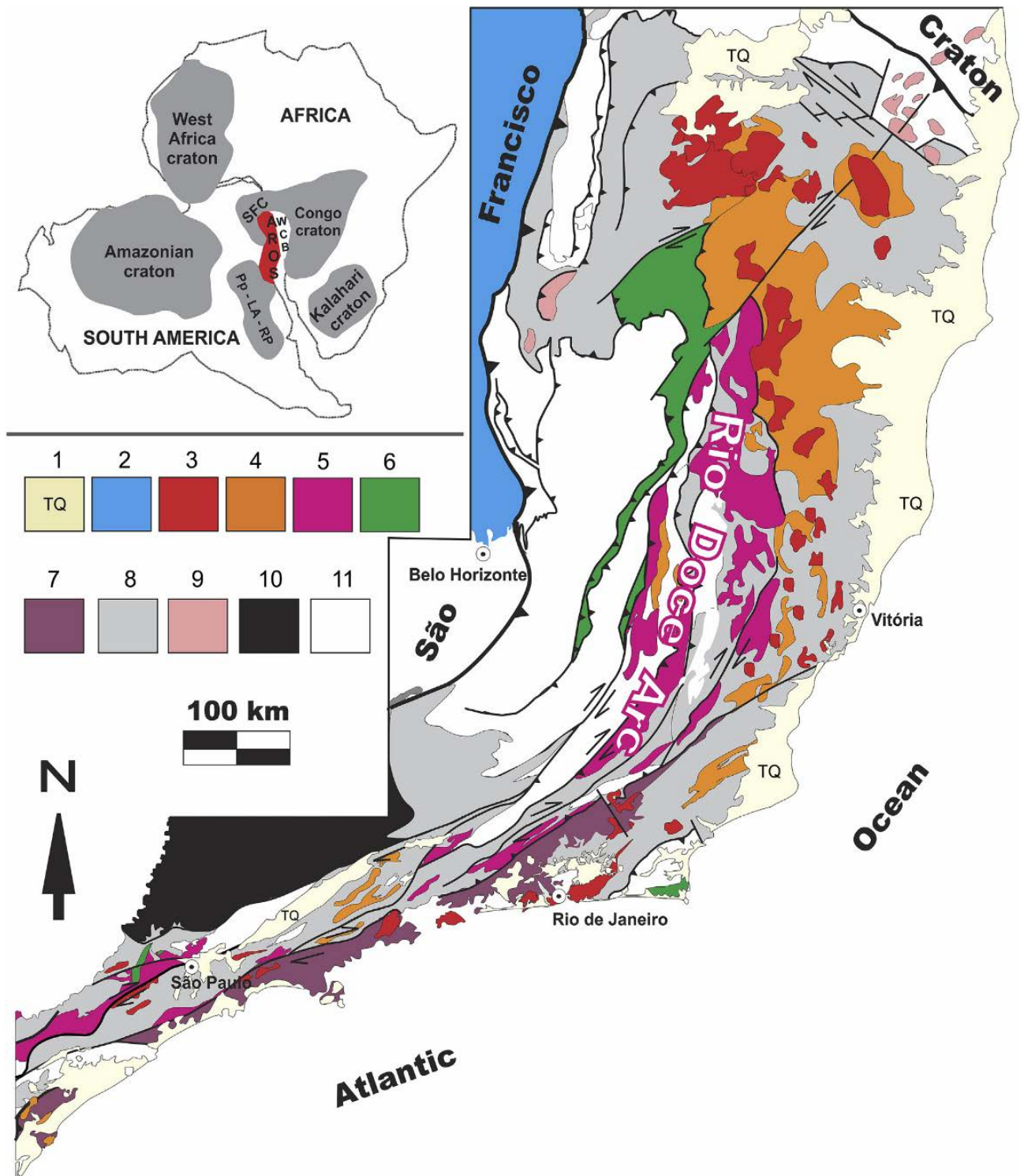


Figura 2.5 – Mapa geológico simplificado do sistema orogênico Araçuaí-Ribeira, e sua localização na porção ocidental do Paleocontinente Gondwana (extraído de Tedeschi *et al.* 2016). 1, Cobertura sedimentar cenozoica; 2, Cobertura do cráton São Francisco. Unidades do AROS (Araçuaí-Ribeira orogenic system): 3, Plutonismo pós-colisional; 4, Plutonismo colisional; 5, Arco magmático Rio Doce e possíveis correlativos; 6, Assembleia de rochas “Ophiolite-bearing”; 7, Domínio do arco Rio Negro; 8, Sucessões metassedimentares e metavulcânicas Neoproterozoicas; 9, Rochas magmáticas Tonianas e Criogenianas associadas a rift; 10, Porção sul do Cinturão Brasília; 11, Unidades pré-Neoproterozoicas. WCB, Cinturão Congo Ocidental. CSF, Cráton São Francisco. PP-LA-RP, bloco cratônico Paranapanema-Luiz Alves-Rio de la Plata.

Tabela 2.1 – Principais características das supersuítas G1 a G5 do Orógeno Araçuai. Dados obtidos por: Pedrosa-Soares *et al.* (2011); Gonçalves (2015); Gonçalves *et al.* (2016); Tedeschi *et al.* (2016); Melo *et al.* (2016, 2017); Araujo *et al.* (2020); Soares *et al.* (2020).

Supersuítas	G1	G2	G3	G4	G5
Idade U-Pb (Ma)	630 - 580	585 - 540	545 - 540	530 - 490	525 - 480
Litotipos	Predominantemente tonalitos e granodioritos, em menor quantidade rochas monzoníticas e dioríticas a gabronorito, com biotita, anfibólio e/ou piroxênio	Predominantemente granada-biotita sienogranitos a álcali-feldspato granitos; em menor quantidade: rochas monzoníticas a tonalitos ricos em granada e granada-duas-micas granito, com a presença local de silimanita	Álcali-feldspato granito a sienogranito com cordierita e/ou granada, com biotita ausente ou empobrecidos	Granito duas-micas com a presença comum de granada, granitos pegmatoides e biotita-granito em menor quantidade	Álcali-feldspato granito a granodioritos e rochas equivalente portadoras-de-Opx (chamockitos), enderbitos e noritos em menor quantidade
Relações de campo	Batólitos e stocks, geralmente ricos em enclaves intermediários a máficos, demonstrando deformação em estado sólido e migmatização, tramas ígneas localmente preservadas, associadas com as rochas de arco metavulcanosedimentares do Grupo Rio Doce	Batólitos, stocks e corpos estratificados, demonstrando deformação em estado sólido, metamorfismo e migmatização, tramas ígneas locais bem preservadas, com a presença comum de restitos e xenólitos de rochas metassedimentares	Filões, veios e porções não deformados, stocks em baixas quantidades, livres de foliação regional, hospedados pelo paleossoma em migmatitos G2	Plutons intrusivos em forma de balão, corpos estratificados em baixa quantidade, geralmente livres de deformação regional	Plutons intrusivos em forma de balão, batólitos livres de deformação regional de estado sólido, ricos em feições de <i>mingling</i> e mistura magmática, com enclaves intermediários a máficos
Litoquímica	Metaluminosos a levemente peraluminosos, magnésiana, cálcico a álcali-cálcico, médio a alto-K, série cálcico-alcálica expandida	Peraluminoso, calci-alcálica a sub-alcálica	Peraluminoso, sub-alcálica a alcalina de alto-K	Peraluminoso, sub-alcálico (K > Na) a alcalino (Na > K)	Metaluminoso a levemente peraluminoso, alto K-Fe, calci-alcálico a alcalino, baixa quantidade de tholeítos
εNd(t) (rocha-total)	-2.9 a -13.6	-5 a -13	-	-	-6 a -23
Idade TDM Nd	1.19 – 2.13Ga	1.3 – 1.9Ga	-	-	1.4 – 2.5Ga
87Sr/86Sr(i) (rocha- total)	0.704 a 0.716	0.707 a 0.713	-	0.713	0.702 a 0.716
εHf(t) em zircão	-3 a -15	-2 a -8	-4 a -10	-	-
Idade TDM Hf	1.3 – 1.7Ga	1.3 – 1.9Ga	1.3 – 1.7Ga	-	-
Tipo genético	Predominantemente metaluminosos tipo-I, levemente peraluminoso tipo-I	Predominantemente tipo-S, levemente peraluminoso tipo-I	Tipo-S	Tipo-S	Tipo-A e Tipo-I
Configuração e estágio tectônico	Pré-colisional a colisional inicial, arco magmático de margem continental ativa calci-alcálico magnésiano (arco magmático Rio Doce)	Pré-colisional tardio a colisional tardio	Colisional tardio a pós-colisional	Colisional tardio a pós-colisional	Pós-colisional

2.3 ORÓGENO RIBEIRA

O Orógeno Ribeira está inserido no contexto do Sistema Orogênico Brasileiro do Atlântico Sul (Caxito *et al.* 2022), mais especificamente na Província Mantiqueira Central (Heilbron *et al.* 2004). Trata-se de uma unidade litotectônica com orientação estrutural NE-SW, localizada nas regiões leste e sul do cráton São Francisco, estendendo-se paralelamente à costa sudeste do Brasil, entre os paralelos 20°S e 25°S. A sul, o cinturão Ribeira é limitado pelo cráton Luiz Alves, sendo que ambos estão parcialmente cobertos pelas sucessões sedimentares da bacia do Paraná (Trouw *et al.* 2000). A norte, o cinturão Ribeira se interliga, lateralmente, ao orógeno Araçuaí, assumindo uma mudança do *trend* estrutural de NE-SW (orógeno Ribeira) para N-S (orógeno Araçuaí). A noroeste, localiza-se uma complexa zona de interferência, desenvolvida na interação do orógeno Ribeira e o cinturão Brasília Sul (Trouw *et al.* 2000).

A formação do cinturão Ribeira resultou de sucessivos episódios de colisão ocorridos em diferentes períodos: 620-605 Ma, 605-565 Ma e 535-510 Ma (Heilbron *et al.* 2016). Durante esses eventos, houve a convergência e a acreção de microcontinentes e arcos magmáticos a uma margem continental que já estava unida, o bloco São Francisco-Paranapanema (Heilbron *et al.* 2016). A colisão entre os crátoms São Francisco e Paranapanema, por volta de 640-620 Ma, deu origem ao cinturão Brasília Sul. A frente orogênica Ribeira sobrepôs-se à porção sul já existente do cinturão Brasília, resultando em uma zona de interferência tectonicamente complexa (Trouw *et al.* 2000; Heilbron *et al.* 2016). O cinturão Ribeira é composto, principalmente, por quatro terrenos tectonoestratigráficos: Ocidental, Paraíba do Sul, Oriental e Cabo Frio (ver **Figura 2.6**).

O terreno Ocidental, representa a parte externa do cinturão, e é formado por: embasamento retrabalhado (ortognaisses e ortogranulitos do Arqueano e Paleoproterozoico), bacias intracratônicas mesoproterozoicas e uma unidade de margem passiva Neoproterozoica (Grupo Andrelândia). O topo do Grupo Andrelândia é considerado depositado em uma margem ativa, alimentada por um arco magmático localizado na placa Paranapanema (Heilbron *et al.* 2016).

O terreno Paraíba do Sul é composto por embasamento Arqueano-Paleoproterozoico, sendo constituído por unidades metassedimentares Neoproterozoicas e um arco magmático continental (Complexo Serra da Bolívia, 640-595 Ma), acrescido à margem sudeste do cráton entre 620 e 605 Ma (Heilbron *et al.* 2013, 2016, 2020).

O terreno Oriental é caracterizado por um arco magmático juvenil a imaturo (Complexos Rio Negro e Serra da Prata, 860-620 Ma), colidiu com o proto-cinturão Ribeira. As colisões resultaram no espessamento crustal e na geração de granitos dos tipos-I, S e híbridos, que intrudem tanto o embasamento quanto as camadas de cobertura nas áreas mais deformadas do cinturão.

O terreno Cabo Frio é um fragmento do Cráton Angola amalgamado ao Gondwana Ocidental e mantido pós abertura do Atlântico Sul, colidiu no Cambriano (535-510 Ma), causando a reorganização dos terrenos pré-existentes, com a formação de grandes dobras e zonas de cisalhamento transpressivas que atingiram a margem do CSF.

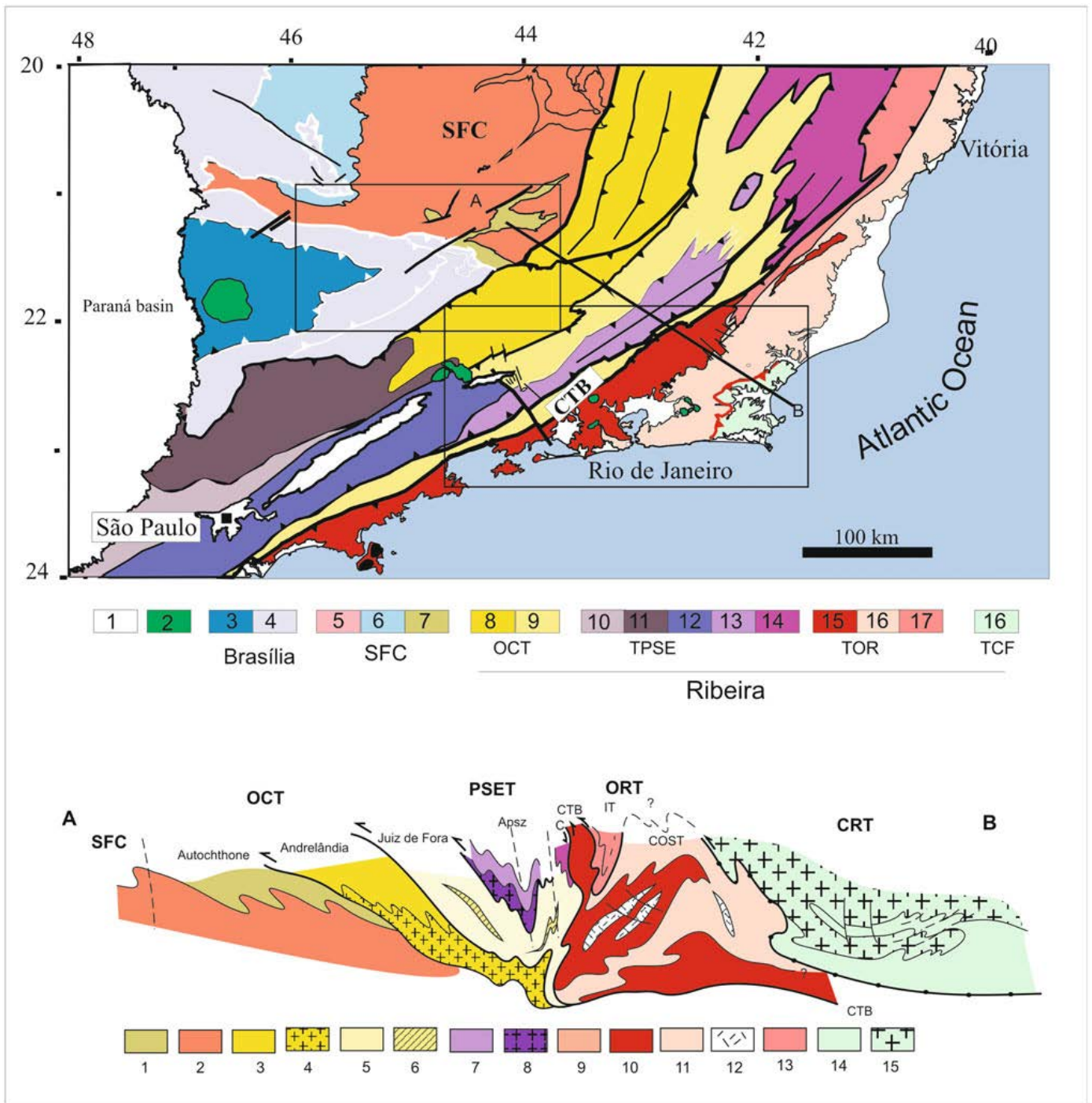


Figura 2.6 – Estrutura tectônica do Cinturão Ribeira e da zona de interferência com o Cinturão Brasília, extraído de Heilbron *et al.* 2016. Em A-B uma seção transversal esquemática regional. 1) Cobertura Fanerozoica; 2) Plutons alcalinos do Cretáceo Superior; 3 e 4) Unidades com orientação E do Cinturão Brasília, incluindo a nappe de Guaxupé e nappes inferiores; 5–7) Unidades do Cráton São Francisco: 5- Embasamento Paleoproterozoico a Arqueano; 6- Cobertura cratônica Neoproterozoica, Grupo Bambuí; 7- Metassedimentos Mesoproterozoicos a Neoproterozoicos do domínio autóctone; 8–17) Terrenos e domínios estruturais do Cinturão Ribeira: 8- Domínios de Andrelândia e 9- Juiz de Fora do terreno Ocidental, 10- Nappe de Socorro; 11- Terreno de Apiaí; 12- Terreno de Embú; 13- Terreno Paraíba do Sul, 14- Terreno de Cambuci; 15- Arco magmático do Criogeniano-Ediacarano, 16- Sucessões metassedimentares Neoproterozoicas e arco magmático Toniano do Terreno Oriental; 17- Terreno de Cabo Frio; CTB – Contato Tectônico Central; SFC: cráton São Francisco; OCT: Terreno Ocidental; TPSE: Terreno Paraíba do Sul-Embu; TOR: Terreno Oriental e TCF: Terreno Cabo Frio.

2.3.1 Estratigrafia do Orógeno Ribeira

As principais unidades tectonoestratigráficas do Cinturão Ribeira (Tabelas 2.2 e 2.3) são:

- O ‘*Embasamento*’ do Cinturão Ribeira compreende os Complexos Mantiqueira e Juiz de Fora para o Terreno Ocidental e os Complexos Taquaral e Quirino para o Terreno Paraíba do Sul, ambos de idade Paleoproterozoica (Heilbron *et al.* 2016). O Complexo Região dos Lagos, é o Embasamento do Terreno Cabo Frio e será melhor tratado mais adiante, durante a descrição deste terreno. O Complexo Mantiqueira consiste em rochas ortognaíssicas félsicas (correspondentes com quartzo-dioritos, tonalitos, granodioritos e granitos porfiríticos), com camadas anfibolíticas e lentes de rocha meta-ultramáfica. Dados de U-Pb indicam que tenha sido gerado em uma configuração de margem continental ativa, com a edificação de um arco magmático continental, responsável por retrabalhar uma crosta Arqueana (2,7 – 2,6Ga) com significativo incremento/geração de crosta entre 2,22 e 2,05 Ga. Já o Complexo Juiz de Fora é constituído de ortognaisses e rochas metabásicas, ambas com metamorfismo de fácies granulítica. Suas assinaturas geoquímicas e isotópicas indicam e atestam uma geração diretamente relacionada com uma configuração de arco magmático intra-oceânico de idade 2,2 – 2,1 Ga (Heilbron *et al.* 2016).
- ‘*Sucessões sedimentares Mesoproterozoicas de Bacia Intracratônicas*’ (Figura 6), compreendendo o Grupo São João Del Rey, que consiste em sucessões siliciclásticas e carbonáticas, aflorantes nas regiões adjacentes a borda sul do CSF (Heilbron *et al.* 2016); e a Formação Carandaí, que consiste de diamictitos polimícticos associados a depósitos de fluxos episódicos de escarpas de falha, desenvolvidas durante um evento distensivo (Ribeiro *et al.* 2013). As sucessões sedimentares Mesoproterozoicas do Grupo São João Del Rey, são interpretadas por Ribeiro *et al.* (2013), como unidades correlativas ao

Supergrupo Espinhaço, essas expostas no aulacógeno de Paramirim e Orógeno Araçuaí (**Figura 2.2**– Heilbron *et al.* 2016). Estando associadas com eventos *rift-sag* que afetam o CSF durante a Era Mesoproterozoica.

- *‘Assembleias sedimentares Neoproterozoicas de bacias de Margem Passiva e Ativa (Megassequência Andrelândia)’*. São constituídas principalmente por rochas metassedimentares siliciclásticas que afloram na zona de interferência entre o Cinturão Ribeira e o Cinturão Brasília Sul e juntamente com lascas de cavalgamento na porção leste do Terreno Ocidental (Heilbron *et al.* 2016). A Megassequência Andrelândia subdivide-se em 2 sequências deposicionais dominantes: Sequência Basal e Sequência Superior. A Basal compreende 4 associações de litofácies distintas as quais consistem de: meta-psamopelitos arcossianos (paragnaisses) com camadas pelíticas e anfibolitos (unidades A1 e A2 respectivamente); camadas de mica branca-quartzitos contínuas (unidade A3) intercalações de filitos/xistos grafitosos e quartzo-metarenitos (unidade A4). Já a Sequência Superior, compreende duas associações de litofácies: plagioclásio-biotita-xistos/gnaisses com camadas pelíticas e quartzitos associados (unidade A5); e xistos pelíticos e gnaisses, com quartzitos, anfibolitos e metacherts calcissilicáticos ricos em Mn (unidade A6), que por sua vez são mais comumente encontrados nas lascas de cavalgamento da porção leste do Terreno Ocidental (Heilbron *et al.* 2016). A Megassequência Andrelândia é então, predominantemente interpretada como sucessões sedimentares Neoproterozoicas provenientes de depósitos de *rift* a margem passiva, sendo correlacionadas com o Grupo Macaúbas do Orógeno Araçuaí. A unidade A5 é interpretada como associada a uma bacia de Margem Ativa cuja unidade correlata do Orógeno Araçuaí, seria a Formação Salinas (**Figuras 2.4 e 2.5**).
- No *‘Terreno Paraíba do Sul’* compreendem: o embasamento Paleoproterozoico que consistem de Hbl-ortognaisses do Complexo

Quirino; paragnaisses de fácies anfibolito do Grupo Paraíba do Sul; diversos granitoides Neoproterozoicos, incluindo o Complexo Serra da Bolívia (arco magmático Neoproterozoico, análogo ao Arco Rio Doce do Orógeno Araçuaí – Gonçalves *et al.* 2014; Heilbron *et al.* 2016; Tedeschi *et al.* 2016). O Complexo Quirino são ortognaisses ricos em hornblenda, apresentando enclaves máficos e ultramáficos, e cuja idade de cristalização se dá entre 2,3 e 2,1 Ga, com herança Arqueana. As assembleias supracrustais do Grupo Paraíba do Sul, consistem em gnaisses com silimanita, granada, biotita, contendo intercalações de lentes calcissilicáticas e de mármore dolomítico, cuja proveniência são unidades Paleoproterozoicas e, subordinadamente, Arqueanas (Heilbron *et al.* 2016). Durante o Ediacarano, a margem ocidental do Terreno Paraíba do Sul foi convertida em uma configuração de margem ativa, onde se tem o desenvolvimento do arco cordilheirano do Complexo Serra da Bolívia (620-595 Ma). Este por sua vez, consiste de rochas associadas ao desenvolvimento do arco magmático, como ortognaisses calci-alcálicos, rochas charnockíticas e rochas gabróicas, que intrudem tanto o embasamento Paleoproterozoico quanto as sucessões Neoproterozoicas do terreno. É de se notar, que o Complexo Serra da Bolívia (ver Tabela 2.3) seria análogo e correlativo com as suítes pré-colisionais Socorro e Rio Doce (arcos magmáticos dos orógenos Ribeira Central e Araçuaí respectivamente – Heilbron *et al.* 2016).

- O '*Terreno Oriental*' é interpretado como sendo um terreno alóctone, aglutinado à margem continental ativa (605-580 Ma) e representa as porções mais externas do Cinturão Ribeira. O terreno é constituído estritamente pelos Complexos Tonianos-Ediacaranos da Serra da Prata e Rio Negro, que por sua vez, são assembleias de rochas relacionadas com o desenvolvimento de arcos intra-oceânicos e continentais imaturos; bem como pelas sequências metassedimentares de alto grau Neoproterozoicas,

aqui representadas pelos Grupos Itálva e São Fidelis. O Complexo Serra da Prata é constituído de ortognaisses tonalíticos-granodioríticos portadores de hornblenda e biotita, e ocorrem lentes dioríticas e leucognaisses associados. Esse complexo registra as idades mais primitivas do Terreno Ocidental, com idades de cristalização de 860, 760, e 640-620 Ma (Heilbron *et al.* 2016). Já o Complexo Rio Negro consiste de rochas gabróicas e uma diversa assembleia de ortognaisses calci-alcálicos e shoshoníticos. Os ortognaisses (790 – 605 Ma) apresentam contato intrusivo com as unidades basais do Grupo São Fidelis. Dados isotópicos de Sm-Nd, registram uma evolução progressiva da natureza juvenil: representada por rochas dioríticas e tonalíticas de médio-K, das séries calci-alcálicas e tholeíticas; até o desenvolvimento de um estágio ‘maturo’ onde apresentam assinaturas isotópicas relacionadas a arcos magmáticos cordilheiranos (Heilbron *et al.* 2016). A Unidade Bom Jesus de Itabapoana e os Grupos Itálva e São Fidelis (**ver Tabela 2.2**) são coevos com os desenvolvimentos dos arcos Serra da Prata e Rio Negro e consistem de paragnaisses de fácies anfíbolito a granulito, mármore, gnaisses psamo-pelíticos, anfíbolitos e rochas calcissilicáticas, associadas a bacias de *forearc* e *backarc*, relacionadas com o desenvolvimento dos arcos.

Tabela 2.2 – Unidades metassedimentares e litologias associadas com o desenvolvimento dos arcos no Cinturão Ribeira (retirado de Heilbron *et al.* 2016).

Unidade	Litologia	Ambiente tectônico	Idade de Sedimentação
Bom Jesus do Itabapoana	Gnaisses psamo-pelíticos, mármores dolomíticos, anfíbolitos e rochas calcissilicáticas	Bacia <i>forearc</i> do arco Serra da Bolívia (arco Rio Doce)	ca. 630–595 Ma
Grupo Italva (Unidade Euclidelândia)	Gnaisses psamíticos com lentes de mármore	Bacia <i>forearc</i> do arco Serra da Prata	ca. 760–630 Ma
Grupo Italva (Unidades São Joaquim e Macuco)	Mármores calcíticos, gnaisses psamíticos, anfíbolitos	Bacias intra- a proximal do arco Serra da Prata	ca. 860–760 Ma
Grupo São Fidelis (unidade Superior)	Sil-Grt-gnaisses com quartzitos e rochas calcissilicáticas	Bacia <i>backarc</i> dos arcos Serra da Prata e Rio Negro	ca. 620–605 Ma
Grupo São Fidelis (unidade Inferior)	Gnaisses kinzigíticos com cordierita, rochas calcissilicáticas e lentes de mármore	Transição de Margem Passiva para configuração de <i>Backarc</i> do arco Rio Negro	-

- O ‘*Terreno Cabo Frio*’ é alóctone e foi aglutinado ao Cinturão Ribeira aproximadamente entre 535 e 510 Ma (Schmitt *et al.* 2004). Este terreno alóctone compreende uma unidade de embasamento, representada pelo Complexo Região dos Lagos (ortognaisses de 1,9Ga) e sucessões metassedimentares de alto grau dos Grupos Búzios e Palmital. De acordo com Schmitt *et al.* (2016), o Terreno Cabo Frio (540-490 Ma) é interpretado como sendo um segmento do Cráton de Angola, associado com uma bacia de *backarc* do arco Rio Negro, que foi então aglutinado ao Gondwana Ocidental durante o ciclo orogênico Brasileiro e, permanecendo na Plataforma Sul-Americana após abertura do Oceano Atlântico.

Tabela 2.3 – Unidades tectonoestratigráficas do Cinturão Ribeira (retirado de Heilbron *et al.* 2016);

Unidades tectonoestratigráficas	Terrenos			
	Ocidental	Paraíba do Sul-Embú	Oriental	Cabo Frio
Granitos pós-colisionais ca. 510–480 Ma	Ausente	Muito Raro	Granitos, com dioritos, gabros e pegmatitos subordinados	Somente pegmatitos
Granitoides sin-colisionais (colisão III) ca. 535–510 Ma	Raros plutons, pequenos e controlados por zonas de cisalhamento tardias. Presença de leucogranitoides levemente peraluminosos.		Plutons fracamente foliados, leucogranitos e charnockitos	Leucossomas
Bacias sin- a tardi- colisionais ca. 605–565 Ma	Bacias transicionais			
Granitoides sin-colisionais (colisões I e II) ca. 605–565 Ma	Hb-Bt-granitos foliados, metaluminosos, frequentemente porfíricos, presença de leucogranitoides peraluminosos e granitoides híbridos. Presença também de granitoides charnockíticos.			Ausente
Bacias de margem ativa ca. 840–605 Ma	Unidade A5 da megassequência Andrelândia	Bacia Bom Jesus do Itapaboana (bacia de <i>forearc</i>)	Bacias de São Fidélis, Italva e Búzios (bacias de <i>backarc</i>)	Ausente
Arco magmático Neoproterozoico ca. 840– 605 Ma		Arcos Socorro e Serra da Bolívia (Arcos magmáticos do tipo Cordilheiranos)	Arcos Rio Negro e Serra da Prata (Arcos intra-ocênicos juvenis a continentais imaturos)	Ausente
Bacias de margem passiva ca. 1000–760 Ma	Megassequência Andrelândia	Bacia Paraíba do Sul	Unidades Inferiores do Grupo São Fidelis	Ausente
Bacias intracratônicas ca. 1.7–1.3 Ga	Bacias Carandaí e São João del Rey	Ausente	Ausente	Ausente
Rochas de Embasamento ca. 2.4–1.90 Ga ca. 2.8–2.6 Ga	Complexos Mantiqueira e Juiz de Fora	Complexos Taquaral e Quirino	Ausente	Complexo Região dos Lagos

2.4 MODELOS EVOLUTIVOS DO SISTEMA OROGÊNICO ARAÇUAÍ-RIBEIRA

A evolução das técnicas analíticas, tais como a Espectrometria por Fluorescência de Raio-X (XRF) e a Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente e Ablação a Laser (LA ICP-MS/OES), tem permitido nas últimas décadas um refinamento significativo dos modelos geológicos. Isso se deve ao apoio fornecido pelos dados geoquímicos elementares e isotópicos, que auxiliam na verificação desses modelos. Porém a busca por um modelo integrado e idealizado do Sistema Orogênico Araçuaí-Ribeira permanece alvo de importantes discussões na literatura científica.

Nessa seção, tratou-se de forma sintética a compreensão histórica atualizada dos modelos vigentes para o SOAR.

2.4.1 Síntese da História Evolutiva do Orógeno Araçuaí sob a Perspectiva da Tectônica de ‘Quebra-Nozes’

O conjunto de componentes geotectônicos do Orógeno Araçuaí (ver seção anterior), foram responsáveis pela concepção de uma orogenia confinada para o mesmo, isto é, sua bacia precursora (Bacia Macaúbas), haveria se formado sobre uma reentrância parcialmente oceanizada entre os crátons do São Francisco e Congo (ver Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000 e Alkmim *et al.* 2006). Esse confinamento é resultado da conexão contínua dos crátons do São Francisco e do Congo desde o Paleoproterozoico até a abertura do Atlântico Sul no Cretáceo. Durante esse período, existia uma 'ponte continental cratônica' localizada aproximadamente na região da Bahia (Brasil) e do Gabão (África – Pedrosa-Soares *et al.* 2007). Devido a esse confinamento, o mecanismo de evolução do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental durante o período Brasileiro seria comparável ao movimento de fechamento de um quebra-nozes, impulsionado por colisões à distância, conforme é descrito por Alkmim *et al.* (2007).

Com base nessa configuração, elaborou-se um modelo que descreve a evolução tectônica em cinco estágios distintos (vide Alkmim *et al.* 2006), que tem como base fundamental as seguintes premissas:

- A formação da bacia precursora do Orógeno Araçuaí teve início com o surgimento de atividade magmática durante a fase de rifte (**Figura 2.7**). Essa atividade é representada pelos diques máficos da Suíte Pedro Lessa (com idade de 906 ± 2 Ma – Machado *et al.* 1989) e pelos granitos do tipo-A da Suíte Salto da Divisa (com idade de 875 ± 9 Ma – vide Silva *et al.* 2002, 2007). Esse evento extensional foi uma reativação do sistema de rifte Espinhaço, que ocorreu por volta de 1,75 Ga, resultando na abertura progressiva da bacia de Macaúbas de sul para norte. Essa dinâmica de abertura foi responsável por configurar um golfo oceanizado na

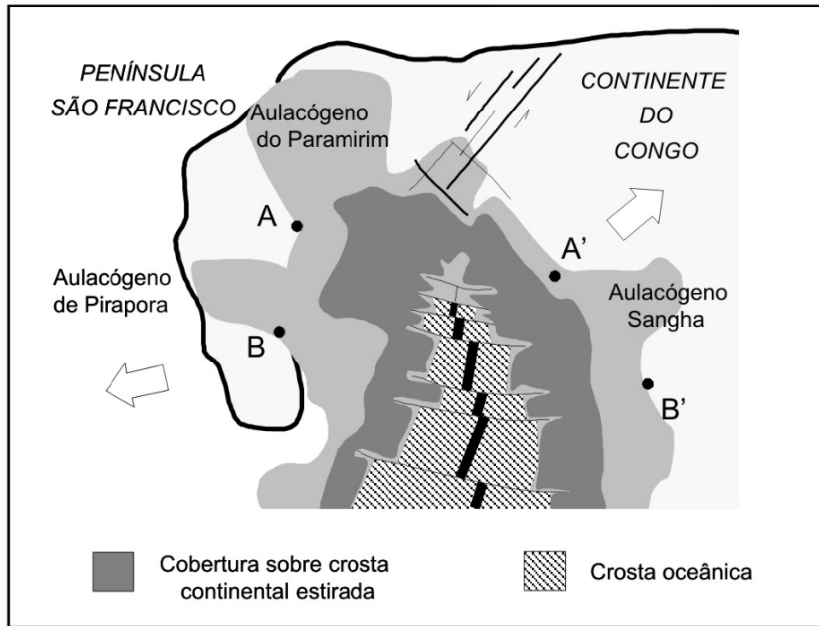
porção sul e uma região ainda ensialica na parte norte do orógeno (Alkmim *et al.* 2006).

Nesse estágio também ocorreu a deposição das sequências sedimentares de margem continental passiva que estão registrados no domínio externo do orógeno, representados pelas unidades proximais do Grupo Macaúbas (**Figura 2.7c**), incluindo a unidade superior da Formação Chapada Acauã e a Formação Ribeirão da Folha (rochas máficas/ultramáficas de sequências ofiolíticas – Pedrosa-Soares *et al.* 2007);

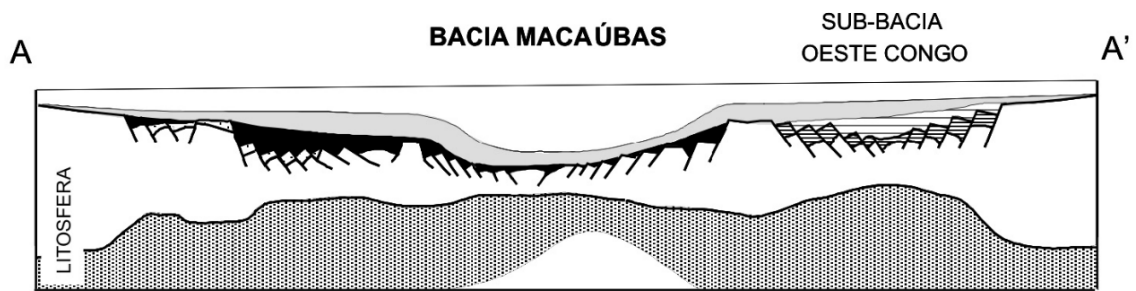
- Devido à sua configuração tectônica peculiar e à presença de um segmento oceânico relativamente estreito, o fechamento da Bacia Macaúbas teria sido induzido à distância, através de colisões envolvendo a placa São Francisco e as placas Paranapanema ou Rio de la Plata. Uma vez que apenas as forças gravitacionais e de arrasto astenosférico não seriam suficientemente capazes de proporcionar uma subducção e fechamento da Bacia Macaúbas;
- A convergência das duas margens da bacia precursora e a consequente formação do orógeno, se desenvolveria, cinematicamente, por uma rotação anti-horária da Península São Francisco em choque contra o continente do Congo (modelo cinemático tectônico nutcracker). Também é considerado que a rotação e o fechamento do mecanismo conhecido como "quebra-nozes" foram facilitados pela presença de diversos pontos fixos de pivô localizados nos aulacógenos gerados durante a fase de abertura. Esses aulacógenos, representados pelos aulacógenos de Paramirim, Pirapora e Sangha (**Figura 2.7a**), desempenharam o papel de eixos de rotação durante a etapa de fechamento, passando por múltiplas fases de inversão tectônica ao longo desse processo;
- As idades de geração dos granitos pré-colisionais (associados a subducção) da Supersuíte G1 (arco magmático Rio Doce – **ver Figura 2.8c**) e das rochas vulcânicas do Grupo Rio Doce, são balizadoras para o início da operação de fechamento do quebra-

nozes, dada por volta de c. 630 Ma (Pedrosa-Soares *et al.* 2007; Tedeschi *et al.* 2016; Gonçalves *et al.* 2018). Esse estágio também registra a deposição da unidade sedimentar sin-orogênica, a Formação Salinas (**Figura 2.8b**);

- A principal fase colisional deve ter ocorrido no intervalo aproximado de 590 e 545 Ma (com pico em 575 Ma – **Figura 2.9a**), marcando o intervalo de idades correspondentes ao metamorfismo e paragénese que materializam a foliação regional, bem como a granitogênese de natureza sin-colisional de granitos tipo-S da Supersuíte G2;
- No estágio tardi-colisional tem-se a geração dos granitoides da Supersuíte G3, que por sua vez, são leucogranitos resultantes da fusão autóctone e parautóctone dos granitoides G2 (Pedrosa-Soares *et al.* 2008);
- A aproximação máxima do extremo sul da península São Francisco e a margem do cráton do Congo resulta em um escape de massas para sul, por meio de grandes zonas de cisalhamento destrais (**Figura 2.9b**);
- O estágio de transição tardi- e pós-colisional é marcado pela granitogênese das Supesuítes G4 e G5 (**Figura 2.9**), e pelo colapso gravitacional do orógeno, este motivado pelo fluxo lateral de suas porções basais, seguido do abatimento das porções superiores, com uma acomodação proporcionada pelo desenvolvimento de uma série de zonas de cisalhamento (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000; Pedrosa-Soares *et al.* 2007).



a



b

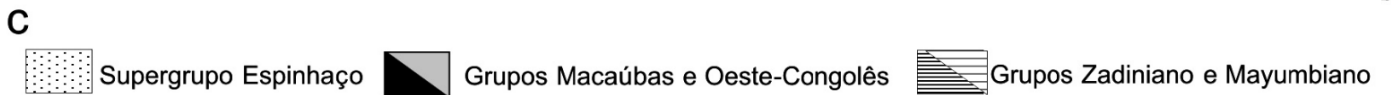
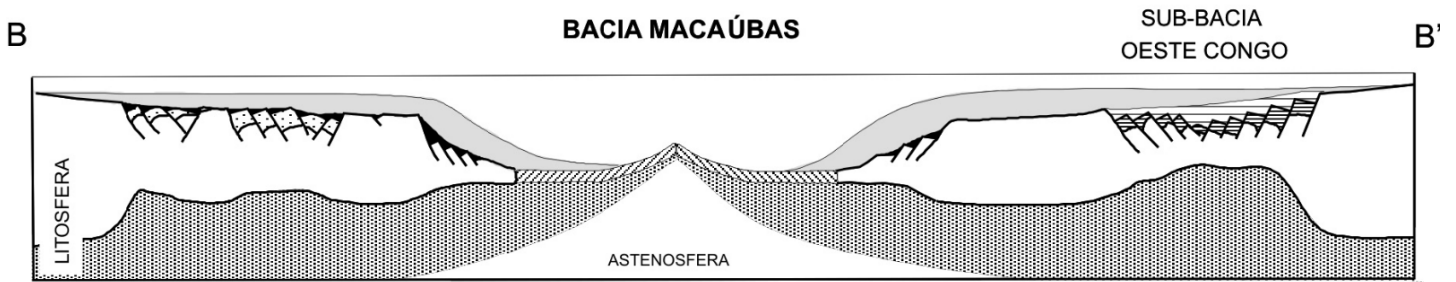
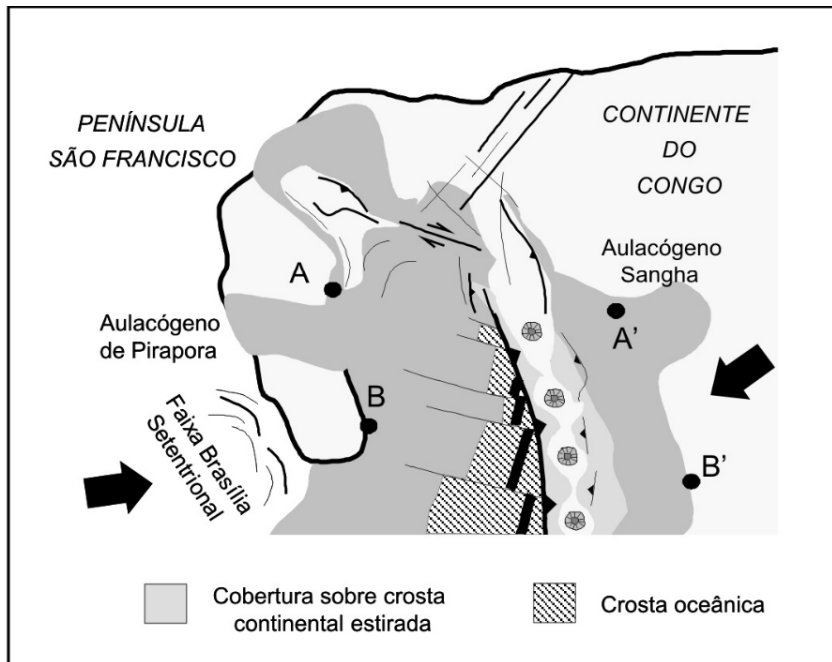
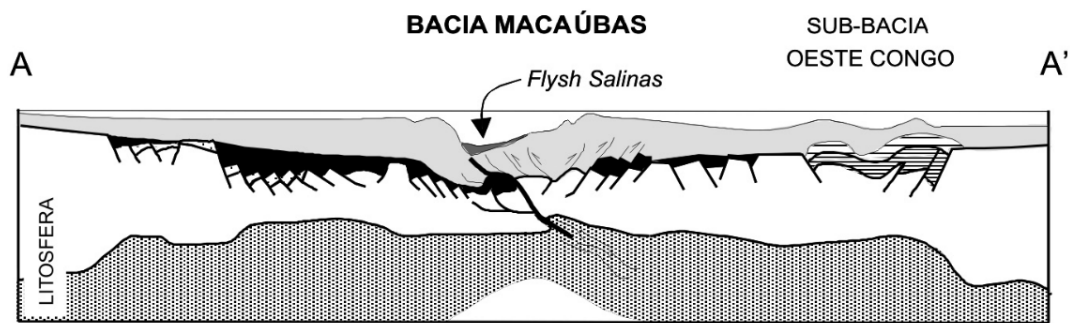


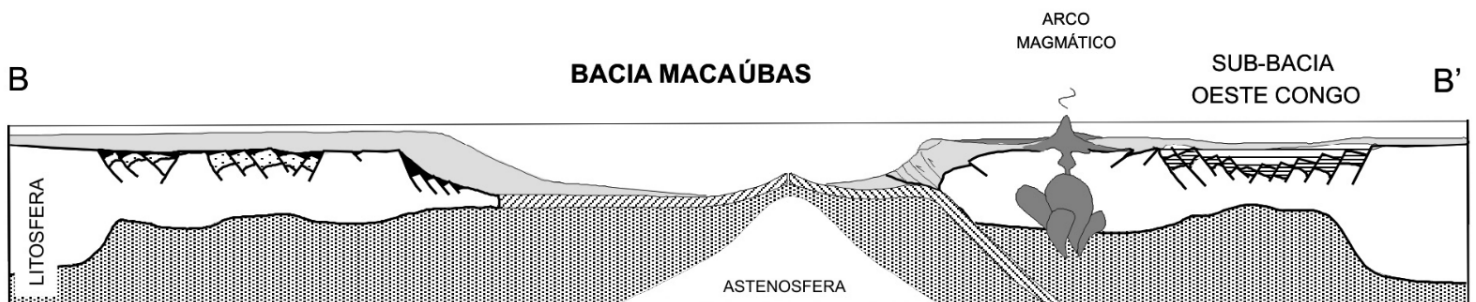
Figura 2.7 – Desenvolvimento da bacia Macaúbas, precursora do Orógeno Araçuaí (700 Ma). Em A - Elementos tectônicos visto em mapa. B - Seção através do setor setentrional ensialico. C - Seção através do setor meridional oceânico (extraído de Alkmim *et al.* 2007).



a



b



c



Figura 2.8 – Evolução da bacia Macaúbas, precursora do Orógeno Araçuaí por volta de 600 Ma na fase inicial de convergência; deposição da unidade metassedimentar, a Formação Salinas e desenvolvimento do arco magmático Rio Doce. Em A - Elementos tectônicos visto em mapa. B - Seção através do setor setentrional ensialico. C - Seção através do setor meridional oceânico (extraído de Alkmim *et al.* 2007).

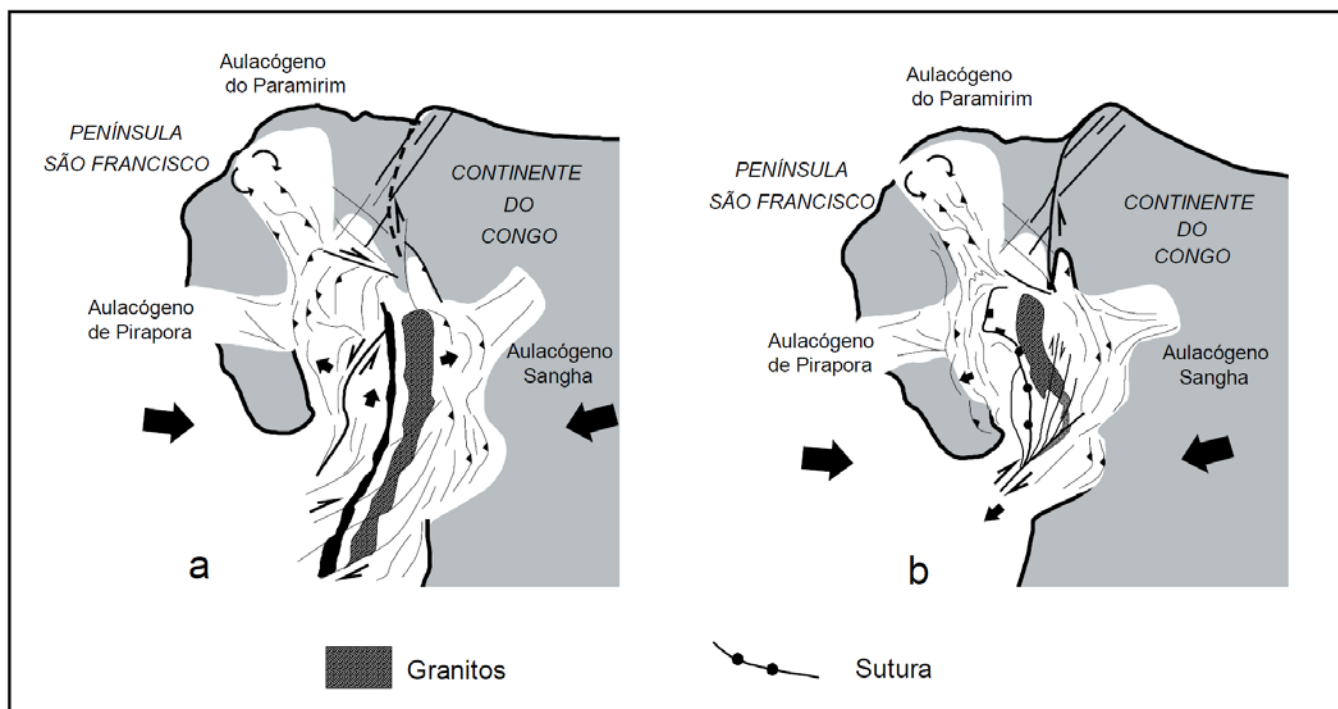


Figura 2.9 – Estágios (a) colisional, por volta de ca. 560 Ma e (b) de colapso gravitacional após escape lateral da porção sul do orógeno por volta de 500 Ma (extraído de Alkmim *et al.* 2007).

2.4.2 Síntese da História Evolutiva do Cinturão Ribeira sob a Perspectiva da Tectônica de Margem Continental Ativa

A caracterização evolutiva do Orógeno Ribeira se deu a partir de estudos sistemáticos realizados ao longo dos anos, de forma análoga ao que ocorreu para o Orógeno Araçuaí. Apesar de se contraporem em alguns aspectos, é de amplo consenso que o Orógeno Ribeira tenha se desenvolvido através de colisões continentais, e que essas colisões estiveram sob o domínio de componentes transpressivos, promovendo então a transcorrência e escape lateral e/ou vertical dessas massas litosféricas (Trouw *et al.*, 2000; Heilbron *et al.*, 2000, 2016, 2020a, 2020b; Heilbron & Machado 2003).

Dessa maneira, com base nos trabalhos de Heilbron *et al.* (2000, 2013, 2016, 2020a e 2020b) e Trouw *et al.* (2000), a evolução geotectônica do Orógeno Ribeira é descrita pela sucessão das seguintes etapas (**Figura 2.10**):

- a) Rift a Margem Passiva: a partir de 1.0 Ga, desenvolveram-se as seqüências deposicionais nas margens Leste do Terreno Ocidental (representado pelas unidades do Grupo Andrelândia), ocorrendo

simultaneamente com a deposição das sequências sedimentares na margem Oeste do Terreno Oriental (representado pelas sucessões metassedimentares do Domínio Costeiro);

- b) Início de subducção da Placa São Franciscana: forças convergentes promovem um processo de subducção com polaridade para Leste (Figura 10a), induzindo o consumo da Placa São Franciscana sob o Terreno Oriental. Esse processo de subducção é coevo com o desenvolvimento dos arcos intra-oceânicos a transicional continentais (juvenis) do Serra da Prata (860 Ma) e Rio Negro (620 Ma), que intrudem as sucessões metassedimentares dos domínios Itálva e Costeiro, respectivamente. Juntamente com o desenvolvimento dos arcos, sucessões metassedimentares eram depositadas nas bacias de antearco (domínios Paraíba do Sul e Cambuci) e retroarco (domínios Itálva e Búzios);
- c) A amalgamação diacrônica do Cinturão Ribeira foi resultado de três episódios de colisão: o primeiro (630 – 595 Ma) ocasionou a acreção do Terreno Central (compreendendo os Terrenos Paraíba do Sul-Embú e o sistema de arcos internos do Domínio Cambuci – vide o arco Serra da Bolívia (623 – 590Ma) e Complexo Marceleza); o segundo evento colisional (600 – 565 Ma) registra a acreção do Terreno Oriental (o sistema de arcos externos) e o terceiro evento (535 – 510 Ma), resultando na acreção do Terreno Cabo Frio (fragmento do Cráton de Angola);
- d) Acredita-se que o período de subducção responsável pela geração dos arcos do sistema interno tenha ocorrido entre 650 e 595 Ma, sendo registrado pelos plútons dos Complexos Serra da Bolívia e Marceleza (**ver Figura 2.10b**);
- e) O colapso gravitacional do Orógeno (510 – 480 Ma): esse episódio é comumente associado ao processo de delaminação do manto, ocasionando o colapso transtensional do Orógeno devido ao fluxo de massa por escape lateral das porções basais. Nessa etapa ocorreria a geração da granitogênese tardi-colisional a estritamente

pós-colisional. Contemporaneamente tem-se a geração de um magmatismo bimodal (**Figura 2.10c**) promovido pela ascensão da astenosfera pós processo de delaminação do manto.

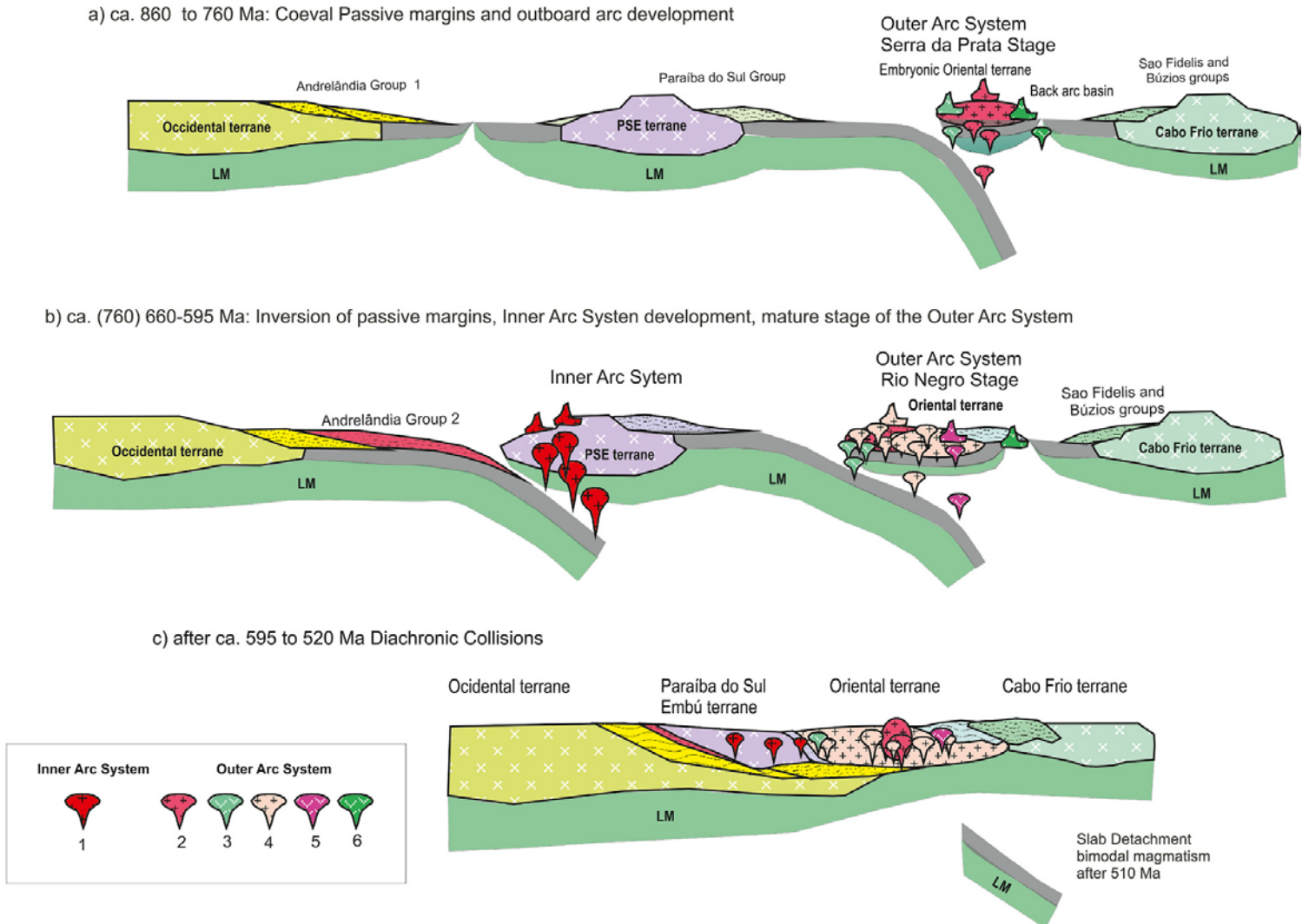


Figura 2.10 – Modelo tectônico simplificado do desenvolvimento do Orógeno Ribeira. 1 – Complexos Serra da Bolívia e Marceliza e suíte Leopoldina, representantes do Sistema Interno de Arcos; 2-6 – Rochas do Sistema Externo de Arcos; 2 – rochas cálcio-alcálicas do arco Serra da Prata; 3 – Gabros tholeiíticos associados aos arcos; 4 – Rochas de médio a alto-K da série Calcio-alcálica; 5 – Rochas da série Shoshonítica do arco Rio Negro; 6 – Magmatismo máfico de *backarc* (Figura extraída de Heilbron et al. 2020b).

2.4.3 O Modelo de Orogenia Intracontinental

A abordagem do modelo de orogenia intracontinental explora de maneira alternativa a evolução geodinâmica dos orógenos brasileiros. O foco central dessa abordagem é o questionamento de ‘quais entidades tectônicas estão (ou estariam) envolvidas durante o processo orogenético’, ou seja, se a orogenia é resultado de uma interação interplacas ou intraplacas (Meira, 2014). Motivados por publicações recentes que reconhecem a interpretação de sistemas orogênicos a partir de deformações tectônicas intraplaca, como o sistema Tien Shan/Altai/Gobi Altai/Sayan/Stanovoy na Ásia Central (Cunningham, 2005), nas regiões centrais (Orógenos Petermann e Alice Springs – vide Raimondo *et al.* 2009, 2010) e sul da Austrália (Adelaide Fold Belt – vide Dyksterhuis e Müller, 2008), Meira (2014), Cavalcante *et al.* (2019), Fossen *et al.* (2020) e Konopásek *et al.* (2020) retomam a perspectiva histórica apresentada por Trompette (1994, 1997) ao idealizar e adaptar um modelo geológico de orogenia intracontinental para o Sistema Orogênico Araçuai-Ribeira e da Província Mantiqueira como um todo. O resgate desse modelo, se alicerça em paradigmas que contrapõe e tornam controversos, alguns dos pilares para o modelo de orogenia interplaca (tratado nos tópicos anteriores dessa mesma seção).

Tratarei de forma sintética as principais divergências que existem:

- Orógenos intracontinentais representam a concentração de zonas de deformação, cuja força motriz se daria a distâncias consideráveis (> 1000km), isto é, seriam o produto de reação na crosta da propagação de tensões compressivas *far-field*, longe dos limites marginais de placas;
- A colisão entre o Bloco Paranapanema e o Cráton do São Francisco (aqui representando o Gondwana Ocidental íntegro e amalgamado, sem reentrâncias e/ou oceanizações) entre 650-600 Ma, seria o principal motivador e criador dos vetores de forças compressionais;
- Essa massa litosférica seria posteriormente submetida a um intenso evento distensivo, responsável por estirar significativamente a crosta, sendo tal processo diretamente

associado e coevo com a volumosa granitogênese entre os períodos de 600 – 560 Ma (**ver Figura 2.11**).

Com esses pressupostos em mente, Meira *et al.* (2019a) reconstroem a sucessão de eventos durante a amalgamação do Gondwana Ocidental (ver Figura 12), representado pelas seguintes etapas:

1. Período Criogeniano (aproximadamente 800-650 Ma – **Figura 2.12a**), marcado por processos de subducção nos oceanos Charrua-Goiás-Pharusiano e Adamastor, e pelo desenvolvimento de arcos insulares no Oceano Charrua-Goiás-Pharusiano, arcos magmáticos nas margens dos blocos cratônicos Paranapanema e Rio de La Plata, além de bacias sedimentares (como os grupos São Roque, Açungui e Macaúbas e os complexos Porongos, Costeiro e Juiz de Fora) nas áreas de retaguarda desses blocos;
2. Período entre o final do Criogeniano e início do Ediacarano (aproximadamente 650-600 Ma – **Figura 2.12b**), marcado pelos os principais eventos dos sistemas colisionais brasileiros, com o fechamento do Oceano Adamastor e da parte “embayada” do Oceano Charrua-Goiás-Pharusiano (entre o Cráton São Francisco e os blocos Goiás e Paranapanema);
3. Durante os períodos médio-tardio do Ediacarano (aproximadamente 600-560 Ma – **Figura 2.12c**), ocorreram processos tectônicos extensionais e transcorrentes em toda a Província Mantiqueira, com uma deformação compressional localizada no Cinturão Araçuaí. Esses eventos resultaram em metamorfismo de baixa pressão, magmatismo pós-colisional e o desenvolvimento de bacias vulcano-sedimentares relacionadas a riftes, além de depósitos marinhos epicontinentais. Um aspecto notável é a mudança gradual na orientação dos vetores de tensão horizontal em direção ao norte, com uma transição da cinemática dominante de transcorrência para a esquerda nas áreas mais ao sul, para uma cinemática dominante de extensão ao sul e norte do Cráton Luis Alves, movimentos dominantes de transcorrência para a direita na Faixa Ribeira Central-Norte e tensões dominantes de compressão no Cinturão Araçuaí. A orientação do campo de tensão horizontal (σ_1 e σ_3) em diferentes

partes da Província Mantiqueira durante o período médio-tardio do Ediacarano foi determinada por meio da análise de paleotensões nas bacias de rift, bem como pela cinemática de zonas de cisalhamento e cavalgamentos nas faixas de dobras e cavalgamentos.

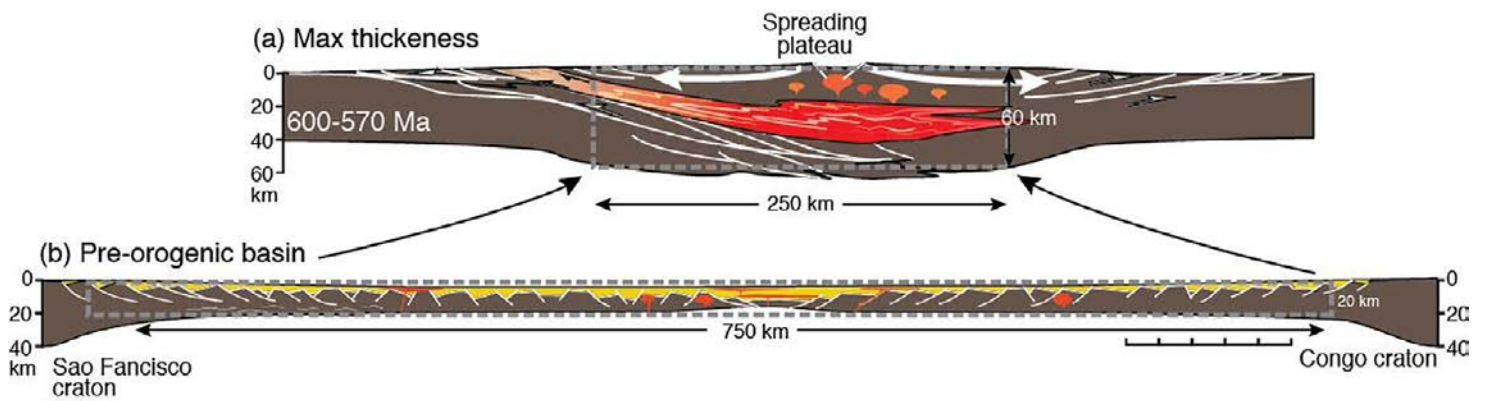
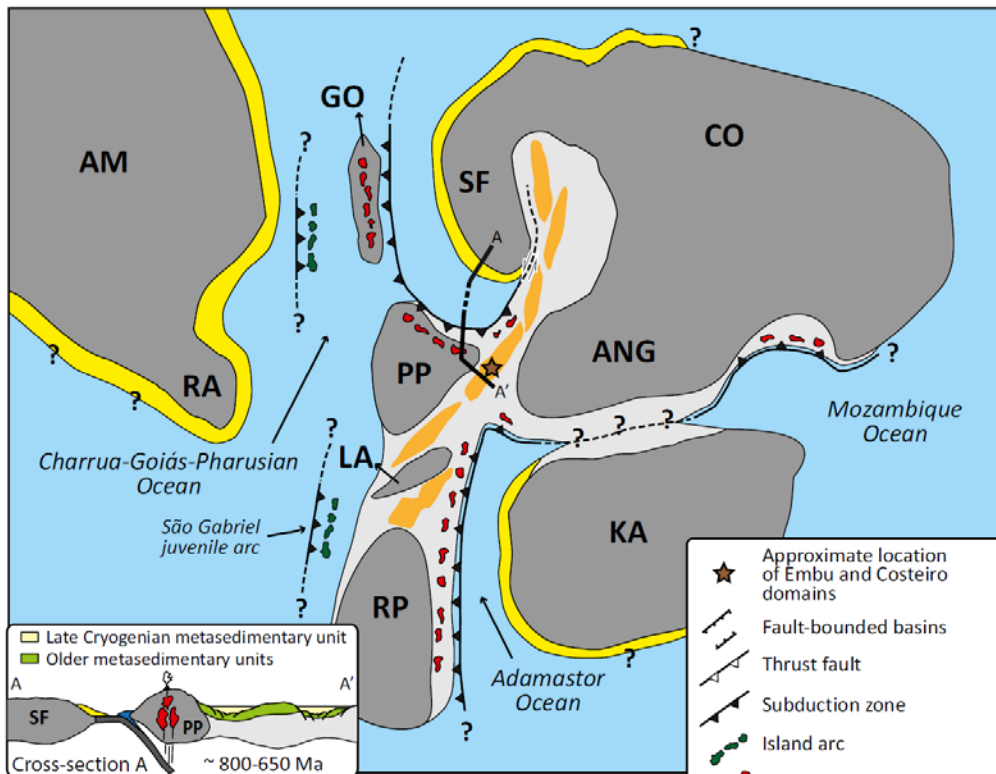
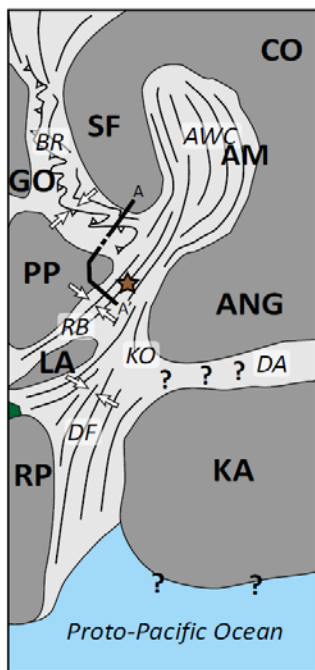


Figura 2.11 – a) Seção transversal esquemática do Orógeno Araçuaí durante o momento de fusão parcial da crosta média. b) Ilustração de como a bacia pré-orogênica de Macaúbas pode ter sido. A descontinuidade de Moho foi arbitrariamente colocada a 20 km de profundidade. O retângulo pontilhado em a) reflete a espessura média da crosta na parte espessada do Orógeno, e a forma pré-orogênica correspondente desta área é apresentada pelo retângulo em b) (figura extraída de Cavalcante *et al.* 2019).

(a) ~ 800-650 Ma



(b) ~ 650-600 Ma



(c) ~ 600-560 Ma

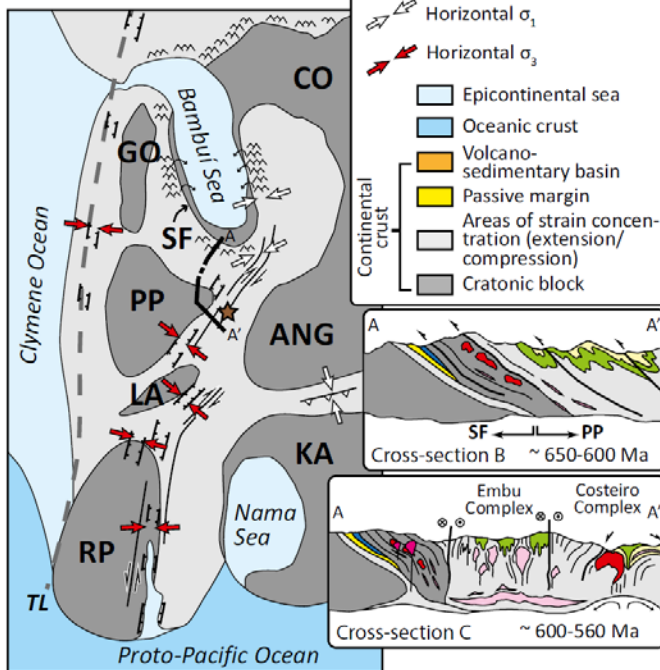


Figura 2.12 – Em a, b e c, tem-se a representação da geodinâmica dos sistemas orogênicos brasileiros, das etapas entre os períodos Criogeniano (aproximadamente 800-650 Ma), final do Criogeniano e início do Ediacarano (aproximadamente 650-600 Ma) e Ediacarano (aproximadamente 600-560 Ma), respectivamente. AM, Cráton da Amazônia; ANG, Bloco de Angola; CO, Cráton do Congo; GO, Bloco de Goiás; KA, Cráton de Kalahari; LA, Cráton Luis Alves; PP, Bloco Paranapanema; RA, Bloco Rio Apa; RP, Cráton Rio de La Plata; SF, Cráton São Francisco; SL, Cráton São Luís; WA, Cráton da África Ocidental; TL, Lineamento Transbrasiliiano (figura extraída de Meira *et al.* 2019a).

ESTADO DA ARTE DA CLASSIFICAÇÃO GRANÍTICA E TÉCNICAS ESTATÍSTICAS

3.1 CLASSIFICAÇÃO PARA GRANITOIDES

Granitos geralmente estão associados a outras rochas ígneas, sejam elas plutônicas ou vulcânicas. Essa associação de rochas ígneas pode se apresentar como uma assembleia de corpos cogenéticos, porém não necessariamente comagmáticos. Uma perspectiva para a compartimentação litodêmica dessas assembleias, é a adoção dos termos: ‘unidades/superunidades’ por Pitcher *et al.* (1985) ou de ‘suítes/supersuítes’ por White *et al.* (2001) (e.g., Bonin *et al.* 2020).

Para além do agrupamento em função da natureza cogenética de suítes/supersuítes, ao longo dos anos, os esquemas de classificação granítica empenharam-se em investigar mais profundamente, a natureza essencial do magma gerador de uma rocha ígnea, por conseguinte, a fonte e suas características físico-químicas. Os esquemas classificatórios como: a classificação I/S de Chappell & White (1974), a classificação das séries Ilmenita/Magnetita de Ishihara (1977), Frost *et al.* (2001) ou Frost & Frost (2008), atentam-se a parâmetros supostamente fundamentais para a distinção de uma associação ígnea. Porém é advertido por Bonin *et al.* (2020), que tais esquemas se baseiam em um modelo específico ou em um único paradigma de formação granítica, e, portanto, podem ser de difícil aplicação para além da situação ou área originais de estudo.

Devido às limitações das ferramentas disponíveis para uma observação mais completa das rochas, as análises iniciais baseavam-se principalmente na análise modal quantitativa da mineralogia, como, por exemplo, a análise modal dos minerais félsicos. Com o avanço e o desenvolvimento de novos métodos analíticos, tornou-se possível aprofundar o nível de detalhamento e observação, incluindo a investigação de elementos maiores/traço e possibilitando a classificação dos granitoides com base em dados brutos, índices químicos ou normas. Os esforços do desenvolvimento de um esquema de classificação descritivo atingiram um ápice entre os anos 70 e 80, com a publicação de esquemas sistemáticos de classificação, como:

Streckeisen (1976), baseado na composição e proporção modal; Le Bas *et al.* (1992) e De La Roche *et al.* (1980), baseados na química de rocha total. Apesar de tais avanços, as duas abordagens de classificação nunca atingiram um consenso (Bonin *et al.* 2020).

Nessa mesma época, surgiram novas abordagens para se classificar granitoides, que buscavam se desvencilhar de análises descritivas que visavam dar nome a dada rocha, e se direcionavam para uma classificação mais interpretativa, a exemplo, dos trabalhos de Chappell & White, (1974); Debon & Le Fort, (1983 e 1988); Barbarin, (1999); Frost *et al.* (2001), estes últimos já na década de 90 e anos 2000. As análises e interpretações petrogenéticas de elementos traço também se tornaram corriqueiras, apesar de não serem completamente diretas, uma vez que os elementos traço são muito controlados pela saturação e fracionamento de várias fases acessórias, e devem ser utilizadas com cautela (Janoušek *et al.* 2016, 2019).

Apesar dos avanços atuais nas técnicas analíticas para elementos traço e dados isotópicos, os elementos maiores continuam sendo de extrema importância. Como são os constituintes fundamentais da cristaloquímica, eles devem refletir diretamente as proporções modais dos principais minerais que compõem as rochas. Por isso, são essenciais para o propósito de classificação (Bonin *et al.* 2020).

Levando em consideração os fatos expostos, Bonin *et al.* (2020) assinalam diferentes características geoquímicas para melhor se analisar a composição de rochas granitoides, sendo:

- I. o *grau de diferenciação*. Desde o trabalho pioneiro de Harker (1909), o parâmetro mais comumente utilizado como *proxy* para se observar o grau de diferenciação de granitoides é o conteúdo de SiO₂ (wt. %). Já que o conteúdo de sílica se correlaciona negativamente com a maioria dos óxidos, e particularmente com óxidos máficos como, MgO, FeO, TiO₂ e, em um menor grau, CaO. O índice de diferenciação (*Differentiation Index* (DI)) de Thornton & Tuttle (1960), ou parâmetros como, “valor de Si” de Niggli (1923) ou os valores multicatiônicos Q e B (maficidade) de Debon & Le Fort (1983,

1988), estão geralmente associados;

- II. a “*alcalinidade*” dada pelo balanço entre álcalis formadores-de-feldspato e os cátions alcalinos-terrosos (Na e K, Ca). Além dos importantes indicadores, que incluem quantidades normativas de feldspatos obtidas através de várias normas; diagrama normativo Ab-An-Or (O’Connor 1965), diagrama de álcali-agregado (Peacock 1931) e os índices MALI (Frost *et al.* 2001), bem como o parâmetro multicatiônico P de Debon & Le Fort (1983, 1988);
- III. a “*aluminosidade*” dada pelo excesso/deficiência de alumina com relação à estequiometria de feldspatos. Esta é a lógica de vários diagramas, que utilizam as razões como $A/CNK \times A/NK$, com valores normativos (córindon normativo, ou metassilicatos aegirina/sódio) e combinação linear de variáveis (parâmetro catiônico A de Debon & Le Fort, 1983);
- IV. o *balanço entre Fe e Mg*, principalmente para rochas alcalinas ou quase alcalinas;
- V. o *balanço entre Na e K* que pode ser expresso pelo parâmetro k de Niggli (1923) ou, simplesmente por várias razões como, K/Na [K_2O/Na_2O , $K/(Na + K)$]. Como os conteúdos de K_2O estão, geralmente, positivamente correlacionados com o conteúdo de SiO_2 , seus valores absolutos podem não ser diagnósticos. Até mesmo o diagrama simples SiO_2 - K_2O , mostra como os valores de K_2O evoluem com o aumento de SiO_2 , capturando efetivamente, grande parte dessa informação.

Tendo em vista todos esses importantes parâmetros, é proposto que o melhor caminho para se classificar granitoides deva ser:

- com base em critérios mais passíveis de tratamento objetivo, como a plotagem de diagramas, a aplicação de algoritmos e análises estatísticas, é preferível em relação a observações qualitativas;

- idealmente, é preferível utilizar elementos maiores, pois eles possibilitam a ligação das propriedades químicas com os principais minerais formadores de rocha (aproximando-se da mineralogia essencial observada na rocha). Por outro lado, os elementos traço têm comportamento independente em relação às fases principais - eles podem substituir cátions nos minerais formadores de rocha ou formar minerais acessórios independentes, fornecendo informações diferentes dos elementos maiores;
- recomenda-se utilizar representações simples dos dados para elementos maiores, facilitando a associação entre os dados dos elementos maiores presentes na rocha total e as proporções modais e composicionais/estruturais dos minerais formadores de rocha. Nesse sentido, o uso de valores em peso percentual (wt. %) para óxidos pode ser inadequado para expressar tais propriedades químicas, sendo preferível utilizar os elementos em proporções atômicas (e.g. valor em milicátions, etc.).

Sob essa ótica, a classificação ideal deve ser baseada em diversos diagramas que assinalem propriedades geoquímicas essenciais para granitoides, como:

1. *Acidez* (ou *maficidade*), na forma de Si, Fe + Mg, etc.;
2. *Acalinidade*, relacionada com o balanço entre Na + K e Ca;
3. *Aluminosidade*, expressa pelo balanço entre Al e Ca, Na e K;
4. *Balanço entre a razão Fe/Mg*;
5. *Balanço entre a razão Na/K e os conteúdos de K em relação aos conteúdos de SiO₂*.

A classificação ideal deve se concentrar na identificação de tendências e associações, em vez de se basear em composições individuais. Embora existam esquemas de classificação que abordem essas análises químicas de forma mais criteriosa, como os trabalhos de Debon & Le Fort (1983, 1988), Villaseca *et al.*

(1998), Frost *et al.* (2001), Moyen *et al.* (2017), ainda não há uma classificação universalmente aceita que abranja todos os aspectos mencionados acima. No entanto, as classificações que utilizam valores multielementares em milicátions, como os diagramas propostos por Debon & Le Fort (1983, 1988) e seus derivados, são as mais próximas de uma classificação "ideal" para granitoides (Bonin *et al.* 2020).

3.2 BANCO DE DADOS COMPARATIVO DE BONIN *ET AL.* (2020) E MOYEN *ET AL.* (2021)

Para a classificação final das amostras neste estudo, foram utilizados dados geoquímicos de aproximadamente 6600 amostras de granitoides, representativas dos principais tipos de granitos encontrados na Terra. Essas amostras foram inicialmente classificadas e separadas por Bonin *et al.* (2020) e Moyen *et al.* (2021) em "tipos" e "subtipos" de acordo com a abordagem proposta por Barbarin (1999), seguindo a mesma lógica do autor. Essa classificação baseia-se principalmente em aspectos e considerações petrológicas, como tipo de rocha, minerais essenciais e minerais-chave, entre outros parâmetros. Em alguns casos, também foram considerados diferentes contextos geológicos. Os subtipos, derivados da classificação em tipos de acordo com Barbarin (1999), são fundamentados em indicadores químicos que distinguem afinidades químicas internas.

3.3 TIPOS E SUBTIPOS DEFINIDOS POR BARBARIN (1999)

O conjunto de afinidades químicas, juntamente com a posição em diagramas classificatórios como Ab-An-Or (O'Connor, 1995) e QAP de Streckeisen (1976), foi utilizado como um dos parâmetros para diferenciar e agrupar os granitoides em "tipos" e "subtipos" com equivalências petrogenéticas. Esse agrupamento foi amplamente baseado nos "tipos" e "subtipos" modificados propostos por Barbarin (1999), conforme mencionado anteriormente. Embora possam ter ocorrido omissões acidentais, os dados compilados dos granitoides presentes no banco de dados utilizado por Bonin *et al.* (2020) representam, de forma geral, os principais grupos ou sistemas graníticos da Terra. Portanto, as amostras foram separadas em:

- I. **Granitos tholeíticos de dorsal (*Ridge tholeiitic granites – RTG*)**. Os RTGs são comumente associados ou com ofiolitos/crosta oceânica ou com platôs basálticos. São um tipo pouco comum e, portanto, representam menos de 1% do volume de amostras do banco de dados. Ocupam o campo dos plagiogranitos oceânicos (*oceanic plagiogranites – OP*) no diagrama de elementos-traço de Maniar & Piccoli (1989), ou o campo de granitos de dorsal oceânica (*ocean ridge granites – ORG*) nos diagramas de Pearce *et al.* (1984). Por vezes, se assemelham a granitoides tipos A na classificação S-I-M-A.

- II. **Granitoides cálcio-alcálicos ricos em anfibólio (*Amphibole-rich calc-alkaline granitoids – ACG*) e granitoides tholeíticos (*‘tholeiitic’ granitoids – ATG*)**. Os dois tipos (ACGs e ATGs) compõem cerca de 32% da database compilada e são comumente encontrados em zonas de margem continental ativa (e.g., Andes, Japão). Podem formar batólitos cordilheiranos clássicos, porém também são encontrados em configurações mais ambíguas como o Cinturão de dobramentos Lachlan (*Lachlan Fold Belt – LFB*). São geralmente granitoides tipo I e ocupam os campos de granitoides de arco de ilha e/ou granitoides de arco-continental (IAG e CAG) nos diagramas de Maniar & Piccoli (1989), e já nos diagramas de Pearce *et al.* (1984), ocupam o campo de granitos de arco vulcânico (VAG). Dentre esses dois tipos de granitoides ACGs e ATGs distinguem-se uma série de subgrupos com especificidades nas afinidades químicas internas, sendo esses dois tipos então, subdivididos em (1) *ACGs comuns*; (2) *ACGs levemente alcalinos*; (3) *ATGs tholeíticos*; (4) *ACGs relativamente aluminosos*. O subgrupo dos ACGs aluminosos, podem sobrepor com os campos de granitoides do tipo CPG/MPG (que serão abordados em seguida), e essa variedade de granitos correspondem, em parte, com o que geralmente se refere como granitos transicionais tipo I-S.

- III. **Granitoides peraluminosos portadores-de-cordierita (*Cordierite-bearing peraluminous granitoids – CPG*) e granitoides peraluminosos portadores-de-muscovita (*Muscovite-bearing peraluminous granitoids – MPG*)**. Esses dois grupos compõem cerca de 22% da database utilizada

por Bonin *et al.* (2020). Os granitoides CPG são representativos para os granitos tipo-S definidos no LFB por Chappell & White (1974), enquanto os granitoides MPG são ainda mais leucocráticos e se aproximam da composição granítica mínima (granito mínimo). Dessa maneira, pode-se obter essa classificação para os membros finais (*end members*) de rochas muito diferenciadas em diversos plutons. Os tipos CPG e MPG são quimicamente distintos e ambos ocupam os campos dos diagramas de Pearce *et al.* (1984) de granitos sin-colisionais (*syn-COLG*) e nos diagramas de Maniar & Piccoli (1989) de granitoides de colisão-continental (*CCG*).

- IV. **Granitoides calci-alcinos ricos em potássio (*K-rich calc-alkaline granitoids – KCG*)**. O grupo KCG constitui 20% da database utilizada. É o grupo com maior dificuldade para se definir. Nos diagramas de Maniar & Piccoli (1989), ocupam o campo de granitoides de *uplift* epirogênico (*CEUG*). Os KCG não são definidos segundo a classificação S-I-M-A, não ocorrem no LFB, e quando se utiliza esse sistema de classificação para essas rochas, são tidos como mais próximos de granitos tipo-I, uma vez que não são peraluminosos. Em contrapartida, pelo fato dos KCG possuírem altos conteúdos de K, apresentarem alto conteúdo de álcalis no geral, alguns são descritos como tipo-A (“tipo-A orogênicos” e “tipo-A oxidados”). Os KCG são encontrados em uma grande variedade de ambientes tectônicos, mas ocorrem predominantemente nos ambientes pós-colisionais a pós-orogênicos. São identificadas uma série de variações químicas que os distinguem e subgrupam, como: (1) suíte alto-K, que são geralmente subalcalinos, magnesianos e se associam à rochas máficas (chamados ‘vaugneritos’, ‘appinitos’ e ‘redwitzitos’), e são essencialmente similares aos sanukitoids Arqueanos, por vezes descritos como granitoides alto Ba-Sr; (2) a suíte ultra-potássica, são alcalinos, fortemente magnesianos (chamados ‘durbachitos’); (3) a suíte ‘A2’, também alcalina, mas geralmente de caráter ferroano e levemente peraluminosos. As suítes alto-K e ultra-potássicas são geralmente pós-colisionais e a suíte A2, pós-orogênicos.
- V. **Granitoides peralcalinos e granitoides alcalinos (*Peralkaline and alkaline granitoids – PAG*)**. Este grupo compõe cerca de 15% da database e estão comumente associados à ambientes de *rift* e *hotspot*. São do tipo-A, e ocupam os campos de granitos intra-placa (*WPG – Within plate*

granitoids) dos diagramas de distinção tectônica de Pearce *et al.* (1984) e granitoides de *rift* nos diagramas de Maniar & Piccoli (1989). Possuem uma química muito distintiva, sendo fortemente alcalinos, ferroanos, metaluminosos a peralcalinos. Comumente se observa uma composição modal pouco usual, possuindo silicatos máficos sódicos, como aegirina e riebeckita.

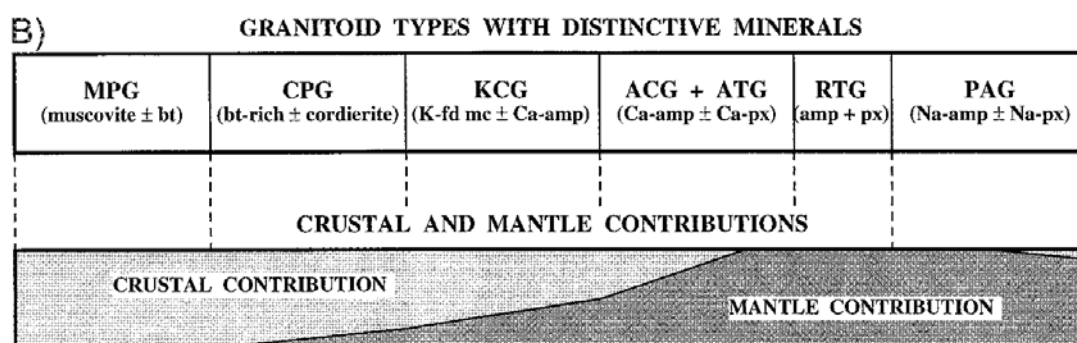
- VI. **TTGs arqueanos (*Archean tonalites, trondhjemites and granodiorites – TTG*)**. Constituem 10% da database e apesar de não aparecerem do esquema classificatório de Barbarin (1999), apresentam comportamento químico marcante que os distinguem dos demais granitoides.

Como sugerido por Pupin (1980) e enfatizado por Barbarin (1999), a melhor maneira de distinguir entre as variedades de granitoides é determinar se eles são de origem mista (crustal + mantélica), se são de origem puramente ou essencialmente crustal e se são de origem puramente ou principalmente mantélica (**ver Figura 3.1**).

Em resumo, podem ser definidos 6 tipos de granitoides com base em suas associações minerais, critérios de campo, dados petrográficos e químicos. Existem dois tipos de granitoides peraluminosos de origem puramente ou essencialmente crustal (MPG e CPG, respectivamente), dois tipos de granitoides calcioalcalinos de origem mista (KCG e ACG) e dois tipos de granitoides 'tholeíticos' ou alcalinos de origem puramente ou principalmente mantélica (ATG ou RTG e PAG, respectivamente).

A)

GRANITOID TYPES		ORIGIN	GEODYNAMIC ENVIRONMENT
Muscovite-bearing Peraluminous Granitoids	MPG	CRUSTAL ORIGIN PERALUMINOUS GRANITOIDS	CONTINENTAL COLLISION
Cordierite-bearing Peraluminous Granitoids	CPG		
K-rich Calc-alkaline Granitoids (High K - Low Ca)	KCG	MIXED ORIGIN (Crust + Mantle) METALUMINOUS AND CALC-ALKALINE GRANITOIDS	TRANSITIONAL REGIMES
Amphibole-bearing Calc-alkaline Granitoids (Low K - High Ca)	ACG		SUBDUCTION
Arc Tholeiitic Granitoids	ATG	MANTLE ORIGIN THOLEIITIC, ALKALINE AND PERALKALINE GRANITOIDS	OCEANIC SPREADING OR CONTINENTAL DOMING AND RIFTING
Mid-ocean Ridge Tholeiitic Granitoids	RTG		
Peralkaline and Alkaline Granitoids	PAG		



C)

CHEMISTRY	MPG	CPG	KCG	ACG	RTG	PAG
Alumina Index A / KCN (molar)	A ≥ CNK ≥ 1		CNK > A > NK < 1			A ≤ NK alkaline
Al ₂ O ₃	x x x	x x x	x x	x x	x x	x
CaO	x	x	x x	x x x	x x	x
Na ₂ O	x x	x x	x x	x x	x x x	x x x
K ₂ O	x x	x x x	x x x	x x	x	x x x
FeOt+MgO+MnO	x	x x	x x	x x x	x x	x x
Fe ³⁺ /(Fe ³⁺ +Fe ²⁺)	x	x	x x	x x x	x x x	x x
FeOt/(FeOt+MgO)	< 0.8	< 0.8	0.8 - 1.0	< 0.8	> 0.8	> 0.8
⁸⁷ Sr / ⁸⁶ Sr	.706 to .760	> .708	.706 to .712	.706 to .708	≤ .704	.704 to .712
εNd	- 4 to -17	- 6 to - 9	- 4 to - 9		-	-
δ ¹⁸ O (‰)	+ 10 to +14	+ 10 to + 13	+ 5 to + 10		-	-
δ ³⁴ S (‰)	- 12 to + 2		+ 5 to + 20		-	-

(x : low; xx : medium; xxx : high)

Figura 3.1 – Síntese proposta por Barbarin (1999), onde se observa: A) uma síntese sobre a relação entre os tipos/subtipos petrogenéticos, suas origens e o ambiente geodinâmico dominante; B) diagrama esquemático dos tipos/subtipos petrogenéticos em relação as suas assembleias minerais típicas, e proporções dos componentes crustal e mantélico em sua gênese; C) as principais características de cada tipo/subtipo.

3.4 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA GEOQUÍMICA DAS ROCHAS MAGMÁTICAS PLUTÔNICAS

A geoquímica das rochas magmáticas plutônicas desempenha um papel pivotal em nossa compreensão das origens, evoluções e interações de sistemas geológicos/magmáticos. Cada elemento químico ou isotópico pode funcionar como um traçador, fornecendo pistas sobre as condições e os processos que governaram a formação da rocha (Rollinson, 1993). No entanto, a natureza multivariada dos conjuntos de dados geoquímicos, juntamente com a sua complexidade e heterogeneidade, pode tornar a interpretação um desafio.

No contexto desses desafios, a estatística se apresenta como uma aliada poderosa (Aitchison, 1986). A estatística não é apenas uma ferramenta para resumir ou descrever dados; é uma metodologia rigorosa que permite a identificação de padrões, a quantificação de incertezas e a geração de previsões. No campo da geoquímica, onde os dados podem ser profundamente inter-relacionados e frequentemente ruidosos, a aplicação adequada de técnicas estatísticas pode desemaranhar complexidades, revelando a essência dos processos geoquímicos subjacentes (Reimann *et al.* 2008).

Ao adotar técnicas estatísticas avançadas, podemos extrair *insights* mais profundos e precisos dos dados geoquímicos. Por exemplo, técnicas de análise multivariada, como a Análise Discriminante Linear - LDA, permitem discernir agrupamentos sutis e identificar variáveis que são mais discriminantes para a separação de grupos ou classes. Essa quantificação precisa é essencial para tomar decisões informadas, desenvolver teorias geológicas robustas e avaliar a consistência/confiabilidade de um banco de dados (Verma, 2013).

3.4.1 Análise Discriminante Linear (LDA)

A Análise Discriminante Linear (LDA) é uma técnica estatística multivariada introduzida por Ronald A. Fisher em 1936 como um meio de caracterizar ou discriminar entre duas ou mais classes previamente definidas nos dados (Fisher, 1936). A ADL busca encontrar combinações lineares das variáveis independentes que proporcionem a melhor discriminação entre os grupos de interesse.

3.4.1.1 Fundamentos Matemáticos da LDA

A matemática subjacente à LDA deriva da teoria da análise multivariada e incorpora aspectos essenciais da álgebra linear e cálculo vetorial (Johnson & Wichern, 2002). Em sua essência, a LDA tem como objetivo maximizar a variância entre os grupos ao mesmo tempo que minimiza a variância dentro dos grupos.

Para visualizar isso (veja **Figura 3.2**), imagine que temos dados bidimensionais de dois grupos distintos representados em um gráfico de dispersão. A LDA busca identificar uma linha (ou em dimensões maiores, um hiperplano) que melhor separe esses dois grupos.

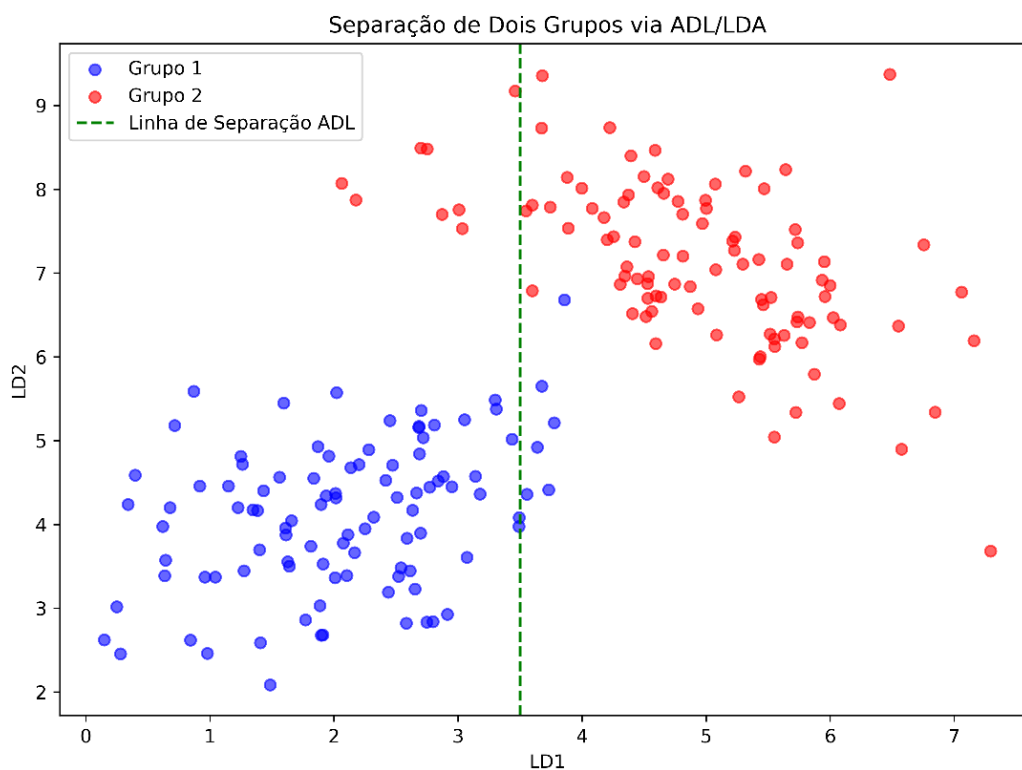


Figura 3.2 – Diagrama bidimensional ilustrando a separação de dois grupos distintos utilizando Análise Discriminante Linear (LDA). Os pontos azuis e vermelhos representam os dados de dois grupos diferentes. A linha pontilhada verde é a linha de separação determinada pela LDA, que tenta maximizar a distância entre os centroides dos grupos enquanto minimiza a variação dentro de cada grupo. Os parâmetros LD1 e LD2 são eixos ortogonais entre si, que definem um hiperplano hipotético, e que durante a análise LDA se mostraram eficientes em observar o contraste da distribuição multivariada entre as classes, enquanto minimiza a distância intra-classe.

3.4.1.2 Cálculos Envolvidos

A direção que maximiza a separação entre os grupos é determinada com base em duas matrizes de dispersão: a matriz de dispersão dentro do grupo (**S_w**)

e a matriz de dispersão entre os grupos (S_b – Mardia, Kent & Bibby, 1979). A direção ótima é identificada ao resolver o problema de autovalor/autovetor generalizado:

$$(Eq.1) S_W^{-1} S_B v = \lambda v$$

Onde v é o autovetor associado ao autovalor λ . Os autovetores determinam as direções da nova característica, enquanto os autovalores determinam sua magnitude. Em outras palavras, quanto maior o autovalor, maior a discriminação proporcionada pela característica correspondente.

3.4.1.3 Interpretação e Aplicação da LDA

Após a análise, os resultados são interpretados em termos das combinações lineares das variáveis originais (**Figura 3.3**). Estas combinações são denominadas funções discriminantes e podem ser utilizadas para classificar novas observações nos grupos predefinidos.

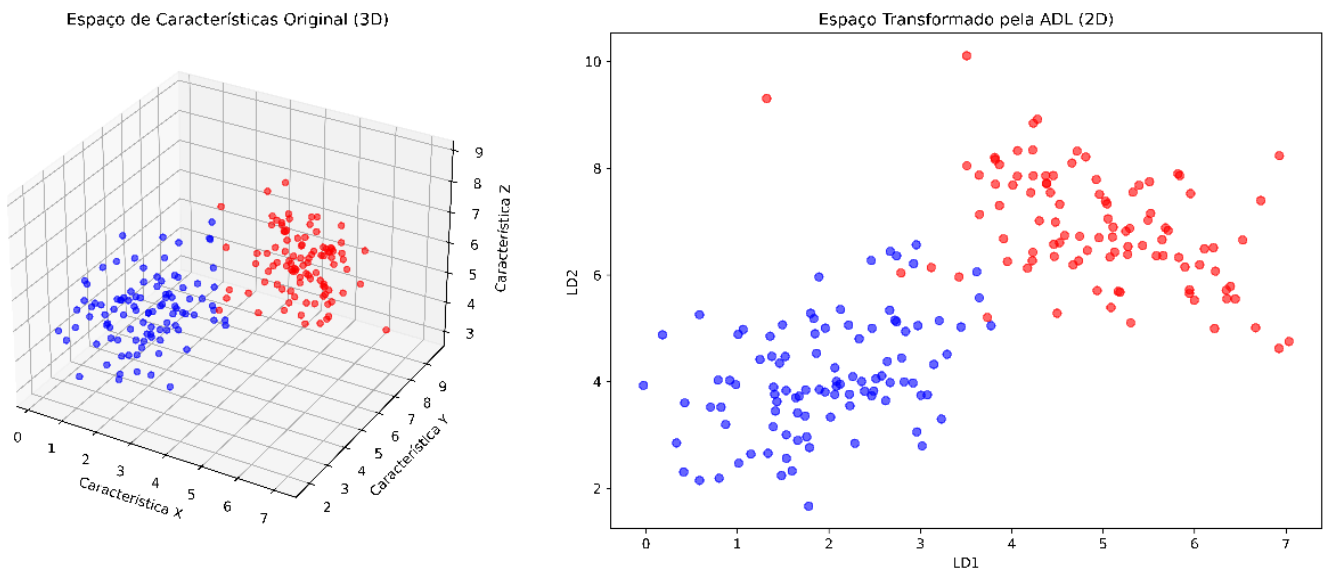


Figura 3.3 – À esquerda, temos diagrama tridimensional do Espaço de Características Original (3D), que representa as três características originais dos dados. Os pontos azuis e vermelhos representam os dados de dois grupos diferentes. À direita, temos diagrama bidimensional do Espaço Transformado pela LDA (2D). Depois de aplicar a Análise Discriminante Linear, os dados são projetados em um espaço de menor dimensão (neste caso, 2D). Note que, neste espaço transformado, a separação entre os grupos é mais clara, o que é o objetivo da LDA. Estas imagens ajudam a visualizar como a LDA opera, transformando os dados de um espaço de alta dimensão para um espaço de menor dimensão, onde a separação entre grupos é maximizada.

É fundamental notar que a LDA, como qualquer técnica estatística, possui suposições subjacentes. A normalidade multivariada dos dados e a

homogeneidade das matrizes de covariância (ver Capítulo 4) são pré-requisitos essenciais para garantir a validade da análise (Huberty, 1994).

A transformação LDA pode ser compreendida em 3 etapas principais:

1. Cálculo das Matrizes de Dispersão

- **Matriz de Dispersão Intra-classe (S_W):** Esta matriz representa a dispersão dentro de cada classe. É uma soma das matrizes de covariância de cada classe (Duda & Hart, 1973):

$$(Eq. 2) \quad S_W = \sum_{i=1}^c S_i$$

onde (S_i) é a matriz de covariância da classe i , e c é o número de classes;

- **Matriz de Dispersão Inter-classes (S_B):** Esta matriz representa a dispersão entre as classes. Ela é calculada com base nas médias de cada classe (μ_i) e na média geral dos dados (μ – Bishop, 2006):

$$(Eq. 3) \quad S_B = \sum_{i=1}^c N_i (\mu_i - \mu)(\mu_i - \mu)^T$$

onde (N_i) é o número de amostras na classe i ;

2. Determinação dos Autovetores e Autovalores

Com as matrizes de dispersão definidas, o próximo passo é resolver a equação de autovalor:

$$(Eq. 1) \quad S_W^{-1} S_B \mathbf{v} = \lambda \mathbf{v}$$

Aqui, deseja-se encontrar os autovetores (\mathbf{v}) que maximizam este parâmetro. Os autovalores (λ) indicam a quantidade de "informação" (ou seja, a variância discriminante) capturada pelo respectivo autovetor (Mika *et al.* 1999).

3. Ordenação e Seleção

Depois de obter os autovalores e autovetores, ordenam-se os autovalores em ordem decrescente e escolhem-se os primeiros k autovetores, onde k é o número de classes menos um. Estes k autovetores formam um novo subespaço

que é usado para projetar os dados (Jolliffe, 2002). Esta projeção é o resultado da transformação LDA.

Neste contexto, o presente trabalho buscou automatizar e otimizar a etapa de cálculo das LDAs utilizando as potencialidades do *Python*, em especial com o auxílio das bibliotecas *Matplotlib* e, especialmente a *Scikit-learn*, a qual oferece ferramentas robustas para análise de dados e modelagem estatística.

3.4.1.4 Distância Intra- e Inter-Classes

No contexto da análise de dados e reconhecimento de padrões, a quantificação da similaridade ou dissimilaridade entre amostras ou grupos é uma tarefa crucial. Para elucidar essas distinções, os conceitos de distâncias intra- e inter-classes são frequentemente empregados (Fisher, 1936).

- I. **Distância Intra-classe:** Refere-se à medida de dispersão ou variação dentro de um grupo particular. Em outras palavras, expressa a distância entre as amostras de um mesmo grupo e o centroide desse grupo (que é o ponto médio de todas as amostras naquele grupo). Um valor baixo para a distância intra-classe indica que as amostras dentro desse grupo são muito similares entre si, enquanto um valor alto sugere uma grande variabilidade dentro do grupo (Duda & Hart, 1973).
- II. **Distância Inter-classe:** Por outro lado, refere-se à medida de separação entre grupos distintos. Especificamente, ela quantifica a distância entre os centroides de dois grupos diferentes. Um valor elevado de distância inter-classe sugere que os grupos são bem distintos ou separados entre si, enquanto um valor baixo pode indicar sobreposição ou similaridade entre os grupos.

Para visualizar estes conceitos, consideremos dois grupos fictícios de amostras (**ver Figura 3.4**): Grupo A e Grupo B. Vamos ilustrar as distâncias intra-classe para o Grupo A e as distâncias inter-classe entre os Grupos A e B.

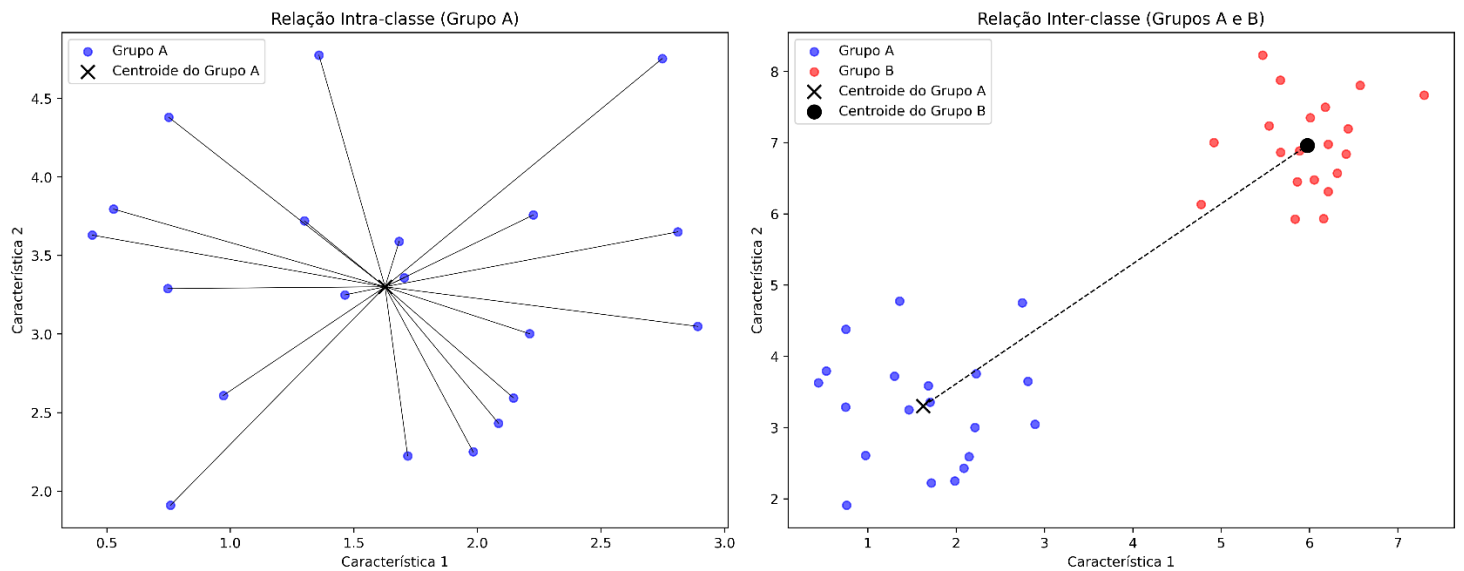


Figura 3.4 – Na figura a esquerda, a relação Intra-classe do Grupo A e seu centroide; à direita, distância Inter-classes dos grupos A e B.

No primeiro gráfico, podemos observar as distâncias intra-classe para o Grupo A, representadas pelas linhas ligando cada ponto ao centroide do grupo. Já no segundo gráfico, a distância inter-classe entre os Grupos A e B é ilustrada pela linha pontilhada ligando os centroides de ambos os grupos.

Estes conceitos são fundamentais em diversas técnicas estatísticas, como a Análise Discriminante Linear (LDA), onde a maximização da distância inter-classe e a minimização da distância intra-classe são objetivos centrais (Jolliffe, 2002).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ETAPA DE TRATAMENTO DOS DADOS GEOQUÍMICOS

O tratamento adequado dos dados é uma etapa crucial em qualquer análise científica. No contexto dos dados geoquímicos sob investigação, várias etapas de pré-processamento foram necessárias para garantir a validade e confiabilidade dos resultados subsequentes. Para se realizar as próximas etapas do presente trabalho, foram utilizadas 1243 amostras pertencentes aos 6 grupos definidos pelas supersuítes (**Figura 4.1**).

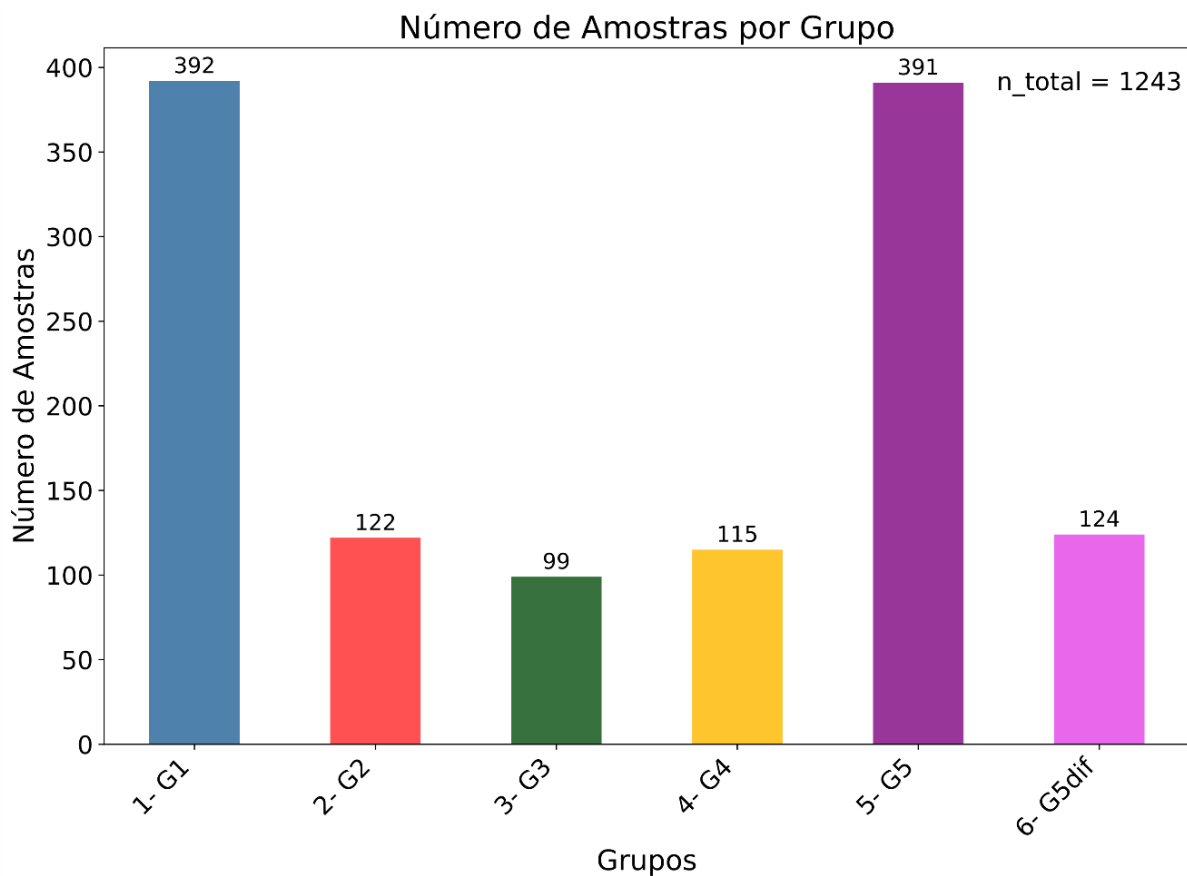


Figura 4.1 – Gráfico representativo do quantitativo de amostras e/ou dados químicos de rocha total compilados da literatura e individualizados nos diferentes grupos (supersuítes).

4.1.1 Normalização das Concentrações Dos Óxidos

A primeira e fundamental etapa do tratamento foi a normalização dos dados. Dada a natureza das amostras geoquímicas, as concentrações dos óxidos em cada amostra foram normalizadas para totalizar 100% em peso (%wt.). Esta etapa é essencial para garantir que as concentrações relativas dos

óxidos sejam representadas de forma consistente em todas as amostras, permitindo comparações significativas entre elas (Aitchison, 1986).

É imperativo reconhecer a natureza intrinsecamente composicional dos dados geoquímicos. As características, neste caso, as concentrações dos óxidos, fornecem informações que são relativas entre si. A restrição de que a soma totalize 100% em peso não é apenas uma característica dos dados, mas uma restrição intrínseca que carrega informações valiosas sobre a relação entre os óxidos (Rollinson, 2021). Frequentemente, em análises estatísticas, os dados são padronizados para ter média zero e desvio padrão unitário. No entanto, no contexto dos dados geoquímicos, tal transformação pode ser inapropriada. A padronização, ao perturbar a relação inerente entre as características/concentrações dos óxidos, pode distorcer a informação composicional contida nos dados (Rollinson, 2021). Além disso, dada a escala comum (% em peso) já presente nos dados, a necessidade de padronização é menos crítica e pode, em alguns casos, ser contraproducente.

Nesta fase, convertemos os distintos estados de oxidação do ferro para uma única medida representativa, o ferro total (FeOt), onde (I) $\text{FeO} = \text{FeOt}$ e (II) $\text{FeOt} = \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{t} * 0,8998$.

4.1.2 Transformação Centered Log-Ratio (CLR)

Para mitigar o efeito de fechamento, onde a soma das partes totaliza uma constante, geralmente 100% ou 1, que pode influenciar negativamente as análises estatísticas e conduzir a interpretações equivocadas, aplicou-se a transformação *Centered-log-ratio* (**clr** – Aitchison, 1986) aos 10 elementos-maiores do banco de dados (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeOt, MnO, MgO, CaO, K_2O , Na_2O , P_2O_5). Essa transformação implica na tomada do logaritmo natural de cada componente dividido pela média geométrica de todos os componentes. Tal procedimento centraliza os dados, atenuando o efeito de fechamento e tornando os dados mais aptos para análises estatísticas convencionais.

Durante a análise preliminar dos dados geoquímicos, identificou-se a presença de valores zero para alguns óxidos em várias amostras. Estes valores zero podem ser interpretados como concentrações abaixo do limite de detecção

(LOD) do instrumento utilizado para a análise, no caso, a Fluorescência de Raios-X (XRF).

A presença de valores zero pode ser problemática, especialmente quando se realiza transformações logarítmicas nos dados, como é o caso da transformação *Centered-log-ratio (clr)*. Para contornar esse problema, adotou-se uma abordagem padrão em geoquímica, substituindo os valores zero por um valor "quase-zero", correspondente ao limite de detecção (*LOD*) do método analítico ou instrumento utilizado. Utilizamos os seguintes LODs médios para os óxidos identificados com valores zero:

- TiO₂: 0,01%;
- MnO: 0,01%;
- MgO: 0,01%;
- P₂O₅: 0,01%;

A transformação *clr* é então definida por:

$$\text{clr}(x_i) = \ln \left(\frac{x_i}{g(x)} \right)$$

Onde x_i ($x = [x_1, x_2, x_3 \dots x_i]$) é a concentração do *i-ésimo* elemento e $g(x)$ é a média geométrica de todas as concentrações dos elementos na amostra.

As etapas de cálculo realizadas foram:

1. Cálculo da média geométrica ($g(x)$) de todos os elementos para cada amostra;
2. Aplicação da transformação *clr* a cada elemento, dividindo sua concentração pela média geométrica da amostra a qual pertence e tomando o logaritmo natural do resultado;
3. Armazenamento dos valores transformados, representando agora a variação composicional em um espaço sem a restrição do fechamento (efeito *closure*).

4.2 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DE DADOS (EDA)

Uma importante etapa preparatória para a execução da LDA foi a etapa da Análise Exploratória de Dados (EDA), onde testes de correlação são

ferramentas essenciais para se avaliar a relação entre as variáveis de interesse (no presente trabalho, são os elementos maiores) e verificar se existem correlações, fortes, moderadas ou fracas, entre os componentes de análise. Em estudos multidimensionais, particularmente aqueles que envolvem múltiplas variáveis, é imperativo entender as relações intrínsecas entre as variáveis em questão. A análise de correlação surge como uma ferramenta estatística robusta para discernir tais relações, com os Testes de Pearson e Spearman estabelecendo-se como pilares fundamentais nesse domínio (De Vaus, 2002).

4.2.1 Teste de Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson, frequentemente denotado por r , é uma medida paramétrica que determina a força e a direção do relacionamento linear entre duas variáveis contínuas (Cohen, 1988). O coeficiente varia entre -1 e 1, onde:

- 1 indica uma correlação positiva perfeita entre as variáveis;
- -1 indica uma correlação negativa perfeita entre as variáveis;
- 0 indica que não há correlação entre as variáveis;

Matematicamente, o coeficiente de Pearson é calculado como:

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

onde X_i e Y_i são os valores das variáveis, e \bar{X} e \bar{Y} são suas médias, respectivamente.

O teste de Pearson assume que os dados são distribuídos normalmente e que as variáveis são medidas em uma escala de intervalo ou razão (De Vaus, 2002).

4.2.2 Teste de Correlação de Spearman

O coeficiente de correlação de Spearman, frequentemente denotado por ρ , serve como uma medida não paramétrica de correlação, destinada a avaliar a associação monotônica entre duas variáveis, sejam elas contínuas ou ordinais.

Diferentemente da correlação de Pearson, que examina exclusivamente relações lineares entre pares de variáveis contínuas, a correlação de Spearman detecta associações monotônicas, independentemente de serem estritamente lineares ou não. Quando as variáveis mostram uma tendência conjunta de aumento, observa-se um valor positivo de ρ ; inversamente, se uma variável aumenta enquanto a outra reduz, o coeficiente será negativo. Uma correlação de Spearman de 0 sugere ausência de qualquer tendência monotônica consistente entre as variáveis em análise (Spearman, 1904).

4.2.3 Resultados nos Testes de Correlação de Pearson e Spearman

Em síntese, enquanto o coeficiente de correlação de Pearson avalia relações lineares entre duas variáveis contínuas, o coeficiente de Spearman é utilizado para avaliar relações monótonas, independentemente de serem lineares ou não. A escolha entre os dois métodos deve ser informada pela natureza dos dados em questão e pelos pressupostos subjacentes a cada teste (De Vaus, 2002), de tal maneira que no presente trabalho o método de escolha foi Teste de Correlação de Pearson, uma vez que se observou haver correlações lineares importantes entre as variáveis exploradas.

Após a transformação *Centered-Log-Ratio (clr)* dos dados geoquímicos, foi realizada uma análise de correlação de Pearson entre os principais óxidos presentes nas amostras, onde foi gerado uma matriz de correlação [10x10] entre os 10 elementos maiores pertencentes às amostras do banco de dados, a matriz exhibe os coeficientes de correlação para cada par elemental (**Figura 4.2**). Buscou-se observar a existência de correlações significativas entre os pares de elementos do banco de dados, onde revelou-se haverem importantes correlações lineares entre os elementos maiores (**Tabela 4.1**).

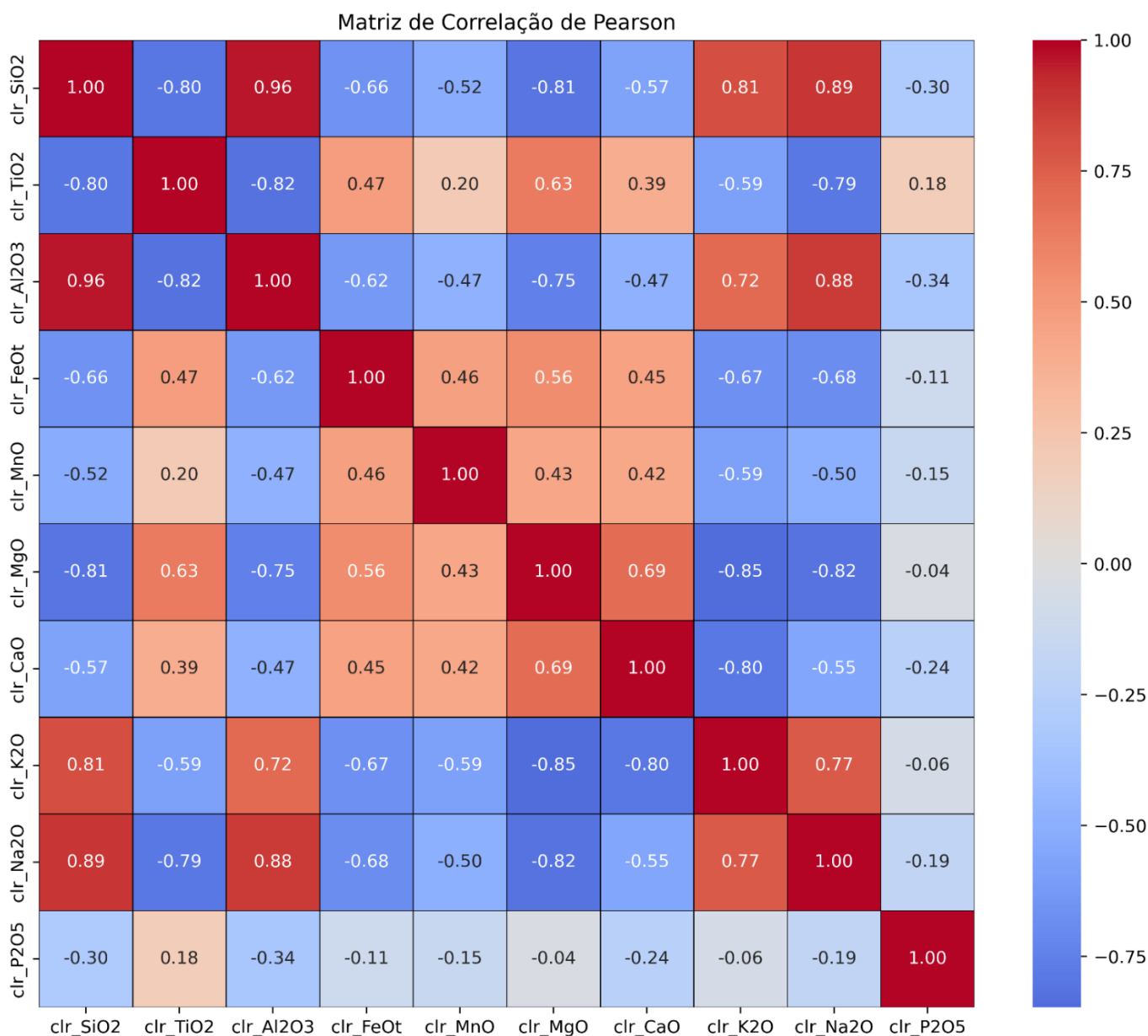


Figura 4.2 – Diagrama *Heatmap*, ou mapa de calor - do termo em inglês, ilustrando a matriz de correlação de Pearson para os elementos (após transformação Centered-log-ratio (*clr*)) no conjunto de dados. as cores variam de azul a vermelho, onde azul indica correlações negativas e vermelho indica correlações positivas.

A matriz de correlação de Pearson nos forneceu uma visão geral das relações lineares entre os pares elementares, as quais estão sintetizadas na **Tabela 4.1**.

Tabela 4.1 – Tabela com as análises das correlações e seus coeficientes relativos, entre os elementos maiores através da matriz de correlação de Pearson.

Óxido	Correlação Positiva Forte	Correlação Moderada	Correlação Negativa Forte
SiO₂	Al ₂ O ₃ (0.91), Na ₂ O (0.80)	FeOt (0.59), K ₂ O (0.58), MnO (0.50), CaO (0.33), P ₂ O ₅ (0.30)	TiO ₂ (-0.71), MgO (-0.70)
Al₂O₃	SiO ₂ (0.91), Na ₂ O (0.87)	FeOt (0.47), K ₂ O (0.59), MnO (0.46), CaO (0.22), P ₂ O ₅ (0.16)	TiO ₂ (-0.82), MgO (-0.92)
Na₂O	SiO ₂ (0.80), Al ₂ O ₃ (0.87), K ₂ O (0.60)	FeOt (0.54), MnO (0.43), CaO (0.19), P ₂ O ₅ (0.18)	TiO ₂ (-0.63), MgO (-0.88)
MgO	CaO (0.75)	TiO ₂ (-0.59), FeOt (0.37), MnO (0.49), Na ₂ O (-0.88), K ₂ O (0.34), P ₂ O ₅ (0.29)	SiO ₂ (-0.70), Al ₂ O ₃ (-0.92)
TiO₂	-	FeOt (0.46), MnO (0.47), MgO (-0.59), Na ₂ O (-0.63), P ₂ O ₅ (0.33)	SiO ₂ (-0.71), Al ₂ O ₃ (-0.82), K ₂ O (-0.60)
FeOt	CaO (0.68), MnO (0.92)	SiO ₂ (0.59), K ₂ O (0.52), TiO ₂ (0.46), MgO (0.37), P ₂ O ₅ (0.49)	Al ₂ O ₃ (-0.47), Na ₂ O (-0.54)
MnO	FeOt (0.92)	SiO ₂ (0.50), K ₂ O (0.44), TiO ₂ (0.47), MgO (0.49), P ₂ O ₅ (0.47)	Al ₂ O ₃ (-0.46), Na ₂ O (-0.43)
K₂O	Na ₂ O (0.60)	SiO ₂ (0.58), Al ₂ O ₃ (0.59), FeOt (0.52), MnO (0.44), CaO (0.28), P ₂ O ₅ (0.55)	TiO ₂ (-0.60), MgO (-0.34)
CaO	MgO (0.75), FeOt (0.68)	SiO ₂ (0.33), Al ₂ O ₃ (0.22), TiO ₂ (-0.24), MnO (0.25), Na ₂ O (0.19), K ₂ O (0.28), P ₂ O ₅ (0.41)	-
P₂O₅	-	SiO ₂ (0.30), Al ₂ O ₃ (0.16), TiO ₂ (0.33), MnO (0.47), MgO (0.29), FeOt (0.49), Na ₂ O (0.18), K ₂ O (0.55), CaO (0.41)	-

O coeficiente de correlação de Pearson, após a aplicação da transformação *clr* (*Centered-log-ratio*), revelou significativas relações lineares entre diversos pares de óxidos. Identificaram-se fortes correlações, tanto positivas quanto negativas, entre vários óxidos, sugerindo a potencial existência

de multicolinearidade. Pares como SiO_2 e Al_2O_3 , Al_2O_3 e Na_2O , e CaO e P_2O_5 apresentaram coeficientes de correlação notavelmente negativos ou positivos, apontando uma possível multicolinearidade entre estes óxidos.

A multicolinearidade, caracterizada por elevadas correlações entre variáveis independentes, é um problema que pode afetar a estabilidade e a capacidade de interpretação dos coeficientes em um modelo estatístico (Hair *et al.* 2010). No entanto, a análise dos resultados da Análise Discriminante Linear (LDA) indica que, mesmo com a possível presença de multicolinearidade, os discriminantes lineares provaram-se competentes em diferenciar os grupos no conjunto de dados em questão.

4.3 MATRIZ DAS DISTÂNCIAS INTRA- E INTER-CLASSES

Uma abordagem significativa na análise dos dados composicionais, após a transformação *clr*, envolveu a avaliação das distâncias intra- e inter-classes.

As distâncias intra-classe oferecem uma compreensão sobre a dispersão das amostras dentro dos respectivos grupos. Uma distância intra-classe reduzida sugere que as amostras de um grupo específico compartilham características mais similares entre si, refletindo uma coesão interna. Por outro lado, as distâncias inter-classe iluminam as diferenças entre os grupos, medindo o afastamento entre os centroides (ou médias) de pares de grupos. Grupos que são intrinsecamente diferentes em suas composições químicas terão distâncias inter-classe mais elevadas.

O *Heatmap* a seguir (**Figura 4.3**) ilustra essas distâncias, fornecendo uma representação visual clara das relações e distinções entre os grupos analisados:

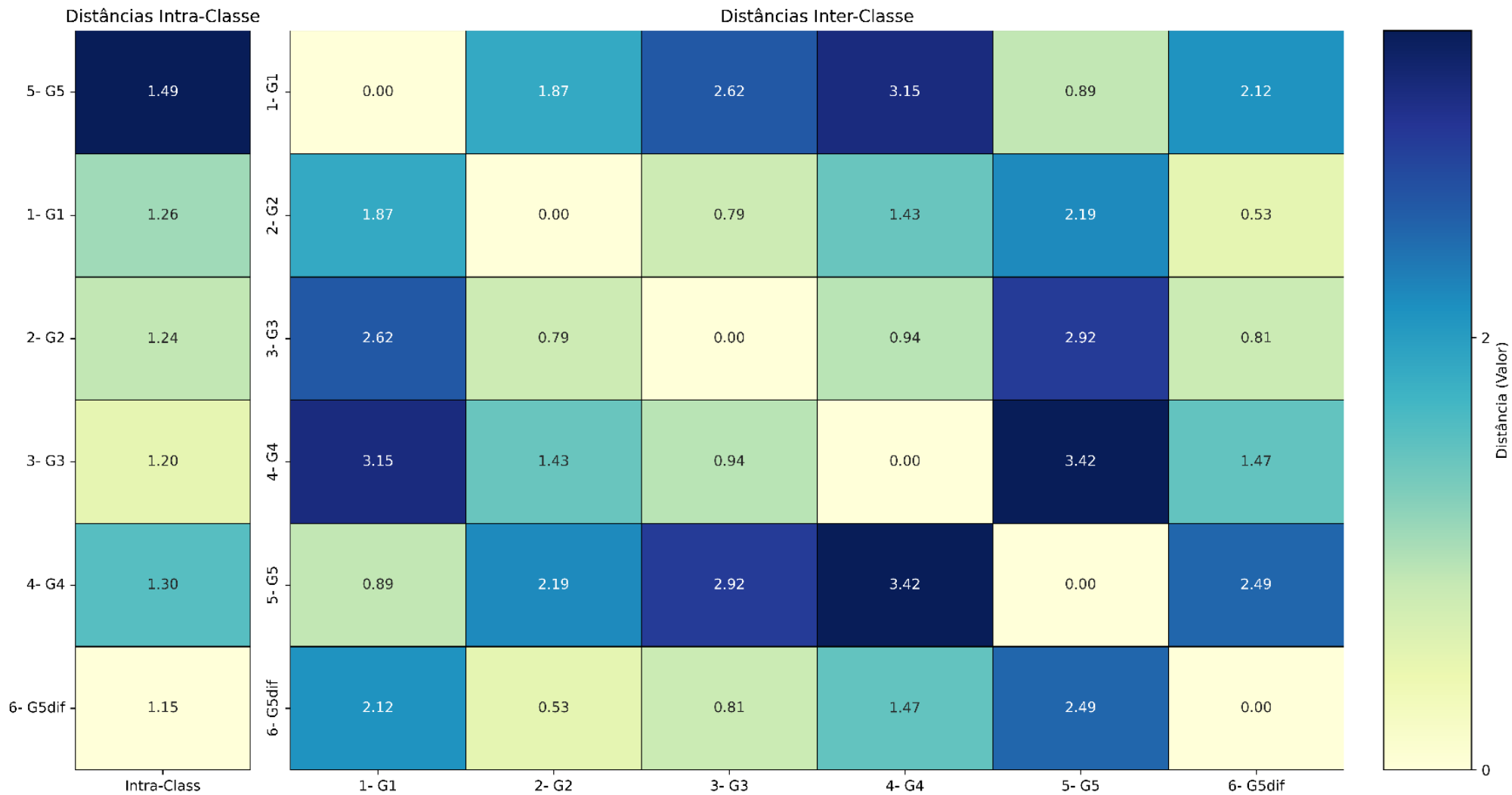


Figura 4.3 – Matriz *Heatmap* ilustrando os valores obtidos para as distâncias: Intra-classe (à esquerda) e Inter-classes (à direita). Cores claras indicam valores baixos e cores escuras valores altos.

O grupo G5 apresenta a maior distância intra-classe, indicando que as amostras neste grupo têm uma maior variabilidade interna em comparação com outros grupos. Por outro lado, o grupo G5dif possui uma das menores distâncias intra-classe, o que sugere uma coesão considerável entre as amostras desse grupo. Os grupos G1, G2, G3 e G4 também mostram baixas distâncias intra-classe, indicando coesão interna nestes grupos.

Notamos que o grupo G1 têm uma distância inter-classe pequena com o grupo G5 e grande para com os grupos G4, G3, G5dif e G2, o que sugere que são bastante distintos. A maior distância ocorre entre os grupos G4 e G5, enquanto a menor ocorre entre os grupos G2 e G5dif, as demais relações estão resumidas na **Tabela 4.2**.

Tabela 4.2 – Tabela com as relações de distância (grande, moderada e pequena) entre os grupos do banco de dados.

Grupo	Grande Distância (>1.5)	Distância Moderada	Pequena Distância (<1.0)
G1	G2, G3, G4, G5dif	-	G5
G2	G1, G5	G4	G3, G5dif
G3	G1, G5	-	G2, G4, G5dif
G4	G1, G5	G2, G5dif	G3
G5	G2, G3, G4, G5dif	-	G1
G5dif	G1, G5	G4	G2, G3

4.4 RESULTADOS DA LDA

O núcleo da LDA reside na determinação dos coeficientes lineares para cada variável preditora, resultando nos chamados discriminantes lineares (LDs). Esses LDs são combinações lineares das variáveis originais que maximizam a separação entre os grupos. A direção e magnitude dos coeficientes dessas combinações lineares (**Tabela 4.3**) fornecem um panorama sobre a importância relativa de cada elemento na diferenciação dos grupos.

Em nossa análise, os LDs são ordenados por sua capacidade de explicar a variação entre os grupos. O primeiro discriminante linear (LD1) é o eixo que explica a maior parte da variação entre os grupos, o segundo discriminante (LD2) explica a segunda maior parte, e assim sucessivamente. A **Tabela 4.3** apresenta os coeficientes destes discriminantes para cada elemento, bem como a percentagem da variação total de cada discriminante.

Tabela 4.3 – Tabela dos coeficientes LD para os elementos maiores do banco de dados.

Elementos	LD1	LD2	LD3	LD4	LD5
SiO ₂	-1.29	-2.04	2.23	-0.69	4.62
TiO ₂	0.26	-0.46	0.99	-1.00	-1.09
Al ₂ O ₃	-1.36	1.83	-0.63	1.21	-4.54
FeO _t	-0.23	0.34	-0.58	0.09	1.16
MnO	0.18	0.72	-0.16	-1.69	0.31
MgO	-0.19	-0.46	-0.29	1.48	0.55
CaO	1.77	-0.57	-0.84	-0.37	-1.09
K ₂ O	0.82	-0.57	0.15	-0.05	-0.52
Na ₂ O	-1.04	0.61	-2.45	-0.38	-0.88
P ₂ O ₅	-0.53	1.40	0.45	0.41	0.02
Variância (%)	75.20	13.52	8.26	2.46	0.55

A Análise Discriminante Linear (LDA) revelou padrões distintos nas assinaturas geoquímicas dos diferentes grupos. A variabilidade total observada foi majoritariamente capturada pelos primeiros dois discriminantes lineares, LD1 e LD2, que juntos explicam aproximadamente 90% da variação total.

O **LD1**, que sozinho captura **75.20%** da variabilidade total, é fortemente influenciado por elementos como SiO₂, Al₂O₃ e Na₂O. Concentrações mais elevadas destes elementos estão inversamente relacionadas com o LD1, ou seja, amostras com maiores teores destes elementos apresentam valores mais baixos de LD1. Por outro lado, os elementos CaO e K₂O mostram uma relação positiva com LD1, indicando que amostras com maiores teores destes elementos tendem a ter valores mais elevados de LD1.

O **LD2**, responsável por **13.52%** da variação, é majoritariamente influenciado pela presença de Al₂O₃ e P₂O₅, que apresentam coeficientes positivos. Isso sugere que amostras com concentrações mais altas destes elementos tendem a ter valores mais elevados de LD2. Contudo, elementos como SiO₂, TiO₂, MgO, CaO e K₂O possuem uma associação inversa com o LD2, sendo discriminadores negativos.

No que se refere ao **LD3**, que explica **8.26%** da variação, SiO₂ e TiO₂ emergem como discriminadores positivos, enquanto o Na₂O atua como um discriminador negativo. Quanto ao LD4, que abarca 2.46% da variação, Al₂O₃ e MgO são os principais discriminadores positivos, com MnO desempenhando um papel inverso. Finalmente, o LD5, que representa apenas 0.55% da variação, é

dominado pelo Al_2O_3 como discriminador positivo e SiO_2 como discriminador negativo.

4.4.1 Diagramas Scatterplot e Boxplot para os Coeficientes LD

Uma forma elucidativa de visualizar as relações entre as amostras de diferentes grupos e seus coeficientes LDs é por meio da geração de diagramas de dispersão, conhecidos como *scatterplots*. Os *scatterplots* (**Figura 4.4 e Figura 4.5**) se mostraram cruciais para entender a distribuição espacial das amostras no espaço discriminante, especialmente após a transformação proporcionada pela Análise Discriminante Linear (LDA). Os diagramas oferecem uma representação visual clara da proximidade e sobreposição entre grupos, realçando a eficácia dos componentes LDs em discriminar as amostras. Ao se concentrar nos primeiros componentes LDs (LD1, LD2 e LD3), que carregam a maior parte da informação discriminante, conseguimos capturar e ilustrar as principais variações entre os grupos. Os diagramas *boxplots* foram utilizados para observar a variabilidade dentro de cada grupo, bem como sua posição relativa no espaço discriminante.

Desenvolveu-se uma aplicação, hospedada na plataforma **PythonAnywhere**. Essa plataforma é especializada em hospedar aplicações “web-baseadas” na linguagem de programação *Python*. Nesta aplicação, é exibido um gráfico tridimensional (3D) que representa a relação entre os três primeiros discriminantes lineares (LD1, LD2, LD3), os quais, coletivamente, capturam a maior parte da variabilidade identificada pelo modelo. Os usuários têm a capacidade de interagir com o gráfico 3D, permitindo uma exploração detalhada das áreas de interesse no espaço discriminante. O link para acesso é: <https://pedroarmond.pythonanywhere.com/>.

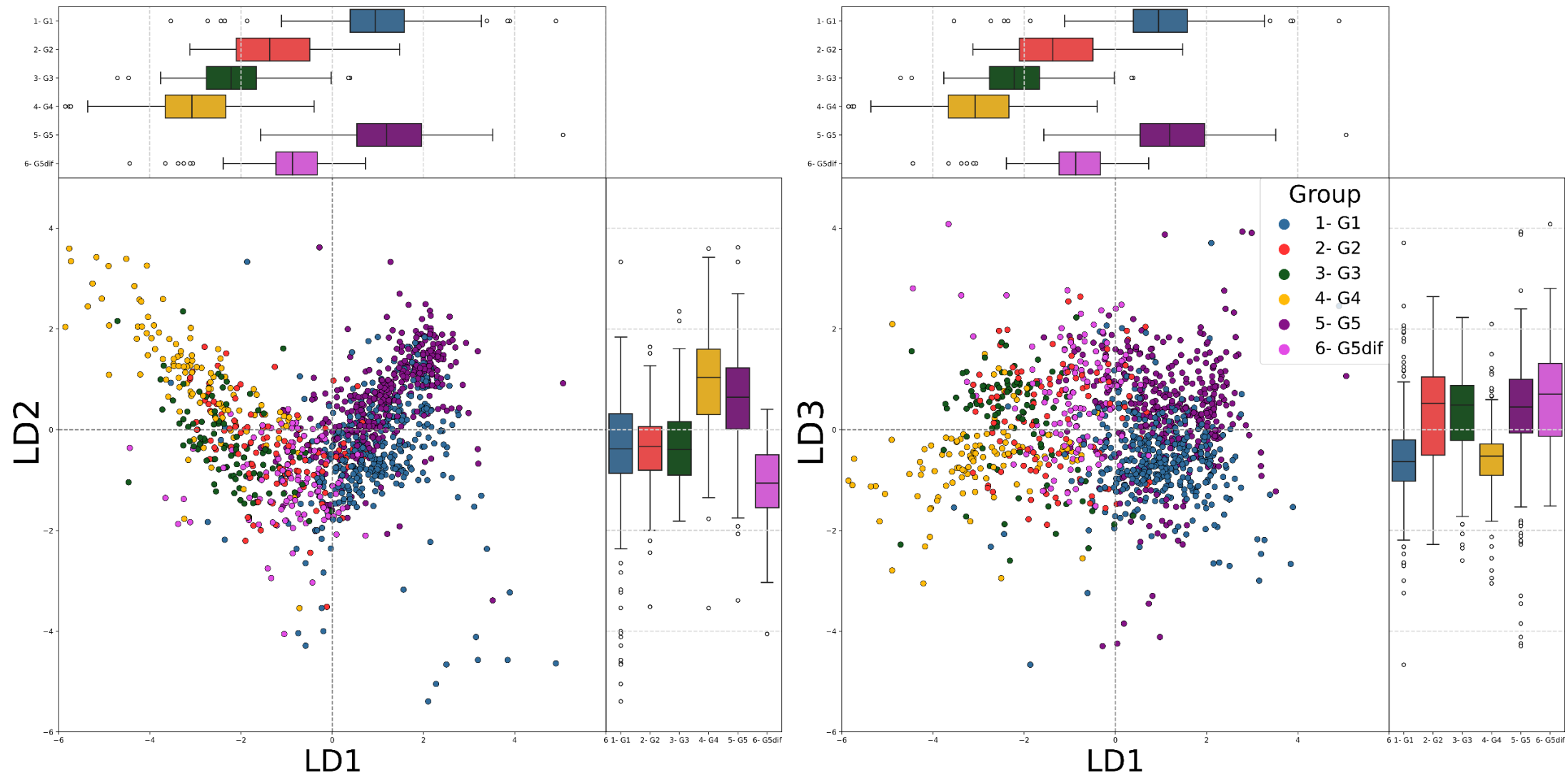


Figura 4.4 – Diagramas *Scatterplots* e *Boxplots* dos parâmetros LD1-LD2 (88,72% da variância) e LD1-LD3 (83,46% da variância).

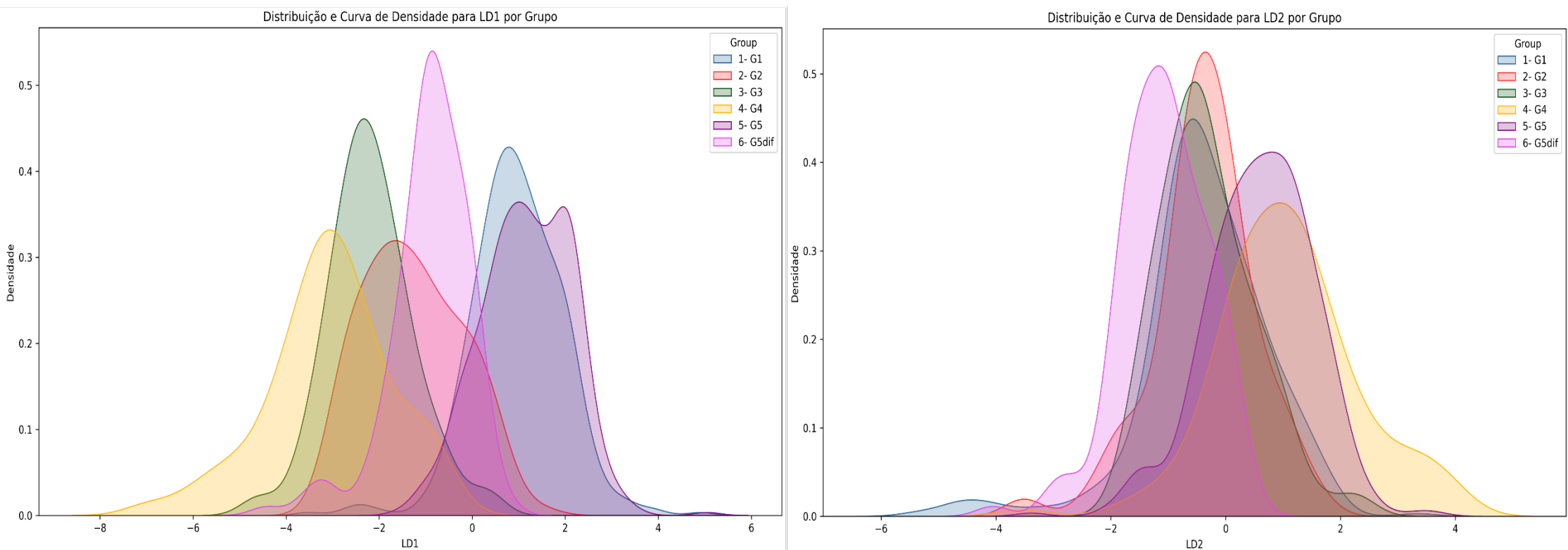


Figura 4.5 – Histogramas suavizados pelo método de KDE (*Kernel Density Estimate*) para os parâmetros LD1 e LD2, usamos a KDE para visualizar a probabilidade de densidade dos coeficientes LD1 e LD2 para cada grupo. Isso nos ajuda a entender a forma e a extensão da distribuição dos dados. Ao comparar as KDEs de diferentes grupos, podemos avaliar o grau de sobreposição entre eles. Grupos com KDEs mais sobrepostas podem ser mais difíceis de distinguir com base nos coeficientes LDs.

Como pode-se observar nas **Figura 4.4** e **Figura 4.5**, a modelagem LDA proporcionou resultados interessantes para se discutir a variabilidade entre as supersuítes, isto é, do ponto de vista do modelo, a variabilidade inter-grupos existente. As supersuítes G1 e G5 se destacam das demais supersuítes posicionando-se nos quadrantes positivos para LD1, enquanto as demais supersuítes concentram-se nos quadrantes negativos da LD1. Dessa maneira, a LD1 é representativa como um parâmetro de identificação para o grau de diferenciação das amostras (coeficientes negativos para SiO_2 , Al_2O_3 e Na_2O); para se observar o parâmetro cálcio nessas amostras (coeficiente muito positivo para CaO) e para se analisar a o balanço de $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (coeficiente negativo para Na_2O e positivo para K_2O).

No histograma KDE para o parâmetro LD1, observou-se que o modelo foi bem-sucedido, principalmente, na separação entre as supersuítes G1, G3, G5 e G5dif, uma vez que apresentam pronunciados picos de densidade, o que favorece a separabilidade entre *trends* e posicionamentos específicos no espaço discriminante dessas suítes. Os grupos G2 e G4 apresentaram resultados satisfatórios, embora exibam uma sobreposição de densidades significativa com as supersuítes G3 e G5dif. As amostras pertencentes às supersuítes G1 e G5 se destacam por serem marcadamente mais cálcicas. Em média, essas amostras apresentam menores teores de SiO_2 e tendem a ser um pouco mais potássicas, características distintivas para esses conjuntos de rochas.

O parâmetro LD2, por sua vez, é predominantemente influenciado de maneira positiva pelos teores de Al_2O_3 e P_2O_5 e, em contraste, exibe influência negativa em relação aos outros óxidos, como SiO_2 , CaO , K_2O , MgO e TiO_2 . Ao analisar conjuntamente os parâmetros LD1 e LD2, nota-se uma sutil distinção nas tendências entre as supersuítes G1 e G5, embora existam sobreposições. A representação mais emblemática da capacidade discriminatória do parâmetro LD2 é evidenciada pelo padrão em "V" observado para as supersuítes G4 e G5, o que as diferencia das outras e sugere maiores teores de Al_2O_3 , e possivelmente de P_2O_5 , nessas amostras. A análise conjunta dos histogramas KDE para os parâmetros LD1 e LD2 evidencia a distinção das supersuítes G5, G4 e G5dif, ainda que persista uma maior interseção entre os demais grupos.

O diagrama LD1-LD3 captura cerca de 83,46% da variabilidade no espaço discriminante e obteve êxito na distinção inter-classes, com um padrão de separação por quadrantes. A supersuíte G1 ocupa predominantemente o quarto quadrante; a G2 e G3, o segundo quadrante; a G4, o terceiro quadrante; a G5, o primeiro quadrante e a G5dif encontra-se dispersa entre os 2º e 3º quadrantes.

De maneira geral, os dois *scatterplots* capturam, de forma substancial, a variabilidade acentuada existente entre as supersuítes. Tais diferenças refletem, sem dúvida, a vasta gama de processos petrogenéticos que prevaleceram durante a cristalização das rochas de cada supersuíte. É notório que existe uma zona de convergência de todas as supersuítes nos *scatterplots*, sendo essa área mais evidente no *scatter* LD1-LD2, próximo ao ponto de origem (0,0). Tal ponto, muito provavelmente, sinaliza a localização da composição do "granito comum" ou "granito mínimo". Em termos petrológicos, essa composição alude ao ponto eutético, representando ou o último líquido gerado por fracionamento ou o primeiro líquido oriundo da fusão parcial. Vale ressaltar que essa região composicional engloba granitoides de todas as supersuítes. Isso implica que, quando se trata da composição dos principais elementos (ou elementos maiores), a vasta maioria dos granitos (*sensu stricto*), tem composição quase idêntica, sugerindo que essas rochas poderiam ser associadas a qualquer grupo granítico e/ou supersuíte (Bonin *et al.* 2020).

4.5 TREINAMENTO DE UM MODELO PELO MÉTODO LDA SOB A PERSPECTIVA CLASSIFICATÓRIA DE BONIN *ET AL.* (2020) E JACOB & MOYEN (2021)

Frente ao desafio classificatório das amostras do banco de dados do presente trabalho, processou-se o treinamento de um modelo de aprendizado de máquina (*Machine Learning*). Este modelo foi fundamentado na aplicação e aprendizado do método LDA para se determinar quais parâmetros são significativamente importantes para a discriminação da variabilidade, dentro de um espaço discriminante multidimensional, de classes pré-definidas pelos autores de dois grandes bancos de dados:

1. **Bonin *et al.* (2020)** – com aproximadamente 2930 amostras, e cujas classes pré-definidas, como discutido anteriormente, separam-se entre os

grupos de granitoides dos tipos CPG/MPG, ACG/ATG, KCG, PAG, RTG e *Archean-TTG*s;

2. **Jacob & Moyen et al. (2021)** – com aproximadamente 3930 amostras pertencentes aos grupos de granitoides CPG/MPG, ACG e KCG;

Os dados foram cuidadosamente tratados, conforme anteriormente realizado para o banco de dados do presente trabalho. Após o tratamento fundamental prévio, executou-se as seguintes etapas:

1. **Avaliação Inicial dos Dados**, o ponto de partida foi a avaliação da nossa base de dados, fornecida em formato Excel. Estas amostras foram classificadas em seis grupos distintos. A avaliação inicial foi crucial para entender a estrutura dos dados e garantir sua integridade e qualidade.
2. **Pré-processamento e Normalização**, antes de aplicar qualquer modelo estatístico, é fundamental que os dados passem por um processo de limpeza e transformação. Neste contexto, foram tratados valores ausentes e *outliers*. Além disso, realizou-se uma normalização dos dados, garantindo que todas as variáveis estivessem na mesma escala, facilitando análises e modelagens subsequentes.
3. **Análise Exploratória de Dados (EDA)**, com os dados preparados, mergulhamos em uma análise exploratória profunda. Esta fase nos permitiu entender a distribuição, tendências centrais e dispersão das variáveis individuais, bem como suas inter-relações. Gráficos de densidade, *scatterplots* e análises de correlação foram instrumentais neste estágio. A visualização dos dados por meio de gráficos de barras e gráficos de dispersão revelou informações valiosas sobre a distribuição e relação das variáveis do conjunto de dados.
4. **Verificação de Pressupostos da LDA**, antes de treinar o modelo LDA, é essencial verificar certos pressupostos. Um dos pressupostos fundamentais da LDA é a homogeneidade das matrizes de covariância entre os grupos. Utilizamos o teste M de Box para avaliar se as matrizes de covariância dos grupos eram iguais, um pré-requisito para a validade da LDA, que por sua vez, foi verificado.
5. **Treinamento do Modelo LDA**, com os pressupostos verificados, passamos ao treinamento do modelo LDA. O objetivo era extrair padrões

discriminantes que poderiam ser usados para classificar novas observações. O modelo foi treinado usando os dados fornecidos, e sua eficácia foi avaliada com base na matriz de confusão, precisão, *recall* e pontuação F1 (ou “*F1-Score*”) para cada grupo (os significados desses parâmetros serão discutidos no próximo tópico).

6. **Para a reclassificação do banco de dados deste trabalho**, utilizou-se o modelo treinado por meio de aprendizado de máquina, empregando-se a modelagem LDA. Este método permitiu a observação de padrões dos dois bancos de dados, que possuem uma vasta variedade de granitoides. Baseando-se nos rótulos/classificações do banco de dados proveniente da literatura, foi possível classificar os dados do SOAR.

4.6 RESULTADO DA MODELAGEM LDA PARA OS BANCO DE DADOS DA LITERATURA

Utilizou-se a geração de uma ‘Matriz de Confusão’ para avaliar a eficácia do modelo em classificar corretamente as classes pré-definidas pelos autores dos bancos de dados (**Figura 4.6**). A matriz de confusão nos mostra o desempenho do modelo de classificação em relação à verdadeira classificação das amostras. Cada coluna da matriz representa as instâncias previstas de uma classe, enquanto cada linha representa as instâncias reais de uma classe.

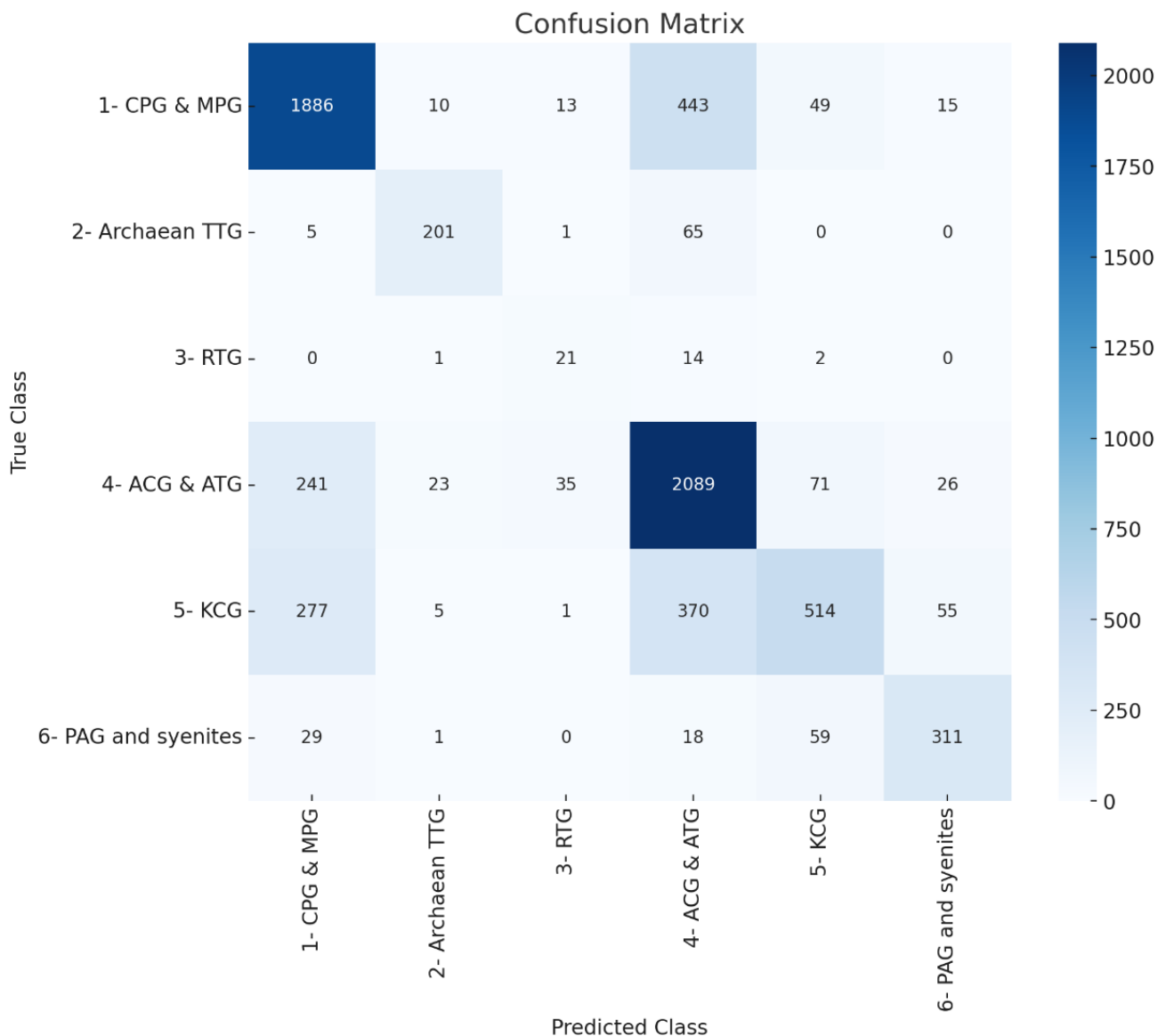


Figura 4.6 – Representação da Matriz de Confusão (*Confusion Matrix*) utilizada para analisar a eficácia classificatória do algoritmo desenvolvido.

Analisa-se a Matriz de Confusão da seguinte maneira, a exemplo do grupo “1- CPG & MPG”, a diagonal principal representa o número de previsões corretas do modelo, isto é, o modelo preditivo acertou em classificar positivamente uma amostra dentro da classe a qual ela pertence, no caso do grupo em questão, o modelo classificou corretamente 1886 amostras. Os valores que se encontram fora da diagonal principal representam classificações equivocadas do modelo, de tal maneira que, pode-se observar que o modelo classificou 443 amostras equivocadamente como 1- CPG & MPG, quando de fato, elas seriam pertencentes à classe 4- ACG & ATG. A mesma lógica de análise valerá para as demais classes.

O modelo foi treinado com base em 6851 amostras (compiladas dos dois bancos de dados da literatura) previamente classificadas como pertencentes aos 6 diferentes tipos explorados por Bonin *et al.* (2020). Dentre as quais:

1. CPG/MPG, 2416 são amostras pertencentes à essa classe;
2. Archean TTGs, 272 são amostras pertencentes à essa classe;
3. RTG, 38 são amostras pertencentes à essa classe;
4. ACG/ATG, 2485 são amostras pertencentes à essa classe;
5. KCG, 1222 são amostras pertencentes à essa classe;
6. PAG, 418 são amostras pertencentes à essa classe;

As métricas de eficácia obtidos através do treinamento do modelo estão expressos no Relatório de Classificação (**Tabela 4.4**).

Tabela 4.4 – Relatório de Classificação do modelo classificador LDA treinado.

Classes	Precisão	Recall	F1-Score	Support
1- CPG & MPG	0.77	0.78	0.78	2416
2- Archean TTG	0.83	0.74	0.78	272
3- RTG	0.30	0.55	0.39	38
4- ACG & ATG	0.70	0.84	0.76	2485
5- KCG	0.74	0.42	0.54	1222
6- PAG and syenites	0.76	0.74	0.75	418
accuracy	-	-	0.73	6851
macro avg	0.68	0.68	0.67	6851
weighted avg	0.74	0.73	0.73	6851

Conceitualmente, o parâmetro de “Precisão” é definido como a relação entre as amostras positivas que foram corretamente previstas e o total de amostras previstas positivas, refletindo assim a capacidade do classificador de não rotular como positiva uma amostra que é negativa. O “Recall” aborda a relação entre as amostras positivas previstas corretamente e o total de amostras que são realmente positivas, representando a habilidade do classificador de identificar todas as amostras positivas. O “F1-Score” é a média harmônica entre Precisão e Recall, oferecendo uma medida composta que busca equilibrar ambos. O termo “Support” se refere ao número de amostras verdadeiras para cada classe (Hastie *et al.* 2009).

Para mérito de simplificação, focaremos nossa análise e discussão sobre as classes mais representativas para o banco de dados do SOAR, que são: CPG/MPG, ACG/ATG e KCGs. O modelo classificador exibiu uma performance notavelmente boa para a classe CPG/MPG, onde o algoritmo identificou corretamente uma grande proporção das amostras verdadeiras/positivas deste grupo (78% – Recall) e, ao mesmo tempo, teve uma alta taxa de identificações corretas em relação às identificações totais deste grupo (77% – Precisão), os valores próximos de Precisão e Recall renderam um F-Score (78%) significativamente alto, o que reforça a boa performance do modelo para a classificação dessa classe. O modelo também teve alta performance durante a classificação da classe de rochas ACG/ATG, onde obteve 70% de Precisão, ou seja, foi bem sucedido em identificar corretamente 70% das amostras pertencentes à classe; apresentou o mais alto Recall durante a classificação dessa classe, onde 84% das amostras positivas foram classificadas como de fato pertencentes ao grupo de rochas ACG/ATG, deixando escapar apenas 16% das amostras positivas que pertenciam à essa classe; o resultado de F-Score (76%) ficou apenas 2% abaixo do resultado para o mesmo parâmetro da classe de rochas CPG/MPG, o que nos indica que a performance média para ambas as classes foram satisfatórias e equivalentes. O algoritmo apresentou um desempenho desafiador para a classificação da classe de rochas KCG; apesar de exibir uma Precisão relativamente alta de 74%, o Recall para essa classe ficou abaixo do limite de resultado satisfatório, performando sob uma taxa de acerto para amostras verdadeiras/positivas de apenas 42%, isto é, o modelo deixou de classificar positivamente 58% das amostras pertencentes à essa classe. A acurácia global do modelo é de 73%, o que é um valor relativamente bom. As médias macro e ponderada mostram que, em termos gerais, o modelo tem uma performance equilibrada entre as diferentes classes. Sobretudo para as classes mais representativas do banco de dados do SOAR, o modelo obteve uma acurácia global de 76,3%, ao se desconsiderar as classes de rochas Archean TTGs, RTG e PAG & syenites. O ligeiro aumento (~3,3%) na acurácia global do algoritmo após a retirada dessas classes, apesar de pequeno nos revela possíveis caminhos futuros para a otimização deste modelo classificatório.

Futuramente, a execução de um balanceamento dos dados, efetuar uma engenharia de características e/ou proceder com uma validação cruzada, são

direcionamentos que poderiam impactar positivamente na acurácia global, e logo, otimizar o caráter classificatório do algoritmo.

4.7 RESULTADO DA MODELAGEM LDA PARA O BANCO DE DADOS DO PRESENTE TRABALHO

Ao aplicar um modelo de Análise Discriminante Linear (LDA) previamente treinado em um conjunto de dados não rotulados, buscamos categorizar cada amostra segundo padrões identificados no conjunto de treinamento, de tal maneira que, embora o LDA tenha sido inicialmente desenvolvido como uma técnica de redução de dimensionalidade, também pode ser usado como um classificador. Vale ressaltar que, em situações como essa, as categorias atribuídas pelo modelo são baseadas nas informações que ele aprendeu durante o treinamento, e não em uma verdade absoluta. Após a validação do desempenho do modelo classificatório, se os pressupostos iniciais estiverem alinhados com os dados geológicos e geoquímicos observados em realidade, o resultado da classificação (**Figura 4.7**) é, portanto, válido e coerente com essa base teórica.

Supersuítas/Tipos	CPG & MPG	Archaean TTG	RTG	ACG & ATG	KCG	PAG and syenites
G1	4.59	0.77	1.02	77.81	15.56	0.26
G2	71.31	0.82	0.82	22.95	4.1	0
G3	83.84	2.02	0	10.1	3.03	1.01
G4	83.48	1.74	0	6.09	5.22	3.48
G5	10.49	0	5.88	19.95	63.17	0.51
G5dif	60.48	0	0	22.58	16.94	0

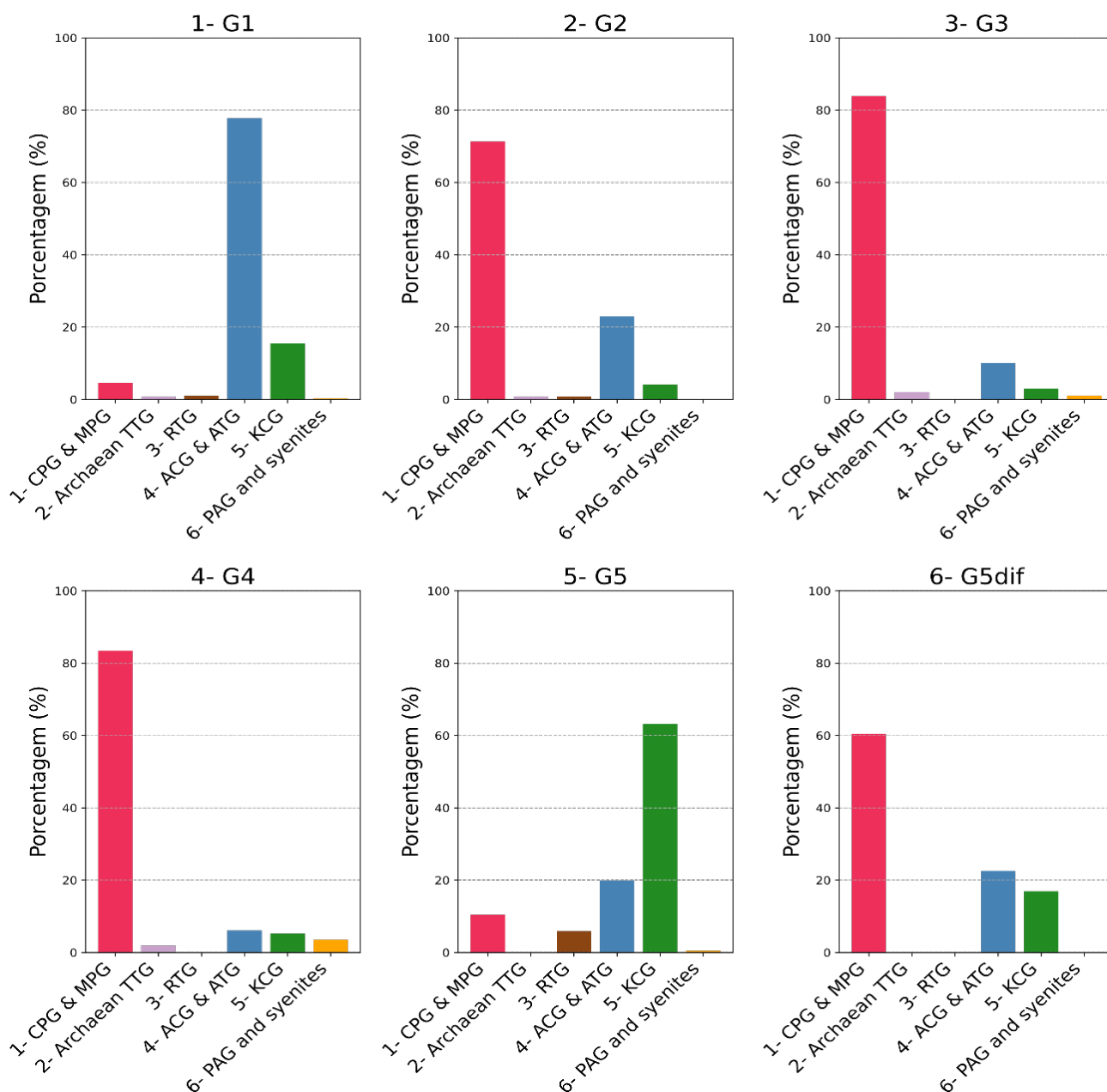


Figura 4.7 – Reclassificação do banco de dados do SOAR. Parte superior, tabela com os valores em porcentagem (%), porção inferior, gráficos de barras representando a taxa de classificação para cada supersuíte entre os diferentes tipos de grantoides propostos por Bonin *et al.* (2020).

A alta eficácia do modelo LDA se reflete nos resultados da tabela de classificação (**Figura 4.7**). As supersuítes G2, G3 e G4 e G5dif mostraram uma tendência clara para o tipo CPG & MPG, com porcentagens altas e muito altas (>60% e >80%, respectivamente), o que é consistente com a alta precisão e recall observados para essa categoria (**Tabela 4.4**). A supersuíte G1 apresentou uma correspondência marcante com o tipo de granitoides ACG/ATG, classe essa que o modelo também obteve alto padrão de performance para as métricas de eficácia classificatória. A supersuíte G5 mostrou uma predominância marcante para a classificação KCG, com aproximadamente 63,17% das amostras sendo classificadas nesta categoria. Este é um valor significativo e indica que a maioria das amostras desta supersuíte possui características geoquímicas que as alinham estreitamente com o tipo KCG. Porém um ponto importante a se considerar é que apesar de 63,17% das amostras da supersuíte G5 serem classificadas como KCG, ainda temos 36,83% das amostras que foram classificadas em outras categorias. Isso reitera a complexidade da supersuíte G5 e a possibilidade dela ter uma composição variada, o que pode causar uma confusão no modelo, especialmente se algumas amostras da supersuíte G5 estiverem em regiões limítrofes no espaço de características. É importante salientar que a subdivisão da supersuíte G5 em dois grupos (G5 e G5dif), inicialmente motivada por bimodalidades percebidas na distribuição das características ao analisar os histogramas dos elementos (particularmente para SiO₂, Al₂O₃ e K₂O), provou ser acertada durante a fase de tratamento dos dados. Essa interpretação baseia-se no fato de que ambos os grupos exibiram resultados contrastantes nas etapas de diferenciação entre classes e reclassificação pelo modelo classificatório, evidenciando a diversidade existente entre esses dois grupos, embora façam parte da mesma supersuíte.

Ao examinar as supersuítes G2, G3 e G4, percebe-se um padrão potencial de aumento da influência crustal na gênese dessas suítes. Nos resultados da reclassificação do banco de dados, a ambiguidade de classificação do modelo treinado entre os tipos CPG/MPG e ACG diminui progressivamente. A supersuíte G2 apresenta a maior ambiguidade classificatória, com 71,31% das amostras rotuladas como CPG/MPG e 22,95% como ACG/ATG. Em contraste, a supersuíte G4 exibe a menor ambiguidade, com 83,48% classificadas como CPG/MPG e

apenas 6,09% como ACG. A supersuíte G3 ocupa uma posição intermediária entre as rochas G2 e G4.

Duas interpretações são propostas para explicar esses resultados. Uma possibilidade é que eles reflitam erros de classificação de campo, como, por exemplo, amostras da supersuíte G1 sendo erroneamente classificadas como G2. Outra explicação seria o aumento progressivo da influência de processos de refusão crustal na gênese das três supersuítes, o que seria consistente com a evolução geodinâmica dos estágios orogênicos. Assim, a supersuíte G2 teria um maior componente associado ao estágio pré-colisional, enquanto a supersuíte G4 representaria a expressão mais pura de componentes (ou processos) associados aos estágios sin-colisão e tardi-colisão.

4.8 PARÂMETROS E DIAGRAMAS GEOQUÍMICOS

Inicialmente foram utilizadas 1243 amostras pertencentes aos 6 grupos (**Figura 4.1**) para se analisar os principais aspectos geoquímicos sobre o ponto de vista das concentrações médias e razões dos elementos maiores; bem como os valores médios de parâmetros importantes (Mg#, FeOt#, ACNK, ANK e MALI – ver **Tabelas 4.5 e 4.6**) na discussão de processos petrogenéticos de rochas estudadas. Portanto, a respeito das médias obtidas destacam-se:

1. As supersuítes G1 e G5 apresentam as médias mais baixas e maiores variações no conteúdo de SiO₂, o que sugere uma maior diversidade de rochas que compõe essas suíte, de básicas a intermediárias;
2. G2, G3, G4, e G5 dif têm médias elevadas de SiO₂, indicativas de rochas mais félsicas e mais diferenciadas, como granitos (*sensu stricto*);
3. As supersuítes G1 e G5 apresentam valores médios elevados para TiO₂, FeOt, MgO e CaO, indicando uma presença significativa de fases máficas como biotita e anfibólio;
4. G2, G3 e G4 apresentam valores baixos para os elementos TiO₂, FeOt, MgO e CaO, o que é consistente com uma composição mais félsica, sem a presença significativa de fases ferromagnesianas e/ou plagioclásio com alto teor de anortita;

5. Os valores médios de Al_2O_3 são relativamente uniformes, sugerindo uma importante participação mineralógica modal de minerais aluminossilicatados para todas os grupos;
6. As supersuítes G3, G4 e G5dif apresentam valores médios elevados para K_2O , possivelmente indicando a presença de ortoclásio, enquanto a G4 e G5 também apresentam valores elevados para Na_2O , sugerindo o envolvimento de albita;
7. G1 e G5 têm maiores razões $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{FeOt}/\text{Al}_2\text{O}_3$, e $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, sugerindo um maior conteúdo de minerais máficos e cálcicos.
8. A relativa variabilidade dos teores de SiO_2 para as supersuítes G1 e G5, aliada a altas concentrações e valores de FeOt, MgO, Mg# ($>0,25$) e FeOt# sugerem uma diversidade de processos petrogenéticos associados à gênese dessas suítes, embora pode-se concluir que possuam fontes preponderantemente máficas e redutoras;
9. Entre as supersuítes G2, G3 e G4, a supersuíte G2 é a menos diferenciada delas e a G4 a mais diferenciada; porém todas exibem baixas concentrações e baixa variabilidade para os conteúdos de TiO_2 , FeOt, MgO e CaO, o que indica que processos de retrabalhamento e anatexia crustal preponderaram como principais processos petrogenéticos geradores dessas rochas;
10. As supersuítes G1 e G5 são: cálcicas, magnesianas/ferroanas, ricas em TiO_2 e MnO; já as supersuítes G2, G3, G4 e G5dif são mais ácidas (mais diferenciadas), ricas nos álcalis $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, embora sejam mais potássicas que sódicas;
11. Geoquimicamente, o grupo G5dif parece representar um segmento mais diferenciado e menos máfico da supersuíte G5, com características mais próximas das supersuítes G3 e G4, possivelmente indicando um magmatismo ácido concomitante com o magmatismo intermediário/básico, típico para a supersuíte G5.

Tabela 4.5 – Concentrações médias/desvio padrão (σ) para os 10 elementos-maiores e razões importantes dos 6 grupos analisados.

Médias/ Desvio Padrão (σ)	G1	G2	G3	G4	G5	G5dif
SiO₂	63.52	71.87	73.35	73.41	60.40	73.18
σ	7.18	4.25	1.75	1.59	7.49	1.88
TiO₂	0.92	0.39	0.22	0.14	1.47	0.36
σ	0.62	0.32	0.14	0.11	0.86	0.17
Al₂O₃	16.29	14.91	14.80	15.06	16.01	14.16
σ	1.75	1.48	0.68	0.55	1.64	1.04
FeOt	5.58	2.58	1.52	1.36	6.34	1.75
σ	2.91	2.22	1.40	1.11	2.96	0.82
MnO	0.10	0.05	0.03	0.03	0.12	0.04
σ	0.05	0.05	0.04	0.02	0.07	0.02
MgO	2.31	0.83	0.41	0.24	2.94	0.43
σ	1.73	0.99	0.46	0.25	2.72	0.24
CaO	4.83	1.62	1.11	0.91	5.12	1.40
σ	2.25	1.06	0.52	0.45	2.98	0.50
K₂O	2.98	4.52	5.03	4.53	3.82	5.57
σ	1.34	1.13	1.07	0.82	1.77	1.02
Na₂O	3.21	3.03	3.36	4.15	3.09	2.99
σ	0.62	0.84	0.55	0.56	0.77	0.71
P₂O₅	0.26	0.19	0.16	0.17	0.68	0.13
σ	0.19	0.16	0.12	0.07	0.55	0.07
Na₂O/K₂O	1.35	0.78	0.74	0.96	1.42	0.57
σ	0.87	0.66	0.46	0.26	2.07	0.23
K₂O/Na₂O	1.00	1.86	1.55	1.13	1.27	2.25
σ	0.65	2.97	0.47	0.38	0.71	3.04
SiO₂/Al₂O₃	4.00	4.88	4.97	4.88	3.83	5.21
σ	1.21	0.59	0.31	0.24	0.69	0.56
CaO/Al₂O₃	0.29	0.11	0.07	0.06	0.32	0.10
σ	0.14	0.06	0.03	0.03	0.21	0.03
FeOt/Al₂O₃	0.34	0.17	0.10	0.09	0.40	0.12
σ	0.17	0.13	0.10	0.08	0.19	0.06
MgO/Al₂O₃	0.14	0.05	0.03	0.02	0.19	0.03
σ	0.12	0.06	0.03	0.02	0.21	0.02
FeOt/MgO	2.99	4.27	4.69	9.93	3.32	5.46
σ	2.02	2.99	5.92	9.48	2.03	5.62
CaO/MgO	2.91	3.27	3.78	7.56	2.33	4.42
σ	2.54	2.71	1.99	11.80	1.11	3.91

Tabela 4.6 – Tabela com valores médios/desvio padrão (σ) de parâmetros geoquímicos importantes para os 6 grupos.

Médias/ Desvio Padrão (σ)	G1	G2	G3	G4	G5	G5dif
MALI	1.95	5.93	7.24	7.75	3.40	7.12
σ	2.87	2.02	1.40	0.94	3.21	1.31
A/NK	2.80	2.07	1.80	1.75	3.13	1.68
σ	0.90	0.63	0.37	0.16	4.42	0.24
A/CNK	1.50	1.67	1.57	1.58	1.35	1.43
σ	0.22	0.44	0.19	0.11	0.18	0.19
Mg#	28.22	22.35	23.17	15.82	28.44	21.03
σ	10.55	7.82	9.72	11.12	13.07	10.76
FeOt#	0.72	0.78	0.77	0.84	0.72	0.79
σ	0.11	0.08	0.10	0.11	0.13	0.11

Após a análise das médias dos teores elementares, procedeu-se ao tratamento do banco de dados, a fim de adequá-lo à visualização nos diagramas geoquímicos propostos por Boni *et al.* (2020). Amostras com SiO₂ (>80% wt.) foram excluídas para evitar a inclusão de rochas alteradas, restando apenas aquelas com SiO₂ > 52% wt. e <80% wt. Após este processo, 1010 amostras permaneceram (**Figura 4.8**), sendo então utilizadas para análise das tendências de cada supersuíte nos referidos diagramas geoquímicos.

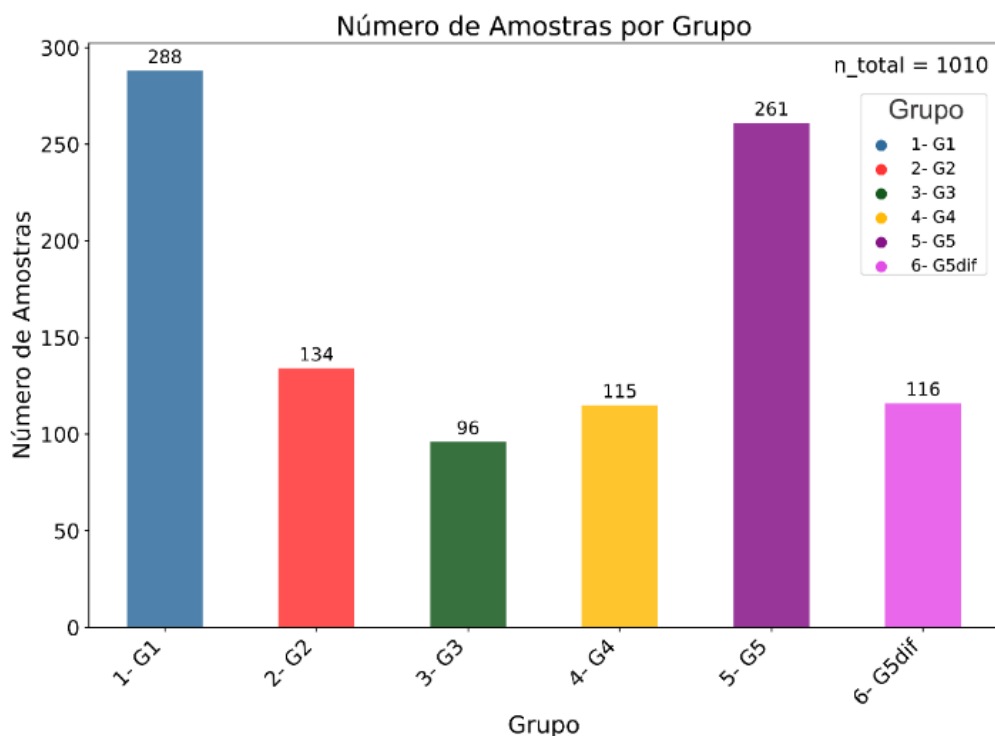


Figura 4.8 – Gráfico de barras representando a quantidade de amostras por supersuíte para a análise subsequente através dos diagramas geoquímicos.

Bonin e colaboradores, separam os diferentes diagramas geoquímicos em 2 grupos, que em conjunto, compõem a essência dos principais esquemas classificatórios para granitos, sendo: (1) diagramas de classificação/nomenclatura, são melhor utilizados para se observar as características individualizadas das amostras; (2) diagramas que assinalam as propriedades químicas essenciais para a classificação de amostras/suítes graníticas, bem como a evolução das mesmas no tempo ou espaço. De tal maneira que os diagramas explorados aqui foram:

- 1- **TAS** (Middlemost 1994), baseado nas proporções de 3 óxidos de elementos maiores (SiO_2 , Na_2O e K_2O), em valores de porcentagem de peso wt. % (**Figura 4.9**);
- 2- **Diagrama Q'-ANOR** de Streckeisen & Le Maitre (1979), $Q' = 100Qz/(Qz + Or + Ab + An)$ e $ANOR = 100An/(Or + An)$, baseado em uma Mesonorma aprimorada para granitoides, conforme Mielke & Winkler (1979 – **Figura 4.10**);
- 3- **Diagrama multicatiônico P-Q** (Debon & Le Fort 1983, 1988), que se equivale ao clássico QAP. É baseado nos parâmetros em valores de milicátions: (1) Q ($\text{Si}/3 - (\text{Na} + \text{K} + 2 \times \text{Ca}/3)$), representativo para a abundância do mineral quartzo e (2) P ($\text{K} - (\text{Na} + \text{Ca})$), que é indicativo para a proporção de K-feldspato em meio aos feldspatos presentes na rocha (**Figura 4.11**);
- 4- **B-mg#** Diagrama binário multicatiônico entre B-mg# (índice de maficidade vs número de magnésio – Debon & LeFort 1983, 1988) (**Figura 4.12**);
- 5- **$\text{SiO}_2\text{-FeOt\#}$** - Diagrama binário entre SiO_2 e “número de Ferro” por Frost *et al.* (2001); Frost & Frost (2008 – **Figura 4.13**);
- 6- **Diagram do índice MALI** de Frost *et al.* (2008 – **Figura 4.14**);
- 7- **Diagrama de Shand** (1927) – dos parâmetros A/CNK (razão molecular entre $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) e A/NK (razão molar entre $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ – **Figura 4.15**);
- 8- **Diagrama multicatiônico B-A** (Debon & Le Fort 1983, 1988; modificado por Villaseca *et al.* 1998 – **Figura 4.16**);
- 9- Diagrama triangular projetado na composição da Biotita (Moyen *et al.* 2017 – **Figura 4.17**);

10-Diagrama ternário de feldspatos Ab-An-Or de O'Connor (1965 –

Figura 4.18).

Os diagramas 1, 2 e 3 são classificatórios, onde busca-se definir as características petrográficas individuais das amostras. Enquanto os demais diagramas (4 a 10) buscam, sobretudo, discutir a respeito dos parâmetros de: (I) Grau de diferenciação; (II) Aluminosidade; (III) Alcalinidade e (IV) Maficidade, que são informações fundamentais para se classificar suítes graníticas (Bonin *et al.* 2020). Os resultados foram resumidos na **Tabela 4.7**.

Tabela 4.7 – Síntese da frequência de ocorrências nos campos dos diagramas explorados dos 6 grupos.

Diagramas	G1	G2	G3	G4	G5	G5dif
TAS	Granodiorito	Granito	Granito	Granito	Quartzo-monzonito	Granito
Q'ANOR	Tonalito/Granodiorito	Granito	Granito/Álcali-feldspato Granito	Granito/Álcali-feldspato granito	Granito	Granito
P-Q	Granodiorito	Granito	Granito	Adamelito (Quartzo monzonito)	Granito	Granito
B-Mg#	Predominante mente associações ferroanas	Leucogranitoides ferroanos/magnesianos	Leucogranitoides ferroanos/magnesianos	Leucogranitoides ferroanos/magnesianos	Predominante mente associações ferroanas	Leucogranitoides ferroanos/magnesianos
SiO ₂ -FeOt#	Magnesianas	Magnesianas	Magnesianas	Ferroanas	Ferroanas transicionais magnesianas	Ferroanas
MALI	Cálcicas/Calcó-alcálicas	Predominante mente álcali-cálcicas	Álcali-cálcicas	Álcali-cálcicas	Cálcicas/Calcó-alcálicas/Álcali-cálcicas	Álcali-cálcicas
SiO ₂ -K ₂ O	Série Alto-K Cálcicalcalina/Cálcicalcalina	-	-	-	Série Shoshonítica	-
A/CNK-A/NK	Metaluminoso	Peraluminoso	Peraluminoso	Peraluminoso	Metaluminoso	Peraluminoso
B-A	Metaluminosa	Peraluminoso Félsico/Peraluminoso médio	Peraluminoso Félsico	Peraluminoso Félsico	Metaluminoso	Baixa Peraluminosidade/Metaluminoso
Ab-An-Or	Granodiorito	Granito	Granito	Granito	Quartzo-monzonito/Granodiorito	Granito

Projeção da Biotita	Inclinação negativa abaixo de A/CNK = 1	Inclinação positiva	Inclinação positiva	Inclinação positiva	Inclinação negativa abaixo de A/CNK = 1	Inclinação positiva
----------------------------	---	---------------------	---------------------	---------------------	---	---------------------

TAS Middlemost (1994)

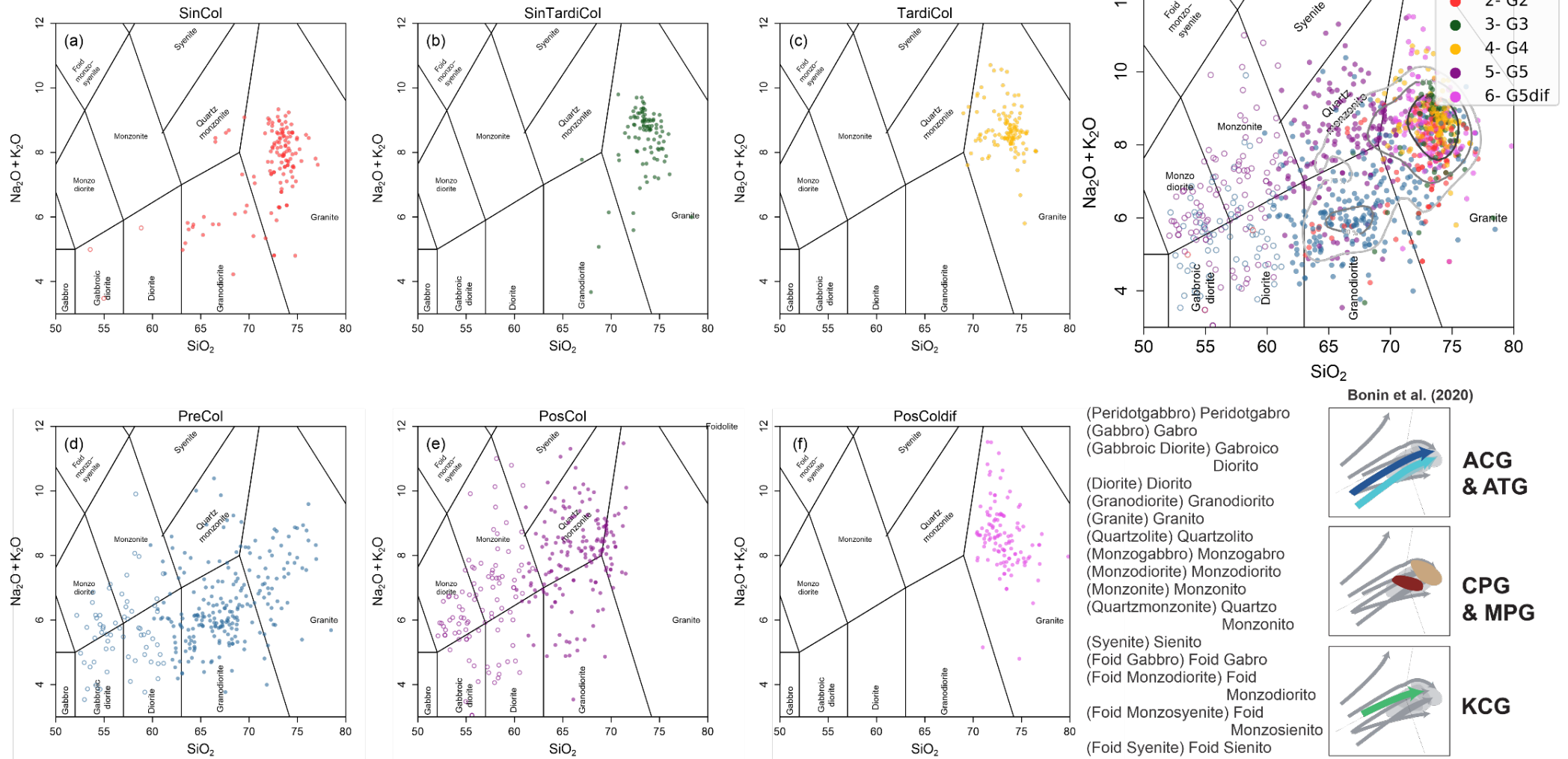


Figura 4.9 – Diagrama TAS (Middlemost 1985). Os 6 grupos/supersuítas foram representados individualizadamente, onde G1 = PreCol; G2 = SinCol; G3 = SinTardiCol; G4 = TardiCol; G5 = PosCol; G5dif = PosColdif. As cores de referência para cada supersuíte mantiveram-se padronizadas como nos demais diagramas do trabalho. No canto superior direito, está representada a distribuição geral de todas as supersuítas no diagrama em questão, abaixo, legendas referentes aos campos e no canto inferior direito, estão os *trends*/posicionamento “médio” dos diferentes tipos e subtipos (ACG/ATG, CPG/MPG e KCG - extraído de Bonin *et al.* 2020) de granitoides, relevantes para a discussão do banco de dados do SOAR. Usou-se a mesma simbologia para os demais diagramas que serão apresentados.

Q-ANOR plot (Streckeisen + Le Maitre 1979)

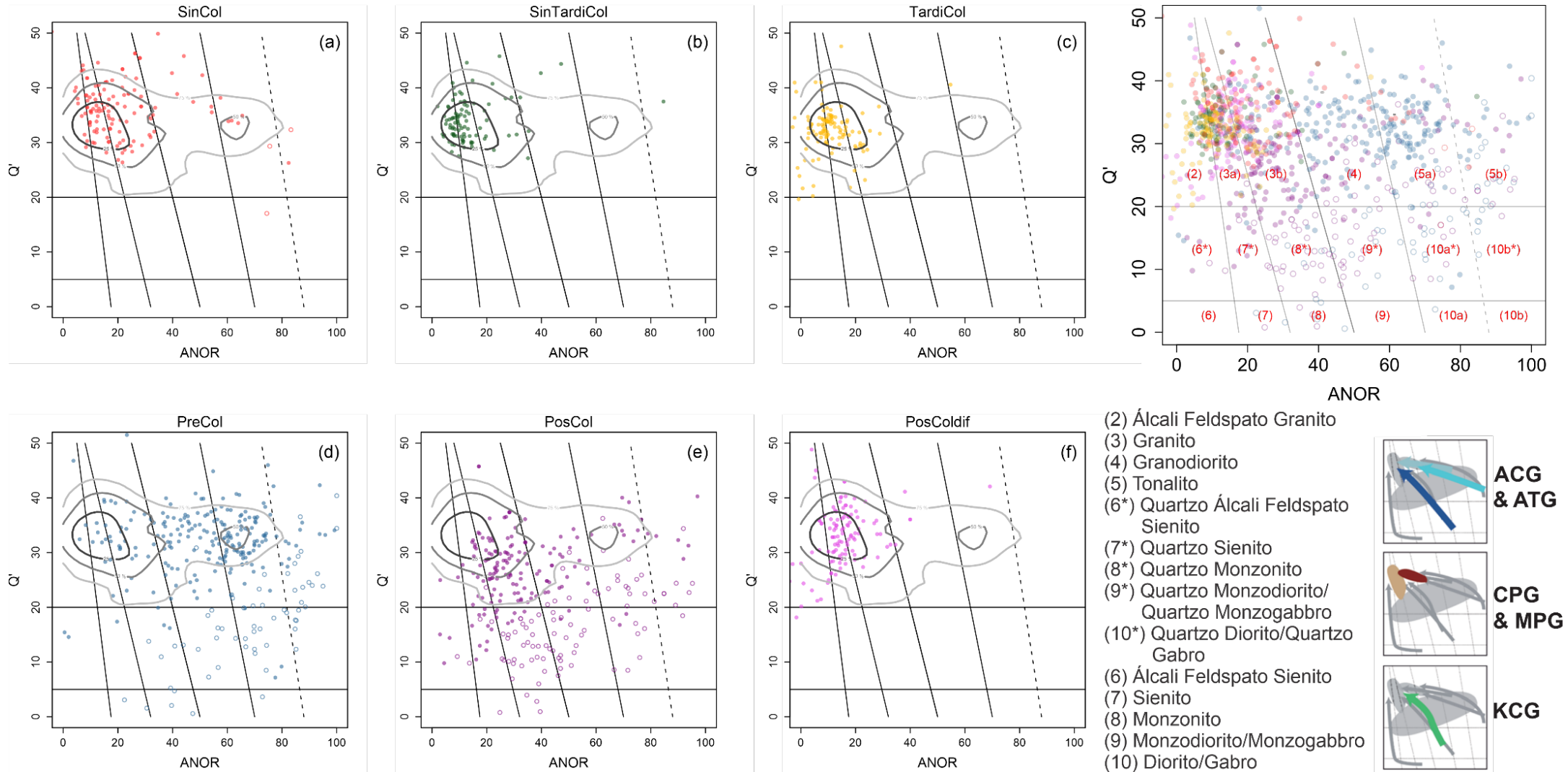


Figura 4.10 - Diagrama Q'ANOR (Streckeisen & Le Maitre, 1979).

Debon & Le Fort P-Q (1983, 1988)

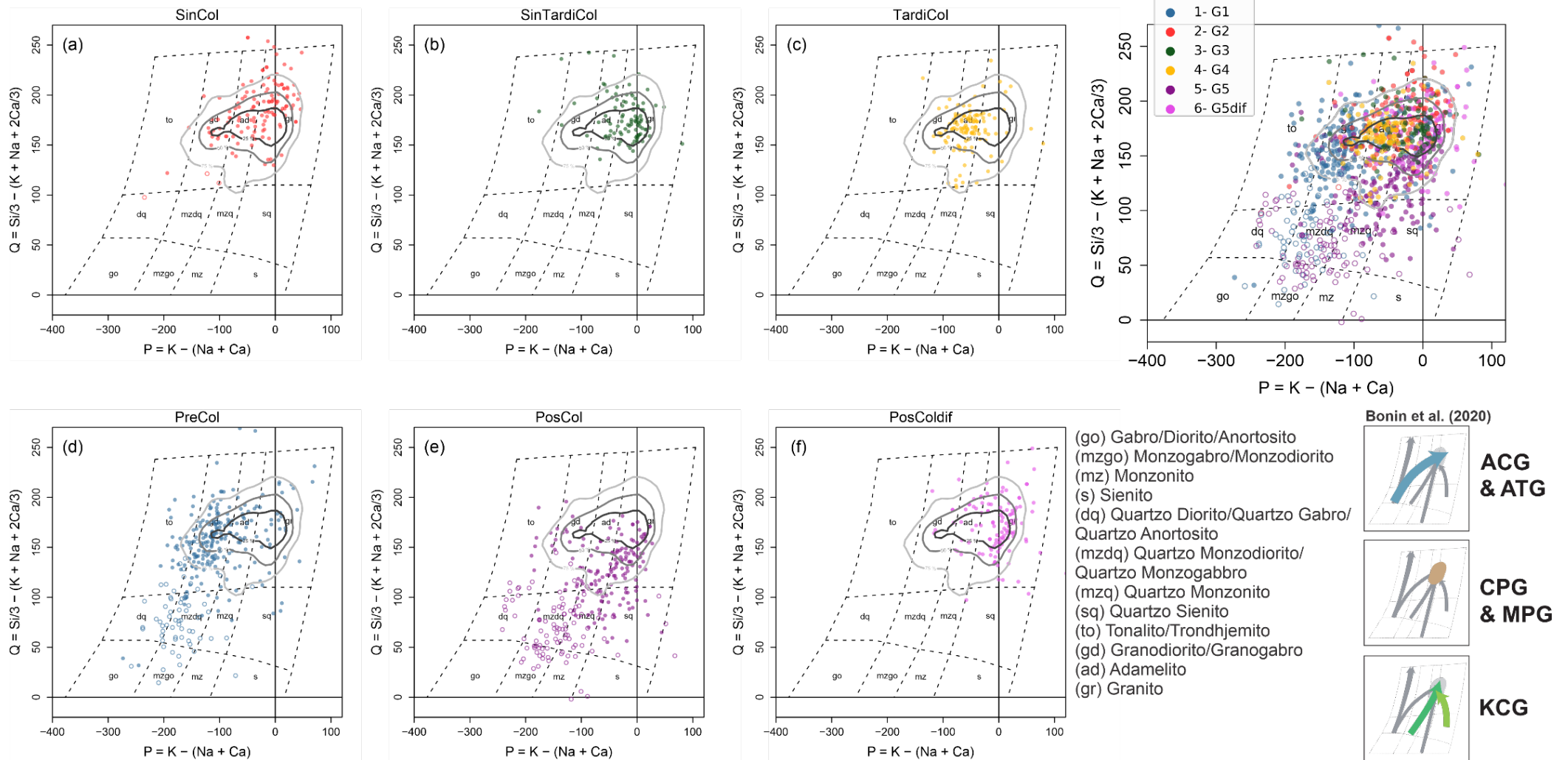


Figura 4.11 – Diagrama binário entre os parâmetros multicatiônicos $P = K - (Na + Ca)$ & $Q = Si/3 - (K + Na + 2Ca/3)$ de Debon & LeFort (1983, 1988).

Debon & LeFort B-#mg (1983, 1988)

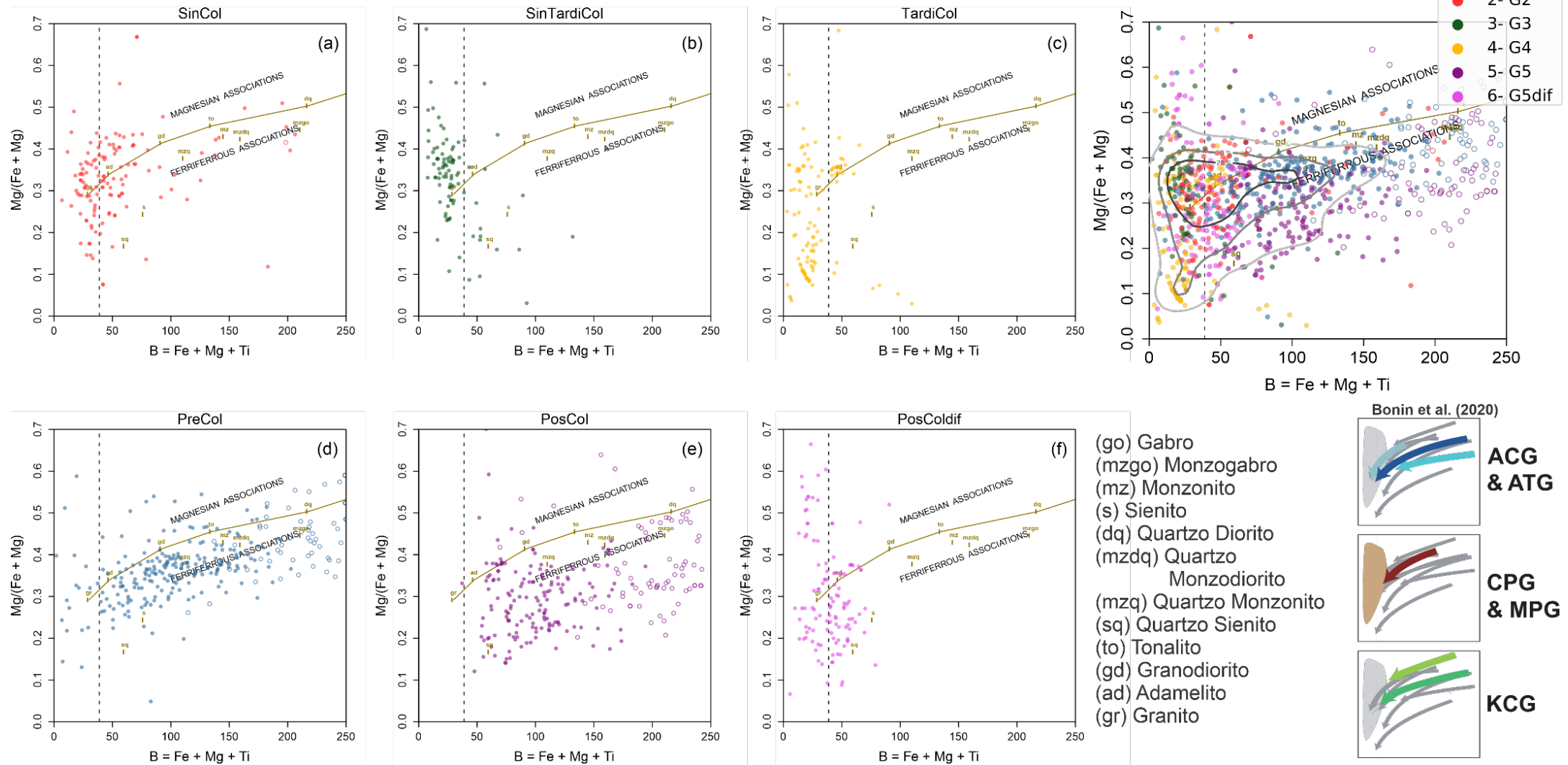
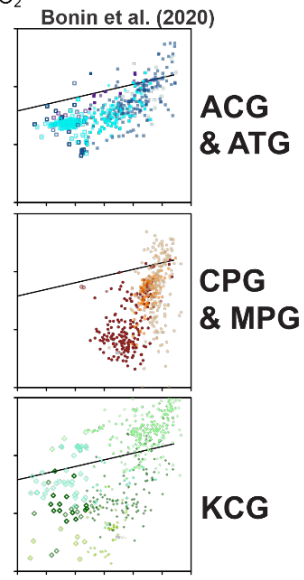
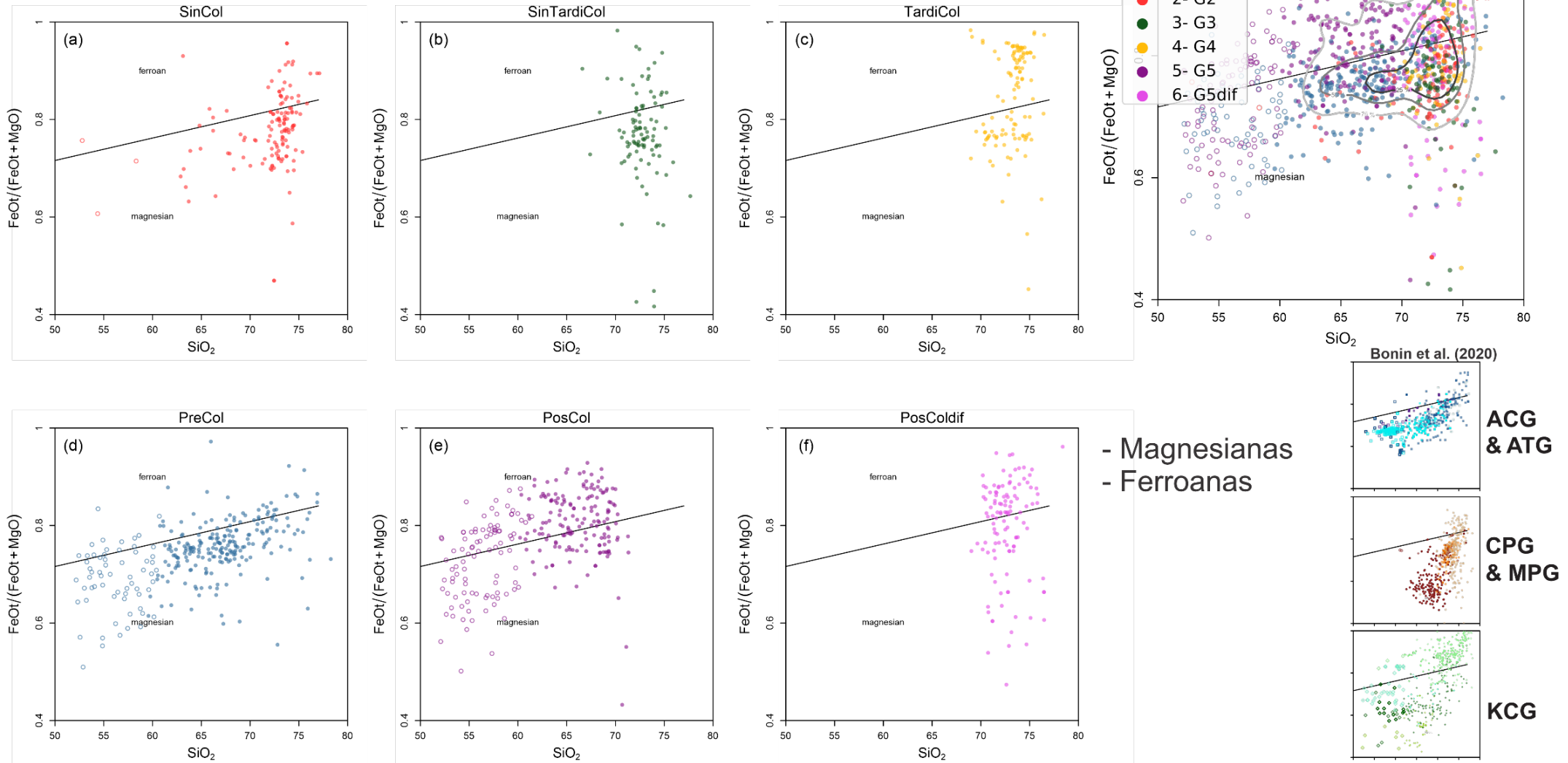


Figura 4.12 – Diagrama binário multicatiônico entre B = Fe+Mg+Ti e #Mg (número de magnésio) = Mg/(Fe+Mg) – valores em milicátions, por Debon & LeFort (1983, 1988).

SiO₂ - FeOt# Frost et al. (2008)



- Magnesianas
- Ferroanas

Figura 4.13 – Diagrama de SiO₂ – FeOt# (“número de Ferro”) por Frost et al. (2001, 2008).

Índice MALI (Frost et al. 2008)

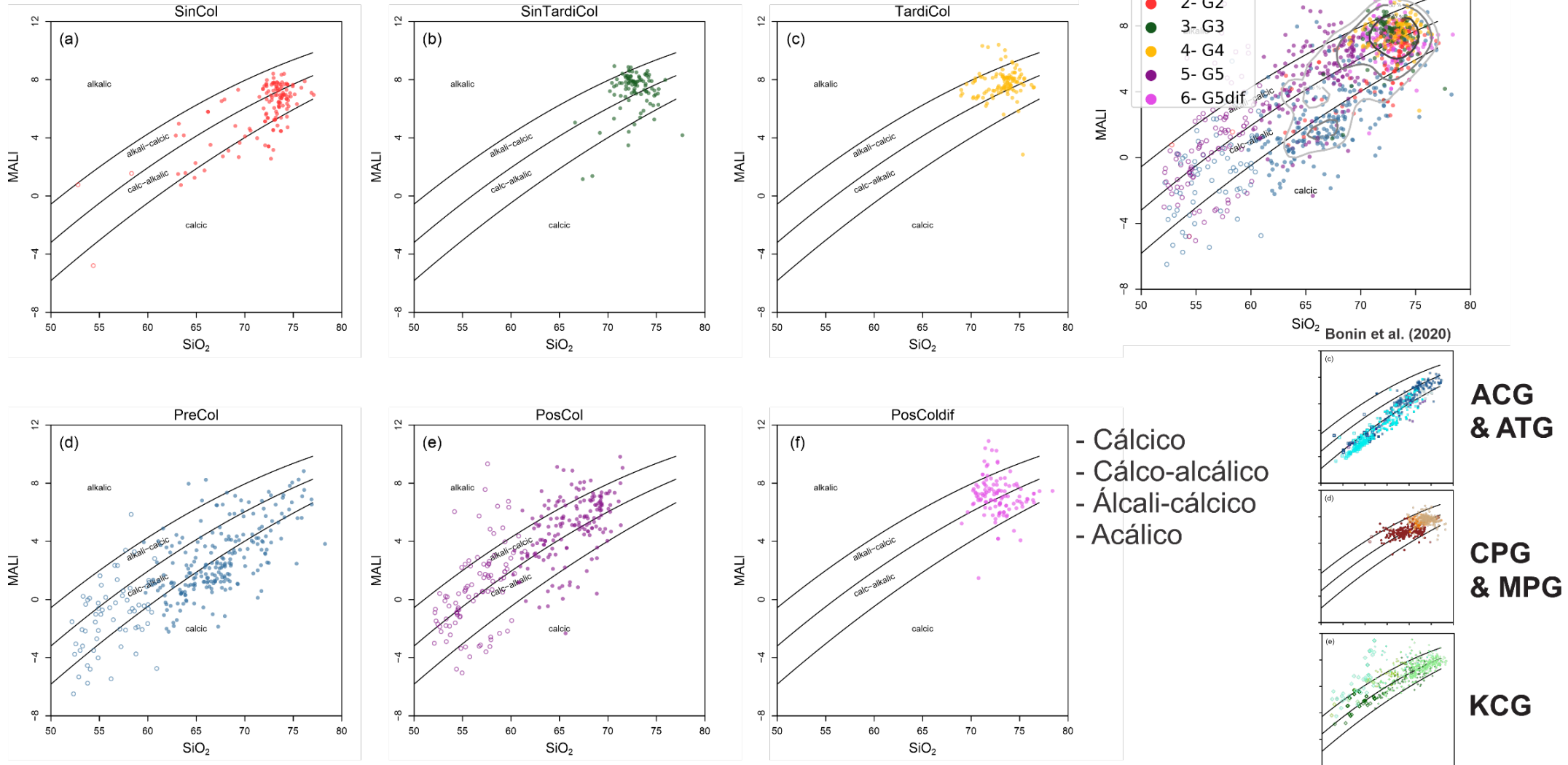


Figura 4.14 – Diagrama de SiO₂ (em % em peso) vs. Índice de álcali-lime modificado (MALI), definido como Na₂O+K₂O-CaO (em % em peso) por Frost et al. (2001, 2008).

A/CNK-A/NK Shand (1943)

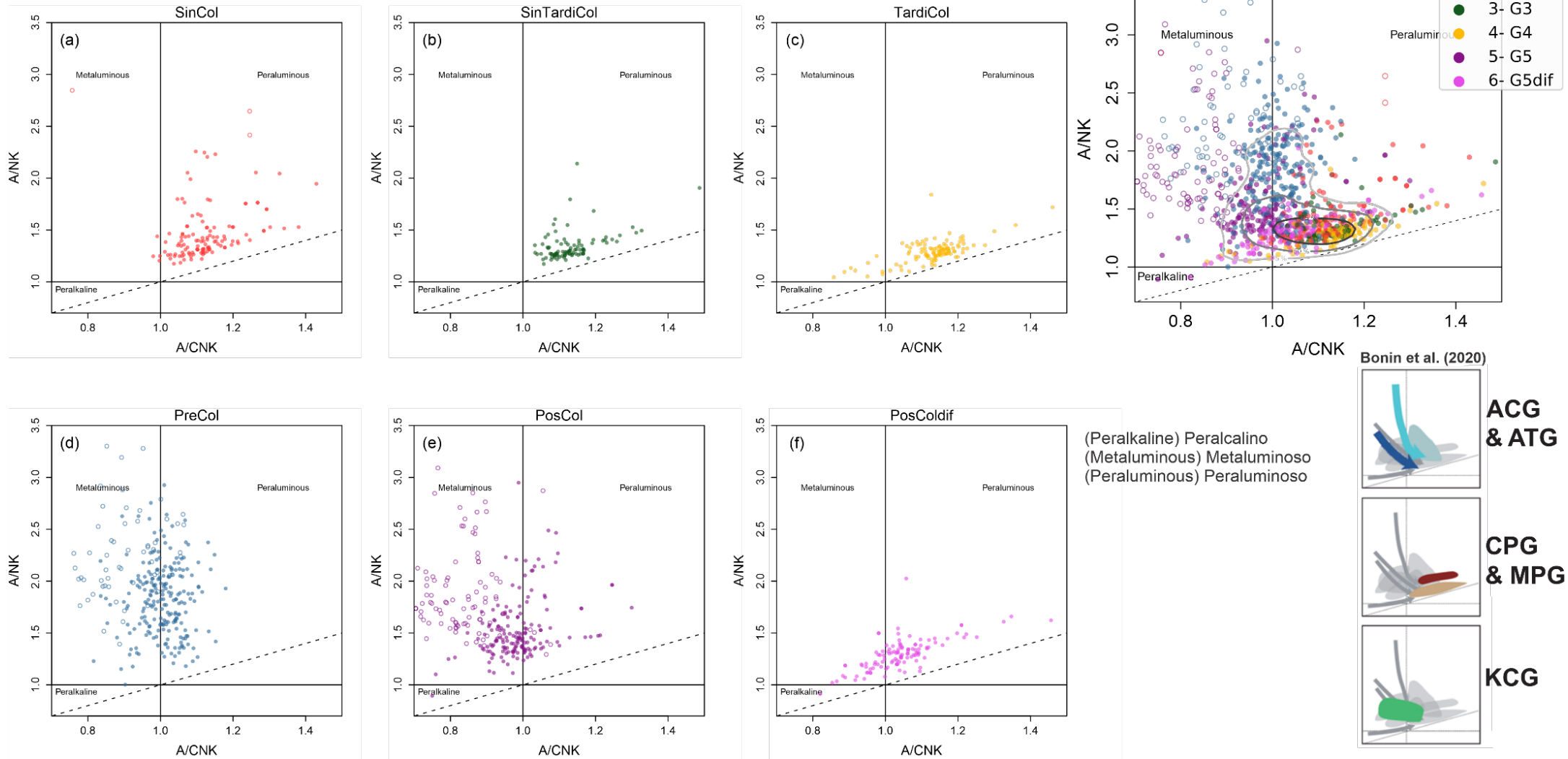


Figura 4.15 – Diagrama binário entre Al_2O_3/Na_2O+K_2O (A/NK) $Al_2O_3/CaO+Na_2O+K_2O$ (A/CNK) de Shand (1943).

Villaseca B-A (1998)

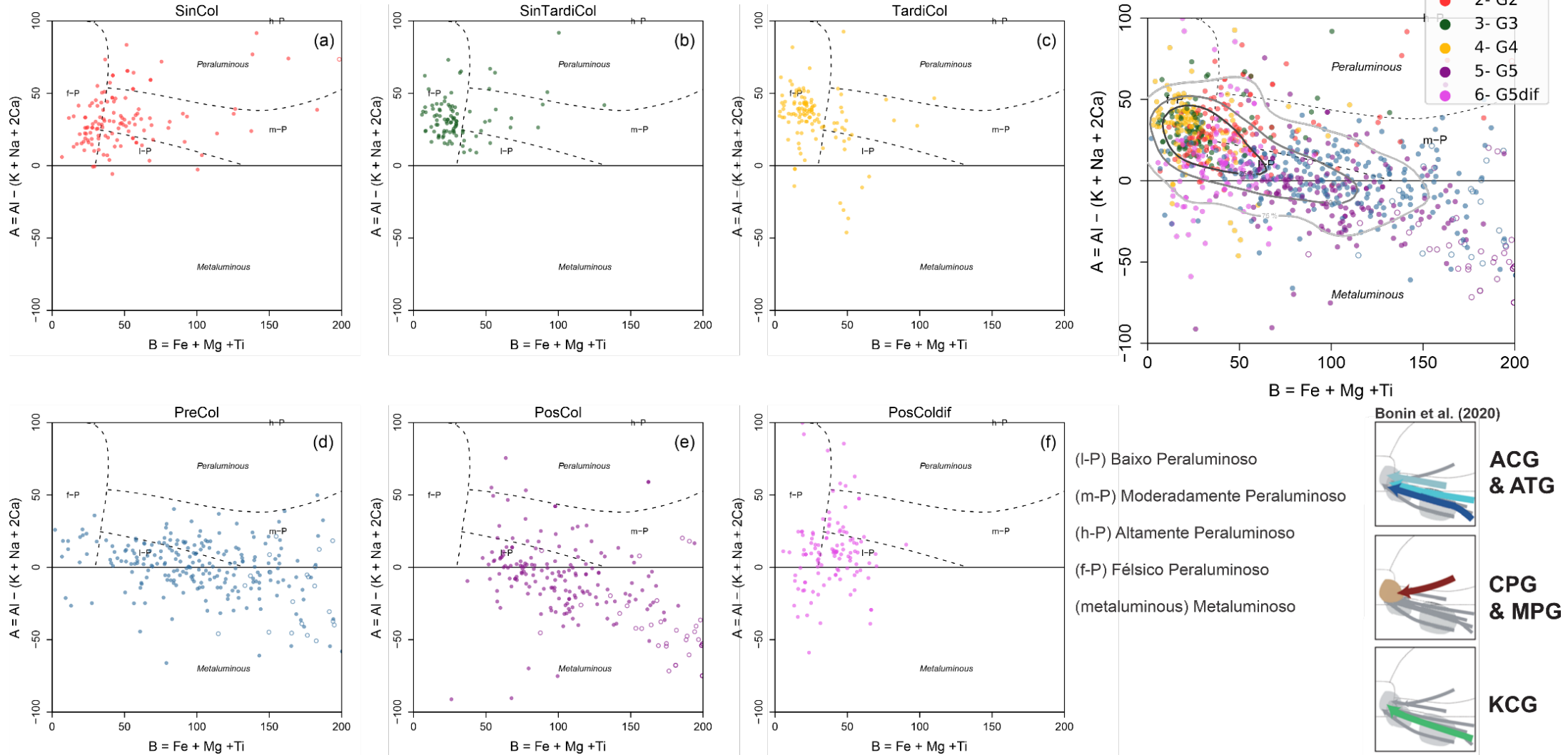


Figura 4.16 – Diagrama multicatiónico B-A (modificado por Villaseca *et al.* 1998), onde $B = Fe + Mg + Ti$ e $A = Al - (K + Na + 2Ca)$.

Moyen et al. A/CNK proj. Biotita (2017)

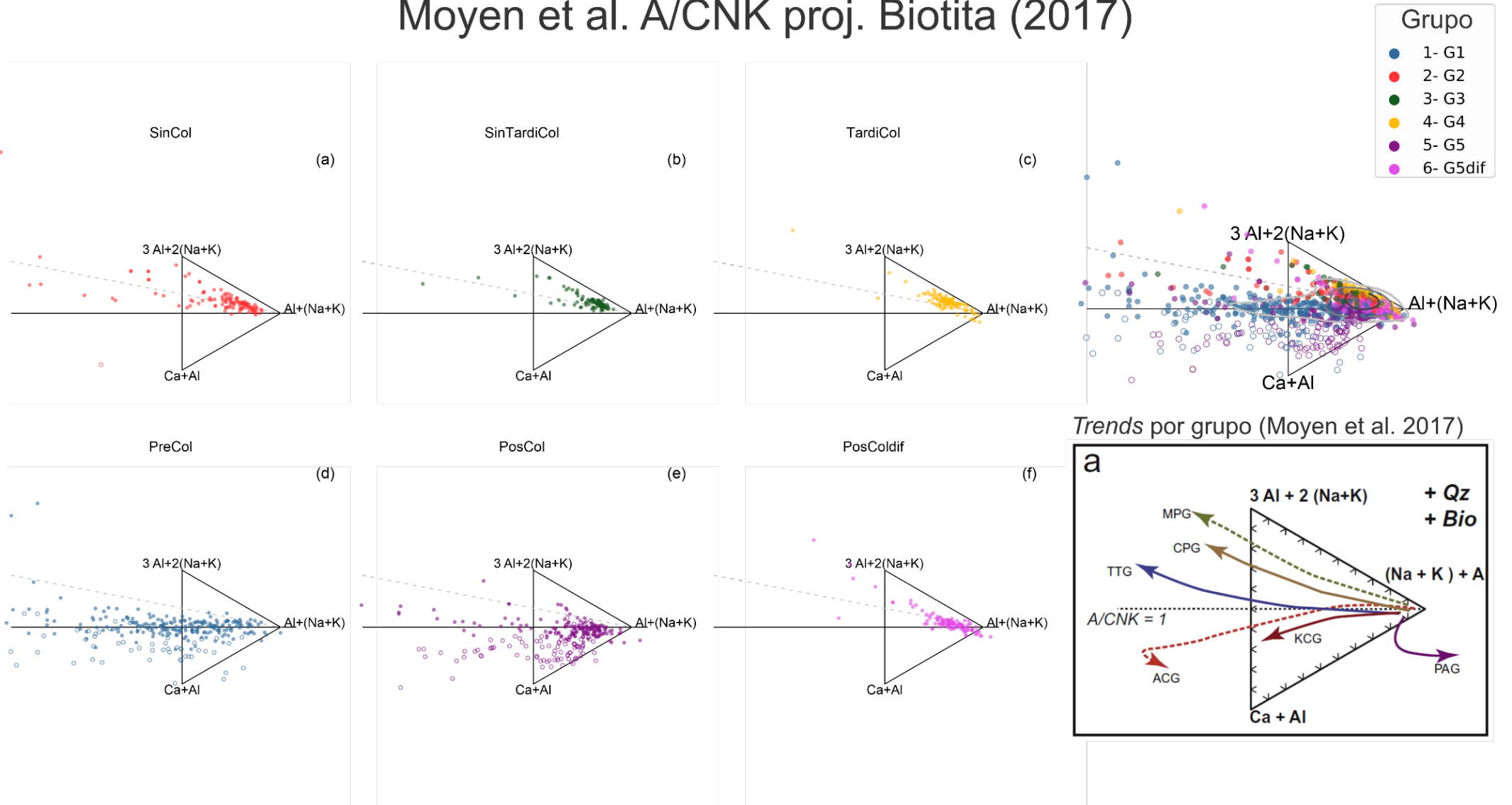


Figura 4.17 – Diagrama triangular projetado na composição da Biotita (Moyen *et al.* 2017), $x_{ms1} = Al - Ca - NK$, $x_{fsp} = -2Al - 2Ca + 3NK - 1/3 FM$ e $x_{CaAl} = Ca$ (FM = Fe + Mg e NK = Na + K). Linha tracejada expressa a relação 2:1 entre os ápices $3Al+2(Na+K)$ e $(Ca+Al)$.

Ternário Ab-An-Or O'Connor (1965)

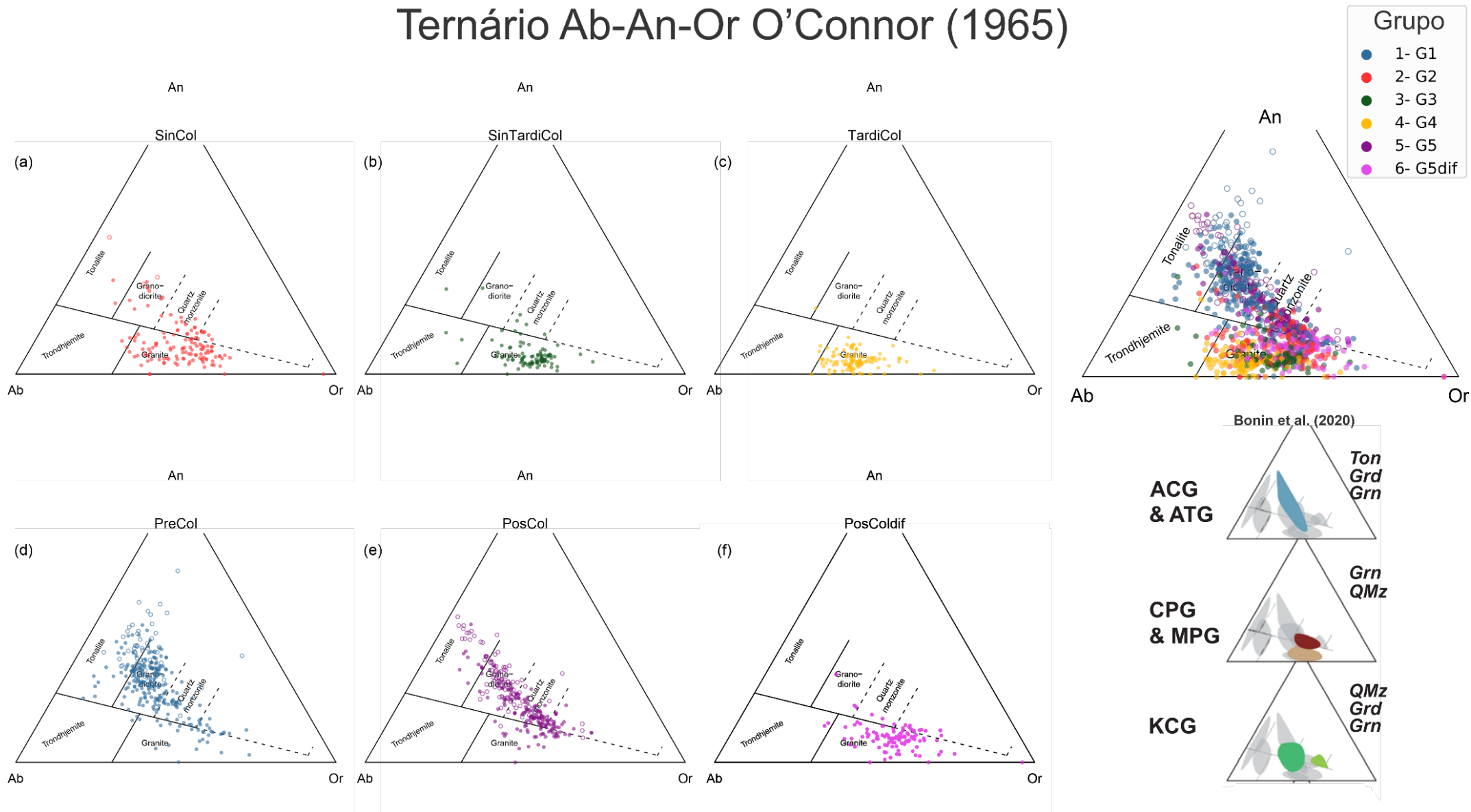


Figura 4.18 – Diagrama ternário de feldspatos Ab-An-Or de O'Connor (1965).

Os principais aspectos observados para as supersuítas do banco de dados do SOAR foram:

- **Supersuíte G1:** As amostras da supersuíte G1 são predominantemente granodioritos, subordinadamente tonalitos. Elas exibem afinidade com os tipos de rochas ACGs/ATGs do banco de dados da literatura, ao compararmos a distribuição e tendências nos diagramas geoquímicos explorados. São subalcalinas (TAS), ricas em plagioclásio cálcico (P-Q e Q'-ANOR), são cálcicas a calco-cálcicas ($\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ e MALI), metaluminosas a levemente peraluminosas (B-A e Shand); e são magnesianas transicionais ferroanas (B-Mg# e FeOt#). No diagrama da projeção da biotita (**Figura 4.16**) se distribuem em uma tendência linear a levemente negativa em relação à linha $A/\text{CNK} = 1$, padrão comumente observado para rochas de arcos magmáticos/arcos de ilha (**ver Anexos 1 e 2 para informações complementares**).
- **Supersuíte G2:** é composta majoritariamente por granitos, como pôde-se ser observado em todos os diagramas de classificação/nomenclatura. São subalcalinas, potássicas, aluminosas, plotam nos campos de rochas Peraluminosas Félsicas a Altamente Peraluminosas e possuem correlação positiva no diagrama B-A. Plotam no campo de associações leucocráticas/leucogranitoides magnesianas no diagrama B-Mg# e no diagrama projetado da composição da biotita apresentam uma inclinação positiva, acima da linha tracejada da relação 2:1 entre os ápices $3\text{Al}+2(\text{Na}+\text{K})$ e $(\text{Ca}+\text{Al})$, região que separa rochas associadas à fontes félsicas/"crustais" (acima da linha, fusão de metagranitoides/ metassedimentos) e máficas/"mantélicas" (abaixo da linha, fonte de composição basáltica/andesítica – vide Moyen *et al.* (2017) e Bonin *et al.* (2020)). Todas essas características observadas exibem uma correspondência com os tipos de rochas CPG/MPG, onde as rochas MPG (Granitoides peraluminosos portadores de muscovita) são experimentalmente gerados a partir da fusão de fontes altamente aluminosas (como rochas sedimentares/metassedimentares pelíticas), enquanto as rochas CPG (Granitoides peraluminosos portadores de Cordierita) possuem gênese associada a fusão de fontes menos aluminosas (quartzo-feldspáticas), como rochas sedimentares imaturas e/ou ígneas/meta-ígneas félsicas.
- **Supersuítas G3 e G4:** ambas apresentaram resultados similares, sendo subalcalinas, altamente félsicas e diferenciadas, ricas em álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), predominantemente compostas por granitos e álcali-feldspato granitos. São ricas

em ortoclásio e albita, enquanto são pobres em fases ferromagnesianas como biotita, anfibólio e ilmenita. São peraluminosas (Shand e B-A) e exibem o mesmo padrão de correlação positiva para os diagramas B-A e do diagrama projetada da composição da biotita, como também observado para a supersuíte G2, indicando fontes félsicas aluminosas, potencialmente sedimentares/metassedimentares. A supersuíte G3 é levemente mais potássica que a supersuíte G4, que por sua vez é mais sódica. Como observado nos diagramas de referência ambas as supersuítes possuem afinidade com os tipos de rochas CPGs/MPGs da literatura.

- **Supersuíte G5:**

1. **G5:** Estas são subalcalinas, predominantemente compostas por quartzo-monzonitos a granitos, e são classificadas como pertencentes à série de alto-K (shoshonítica), álcali-cálcicas a alcálicas (MALI), ferroanas (B-Mg# e FeOt#) e metaluminosas (Shand e B-A). Semelhante à supersuíte G1, elas exibem uma tendência de correlação negativa tanto no diagrama B-A quanto no diagrama projetado da composição da biotita, indicando fortemente a participação de uma fonte máfica, possivelmente mantélica. Sua riqueza em potássio sugere processos de mistura de magma e uma fonte heterogênea. São ricas em ortoclásio, albita, anortita, ilmenita e frequentemente apresentam anfibólios. Demonstram maior semelhança com rochas do tipo KCG, mas as tendências não são tão definidas como nas outras supersuítes, apresentando maior dispersão nos diagramas analisados.
2. **G5dif:** Também subalcalinas, são predominantemente compostas por granitos (TAS, Q'-ANOR, P-Q e Ab-An-Or), sendo notavelmente ricas em quartzo, ortoclásio e albita, em detrimento ao conteúdo de anortita. São mais potássicas que sódicas, e mais peraluminosas que metaluminosas, apresentando uma tendência de correlação positiva no diagrama projetado da composição da biotita, sugerindo possivelmente uma fonte de composição metaígneia félsica, quartzo-feldspática ou até uma fonte metassedimentar imatura (possivelmente calcissilicática). Embora sejam classificadas predominantemente como CPG/MPG, as G5dif integram a supersuíte G5 e podem representar um magma pós-colisional que experienciou intensa mistura de magmas, com predominância de componentes crustais durante sua petrogênese.

Algumas conclusões marcantes podem ser retiradas dos vários resultados que obtivemos, dentre as quais, listam-se:

1. O sistema orogênico Araçuaí-Ribeira constitui uma região de crucial importância para a compreensão da história geológica da plataforma Sul-Americana, servindo também como um laboratório natural para o estudo dos processos associados à granitogênese durante o Ciclo Brasileiro.
2. A investigação por uma compartimentação mais precisa entre as unidades correlatas dos segmentos orogênicos Araçuaí e Ribeira deve persistir.
3. Os resultados alcançados pelo método estatístico LDA, tanto na fase de diferenciação das classes/supersuítas quanto na subsequente reclassificação do banco de dados compilado para o SOAR, demonstraram grande eficácia. Eles certamente contribuem para a compreensão dos processos petrogenéticos predominantes durante a colocação e gênese destes corpos magmáticos das diferentes suítas.

No que diz respeito à discussão acerca dos modelos geotectônicos que se contrapõe para o SOAR, discute-se:

1. Talvez o aspecto mais crítico e diagnóstico na avaliação da validade entre os dois modelos contrapostos, orogenia colisional vs orogenia intracontinental, seja a análise dos estágios pré-colisionais/pré-orogênicos. Isso porque a presença ou ausência de oceanização → subducção são elementos determinantes para estabelecer o ponto de partida do paradigma do modelo colisional. Nesse contexto, as supersuítas G1 e G2 tornam-se cruciais para o debate dessas perspectivas contrastantes.
2. No contexto do modelo de orogenia colisional, a supersuíte G1 se encontra no estágio pré-colisional, e, assim, os resultados advindos da reclassificação do banco de dados, por meio do classificador treinado utilizando LDA, alinham-se com as expectativas para tais rochas. Isso implica que elas pertençam a um conjunto de granitoides que têm interação direta com a química mantélica, especificamente, o tipo ACG (Barbarin 1999). Este fenômeno se materializa pela dinâmica de subducção da crosta oceânica sob a continental, causando a desidratação da crosta oceânica e a metassomatização da cunha mantélica,

facilitando, assim, a fusão parcial do manto litosférico enriquecido que, devido à diferença de densidade, ascenderia.

3. O modelo de orogenia intracontinental não consegue elucidar a origem das rochas da supersuíte G1, dado que estas apresentam afinidades com granitoides do tipo ACG, e não com os tipos CPG/MPG, esperados em cenários onde a fusão crustal é predominante.
4. A supersuíte G1 tem uma natureza caracteristicamente mista entre componentes mantélicos e crustais, com predominância do componente mantélico (**ver Anexos 1 e 2**). Essas tendências são evidenciadas no diagrama A/CNK da projeção da biotita (**Figura 4.16**), onde as amostras exibem uma dispersão cuja linha de tendência tem uma inclinação negativa em relação à linha de $A/CNK = 1$. Por outro lado, as amostras da supersuíte G5 mostram uma predominância ainda maior do componente mantélico em comparação com a supersuíte G1, evidenciada pelo alto coeficiente angular na linha de tendência, que também se relaciona negativamente com a referência de $A/CNK = 1$.
5. As supersuítes G2, G3 e G4 assinalam o intervalo de transição entre o término do processo de subducção da crosta oceânica, ocorrido durante a progressão da convergência, e o início do processo de colisão. Este intervalo é caracterizado pela prolífica geração de granitos dos tipos CPG e MPG, com a ocorrência subordinada de alguns KCGs (Barbarin, 1999). Conforme observado, a supersuíte G2 é o membro menos diferenciado/félsico dentre as três supersuítes, enquanto as supersuítes G3 e G4 representam formas mais evoluídas do estágio de colisão continental.
6. Quando granitoides do tipo KCG prevalecem, sugere-se que sejam excelentes indicadores de significativas alterações no ambiente geodinâmico da evolução orogênica, sinalizando um enfraquecimento até a completa cessação das forças convergentes (Barbarin, 1999). A presença conjunta de suítes ígneas máficas cálcio-alcalinas de alto-K (ou até shoshoníticas) e rochas peraluminosas silicáticas de Al-Fe-Mg é comum. Nessas associações, as frações máficas são oriundas da fusão parcial de uma fonte caracterizada por anfibólio-espinélio-peridotito metassomatizado, enquanto os componentes peraluminosos provêm da fusão por desidratação incongruente de muscovita±biotita da crosta continental (Bonin, 2004). As rochas dos dois grupos da supersuíte G5 (G5 e G5dif) ilustram essa dualidade complexa do episódio pós-colisional. O grupo G5

apresenta características típicas de KCG (metaluminosas, máficas, alto-K), enquanto as rochas G5dif são CPG/MPG e pertencem ao estágio pós-colisão, apresentando características peraluminosas, félsicas e são ricas em Al-Fe-Mg.

Em síntese, as duas fases de modelagem deste estudo (separação de classes e reclassificação) podem ser continuamente otimizadas, visando aumentar a precisão e melhorar as métricas de eficácia de maneira geral. Todavia para os objetivos inicialmente propostos para este trabalho, ambas se mostraram adequadas, sendo consideradas válidas e extremamente relevantes para o avanço científico nesta região geológica complexa da plataforma Sul-Americana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aitchison, J. (1986). *The Statistical Analysis of Compositional Data*. Chapman & Hall.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., Pedrosa-Soares, A.C., Cruz, S.C.P.; Peres, G.G. & Whittington, A.G. (2003). Tectônica Quebra-Nozes e a Gênese do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 9, Búzios. SBG-RJ, Boletim de Resumos, 40-43.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., Pedrosa-Soares, A.C., Peres, G.G., Cruz, S.C.P. & Whittington, (2006). Kinematic evolution of the Araçuaí–West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, 149: 43-63.
- Alkmim, F.F., Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M. & Cruz, S.C.P. 2007. Sobre a Evolução Tectônica do Orógeno Araçuaí-Congo Ocidental. *Geonomos*, 15(1): 25 – 43.
- Alkmim, F. F., Kuchenbecker, M., Reis, H. L., & Pedrosa-Soares, A. C. (2017). The Araçuaí Belt. São Francisco craton, eastern Brazil: Tectonic genealogy of a miniature continent, 255-276.
- Almeida, F. D. (1967). Origem e evolução da Plataforma Sul-Americana. *Boletim*, (241).
- Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349- 364.
- Araújo, C., Pedrosa-Soares, A., Lana, C., Tedeschi, M., & Dussin, I. (2020). Primeiro registro de magmatismo juvenil no arco magmático Rio Doce, Orogeno Araçuaí meridional. In: XVII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos (SNET), SBG, Bento Gonçalves, Annals, 105.
- Barbosa, A.L.M., Grossi-Sad, J.H. & Torres, N. (1964). Geologia das quadrículas de Barra do Cuieté e Conselheiro Pena, Minas Gerais. Belo Horizonte, DNPM-GEOSOL, 285 p.
- Barbarin, B. (1999). A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46, 605–626.

- Bishop, C. M., & Nasrabadi, N. M. (2006). Pattern recognition and machine learning (Vol. 4, No. 4, p. 738). New York: Springer.
- Bonin, B., Janoušek, V., Moyen, J.F., (2020). Chemical variation, modal composition and classification of granitoids. In: Janoušek, V., Bonin, B., Collins, W.J., Farina, F., Bowden, P. (Eds.), *Post-Archean Granitic Rocks: Contrasting Petrogenetic Processes and Tectonic Environments*. Geol. Soc. London Spec. Pub. 491. pp. 9–51.
- Brito-Neves, D. B., Fuck, R. A., & Pimentel, M. M. (2014). The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology*, 44, 493-518.
- Cavalcante, C., Fossen, H., Almeida, R. P., Hollanda, M. H. B., & Egydio-Silva, M. (2019). Reviewing the puzzling intracontinental termination of the Araçuaí-West Congo orogenic belt and its implications for orogenic development. *Precambrian Research*, 322, 85–98.
- Caxito, F. D. A., Santos, L. C. M. D. L., Ganade, C. E., Bendaoud, A., Fettous, E. H., & Bouyo, M. H. (2020). Toward an integrated model of geological evolution for NE Brazil-NW Africa: The Borborema Province and its connections to the Trans-Saharan (Benino-Nigerian and Tuareg shields) and Central African orogens. *Brazilian Journal of Geology*, 50.
- Caxito, F. A., Hartmann, L. A., Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A. C., Bruno, H., Basei, M. A., & Chemale, F. (2022). Multi-proxy evidence for subduction of the Neoproterozoic Adamastor Ocean and Wilson cycle tectonics in the South Atlantic Brasiliano Orogenic System of Western Gondwana. *Precambrian Research*, 376, 106678.
- Chappell, B.W. & White, A.J.R. (1974). Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8, 173–174.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cordani, U.G., Melcher, G.C., Almeida, F.F.M., (1967). Outline of Precambrian geochronology of South America. *Can. J. Earth Sci.* 5, 629–632.
- Cunningham, D., (2005). Active intracontinental transpressional mountain building in the Mongolian Altai: Defining a new class of orogen. *Earth and Planetary Science Letters* 240, 436–444.

- Debon, F., & Le Fort, P. (1983). A chemical–mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 73(3), 135-149.
- Debon, F., & Le Fort, P. (1988). A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: principles, method, applications. *Bulletin de Minéralogie*, 111(5), 493-510.
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P. & Marchal, M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major element analyses – its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*, 29, 183–210.
- De Vaus, D. A. (2002). *Analyzing social science data: 50 key problems in data analysis*. London: SAGE.
- Duda, R. O., & Hart, P. E. (1973). *Pattern classification and scene analysis* (Vol. 3, pp. 731-739). New York: Wiley.
- Dyksterhuis, S. e Müller, R.D., (2008). Cause and evolution of intraplate orogeny in Australia. *Geology* 36, 495–498.
- Fisher, R. A. (1936). *Statistical methods for research workers*. Statistical methods for research workers., (6th Ed).
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., Arculus, R. J., Ellis, D. J., & Frost, C. D. (2001). A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of petrology*, 42(11), 2033-2048.
- Frost, B. R., & Frost, C. D. (2008). A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology*, 49(11), 1955-1969.
- Fossen, H., Cavalcante, C., Konopásek, J., Meira, V. T., Almeida, R. P., Hollanda, M. H. B., & Trompette, R. (2020). A critical discussion of the subduction-collision model for the Neoproterozoic Araçuaí-West Congo orogen. *Precambrian Research*, 343, 105715.

- Gonçalves, L.E.S., Alkmim FF, Pedrosa-Soares AC (2010) Características geoquímicas da Suíte G1, arco magmático do Orógeno Araçuaí, entre Governador Valadares e Ipanema, MG. *Revista da Escola de Minas* 63:457–464.
- Gonçalves, L., Farina, F., Lana, C., Pedrosa-Soares, A.C., Alkmim, F.F., Nalini Jr., H.A., (2014). New U-Pb ages and lithochemical attributes of the Ediacaran Rio Doce magmatic arc, Araçuaí confined orogen, Southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 52, 1-20.
- Gonçalves, L., (2015). Contribuição à geoquímica, geocronologia, estrutura e evolução dos segmentos central e setentrional do arco magmático Rio Doce, Orógeno Araçuaí, MG. 180 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Goncalves, L., Alkmim, F.F., Pedrosa-Soares, A.C., Dussin, I.A., Valeriano, C.d.M., Lana, C., Tedeschi, M., 2016. Granites of the intracontinental termination of a magmatic arc: an example from the Ediacaran Araçuaí orogen, southeastern Brazil. *Gondwana Res.* 36, 439–458.
- Goncalves, L., Alkmim, F.F., Pedrosa-Soares, A., Goncalves, C.C., Vieira, V., 2018. From the plutonic root to the volcanic roof of a continental magmatic arc: a review of the Neoproterozoic Araçuaí Orogen, southeastern Brazil. *Int. J. Earth Sci.* 107, 337–358.
- Gradim, C., Roncato, J., Pedrosa-Soares, A. C., Cordani, U. G., Alkmim, F. F., Dussin, I. A., ... & Babinski, M. (2014). The hot back-arc zone of the Araçuaí orogen, Eastern Brazil: from sedimentation to granite generation. *Brazilian Journal of Geology*, 44(1), 155-180.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate data analysis* (7th ed.). Prentice Hall.
- Harker, A. 1909. *The Natural History of Igneous Rocks*. Methuen & Co., London. Ishihara, S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, 27, 293–305.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). "The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction." Springer Series in Statistics. Springer.

- Heilbron, M., Mohriak, W. U., Valeriano, C. M., Milani, E. J., Almeida, J., & Tupinambá, M. (2000). From collision to extension: the roots of the southeastern continental margin of Brazil. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 115, 1–32.
- Heilbron, M., & Machado, N. (2003). Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic–Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Research*, 125(1-2), 87-112.
- Heilbron, M., Soares, A. C. P., Campos, N., Silva, L. C., Trouw, R., & Janasi, V. (2004). Província mantiqueira. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R., Brito Neves, B. B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (Beca Produções Culturais Ltda, São Paulo).
- Heilbron, M., Tupinambá, M., de Morisson Valeriano, C., Armstrong, R., do Eirado Siva, L. G., Melo, R. S., ... & Machado, N. (2013). The Serra da Bolívia complex: the record of a new Neoproterozoic arc-related unit at Ribeira belt. *Precambrian Research*, 238, 158-175.
- Heilbron, M., Cordani, U. G., & Alkmim, F. F. (Eds.). (2017). *São Francisco craton, eastern Brazil: Tectonic genealogy of a miniature continent*. Regional Geology Reviews, Switzerland: Springer International Publishing Co.
- Heilbron, M., Silva, L. G. E., Almeida, J. C. H., Tupinambá, M., Peixoto, C., Valeriano, C. M., Lobato, M., Rodrigues, S., Ragatky, C. D., Silva, M. A., Monteiro, T., Freitas, N., Miguens, D., Girão, R. (2020a). Proterozoic to Ordovician geology and tectonic evolution of Rio de Janeiro State, SE-Brazil: insights on the central Ribeira Orogen from the new 1: 400,000 scale geologic map. *Brazilian Journal of Geology*, 50, 1–25. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190099>.
- Heilbron, M., de Morisson Valeriano, C., Peixoto, C., Tupinambá, M., Neubauer, F., Dussin, I., *et al.* (2020b). Neoproterozoic magmatic arc systems of the central Ribeira belt, SE-Brazil, in the context of the West-Gondwana pre-collisional history: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, 102710. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102710>.
- Huberty, C. J. (1994). Why multivariable analyses? *Educational and Psychological Measurement*, 54(3), 620-627.
- Ihaka, R., & Gentleman, R. (1996). R: a language for data analysis and graphics. *Journal of computational and graphical statistics*, 5(3), 299-314.

- Ishihara, S. (1977). The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining geology*, 27(145), 293-305.
- Konopásek, J., Cavalcante, C., Fossen, H., & Janoušek, V. (2020). Adamastor—an ocean that never existed? *Earth Science Reviews*, 103201.
- Janoušek, V., Moyen, J.F., Martin, H., Erban, V. & Farrow, C. 2016. *Geochemical Modelling of Igneous Processes – Principles and Recipes in R Language. Bringing the Power of R to a Geochemical Community*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Janoušek, V., Bonin, B., Collins, W.J., Farina, F. & Bowden, P. 2019. Whole-rock geochemical modelling of granite genesis: the current state of the play – Introduction. In: Janoušek, V., Bonin, B., Collins, W.J., Farina, F. & Bowden, P. (eds), *Post-Archaean Granitic Rocks: Contrasting Petrogenetic Processes and Tectonic Environments*. Geological Society of London Special Publications 491.
- Janoušek, V., Farrow, C. M., & Erban, V. (2006). Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, 47(6), 1255-1259.
- Jacob, J. B., Moyen, J. F., Fiannacca, P., Laurent, O., Bachmann, O., Janoušek, V., ... & Villaros, A. (2021). Crustal melting vs. fractionation of basaltic magmas: part 2, attempting to quantify mantle and crustal contributions in granitoids. *Lithos*, 402, 106292.
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal component analysis for special types of data* (pp. 338-372). Springer New York.
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2002). *Applied multivariate statistical analysis*.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W. & Woolley, A.R. 1992. The construction of the total alkali-silica chemical classification of volcanic rocks. *Mineralogy and Petrology*, 46, 1–22.
- Lima, S. A., Martins Neto, M. A., Pedrosa-Soares, A. C., Cordani, U. G., & Nutman, A. (2002). A Formação Salinas na área-tipo, NE de Minas Gerais: Uma proposta de revisão da estratigrafia da Faixa Araçuaí com base em evidências sedimentares, metamórficas e idades U-Pb SHRIMP. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(4), 491-500.

- Machado, N., Schrank, A., Abreu, F. R., Knauer, L. G., & Abreu, P. A. A. (1989). Resultados preliminares da geocronologia U-Pb na Serra do Espinhaço meridional. In: Proceedings of the 5th Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Sociedade Brasileira de Geologia-Núcleo MG, Belo Horizonte, 171-174.
- Maniar, P. D., & Piccoli, P. M. (1989). Tectonic discrimination of granitoids. Geological society of America bulletin, 101(5), 635-643.
- Mardia, K., Kent, J., & Bibby, J. (1979). Multivariate analysis. London: Academic Press.
- Meira, V. T., & Juliani, C. (2014). Evolução Tectono-Metamórfica Neoproterozoica dos complexos Embu e Costeiro no contexto de formação do Gondwana Ocidental (leste do Estado de São Paulo).
- Meira, V. T., Garcia-Casco, A., Hyppolito, T., Juliani, C., & Schorscher, J. H. D. (2019a). Tectono-metamorphic evolution of the Central Ribeira Belt, Brazil: A case of late Neoproterozoic intracontinental orogeny and flow of partially molten deep crust during the assembly of West Gondwana. *Tectonics*, 38(8), 3182-3209.
- Melo, M.G., Steves, G., Lana, C., Pedrosa-Soares, A.C., Frei, D., Alkmim, F.F., 2016. Two cryptic anatexis events within a syn-collisional granitoid from the Araçuaí orogen (southeastern Brazil): Evidence from the polymetamorphic Carlos Chagas batholith. *Lithos* 277, 51–71. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.012>.
- Melo, M.G., Lana, C., Stevens, G., Pedrosa-Soares, A.C., Gerdes, A., Alkmim, L.A., Nalini, H.A., Alkmim, F.F., 2017. Assessing the isotopic evolution of S-type granites of the Carlos Chagas Batholith, SE Brazil: clues from U–Pb, Hf isotopes, Ti geothermometry and trace element composition of zircon. *Lithos* 284–285, 730–750.
- Mielke P & Winkler HGF (1979) Eine bessere Berechnung der Mesonorm fuer granitische Gesteine. *Neu Jb Mineral, Mh* 471-480.
- Mika, S., Ratsch, G., Weston, J., Scholkopf, B., & Mullers, K. R. (1999, August). Fisher discriminant analysis with kernels. In *Neural networks for signal processing IX: Proceedings of the 1999 IEEE signal processing society workshop (cat. no. 98th8468)* (pp. 41-48).
- Middlemost, E.A.K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37, 215–224.

- Moyen, J. F., Laurent, O., Chelle-Michou, C., Couzinié, S., Vanderhaeghe, O., Zeh, A., & Gardien, V. (2017). Collision vs. subduction-related magmatism: two contrasting ways of granite formation and implications for crustal growth. *Lithos*, 277, 154-177.
- Moyen, J. F. (2020). Archean granitoids: classification, petrology, geochemistry and origin. Geological Society, London, Special Publications, 489(1), 15-49.
- Moyen, J. F., Janoušek, V., Laurent, O., Bachmann, O., Jacob, J. B., Farina, F., ... & Villaros, A. (2021). Crustal melting vs. fractionation of basaltic magmas: Part 1, granites and paradigms. *Lithos*, 402, 106291.
- Nalini Jr., H.A. 1997. Caractérisation des suites magmatiques néoprotérozoïques de la région de Conselheiro Pena et Galiléia (Minas Gerais, Brésil): étude géochimique et structurale des suites Galiléia et Urucum et leur relation avec les pegmatites à éléments rares associées. École des Mines de Saint-Étienne et École des Mines de Paris, Thèse.
- Neves, B. B. D. B., Fuck, R. A., & Pimentel, M. M. (2014). The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology*, 44, 493-518.
- Niggli, P. 1923. *Gesteins-und Mineralprovinzen I*. 1st ed. Gebrüder Bornträger, Berlin.
- O'Connor, J.T. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *US Geological Survey Professional Papers*, B525, 79–84.
- Noce, C. M., Pedrosa-Soares, A. C., Piuzana, D. A. N. I. E. L. L. E., Armstrong, R., Laux, J. H., Campos, C. D., & Medeiros, S. D. (2004). Ages of sedimentation of the kinzigitic complex and of a late orogenic thermal episode in the Araçuaí orogen, northern Espírito Santo State, Brazil: Zircon and monazite U-Pb SHRIMP and ID-TIMS data. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(4), 587-592.
- Novo, T. A., Soares, A. C. P., Noce, C. M., de Alkmim, F. F., & Dussin, I. A. (2010). Rochas charnockíticas do sudeste de Minas Gerais: a raiz granulítica do arco magmático do Orógeno Araçuaí. *Brazilian Journal of Geology*, 40(4), 573-592.
- Oliveira, R. G., & Medeiros, W. E. (2018). Deep crustal framework of the Borborema Province, NE Brazil, derived from gravity and magnetic data. *Precambrian Research*, 315, 45–65.

- O'Connor, J. T. (1965). A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. US Geological Survey, Professional Papers 525B, B79-B84.
- Peacock, M.A. 1931. Classification of igneous rock series. *The Journal of Geology*, 39, 54–67.
- Pearce JA, Harris NBW, Tindle AG (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J Petrol* 25:956–983.
- Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M., Vidal, P., Monteiro, R. L. B. P., & Leonardos, O. H. (1992). Toward a new tectonic model for the late proterozoic Araçuaí (SE Brazil)-West Congolian (SW Africa) belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 6(1-2), 33-47.
- Pedrosa-Soares AC, Vidal P, Leonardos OH, Brito Neves BB (1998) Neoproterozoic oceanic remnants in eastern Brazil: further evidence and refutation of an exclusively ensialic evolution for the Araçuaí-West Congo Orogen. *Geology* 26:519–522.
- Pedrosa-Soares, A. C., Wiedemann-Leonardos, C. M., Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomas Filho, A., & Campos, D. A. (2000). Tectonic Evolution of South America.
- Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M., Alkmim, F. F. D., Silva, L. C. D., Babinski, M., Cordani, U. G., & Castañeda, C. (2007). Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977.
- Pedrosa-Soares, A. C., Alkmim, F. F., Tack, L., Noce, C. M., Babinski, M., Silva, L. C. D., & Martins-Neto, M. A. (2008). Similarities and differences between the Brazilian and African counterparts of the Neoproterozoic Araçuaí-West Congo orogen. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1), 153-172.
- Pedrosa-Soares, A. C., De Campos, C. P., Noce, C., Silva, L. C., Novo, T., Roncato, J., ... & Alkmim, F. (2011). Late Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. *Geological Society, London, Special Publications*, 350(1), 25-51.
- Pedrosa-Soares, A. C., & de Alkmim, F. F. (2011). How many rifting events preceded the development of the Araçuaí-West Congo orogen? *Geonomos*.
- Pedrosa-Soares, A. C., Deluca, C., Araujo, C. S., Gradim, C., Lana, C. D. C., Dussin, I., ... & Babinski, M. (2020). O Orógeno Araçuaí à luz da geocronologia: um tributo a

Umberto Cordani. Geocronologia e evolução tectônica do Continente Sul-Americano: a contribuição de Umberto Giuseppe Cordani, 250-272.

Pitcher, W.S., Atherton, M.P., Cobbing, E.J., Beckinsale, R.D. (1985). Magmatism at a Plate Edge: the Peruvian Andes. Blackie, Halstead Press, Glasgow.

Porada, H. (1989). Pan-African rifting and orogenesis in southern to equatorial Africa and eastern Brazil. *Precambrian Research*, 44(2), 103-136.

Pupin, J. P. (1980). Zircon and granite petrology. *Contributions to mineralogy and petrology*, 73(3), 207-220.

Queiroga, G. N., Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M., de Alkmim, F. F., Pimentel, M. M., Dantas, E., ... & Prichard, H. (2007). Age of the Ribeirão da Folha ophiolite, Araçuaí Orogen: The U-Pb zircon (LA-ICPMS) dating of a plagiogranite. *Geonomos*.

Raimondo, T., Collins, A. S., Hand, M., Walker-Hallam, A., Smithies, R. H., Evins, P. M., Howard, H. M., (2009). Ediacaran intracontinental channel flow. *Geology* 37, 291–294, doi:10.1130/G25452A.1.

Raimondo, T., Collins, A.S., Hand, M., Walker-Hallam, A., Smithies, R.H., Evins, P.M., Howard, H.M., (2010). The anatomy of a deep intracontinental orogen. *Tectonics* 29, TC4024, doi:10.1029/2009TC002504.

Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R., & Dutter, R. (2008). *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. John Wiley & Sons.

Ribeiro, A., Teixeira, W., Dussin, I. A., Ávila, C. A., & Nascimento, D. (2013). U–Pb LA-ICP-MS detrital zircon ages of the São João del Rei and Carandaí basins: new evidence of intermittent Proterozoic rifting in the São Francisco paleocontinent. *Gondwana Research*, 24(2), 713-726.

Rollinson, H. (1993). Using geochemical data. Evaluation, presentation, interpretation, 1, 23-89.

Rollinson, H. R., Rollinson, H., & Pease, V. (2021). *Using geochemical data: to understand geological processes*. Cambridge University Press.

- Santos, R. F. D., Alkmim, F. F. D., & Soares, A. C. P. (2009). A Formação Salinas, Orógeno Araçuaí (MG): história deformacional e significado tectônico.
- Schmitt RS, Trouw RAJ, Van Schmus WR, Pimentel MM (2004) Late amalgamation in the central part of Western Gondwana: new geochronological data and the characterization of a Cambrian collision orogeny in the Ribeira belt (SEBrazil). *Precambrian Research* 133: 29–61.
- Shand, S.J. (1927). *Eruptive Rocks*. Thomas Murby, London.
- Silva, L.C.; Armstrong, R.; Noce, C.M.; Carneiro, M.; Pimentel, M.; Pedrosa-Soares, A. C.; Leite, C.; Vieira, V. S.; Silva, M.; Paes, V. & Cardoso-Filho, J. (2002). Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP, parte II: Orógeno Araçuaí, Cinturão Móvel Mineiro. e Cráton São Francisco Meridional. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, p. 513-528.
- Silva L.C., Pinto C.P., Gomes A.C.B., Paes V. (2007). Geocronologia U-Pb (LA-ICP-MS) e a cronoestratigrafia granítica no segmento norte do Orógeno Araçuaí (MG). In: *Simpósio de Geologia do Sudeste*, 10, Diamantina. SBGMG, Resumos, 2007.
- Soares, C., Queiroga, G., Pedrosa-Soares, A., Gouvêa, L.P., Morisson Valeriano, C., Gonzaga de Melo, M., Marques, R., Delicio, R., (2020). The Ediacaran Rio Doce magmatic arc in the Araçuaí – Ribeira boundary sector, southeast Brazil: Lithochemistry and isotopic (Sm–Nd and Sr) signatures. *Journal of South American Earth Sciences* 104.
- Spearman, C. (1904). "The proof and measurement of association between two things". *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72-101.
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12, 1– 33.
- Streckeisen, A. & Le Maitre, R.W. (1979). A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, 136, 169–206.
- Tedeschi, M., Novo, T., Pedrosa-Soares, A., Dussin, I., Tassinari, C., Silva, L. C., ... & Heilbron, M. (2016). The Ediacaran Rio Doce magmatic arc revisited (Araçuaí-Ribeira orogenic system, SE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 68, 167-186.

- Thornton, C.P. & Tuttle, O.F. (1960). Chemistry of igneous rocks. I. Differentiation Index. *American Journal of Science*, 258, 664–684.
- Trompette, R., (1994). *Geology of Western Gondwana (2000-500 Ma). Pan-African-Brasiliano aggregation of South America and Africa*. Balkema.
- Trompette, R. (1997). Neoproterozoic (~ 600 Ma) aggregation of Western Gondwana: a tentative scenario. *Precambrian Research*, 82(1-2), 101-112.
- Trouw, R. A. J., Heilbron, M., Ribeiro, A., Paciullo, F., Valeriano, C. D. M., Almeida, J. C. H. & Andreis, R. R. (2000). The central segment of the Ribeira Belt. *Tectonic Evolution of South America*, 31, 287-310.
- Verma, S. P. (2013). *Statistical Techniques in Geochemistry: Basics and Case Studies*. Nova Science Publishers.
- Vieira, V. S. (2007). *Significado do grupo Rio Doce no contexto do Orógeno Araçuaí (Doctoral dissertation)*.
- White, A.J.R., Allen, C.M., Beams, S.D., Carr, P.F., Champion, D.C., Chappell, B.W., Wyborn, D., Wyborn, L.A.I. (2001). Granite suites and supersuites of eastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48, 515–530.
- Winter, J. D. (2014). *Principles of igneous and metamorphic petrology (Vol. 2)*. Harlow, UK: Pearson education.

Anexo 1

Resumo publicado no Congresso Brasileiro de Geoquímica (2021).

A SUÍTE GALILÉIA REVISITADA: CRESCIMENTO OU RETRABALHAMENTO CRUSTAL NA EDIFICAÇÃO DO ORÓGENO ARAÇUAÍ?

Armond, P.V.¹, Lacerda, S.G.¹, Gonçalves, L.¹; Gonçalves, C.C.¹

¹Universidade Federal de Ouro Preto (pedro.armond@aluno.ufop.edu.br, syro.lacerda@aluno.ufop.edu.br, leonardo.goncalves@ufop.edu.br, cristiane.castro@ufop.edu.br)

À luz do conhecimento atual sobre as possíveis classificações, gênese e potenciais ambientes tectônicos para a formação de rochas graníticas, o presente trabalho fundamenta-se em se visitar rochas dessa natureza constituintes do arco magmático do Orógeno Araçuaí (OA). Contraparte do sistema orogênico Araçuaí-Congo Ocidental, o OA se formou entre a borda leste do Cráton São Francisco e a margem continental brasileira durante a aglutinação do Gondwana Ocidental, ocorrida no Ediacarano. A motivação principal do estudo se deve ao fato de recentes publicações acerca da evolução tectônica desse sistema orogênico, que contrapõem modelo com envolvimento de magmatismo relacionado à subducção e modelo puramente ensialico, ou seja, intracontinental. Para tal, investiga-se granitos componentes da Suíte Galiléia, até então tida como o locus typicus do magmatismo cálcio-alcálico, gerado durante o estágio evolutivo pré-colisional do OA. Edificada sobre uma crosta continental Riáciana, cujo principal componente são rochas do Complexo Juiz de Fora (2,2 - 2,0 Ga), essa suíte é constituída por hornblenda-biotita tonalitos e granodioritos, ricos em enclaves melanocráticos tonalíticos/dioríticos e gabroicos. Portanto, propõem-se minuciosa investigação e reclassificação geoquímica de 10 amostras previamente estudadas. Fundamentada nas concentrações de elementos maiores, obtidas pela técnica de fluorescência de raios-x e, de suas proporções milicatônicas, essa nova classificação se aplicará a Suíte Galiléia e a rochas dos plutons São Vítor – unidade crono-espacialmente correlata – ambas constituintes da Supersuíte G1 (630-580 Ma), que representa a porção plutônica do arco magmático continental do OA. Assim, as amostras estudadas constituem-se de tonalitos e granodioritos (TAS/Ab-An-Or), pertencem à série cálcio-alcálica expandida e são sub-alcálicas ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 7 \text{ wt.}\%$). Apresentam caráter metaluminoso a levemente peraluminoso ($A/\text{CNK} = 0,9 - 1,1$), transicional magnésiano ($\#mg = 0,24-0,36$) e são ricas em plagioclásio. Tais características químicas observadas para essas amostras têm grande similaridade com granitoides cálcio-alcálicos levemente peraluminosos ricos em anfibólio (ACGs comuns – segundo classificações de uma extensa database de granitogênese de diversos trabalhos). É entendido que a provável origem para esse tipo de granitoide está associada à fusão parcial da cunha mantélica metassomatizada, a partir da desidratação da crosta oceânica subductada e cujo regime tectônico é de margem continental ativa; ambiente este típico para a geração de batólitos cordilheiranos. Dessa forma, o comportamento geoquímico descrito pelas rochas estudadas e sua enorme similaridade a rochas do tipo ACGs da literatura, apontam para a necessidade de contribuição mantélica na sua gênese, sendo menos provável uma origem puramente ensialica a partir de fusão parcial de um segmento crustal.

PALAVRAS-CHAVE: SUÍTE GALILÉIA, ORÓGENO ARAÇUAÍ, GRANITOGÊNESE

Anexo 2

Resumo publicado no Congresso Brasileiro de Geoquímica (2023).

MODELAGEM GEOQUÍMICA DA SUÍTE GALILEIA: UMA INVESTIGAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO MANTÉLICA NA GÊNESE DE GRANITOIDES PRÉ-COLISIONAIS METALUMINOSOS DO ORÓGENO ARAÇUAÍ

Armond, P.V.¹, Lacerda, S.G¹, Lopes, S.¹Gonçalves, L.¹; Gonçalves, C.C.¹

¹Universidade Federal de Ouro Preto (pedro.armond@aluno.ufop.edu.br, stephany.lopes@aluno.ufop.edu.br, syro.lacerda@aluno.ufop.edu.br, leonardo.goncalves@ufop.edu.br, cristiane.castro@ufop.edu.br)

As rochas graníticas desempenham um importante papel na compreensão da evolução da crosta continental, de tal maneira que são intensamente estudadas pela comunidade científica. Desenvolveram-se duas correntes de pensamento dominantes focadas na granitogênese e seus processos, subdividindo-se as comunidades daqueles que defendem a granitogênese diretamente associada ao retrabalhamento de rochas crustais e aqueles que suportam a gênese associada ao fracionamento e diferenciação de magmas de derivação mantélica. Neste sentido, o presente trabalho se fundamenta no estudo da Suíte Galiléia (594Ma), que ocorre na forma de diversos plútons na região do médio Rio Doce, sendo um componente historicamente importante para a construção do conhecimento do Sistema Orogênico Araçuaí (SOA). O SOA é um edifício litotectônico de idade Ediacarana-Cambriana que se desenvolveu confinado entre os paleocrátons do São Francisco-Congo. A Suíte Galiléia materializa o estágio pré-colisional (630-580Ma), situa-se no núcleo cristalino do SOA, sendo parte do Arco Magmático Rio Doce, edificado como produto da dinâmica de margem continental ativa associada à subducção da crosta oceânica. A suíte constitui-se de rochas tonalíticas-granodioríticas (Bt-Anf- ou Bt-portadoras), com frequentes enclaves máficos, ácidas (SiO₂ 63,58-72,37%wt.), pertencentes a série cálcio-alcálica expandida, metaluminosas a levemente peraluminosas (ANK~2,09/ACNK<1,1) e magnesianas (#mg~30,2). Possuem razão Na₂O/K₂O de ~1,37%wt., La/Yb entre 7,48-38,27, são enriquecidas em elementos LILE e ETRL em relação aos elementos HFSE e ETRP, respectivamente. Em diagrama multielementar normalizado ao manto primitivo, apresentam anomalias negativas de Ta, Nb, Ti e são classificadas como rochas do tipo Amphibole-rich Calc-alkaline Granitoids (ACG). A Suíte Galiléia se mostra, portanto, como um excelente exemplar para se avançar no conhecimento de rochas raramente preservadas de orógenos colisionais antigos. Para tal, foi realizada uma modelagem geoquímica elementar, centrada no conteúdo de ETR, cujo resultado preliminar sugere como magma parental um líquido basáltico de composição análoga a um E-MORB que, a partir da cristalização fracionada entre 5-10%, gera líquidos de composição tonalítica, deixando como resíduo um granulito de composição máfica (25%Opx, 21%Cpx, 30%Hbl, 20%Plg e 4%Grt). A composição análoga a um E-MORB, que se admite como magma parental, poderia ter sido gerada através da fusão do manto metassomatizado por sedimentos em subducção ou mesmo durante regimes tectono-termais mais antigos. A cristalização subsequente desse líquido originaria rochas com composições menos diferenciadas da Suíte Galiléia (como tonalitos e granodioritos), enquanto processos como cristalização fracionada e/ou assimilação das rochas encaixantes poderiam explicar a diversidade composicional dos termos mais evoluídos, como os granitos, nos quais há um aumento na peraluminosidade.

PALAVRAS CHAVE: MODELAGEM GEOQUÍMICA, GRANITOIDES, SUÍTE GALILÉIA, ORÓGENO ARAÇUAÍ

Anexo 3

Referências da compilação do banco de dados do SOAR.

- Aracema, L.W., França, A.V.M., Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Ferreira, D.C., (1999). Granitóides cálcio-alcálicos do arco magmático neoproterozóico da Faixa Araçuaí: Evidências petrográficas e geoquímicas da região de Teófilo Otoni, MG, Brasil. In: Anais V Cong. Geoq. Países de Língua Portuguesa, Soc. Bras. Geoq., Porto Seguro, pp. 435-437.
- Aranda, R., (2018). Petrology of the Afonso Cláudio Intrusive Complex (Espírito Santo State, Araçuaí Orogen): Insights from Petrography, Litho-geochemistry, U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotopes. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MS Dissertation, 64pp.).
- Araújo, C., Pedrosa-Soares, A., Lana, C., Tedeschi, M., & Dussin, I. (2020). Primeiro registro de magmatismo juvenil no arco magmático Rio Doce, Orogênio Araçuaí meridional. In: XVII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos (SNET), SBG, Bento Gonçalves, Annals, 105.
- Baltazar, O.F., Zucchetti, M., Oliveira, S.A.M., Scandola, J., Silva, L.C., (2010). Geologia das Folhas São Gabriel Da Palha e Linhares. Programa Geologia do Brasil, CPRM–Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte.
- Bayer, P., Schmidt-Thomé, R., Weber-Diefenbach, K., Horn, H.A., (1987). Complex concentric granitoid intrusions in the Coastal Mobile Belt, Espírito Santo, Brazil: the Santa Angélica pluton - an example. *Geologische Rundschau* 76, 357-371.
- Bione, F. R. A., Bongiolo, E. M., Mendes, J. C., & Roland, C. L. (2019). Geochemistry, Sm-Nd isotopes and SHRIMP U-Pb geochronology of the Morro do Coco Granite (RJ, Brazil): another piece of the post-collisional magmatism of the Ribeira Belt. *Brazilian Journal of Geology*, 49.
- Cavalcante, C., Meira, V. T., Magalhães, N., Hollanda, M. H. B., & Oliveira, E. (2021). The role of Ediacaran synkinematic anatectic rocks and the late-orogenic charnockitic rocks in the development of the hot Araçuaí belt. *Precambrian Research*, 365, 106396.
- Corrales, F. F., Dussin, I. A., Heilbron, M., Bruno, H., Bersan, S., Valeriano, C. M., ... & Tedeschi, M. (2020). Coeval high Ba-Sr arc-related and OIB Neoproterozoic rocks linking pre-collisional magmatism of the Ribeira and Araçuaí orogenic belts, SE-Brazil. *Precambrian Research*, 337, 105476.
- De Campos, C.P., (2015). Chaotic flow patterns from a deep plutonic environment: a case study on natural magma mixing. *Pure and Applied Geophysics* 172, 1815-1833."

- De Campos, C.P., Mendes, J.C., Ludka, I.P., Medeiros, S.R., Moura, J.C., Wallfass, C., (2004). A review of the Brazilian magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on post-collisional magmatism. *Journal of the Virtual Explorer* 17, 1-35.
- De Moura, C. D. (2018). Evolução do Batólito Itaporé e rochas encaixantes, Orógeno Araçuaí (MG): geoquímica, geocronologia e petrogênese.
- Decol, J. L. (2021). Mapeamento Geológico e Geoquímica dos ortognaisses da região de Castelo (ES), limite entre os Orógenos Araçuaí e Ribeira.
- Fernandes, M. L. S. (1991). Geologia, petrografia e geoquímica de rochas granitóides da região de Pedra Azul, MG. *Anuário do Instituto de Geociências*, 16, 133-133.
- Figueiredo, C.M.S., (2009). O Arco Magmático Brasileiro na conexão entre os orógenos Araçuaí e Ribeira, Região de Muriaé-MG. Master Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, p.103.
- Figueiredo, M.C.H., Campos Neto, M.C., (1993). Geochemistry of the Rio Doce magmatic arc, Southeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 65, 63-81.
- Gonçalves, L., Alkmim, F., Pedrosa-Soares, A. C., Dussin, I.A., Valeriano, C.M., Lana, C., Tedeschi, M. F., 2015. Granites of the intracontinental termination of a magmatic arc: an example from the Ediacaran Araçuaí Orogen, Southeastern Brazil. *Gondwana Research* (manuscript accepted).
- Gonçalves, L., Farina, F., Lana, C., Pedrosa-Soares, A. C., Alkmim, F., Nalini, H. A., (2014). New U-Pb Ages and Lithochemical Attributes of the Ediacaran Rio Doce Magmatic Arc, Araçuaí Confined Orogen, Southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 52, 1-20.
- Gonçalves, L.E.S., 2009. Características gerais e história deformacional da Suíte Granítica G1, entre Governador Valadares e Ipanema, MG. Master Thesis, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brazil, p. 112.
- Gouvêa, L. P., de Medeiros, S. R., Mendes, J. C., Soares, C., Marques, R., & Melo, M. (2020). Magmatic activity period and estimation of PT metamorphic conditions of pre-collisional opx-metatonalite from Araçuaí-Ribeira orogens boundary, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 99, 102506.
- Gradim, C., Roncato, J., Pedrosa-Soares, A.C., Cordani, U., Dussin, I., Alkmim, F.F., Queiroga, G., Jacobsssohn, T., Silva, L.C., Babinski, M., (2014). The hot back-arc zone of the Araçuaí orogen, Eastern Brazil: from sedimentation to granite generation. *Braz J Geol* 44, 155-180.
- Heilbron, M., Tupinambá, M., Valeriano, C. M., Armstrong, R., Do Eirado Silva, L. G., Melo, R.S., Simonetti, A., Pedrosa-Soares, A. C., Machado, N., (2013). The Serra da Bolívia complex: The record of a new Neoproterozoic arc-related unit at Ribeira belt. *Precambrian Research*, 238, 158-175.

- Junho, M. D. C. B. (1993). Granitóides brasileiros da região central do Estado do Rio de Janeiro-geoquímica preliminar. ANAIS-ACADEMIA BRASILEIRA DE CIENCIAS, 65, 161-161.
- Ludka, I. P., Wiedemann, C. M., & Töpfner, C. (1998). On the origin of incompatible element enrichment in the Venda Nova pluton, State of Espírito Santo, southeast Brazil. Journal of South American Earth Sciences, 11(5), 473-486.
- Ludka, I.P., Wiedemann, C.M., Töpfner, C., (1998). On the origin of incompatible element enrichment in the Venda Nova pluton, State of Espírito Santo, southeast Brazil. Journal of South America Earth Sciences 11, 473-486.
- Ludka, I.P., Wiedemann-Leonardos, C.M., (2000). Further signs of an enriched mantle source under the Neoproterozoic Araçuaí-Ribeira Mobile Belt. Revista Brasileira de Geociências 30, 95-98.
- Mello, F.M., (2000). Litogeoquímica e Química Mineral do Maciço Charnockítico Aimorés-MG. Universidade de São Paulo, São Paulo (Ph.D. Thesis, 167 pp.).
- Nalini Jr., H.A. 1997. Caractérisation des suites magmatiques néoproterozoïques de la région de Conselheiro Pena et Galiléia (Minas Gerais, Brésil): étude géochimique et structurale des suites Galiléia et Urucum et leur relation avec les pegmatites à éléments rares associées. École des Mines de Saint-Étienne et École des Mines de Paris, Thèse.