

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ANÁLISE DE PARÂMETROS LITOGEOQUÍMICOS  
DE GRANITOS E SIENITOS DA PROVÍNCIA  
GRACIOSA, S-SE DO BRASIL**

Giselle Boschi

Orientador: Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2017/20)

SÃO PAULO

2017



De acordo,

---

Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach

---

Giselle Boschi



*A Deus, à minha família, a Dany, Matheus e Maria,  
e ao Prof. Dr. Silvio R F Vlach.  
Muito obrigada pela ajuda, força e paciência.*



## Agradecimentos

Ao final destes anos de graduação, são tantas pessoas a agradecer que não caberiam todas aqui. Os primeiros, claro, são meus pais, que abriram mãos de muitos sonhos para dar a mim e a meu irmão as oportunidades que eles nunca tiveram. Agradeço a meu irmão, meu primeiro e grande amigo, pelo carinho, pelos conselhos e pelas memórias compartilhadas. Agradeço a meu primo Matheus, que me deu apoio e calma nas horas mais difíceis. Agradeço à minha família pela compreensão neste último ano, no qual eu praticamente desapareci.

Também agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach, que teve paciência infinita para me ensinar durante a elaboração deste trabalho. Agradeço também à Prof. Dr. Adriana Alves, que logo no primeiro ano do curso me proporcionou a oportunidade de iniciação científica, se tornando um dos pilares da minha vida acadêmica.

As amizades formadas durante momentos difíceis são normalmente as mais duradouras. Levarei sempre comigo os bons momentos que compartilhei com meus colegas da turma 55, e meus companheiros das madrugadas no saguão. Vilminha, obrigada pelas conversas sinceras e pelo apoio em momentos difíceis. Porca, você faz minha alma mais leve com suas risadas, e agradeço do fundo do meu coração pela oferta de ajuda mesmo quando você também precisava de ajuda. Jaque, obrigada pela companhia, pelos desabafos, e pelas alegrias que você me proporcionou. Akira e Pedrita, vocês foram o melhor grupo que eu poderia esperar, e conseguiram com que eu efetivamente sentisse saudade de estar em campo com vocês. Pepê, não se esqueça que você é meu *spirit animal*.

Durante a graduação, tive a oportunidade única de estudar na Universidade de Glasgow, onde conheci duas pessoas que se tornaram minhas melhores amigas, de um jeito que parecia que já nos conhecíamos desde criança. Obrigada, Dany e Maria, pelas memórias que fizemos juntas, pelas risadas e pelo ombro amigo, pelo apoio e pela amizade, profunda de uma maneira que eu achava impossível. Por mais distante que estejamos, a memória daquele ano juntas sempre será forte o suficiente para nos manter unidas.

Agradeço a todos vocês pela participação nesses anos de graduação. Sem a ajuda, amizade e apoio de vocês, eu não teria conseguido.





## RESUMO

A Província Graciosa é constituída por cerca de uma vintena de plútons graníticos e sieníticos do Tipo-A, que se estendem desde o sudeste de São Paulo até o leste de Santa Catarina. São rochas com alto conteúdo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{total}}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  e baixo conteúdo de  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ , resultando em altas razões  $\text{Fe}^\#$ . A Província é composta por duas associações petrográficas, uma alcalina e outra aluminosa. A associação alcalina, menos abundante, é composta por rochas metaluminosas a peralcalinas, portando anfibólio cálcico e anfibólio sódico, respectivamente. Apresentam feldspato alcalino como única fase feldspática primária, além de chevkinita-(Ce) também primária, e são enriquecidas em elementos alcalinos, HFSE (principalmente Zr e Th), Fe, Mn, Cr, Zn, Pb, Hf, Ta, Ga, Sn, Y e ETR (exceto Eu) quando comparada à outra associação. As condições de cristalização são estimadas próximas ao buffer QFM. A associação aluminosa tem ocorrência mais generalizada, sendo constituída por rochas metaluminosas a peraluminosas, portadoras de biotita e anfibólio cálcico. Apresentam feldspato alcalino e plagioclásio como fases primárias, além de allanita como mineral acessório típico. Em relação à associação alcalina, é enriquecida em Cu, V e alcalino-terrosos. As condições de cristalização são estimadas próximas ao buffer TMQAI. Diagramas que utilizam os conteúdos em  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  são comumente utilizados para distinguir as associações, destacando-se o diagrama  $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$  (% em peso) de dispersão em três dimensões, que separa com eficiência as associações alcalina e aluminosa tanto da Província Graciosa quanto de províncias similares. Outros diagramas em três dimensões que mostram as diferentes tendências das associações são baseados em Sr, Ba, Hf, Ta, Zn, Y e Ni. Modelamentos iniciais com o programa Rhyolite-MELTS sugerem que a evolução da associação alcalina poderia ser explicada pela geração de líquidos peralcalinos a partir da cristalização fracionada de magmas iniciais metaluminosos de composição sienítica.

## ABSTRACT

The Graciosa Province consists of about twenty A-type granitic and syenitic plutons that extend from Southeast São Paulo to East Santa Catarina. They are rocks with high  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{total}}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$  and low  $\text{MgO}$  and  $\text{CaO}$  contents, yielding high  $\text{Fe\#}$  ratios. The Province is made up by two contrasting petrographic associations, one alkaline and the other aluminous. The alkaline association, less abundant, consists of metaluminous to peralkaline rocks, containing calcic amphibole and sodic amphibole, respectively. They have alkali-feldspar as sole primary feldspathic phase, in addition to primary (Ce)-chevkinite, and are enriched in alkaline elements, HFSE (mainly Zr e Th), Fe, Mn, Cr, Zn, Pb, Hf, Ta, Ga, Sn, Y and REE (except Eu) in comparison with the other association. The crystallization conditions are estimated to be around the QFM buffer. The aluminous association, in turn, has more widespread occurrence, and consists of metaluminous to peraluminous rocks with biotite and calcic amphibole. They contain alkali-feldspar and plagioclase as primary phases, in addition to allanita as a typical accessory mineral. In comparison with the alkaline association, it is enriched in Cu, V and alkaline earth metals. The crystallization conditions are estimated to be close to the TMQAI buffer. Diagrams using  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$  contents are commonly used to distinguish between the associations, and the  $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$  (weight %) dispersion diagram in three dimensions stands out, efficiently discriminating the alkaline and aluminous associations of both the Graciosa Province and similar provinces. Other three-dimension diagrams that show the different tendencies of the associations are based on Sr, Ba, Hf, Ta, Zn, Y and Ni contents. Preliminary modeling with Rhyolite-MELTS suggest the evolution of the alkaline association could be explained by the production of peralkaline liquids from fractional crystallization of initial metaluminous syenitic magmas.

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
2. Metas e objetivos .....	3
3. Síntese Bibliográfica .....	4
3.1. Princípios de Geoquímica.....	4
3.2. Desenvolvimento do programa Rhyolite-MELTS .....	7
3.3. Características de Granitos Tipo-A.....	8
3.4. Contexto Geológico Regional .....	12
3.4.1.Associação alcalina.....	15
3.4.2.Associação aluminosa.....	15
4. Materiais e métodos.....	17
5. Interpretação e discussão dos resultados .....	23
6. Discussões e Conclusões .....	33
7. Referências bibliográficas .....	35
8. Anexo I: Exemplo de organização dos dados .....	45
9. Anexo II: Diagramas selecionados .....	49

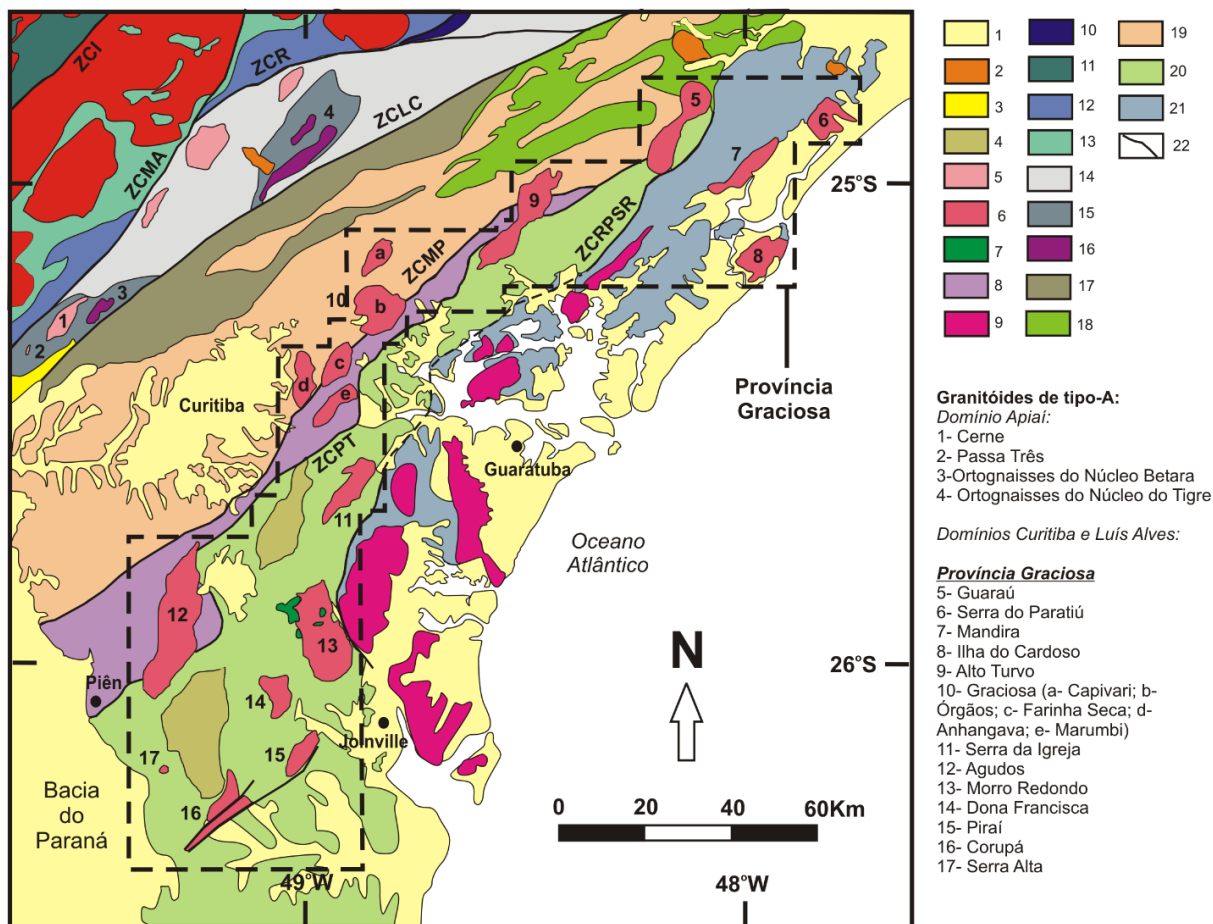


# 1. INTRODUÇÃO

O estudo da distribuição dos elementos químicos nos diversos sistemas geológicos está incluso no escopo da geoquímica; entre suas ferramentas, estão a datação de rochas e a análise química e isotópica de rochas e fluidos, utilizadas para compreender processos petrológicos como a gênese de basaltos e granitos. A geoquímica é frequentemente utilizada para estudos de proveniência de magmas, modelamentos de cristalização e para a discriminação e classificação de rochas graníticas e basálticas; normalmente, tais classificações são relacionadas a interpretações genéticas e/ou tectônicas (Frost et al., 2001; Albarède, 2009). Um exemplo simples de classificação com elementos tectônicos é o de Loiselle e Wones (1979), que agruparam as rochas graníticas formadas sob baixas fugacidades de  $H_2O$ , normalmente alcalinas e frequentemente encontradas em ambientes anorogênicos no denominado Tipo-A.

A Província Graciosa aflora na região Sul do Brasil e é composta por cerca de uma vintena de plútons graníticos e sieníticos do Tipo-A, bem como rochas vulcânicas diretamente associadas, estendendo-se do leste de Santa Catarina até o sudeste de São Paulo (Figura 1). Esses plútons são intrusivos majoritariamente em rochas arqueanas da Microplaca Luiz Alves e em rochas neoproterozoicas da Microplaca Curitiba (Gualda e Vlach, 2007a).

O presente trabalho tem como proposta examinar de forma integrada os dados geoquímicos para elementos maiores, menores e traços disponíveis para a província, se inserindo no contexto dos estudos que vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos pelo grupo de pesquisa coordenado pelo orientador (e.g. Garin, 2002; Gualda e Vlach, 2007a; Vilalva, 2012; Crisma, 2013; Garcia, 2015), com o objetivo de caracterizar a gênese e evolução dos magmatismos sienítico e granítico que constituem a Província Graciosa, e sua relevância para a diferenciação crustal Neoproterozoica da região.



**Figura 1:** Localização dos plútons que compõem a Província Graciosa. 1 – Coberturas fanerozoicas; 2 – Complexos alcalinos mesozoicos; 3 – Bacia eopaleozoica; 4 – Bacias neoproterozoicas; 5 – Stocks graníticos de características de tipo-A do Domínio Apiaí; 6 – Granitos e sienitos de tipo-A da Província Graciosa; 7 – Vulcânicas ácidas e básicas; 8 – Batólito cálcio-alcalino Piên-Mandirituba; 9 – Batólito Paranaguá; 10 – Formação Iporanga; 11 – Grupo Itaiacoca; 12 – Subgrupo Lajeado; 13 – Formação Águas Claras; 14 – Formação Votuverava; 15 – Formação Perau; 16 – Núcleos granito-gnáissicos alcalinos (tipo-A); 17 – Formação Capiru; 18 – Sequência Turvo-Cajati; 20 – Complexo Atuba; 21 – Metassedimentos protomiloníticos (Sequência Rio das Cobras); 22 – Zonas de cisalhamento (ZCI: Zona de Cisalhamento Itapirapuã; ZCMA: Morro Agudo; ZCR: Ribeira; ZCLC: Lancinha-Cubatão; ZCMP: Mandirituba-Piraquara; ZCRPSR: Rio Palmital-Serrinha; ZCPT: Piên-Tijucas. Adaptado e modificado de Prazeres Filho et al. (2003), Heilbron et al. (2004) e Gualda e Vlach (2007a) por Vilalva (2012).

## 2. METAS E OBJETIVOS

Este trabalho se divide em quatro etapas: (1) compilar e organizar os dados geoquímicos de elementos maiores, menores e traços disponíveis para a Província Graciosa; (2) representá-los em diagramas geoquímicos convencionais e analisá-los de forma integrada; (3) comparar estes dados com dados disponíveis para províncias similares tanto no Brasil quanto no exterior; (4) a partir de extensa revisão bibliográfica sobre o comportamento geoquímico de elementos, buscar novos diagramas e parâmetros que acentuem o comportamento de elementos traços, terras-raras, LIL e HFS, principalmente em granitos Tipo-A, dando enfoque no comportamento distinto entre as associações petrográficas alcalina e aluminosa; e (5) modelar uma ou duas composições típicas afins para avaliar a possibilidade teórica de geração de granitos peralcalinos a partir da diferenciação de líquidos sieníticos metaluminosos, utilizando para tanto o programa Rhyolite-MELTS (Gualda e Ghiorso, 2015).

Foram utilizados neste trabalho duas centenas de dados geoquímicos para elementos maiores, menores, traços e terras-raras, representativos das amostras mais típicas de diversos plútons da Província Graciosa, disponibilizados por Oliveira (1989), Siga Jr. (1995), Kaul (1997), Weber (1998), Harara (2001), Passarelli (2001), Garin (2002), Martins et al. (2004), Gualda e Vlach (2007a), Vogado (2010), Vilalva (2012) e Garcia (2015). Estes dados foram comparados com 891 dados de províncias similares brasileiras e do exterior, compilados por Garcia (dados inéditos) e Vilalva e Vlach (dados inéditos), reorganizados para o propósito deste trabalho.

### 3. SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Princípios de Geoquímica

Em 1838, o químico suíço F. Schönbein utilizou o termo “geoquímica” pela primeira vez em literatura (Wedepohl, 1971; White, 2013); entretanto, a geoquímica só amadureceu como ciência durante a década de 1950 (Albarède, 2009). Ela é definida como a ciência que utiliza o entendimento das propriedades químicas dos elementos para compreender a origem, a transformação e a distribuição dos elementos através do tempo geológico, tanto na Terra quanto no sistema solar (Nordstrom e Munoz, 1994). Entra em seu escopo o estudo dos processos que controlam sistemas geológicos como a crosta, o manto, os oceanos e a atmosfera (Albarède, 2009), relacionando-se, portanto, à geologia, à mineralogia, à petrologia e à geofísica (Wedepohl, 1971).

Assim, a geoquímica busca, por exemplo, explicar a razão por que as rochas crustais são constituídas principalmente por oito elementos (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K e Mg), que somam quase 99% de seus componentes; ou por que, dentre esses elementos, o oxigênio é de longe o mais abundante; ou ainda as razões pelas quais os elementos se distribuem de forma contrastada nas rochas que constituem o planeta (e.g. comparativamente, Be, Rb e Ba são tipicamente mais abundantes em granitos, enquanto B, Sc e Ni se concentram mais em rochas básicas) (Mason e Moore, 1982).

Partindo do pressuposto de que cada rocha funciona como um sistema químico, cada mudança química nesse sistema implica na existência de um desequilíbrio, a partir do qual se desenvolve um novo sistema, estável sob as novas condições (Clarke, 1911). O comportamento dos elementos dentro desse sistema é determinado pelo modo de interação entre sua camada de elétrons mais externa e outros íons (Mason e Moore, 1982; Albarède, 2009; White, 2013). Um conceito desenvolvido a partir dessa propriedade é o de potencial iônico, definido pela razão entre a carga e o raio de um íon; ele influencia grandemente o comportamento geoquímico dos elementos (Albarède, 2009).

Os elementos podem, então, ser classificados de acordo com seu comportamento geoquímico, ou pela sua abundância relativa, como é o caso da classificação em elementos maiores ou traços. Os elementos maiores são aqueles que predominam em qualquer análise química de rocha total, e são frequentemente expressos em porcentagem em peso de óxido. Já os elementos traços são aqueles que representam menos de 1% em peso da rocha, sendo normalmente expressos em partes por milhão ou mesmo partes por bilhão (Rollinson, 1993).

Por outro lado, considerando seu comportamento durante processos de fusão parcial, os elementos também podem ser separados em compatíveis e incompatíveis. Em equilíbrios cristais-fusão, os primeiros tendem a permanecer nos minerais residuais, enquanto



os segundos tendem a se concentrar no fundido, de tal forma que a razão entre a concentração inicial do elemento de referência e sua concentração nos cristais residuais e no fundido serão superiores e inferiores à unidade, respectivamente (White, 2013). No caso dos elementos traços, que normalmente não ocorrem em quantidade suficiente para formar minerais próprios, os compatíveis são facilmente incorporados nos minerais comuns, substituindo elementos maiores de carga e raio similares, de acordo com a teoria moderna LSM (*Lattice Strain Model*, cf. Blundy e Wood, 1994a e b). Os elementos traços incompatíveis, por sua vez, possuem ou raio iônico muito grande, ou carga muito alta, e não são facilmente acomodados na estrutura cristalina dos minerais comuns. Por essa razão, ao longo do tempo geológico a crosta foi enriquecida em elementos que se comportam de forma incompatível durante a fusão parcial do manto (White, 2013).

A classificação de Goldschmidt é uma das classificações geoquímicas mais famosas e utilizadas. Ela separa os elementos em litófilos, siderófilos, calcófilos e atmófilos (Mason e Moore, 1982; Albarède, 2009; White, 2013), aos quais Hall (1996) adiciona a classe de elementos hidrófilos. Como o comportamento geoquímico depende da temperatura, da pressão e do ambiente químico como um todo, alguns elementos apresentam afinidade por mais de um grupo (Mason e Moore, 1982). É o caso do Cr, que é fortemente litófilo na crosta terrestre, porém fortemente calcófilo em meteoritos, nos quais O é deficiente; similarmente, C e P são siderófilos quando submetidos a condições extremamente redutoras (Mason e Moore, 1982).

Os elementos litófilos têm afinidade por fases silicáticas (White, 2013), ou seja, são mais comuns nos minerais formadores de rochas da crosta e do manto (Albarède, 2009), ocorrendo como óxidos ou silicatos mesmo sob condições redutoras, com baixas fugacidades de oxigênio (Hall, 1996). Estão inclusos nesta categoria os metais alcalinos, alcalino-terrosos, ETRs, Ti, Zr, Hf, B, Al, Si, O e os halogênios (F, Cl, Br, I); além destes, Cr, Mn, Ga, Ge e P apresentam comportamento tanto litófilo quanto siderófilo (Albarède, 2009; White, 2013). A eletronegatividade dos elementos litófilos é muito alta ou muito baixa, condicionando majoritariamente ligações iônicas (White, 2013). Em rochas ígneas, os elementos traços litófilos substituem isomorficamente elementos maiores em silicatos formadores de rocha; essas substituições podem evidenciar quais cristais participaram de fracionamento ou quais são resíduos de fusão (Hall, 1996).

Os elementos que apresentam afinidade por Fe são chamados siderófilos. São eles Fe, Co, Ni, Mo, Re, Ru, Os, Rh, Ir, Pd, Pt e Au; além destes, Cr, Mn, Ga, Ge e P, que são também litófilos (Albarède, 2009; White, 2013). Por terem afinidade com fase metálica, são empobrecidos na porção silicática (manto e crosta) da Terra (Albarède, 2009; White, 2013), e também não costumam ser abundantes em rochas ígneas (Hall, 1996). Segundo Hall (1996), os elementos siderófilos também possuem tendências calcófilas, e não ocorrem como

elementos nativos apenas quando submetidos às mais altas fugacidades de oxigênio e enxofre. Portanto, em rochas ígneas são concentrados em minerais acessórios ou segregações de enxofre, pois elementos altamente siderófilos não conseguem entrar na estrutura cristalina de silicatos (Hall, 1996). Como suas eletronegatividades são intermediárias, costumam formar ligações covalentes ou metálicas (White, 2013).

Os elementos calcófilos são definidos como aqueles que têm facilidade para formar sulfetos (Albarède, 2009), ou afinidade por fases líquidas ricas em sulfeto (White, 2013), ou ainda aqueles que ocorrem como sulfetos mesmo sob baixas fugacidades de enxofre (Hall, 1996). São eles Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, In, Tl, Pb, As, Sb, Bi, S, Se e T, além de Re, Ru, Os, Rh, Ir, Pd e Pt, que se comportam também como siderófilos (Albarède, 2009; White, 2013). White (2013) ressalta que a maioria dos elementos siderófilos também são um pouco calcófilos, e vice-versa. Hall (1996) especifica que rochas ígneas básicas são mais ricas em sulfetos do que rochas ígneas ácidas, e que nenhum mineral silicático comporta Cu em quantidades suficientes, de tal forma que em rochas ígneas ele é concentrado em sulfetos acessórios.

Os elementos atmófilos são extremamente voláteis, formando gases ou líquidos na superfície da Terra; concentram-se na atmosfera e na hidrosfera. São eles H, C, N e os gases nobres (Hall, 1996; White, 2013).

Além dessas classes, Hall (1996) adiciona a dos elementos hidrófilos (Au, Br, Cl, Li, Mo, Nb, Sn, entre outros), cuja distribuição em rochas ígneas é grandemente influenciada pela presença de água, ou por terem afinidade com as próprias moléculas de água (como Li e outros elementos alcalinos), ou por formarem íons complexos (como  $\text{AuCl}_4^-$  ou  $\text{SnCl}_6^{2-}$ ). Na ausência de água, esses elementos seriam litófilos, calcófilos ou siderófilos; entretanto, essa afinidade por água é capaz de concentrar elementos raros e seus minerais em pegmatitos e rochas alteradas hidrotermalmente.

Esse comportamento seria responsável pela concentração de muitos elementos raros e seus minerais em pegmatitos e rochas alteradas hidrotermalmente, uma vez que na ausência de água esses elementos seriam litófilos, calcófilos ou siderófilos.

Considerando o potencial iônico dos elementos, são encontrados dois grupos cujo comportamento geoquímico se destaca: os grandes íons litófilos e os elementos de alta força de campo. Os grandes íons litófilos, normalmente denominados LIL (Large-Ion Lithophile), também chamados LFS (Low-Field Strength) por Eby (1979), são elementos que possuem grande raio iônico e baixa carga, ou seja, baixo potencial iônico. São eles K, Rb, Cs e Ba (Albarède, 2009; Railsback, 2012), sendo que White (2013) acrescenta à essa lista o Sr. Esses elementos são acomodados com dificuldade na maioria dos minerais do manto, concentrando-se na crosta continental, particularmente em feldspato potássico (Albarède, 2009); entram, portanto, apenas em fases ígneas tardias (Railsback, 2012).

Os elementos de alta força de campo, conhecidos como HFS (High-Field Strength), possuem intensos campos eletrostáticos ao seu redor (Albarède, 2009), devido à sua alta carga iônica (White, 2013). São eles Zr, Nb, Th e U (Albarède, 2009); White (2013) adiciona a esses elementos o Hf e o Ta. Apesar de serem pequenos o suficiente para serem acomodados na maioria dos sítios cristalinos dos minerais mais comuns, sua carga é tão alta que normalmente requerem uma ou mais substituições acopladas (heterovalentes) para manter o balanço de carga, o que é energeticamente desfavorável (White, 2013). Esses elementos são moderadamente a altamente incompatíveis, favorecem ligações covalentes e são insolúveis devido ao seu alto potencial iônico (White, 2013).

O conjunto de elementos conhecidos como Elementos Terra-Rara (ETRs) inclui Sc, Y, os lantanídeos e os actinídeos. Entretanto, na prática das geociências, o termo é aplicado aos elementos lantanídeos e ao Y, que apresenta comportamento geoquímico muito similar ao do Ho (e.g. Henderson, 1984). A configuração eletrônica dos ETRs mostra um preenchimento sequencial da subcamada 4f, protegida pelos oito elétrons das subcamadas 5d<sup>1</sup>5s<sup>6</sup>; isso resulta na denominada “contração lantanídica” e fornece a esses elementos propriedades físicas e químicas muito similares, uma vez que as diferenças no número de elétrons na subcamada 4f não causam mudanças expressivas no comportamento químico, pois eles não são significativamente envolvidos em interações químicas (Henderson, 1984). Por conta dessas características, os ETRs tendem a ocorrer na natureza como um grupo coerente, ao invés de sozinhos. Não obstante, diversos processos geológicos são capazes de fracionar os ETRs em minerais formadores de rocha e, principalmente, minerais acessórios, especialmente em rochas ígneas; este fracionamento pode, inclusive, ser utilizado em estudos genéticos de rochas ígneas (Henderson, 1984). Frequentemente, os ETRs são separados em leves (La a Sm) e pesados (Gd a Lu). Eles são litófilos, concentrando-se em silicatos (Henderson, 1984).

### **3.2. Desenvolvimento do programa Rhyolite-MELTS**

A distribuição dos elementos nos diversos sistemas geoquímicos pode ser entendida e descrita a partir de parâmetros termodinâmicos, utilizados para determinar as condições físicas e químicas originais de tais sistemas (Nordstrom e Munoz, 1994). A termodinâmica é definida por esses autores como o estudo da energia e suas transformações, determinando quais processos geoquímicos ocorrem e quais assembleias mineralógicas se formam sob determinadas condições físicas e químicas.

Ghiorso e Sack (1995) utilizaram os princípios da energia livre de Gibbs de misturas de líquidos silicáticos naturais para desenvolver um modelo termodinâmico aplicável a composições magmáticas variando de ankaratritos potássicos a riolitos, tanto hidratadas

quanto anidras, entre 900 e 1700°C e sob pressões de no máximo 4 GPa. A partir desse modelo termodinâmico, os autores desenvolveram o programa MELTS, que determina o conjunto de fases em equilíbrio a partir de variáveis como: composição média; pressão ou volume; temperatura, entalpia ou entropia; e, opcionalmente, fugacidade de oxigênio.

Asimow e Ghiorso (1998) modificaram os algoritmos do programa MELTS para permitir o cálculo de equilíbrio de fases heterogêneas em condições subsólidas, na presença ou ausência de líquido, em um sistema aberto ou fechado em relação a oxigênio, e com variáveis intensivas fixas. Com isso, o programa passou a permitir cálculos de fusão fracionada, equilíbrio de fases metamórficas e modelos geofísicos em regiões subsólidas. Esse programa é amplamente utilizado, com maior aplicabilidade em sistemas basálticos.

Notando que o programa MELTS apresentava inconsistências quando utilizado para estudar sistemas ricos silícicos, Gualda et al. (2012) desenvolveram uma calibração modificada de seus parâmetros, chamada Rhyolite-MELTS. As mudanças consistem em pequenos ajustes que otimizam a predição da superfície de saturação de quartzo e feldspato como função da pressão. Os autores testaram essa nova calibração com composições variando de traquidacito a riolito rico em sílica, obtendo sucesso para uma variedade de sistemas ricos em sílica e portadores de fluidos. Para facilitar o uso do programa, Gualda e Ghiorso (2015) apresentaram uma versão do Rhyolite-MELTS desenvolvida no Microsoft Excel®, utilizada nesse trabalho.

### **3.3. Características de Granitos Tipo-A**

A geoquímica é uma ferramenta extremamente útil nos mais variados campos da geologia e, entre eles, a classificação de rochas graníticas. Exemplos clássicos são os trabalhos de Peacock (1931), que as dividiu de acordo com seu índice de álcalis; de Shand (1951), que as separou em peraluminosas, metaluminosas ou peralcalinas; ou ainda classificações genéticas embasadas em critérios geoquímicos, como a tipológica (Tipo-I vs. Tipo-S) proposta por Chappell e White (1974).

Com o passar do tempo, essas classificações ganharam também conotação de contextualização tectônica. Pearce et al. (1984), notando que as variáveis utilizadas para tais classificações não foram escolhidas com o propósito de uma classificação tectônica, fizeram o trabalho reverso daquele feito até então: analisaram amostras com ambientes tectônicos muito bem definidos e investigaram até onde essas amostras poderiam ser separadas com base em suas características geoquímicas e mineralógicas. O resultado desse trabalho foi uma classificação tectônica de granitos, baseada em diagramas geoquímicos discriminantes, que sugere a separação das rochas graníticas de acordo com seus ambientes de formação: cordilheiras oceânicas, arcos vulcânicos, intraplaca ou colisional.

Através de diagramas de elementos traços vs. sílica, Pearce et al. (1984) também reconheceram altas concentrações de Y e ETRs pesados em granitos de cordilheira oceânica e intraplaca, bem como Nb e Ta em granitos intraplaca, além de Rb em granitos sincolisionais. Os mesmos autores utilizaram diagramas de Rb-Nb-Y e Rb-Ta-Yb para separar com eficiência granitos sincolisionais dos granitos de arcos vulcânicos, intraplaca e de cordilheira oceânica. As diferenças geoquímicas mais marcantes foram interpretadas pelos autores como decorrentes da possível derivação de granitos de cordilheira oceânica a partir de fontes mantélicas empobrecidas, com perda de Ta durante a evolução do magma; da derivação de granitos intraplaca a partir de fontes mantélicas enriquecidas; do fracionamento de anfibólio durante a gênese de granitos de arco vulcânico; e do enriquecimento em Rb e Ta durante a gênese de granitos sincolisionais.

Frost et al. (2001) elaboraram uma nova classificação de rochas graníticas, que não contém elementos genéticos ou tectônicos, mas é baseada em índices geoquímicos e nos principais elementos presentes:  $\text{SiO}_2$  (% em peso); #Fe, calculado como a razão  $\text{FeO}^{\text{tot}}/(\text{FeO}^{\text{tot}}+\text{MgO})$  (% em peso); o índice “alkali-lime” modificado e denominado MALL, calculado como  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$  (% em peso); e o índice de saturação em alumina, ISA (ou ASI, na sigla em inglês), calculado como  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}-1.67*\text{P}_2\text{O}_5+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  (razão molar), similar ao definido por Shand (1943), porém descontando o Ca necessário para a formação de apatita, em função do teor em P. Com esses parâmetros, as rochas são classificadas em ferroanas ou magnesianas, e os termos alcalina, álcali-cálcica, cálcio-alcalina, cálcica e peraluminosa, metaluminosa e peralcalina são readequados a esses grupos. Frost e Frost (2008) revisaram esta classificação para rochas ígneas feldspáticas, separando-as em quatro famílias: rochas magnesianas, que passaram por diferenciação sob condições oxidantes e relativamente hidratadas; rochas ferroanas, cristalizadas sob condições relativamente redutoras e anidras; leucogranitos, formados por fusão crustal; e rochas potássicas e ultrapotássicas, formadas a partir de manto enriquecido em  $\text{K}_2\text{O}$ .

White (1979) apresentou um resumo da classificação “alfabética” dos granitos, acrescentando aos já definidos tipos -I e -S por Chappell e White (1974) os granitos Tipo-M, na época interpretados como formados pela fusão parcial de crosta oceânica subductada. Nesse resumo, um quarto tipo de granito, com afinidades alcalinas, não recebeu uma letra designativa, porém foi definido como colocado em ambientes anorogênicos.

No mesmo ano, na mesma conferência, Loiselle e Wones (1979) pioneiramente nomearam rochas graníticas anidras, normalmente alcalinas (menos frequentemente peraluminosas) e formadas em ambientes anorogênicos como Granitos Tipo-A, como uma complementação à classificação de Chappell e White (1974) e White (1979). Além do seu baixo conteúdo em  $\text{H}_2\text{O}$ , essas rochas são relativamente empobrecidas em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e

enriquecidas em álcalis, e apresentam altas temperaturas magmáticas inferidas ( $\geq 900^{\circ}\text{C}$ ) (Patiño Douce, 1997).

Foram agrupadas nessa classe rochas muito distintas em composição e gênese, como granitos peralcalinos, granitos metaluminosos ricos em álcalis e riolitos com topázio. A classificação de Frost et al. (2001) mantém o termo “Tipo-A” para definir um grupo de rochas ferroanas, usualmente álcali-cálcicas a alcalinas, mas também cálcio-alcalinas, e na maioria metaluminosas, porém com ocorrências peralcalinas e peraluminosas. **Esta é a definição de granitos Tipo-A adotada neste trabalho.**

A composição geoquímica dos granitos Tipo-A os distingue de outras rochas ígneas por suas altas concentrações de álcalis, sílica, elementos traço incompatíveis, como ETR (exceto Eu) e HFSE (principalmente Zr, Nb e Y), e outros elementos como Ga e, por vezes, F. São também empobrecidos em  $\text{H}_2\text{O}$ , em elementos traços compatíveis em silicatos máficos (Co, Sc, Cr e Ni) e em feldspatos (Ba, Sr, Eu), além de Al, Ca e Mg, o que lhes confere altas razões Fe/Mg e Ga/Al (Whalen et al., 1987; Eby, 1990; Creaser et al., 1991; Pitcher, 1993; Patiño Douce, 1997; Gualda, 2001; Bonin, 2007; Gualda e Vlach, 2007a; Vogado, 2010; Garcia, 2011). Bonin (2007) e Garcia (2011) citam um enriquecimento em LILE. Eby (1990) afirma que a razão  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  costuma ser alta, condizente com Patiño Douce (1997), que acrescenta que a razão  $\text{TiO}_2/\text{MgO}$  também é alta e que o alto conteúdo em F é observado apenas para rochas fortemente fracionadas.

Whalen et al. (1987), Gualda (2001) e Bonin (2007) enfatizam que a composição geoquímica dos granitos Tipo-A meta- e peraluminosos é similar à de granitos Tipo-I e, em menor frequência, Tipo-S, quando estes são submetidos a extenso fracionamento; elementos de campo podem auxiliar na distinção entre essas rochas (Bonin, 2007). Essa similaridade acontece porque todas estas composições são muito próximas ao mínimo granítico, e porque os elementos traços se comportam de maneiras parecidas (Gualda, 2001).

A composição química dos granitos Tipo-A reflete-se na mineralogia como micas, anfibólios e piroxênios ricos em ferro, como annita, ferrohastingsita / ferrohornblenda, hedembergita / ferroedenbergita e olivia faialítica; nas variedades peralcalinas, como anfibólios e piroxênios sódicos, como arfvedsonita, riebeckita e egirina (Whalen et al., 1987; Eby, 1990; Pitcher, 1993; Bonin, 2007). Bonin (2007, ver também Gualda e Vlach, 2007a) afirma que as variedades metaluminosas contêm anfibólio cálcico e biotita, e as peraluminosas, uma grande variedade de micas, incluindo aquelas ricas em Li. Segundo o mesmo autor, as anomalias geoquímicas pronunciadas observadas nas composições de rocha-total ocorrem devido ao alto grau de fracionamento mineral, com cristalização precoce de minerais de ferro anidros, como a faialita, devido à alta temperatura *liquidus*.

Apesar de possuírem duas associações petrográficas com características distintas e de se encontrarem em uma variedade de ambientes geológicos (Eby, 1990; Pitcher, 1993; Garcia, 2011), a assinatura geoquímica dessas rochas é tão marcante que elas são colocadas no mesmo grupo. São rochas que cristalizaram com fugacidades relativamente baixas de H<sub>2</sub>O e variadas de O<sub>2</sub>, a partir de magmas com altas razões HF/H<sub>2</sub>O (Loiselle e Wones, 1979; Creaser, 1991). Todavia, Bonin (2007) explica que, apesar de magmas Tipo-A possuírem as menores fugacidades de água entre os magmas silicáticos, em sua maioria eles ainda contém pequenos volumes de minerais hidratados, ricos em F, principalmente anfibólio e mica; as exceções se encontram no grupo dos mangeritos-charnockitos.

Os granitos Tipo-A são formados em ambientes extensionais variados, como anorogênicos (no interior de placas continentais ou oceânicas), zonas de riftes continentais e até mesmo em fases de magmatismo pós-orogênico em margens continentais, quando há relaxamento dos esforços compressivos (Whalen et al., 1987; Eby, 1990; Pitcher, 1993; Patiño Douce, 1997; Bonin, 2007; Gualda e Vlach, 2007a; Garcia, 2011).

Ainda não há consenso sobre sua formação, mas os modelos atuais incluem: fusão parcial na crosta inferior de composições residuais (Collins et al., 1992); fusão parcial (15 a 40%) de rochas ígneas crustais de composição tonalítica a granodiorítica (Creaser et al., 1991; Patiño Douce, 1997); fusão parcial de fontes metassomatizadas (Martin, 2006), com envolvimento de fontes mistas de OIB e crosta (Eby, 1990, 1992; Martin, 2006); e derivação a partir de magmas máficos e intermediários derivados do manto (Bonin e Giret, 1990; Turner et al., 1992). Whalen et al. (1987) argumenta que qualquer hipótese petrogenética para os granitos Tipo-A precisa explicar a comum associação entre rochas peralcalinas e metaluminosas, a evidência petrográfica de que elas cristalizaram a partir de magmas anidros, ricos em Cl e F, de alta temperatura e completamente fundidos (sem restitos), e seu enriquecimento em ETRs, Nb, Zr, Y, Ga e Zn. Bonin (2007) considera que granitos Tipo-A são cristalizados a partir de magmas derivados do manto, de composição transicional a alcalina, básicos a intermediários, comentando que nenhum líquido Tipo-A convincente foi produzido experimentalmente a partir da fusão de materiais crustais, e também que não há leucossomas de tal composição em terrenos migmatíticos.

Patiño Douce (1997) produziu com sucesso fundidos graníticos metaluminosos e ricos em sílica, similares aos de Tipo-A, a partir da fusão com desidratação de granitoides cálcio-alcalinos na crosta rasa. O autor explica que o aspecto crucial é a profusa cristalização de plagioclásio e ortopiroxênio durante a fusão incongruente com desidratação sob baixas pressões ( $\leq 4$  kbar) de assembleias portadoras de biotita e hornblenda. Essa abundante cristalização de plagioclásio é responsável por empobrecimento em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na, CaO, Sr e Eu, provocando também um aumento das razões K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O e Ga/Al, em relação à cristalização de fundidos das mesmas rochas sob pressões mais altas ( $\geq 8$  kbar). De maneira similar, a

razão  $\text{TiO}_2/\text{MgO}$  aumenta com o decréscimo de pressão, e a cristalização de ortopiroxênio é responsável pelas razões Fe/Mg mais altas sob pressões mais baixas. Sob pressões superiores a 8 kbar, a assembleia residual se torna rica em clinopiroxênio e pobre em plagioclásio + ortopiroxênio, fazendo com que as características de Tipo-A sejam perdidas na crosta profunda, explicando a ausência de granitos Tipo-A em ambientes tectônicos compressivos, onde há espessamento da crosta (Patiño Douce, 1997).

O mesmo autor argumenta que as altas temperaturas estimadas para grande parte dos magmas Tipo-A (Clemens et al., 1986; Creaser et al., 1991) condizem com as temperaturas necessárias para extração de frações significativas de fundido a partir de granitoides cálcio-alcálinos pobres em água, e levam ao enriquecimento em HFSE devido ao aumento de solubilidade das fases acessórias (Collins et al., 1982). Tanto o baixo conteúdo em água do protolito quanto o decréscimo de solubilidade de  $\text{H}_2\text{O}$  com o decréscimo da pressão são responsáveis pelo baixo conteúdo em água dos granitos Tipo-A (Patiño Douce, 1997). Afirma ainda que a rocha fonte não é necessariamente granulítica, empobrecida em água ou fundido, e que as altas temperaturas atingidas em profundidades rasas indicam que há envolvimento de magmas básicos quentes, mesmo que apenas como fonte de calor.

As similaridades nas composições de elementos maiores e traços de granitos Tipo-A isotopicamente significativamente distintos, que fizeram com que eles fossem agrupados em uma única categoria, seriam então efeito de todos terem sido gerados na crosta superior (Patiño Douce, 1997). Tais profundidades rasas de colocação são condizentes com as observações de Bonin (2007) e Gualda e Vlach (2007a). Patiño Douce (1997) interpreta a frequente associação entre complexos intrusivos do Tipo-A com complexos anortosito-norito-mangerito-charnoquíticos (Anderson, 1983; Emslie, 1991; Haapala e Rämö, 1992) como efeito de serem, respectivamente, os produtos líquido e sólido da fusão incongruente de granitoides cálcio-alcálinos, pois esses últimos complexos apresentam a assembleia ortopiroxênio + plagioclásio e frequentemente possuem anomalias positivas de Eu complementares ao empobrecimento em Eu de magmas Tipo-A (Emslie, 1991).

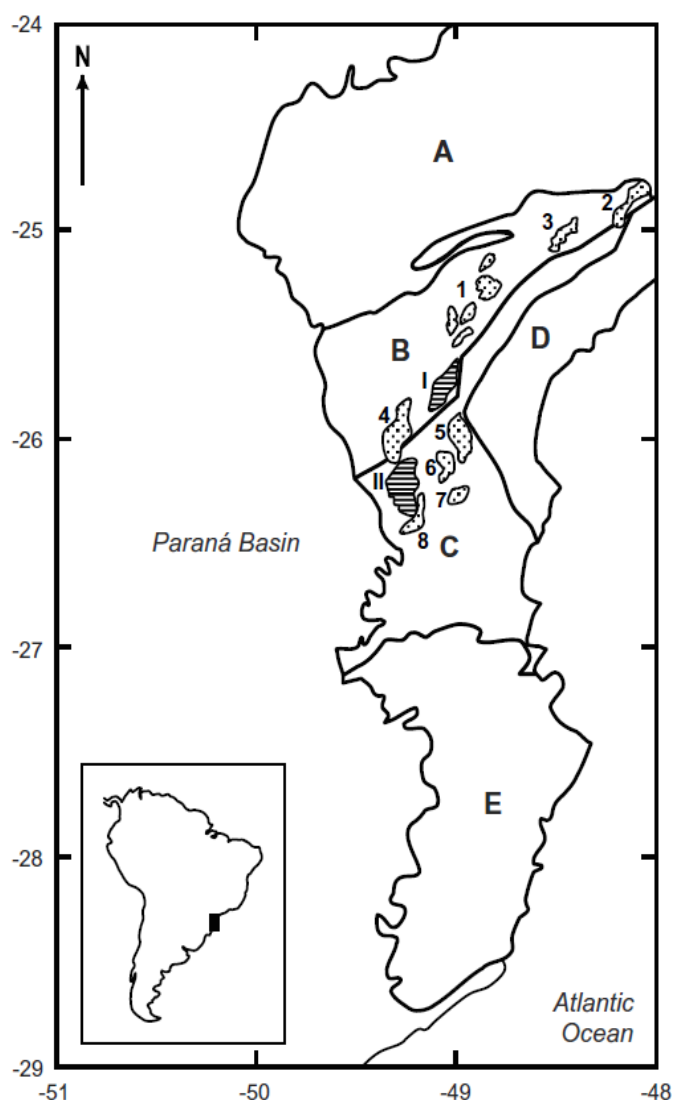
### **3.4. Contexto Geológico Regional**

Antes inclusos na Suíte Intrusiva Serra do Mar por Kaul (1984), os granitos e sienitos que se estendem subparallelamente à costa atlântica do leste de Santa Catarina até o sudeste de São Paulo foram agrupados na Província Graciosa por Gualda e Vlach (2007a), a fim de diferenciá-los de um outro grupo de rochas alcalinas jovens com denominação estratigráfica similar (Província Serra do Mar de Almeida, 1983). Também foram incluídas na província as rochas dioríticas contemporâneas ao magmatismo principal, que apresentam volume muito subordinado; tais rochas, que não serão abordadas no presente trabalho, são também



frequentemente associadas a granitos Tipo-A em outras províncias, porém são algo restritas ou mesmo ausentes em boa parte dos plútons da Província Graciosa (Gualda e Vlach, 2007b).

Em sua maioria, os granitos e sienitos são intrusivos em rochas arqueanas do Cráton Luiz Alves e em rochas neoproterozoicas da Microplaca Curitiba (Figura 2) (Gualda, 2001; Gualda e Vlach, 2007a, 2007b; Vilalva, 2012). O Cráton Luiz Alves é composto principalmente por gnaisses granulíticos formados entre 2,7 e 2,6 Ga e entre 2,2 e 1,8 Ga, sendo o último período pertencente ao chamado Ciclo Transamazônico. A Microplaca Curitiba, por sua vez, é composta por gnaisses e migmatitos formados entre 2,2 e 1,8 Ga, no Ciclo Transamazônico, com migmatização em cerca de 620-550 Ma, durante o chamado Ciclo Brasileiro (Weber, 1998; Gualda e Vlach, 2007a).



**Figura 2: Localização da Província Graciosa e as principais unidades tectônicas na qual ela se insere. A: Cinturão de Dobramentos Ribeira; B: Microplaca Curitiba; C: Microplaca Luiz Alves; D: Cinturão Granitoide Costeiro; E: Cinturão Dom Feliciano. Também são mostradas oito principais áreas de ocorrências de rochas graníticas: 1: Granitos Serra da Graciosa; 2: Plúton Guaraú; 3: Plúton Alto Turvo; 4: Plúton Agudos; 5: Complexo Morro Redondo; 6: Plúton Dona Francisca; 7: Plúton Pirai; 8: Plúton Corupá. Em hachurado, estão duas importantes bacias vulcanossedimentares: I: Bacia Guaratubinha; II: Bacia Campo Alegre. Extraído de Gualda e Vlach (2007a).**

A maioria dos plútons que compõem a Província Graciosa apresenta forma aproximadamente circular, sugerindo que os esforços direcionais durante sua formação não foram expressivos (Kaul, 1984; Gualda e Vlach, 2007a). Entretanto, são encontradas rochas deformadas próximo ao contato de alguns plútons, indicando que houve deformação local durante ou logo após a intrusão dessas rochas (Gualda e Vlach, 2007a; Garcia, 2015; Vilalva et al., 2016). Os plútons que não são sub-circulares apresentam um alongamento com orientação preferencial NE (Crisma, 2013).

As estruturas e texturas observadas nas rochas graníticas (e.g., cavidades miarolíticas, intercrescimentos granofíricos, quartzo bipiramidal) e a associação das rochas intrusivas com bacias vulcanossedimentares quase contemporâneas indicam que a profundidade de colocação dos plútons da Província Graciosa foi rasa, sob pressões máximas da ordem de  $2 \pm 0,6$  kbar (Gualda e Vlach, 2007a), condizente com dados gravimétricos de Hallinan et al. (1993), que não mostram anomalias bem definidas. O magmatismo está relacionado ao regime tectônico extensional que se desenvolveu na região após a aglutinação final do Supercontinente Gondwana (Siga Jr. et al., 1993; Weber, 1998; Gualda e Vlach, 2007a; Basei et al., 2008), em um ambiente pós-colisional no sentido de Liégeois (1998), no qual a deformação se restringe ao longo de falhas, sendo fraca ou ausente entre as falhas (Gualda e Vlach, 2007a). Segundo Vlach et al. (2011), o magmatismo foi posterior à colocação e cristalização dos batólitos cálcio-alcálicos de alto potássio sin- a tardicolisionais, ao pico de metamorfismo regional e ao amalgamento dos terrenos Luiz Alves, Curitiba e Paranaguá, ocorrendo cerca de 10 a 30 Ma após estes eventos. Gualda e Vlach (2007b) argumentam também que a evolução contrastada das seis séries petrográficas encontradas nos cinco plútons que compõem a Serra da Graciosa sugere que tais plútons representam diversas séries magmáticas contemporâneas.

As idades do magmatismo disponíveis em diversos trabalhos (e.g., Cordani, 1974; Siga Jr. et al., 1997, 2000; Cordani et al., 2000; Harara, 2001; Weber et al., 2001; Passarelli et al., 2004) apresentam incertezas significativas. Considerando que rochas gabrodioríticas contemporâneas devem apresentar chances menores de herança em zircão e que, nestas rochas, há menor interação deste mineral com fluidos hidrotermais, Vlach et al. (2011) obtiveram idades U-Pb em zircão de três amostras gabrodioríticas com ID-TMS perfeitamente concordantes, indicativos de que a melhor idade de referência para o magmatismo da província situa-se entre 580 e 583 Ma; segundo Cohen et al (2013), esse período corresponde ao Neoproterozoico (Ediacarano).

Os granitos e sienitos de Tipo-A da Província Graciosa apresentam duas associações petrográficas contrastadas: uma denominada alcalina, outra denominada aluminosa (Vlach et al., 1991; Gualda e Vlach, 2007a, 2007b; Vogado, 2010; Garcia, 2011; Vilalva, 2012; Crisma, 2013; Garcia, 2015). A associação aluminosa corresponde a mais de

70% das ocorrências conhecidas (e.g., Crisma, 2013). Gualda e Vlach (2007a) demonstram claramente que estas associações apresentam susceptibilidades magnéticas muito contrastadas, em função da presença ou não de magnetita primária. O enriquecimento (em graus variáveis) em elementos LIL e HFS é típico em todas as variedades (e.g., Gualda e Vlach, 2007a, Vilalva e Vlach, 2014, Garcia, 2015).

#### 3.4.1. Associação alcalina

A associação alcalina é constituída por álcali-feldspato sienitos e álcali-feldspato granitos de caráter metaluminoso a peralcalino, leucocráticos e equigranulares médios (Gualda e Vlach, 2007a). Ocorre nos plútons Alto Turvo (Vogado, 2010), Corupá (Siga Jr., 1995; Kaul, 1997; Garin, 2002), Mandira (Oliveira, 1989; Passarelli, 2001), Papanduva (Complexo Morro Redondo) (Kaul, 1997; Vilalva, 2012; Vilalva e Vlach, 2014), Anhangava (Siga Jr., 1995; Kaul, 1997; Gualda e Vlach, 2007a), Farinha Seca e Órgãos (Gualda e Vlach, 2007a).

As rochas menos evoluídas, encontradas no Plúton Corupá, apresentam caráter metaluminoso e comportam anfibólio cálcico, clinopiroxênio e olivina, enquanto as mais evoluídas são peralcalinas e possuem anfibólio sódico; anfibólio sódico-cálcico é encontrado em variedades intermediárias. Os minerais acessórios típicos são chevkinita, ilmenita, titanita, magnetita, zircão e esfalerita. São rochas tipicamente *hipersolvus*, com feldspato alcalino como única fase feldspática primária (Gualda e Vlach, 2007a, b e c; Vlach e Gualda, 2007; Vilalva, 2012; Crisma, 2013). As condições de cristalização variam de relativamente reduzidas (próximas ao buffer quartzo-magnetita-faialita, QFM) a algo mais oxidantes nos estágios finais de cristalização (Vlach e Gualda, 2007; Vilalva et al., 2016). Segundo Vlach e Gualda (2007), a cristalização precoce de chevkinita indica que os magmas parentais provavelmente estavam próximos à saturação em ETR.

#### 3.4.2. Associação aluminosa

A associação aluminosa apresenta sienogranitos e álcali-feldspato granitos de caráter metaluminoso a fracamente peraluminoso, com biotita e anfibólio cálcico como principais fases máficas; usualmente, são rochas leucocráticas, variando de equigranulares a porfíricas e de granulação média a grossa (Gualda e Vlach, 2007a). Essa associação aflora nos plútons Agudos (Siga Jr., 1995; Kaul, 1997; Harara, 2001), Alto Turvo (Vogado, 2010), Ilha do Cardoso (Weber, 1998), Guaraú (Garcia, 2015), Quiriri (Morro Redondo) (Kaul, 1997; Vilalva, 2012), Piraí, Dona Francisca (Kaul, 1997), Anhangava, Marumbi (Kaul, 1997; Gualda e Vlach, 2007a), Capivari, Farinha Seca, Órgãos (Gualda e Vlach, 2007a), Serra do Paratiú/Cordeiro (Passarelli, 2001; Martins et al., 2004) e Votupoca (Passarelli, 2001). Os minerais acessórios típicos são allanita, magnetita, titanita, ilmenita, zircão e apatita. São rochas *subsolvus*, com dois feldspatos primários (um alcalino e outro plagioclásio),

tipicamente formadas em ambientes mais oxidantes, próximas ao buffer Ni-NiO (NNO) (Vlach et al., 1991; Gualda e Vlach, 2007a; Vilalva, 2012); Vlach e Gualda (2007) colocam a cristalização próxima ao buffer titanita-magnetita-quartzo-anfibólio-ilmenita (TMQAI).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

No total, foram doze referências bibliográficas que serviram como fonte de dados para o presente trabalho: Oliveira (1989), Siga Jr. (1995), Kaul (1997), Weber (1998), 31 de Harara (2001), Passarelli (2001), Garin (2002), Martins et al. (2004), Gualda e Vlach (2007a), Vogado (2010), Vilalva (2012) e Garcia (2015), compondo um total de 223 amostras, das quais 86 pertencem à associação alcalina e 137 à aluminosa. A Tabela 1 resume a associação petrográfica à qual pertencem as amostras e suas referências de acordo com cada plúton.

Os dados foram organizados em uma única tabela, explicitando a referência, a localização e a associação petrográfica de cada amostra; um exemplo com dados publicados por Gualda e Vlach (2007a) encontra-se no Anexo I: Exemplo de organização dos dados. Dos 24 plútons aqui considerados como pertencentes à Província Graciosa, apenas dois não foram contemplados por este estudo: Serra da Igreja e Serra Alta. O Plúton Votupoca corresponde a um *stock* granítico com cerca de 14 km<sup>2</sup> de área, e está representado apenas por uma amostra; foi correlacionado à chamada Suíte Granítica Serra do Mar por Passarelli (2001), sendo, portanto, considerado como pertencente à Província Graciosa no presente trabalho.

As amostras cujas análises não distinguiam entre Fe<sup>3+</sup> e Fe<sup>2+</sup> foram recalculadas para exibir os respectivos valores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e FeO, utilizando uma ferramenta do programa Rhyolite-MELTS. Para cada tipo de análise realizada, os dados foram primeiro separados de acordo com a associação petrográfica de cada amostra; depois, de acordo com as rochas de cada associação, segundo a classificação de Streckeisen (1974); por fim, foram comparadas as diferentes associações de cada rocha. As análises iniciais foram feitas a partir de diagramas convencionais para rochas graníticas de Tipo-A, como Harker, AFM, e os diagramas de Shand (1943), Pearce et al. (1984), Whalen et al. (1987) e Frost et al. (2001), dando enfoque ao comportamento distinto entre as associações alcalina e aluminosa. Também foram gerados diagramas ETR normalizados segundo Boynton (1984).

A relação entre o conteúdo em elementos maiores e traços e a saturação em alumínio das amostras foi investigada a partir de diagramas ASI vs. A/NK, com cada amostra representada por um círculo de diâmetro proporcional ao conteúdo desses elementos. Os resultados dessa análise permitiram ressaltar diferenças significativas entre as amostras peralcalinas e peraluminosas e, parcialmente, entre as associações alcalina e aluminosa. Foram também gerados diversos diagramas de dispersão em três dimensões, que se mostraram úteis principalmente quando a rotação dos eixos pode ser feita em tempo real. Também foram testados diagramas com interpolação de superfície entre os pontos, porém os desvios nos valores, advindos dos desvios da própria amostragem, eram significativos demais para serem representativos, a despeito dos resultados serem visualmente apreciáveis.

**Tabela 1: Associação petrográfica das amostras de cada plúton pertencente à Província Graciosa, de acordo com as referências bibliográficas fontes de dados.**

Plúton		Associação petrográfica
Agudos	Agudos do Sul	Aluminosa <sup>5</sup>
	Palermo	Aluminosa <sup>5</sup>
	Palmito 1	Aluminosa <sup>3</sup>
	Piador-Cabral	Aluminosa <sup>2 3</sup>
	Rio Negro	Aluminosa <sup>5</sup>
	Serra do Tronco	Aluminosa <sup>2 3</sup>
Alto Turvo		Aluminosa <sup>10</sup> Alcalina <sup>10</sup>
Corupá		Alcalina <sup>2 3 7</sup>
Dona Francisca		Aluminosa <sup>3</sup>
Ilha do Cardoso		Aluminosa <sup>4</sup>
Guaraú (Desembarque)		Aluminosa <sup>12</sup>
Mandira/Itapitangui		Alcalina <sup>1 6</sup>
Morro Redondo	Papanduva	Alcalina <sup>3 11</sup>
	Quiriri	Aluminosa <sup>3 11</sup>
Piraí		Aluminosa <sup>3</sup>
Serra da Graciosa	Anhangava	Alcalina <sup>2 3 9</sup> Aluminosa <sup>3 9</sup>
	Capivari	Aluminosa <sup>9</sup>
	Farinha Seca	Alcalina <sup>9</sup> Aluminosa <sup>9</sup>
	Marumbi	Aluminosa <sup>3 9</sup>
	Órgãos	Alcalina <sup>9</sup> Aluminosa <sup>9</sup>
Serra do Paratiú/Cordeiro		Aluminosa <sup>6 8</sup>
Votupoca		Aluminosa <sup>6</sup>
Serra Alta		
Serra da Igreja		

Referências bibliográficas

1 Oliveira, 1989  
2 Siga Jr., 1995  
3 Kaul, 1997  
4 Weber, 1998  
5 Harara, 2001  
6 Passarelli, 2001

7 Garin, 2002  
8 Martins et al., 2004  
9 Gualda e Vlach, 2007a  
10 Vogado, 2010  
11 Vilalva, 2012  
12 Garcia, 2015

Os dados da Província Graciosa foram comparados com dados de províncias similares do Tipo-A, identificados na Tabela 2 e na Tabela 3, selecionados de acordo com os seguintes critérios: (1) amostras ferroanas; (2) análises com valores quantificados para MgO; (3) classificadas como álcali-feldspato granitos, álcali-feldspato sienitos, quartzo-álcali-feldspato sienitos, quartzo-sienitos, sienitos e sienogranitos segundo Streckeisen (1974). No total, foram 891 amostras de províncias similares. É importante ressaltar que entre essas análises estão rochas caracterizadas tanto como anorogênicas quanto francamente pós-orogênicas; não obstante, as características geoquímicas são similares o suficiente para serem analisadas em conjunto.

Para avaliar as possibilidades teóricas de geração de granitos peralcalinos a partir da diferenciação de líquidos sieníticos metaluminosos, foi utilizado o programa Rhyolite-MELTS (Gualda e Ghiorso, 2015). No primeiro teste, a composição inicial do sistema foi considerada como a da amostra Co-5 de Garin (2002), correspondente a um sienito verde de granulação média, equigranular e maciço, metaluminoso, composto por feldspato alcalino, quartzo, clinopiroxênio, clinoanfíbólio, biotita, ilmenita, hematita, magnetita, zircão e chevkinita. O segundo teste considerou como composição do sistema a amostra GRA-81A de Gualda e Vlach (2007a), que corresponde a um álcali-feldspato sienito metaluminoso similar, da região da Serra da Graciosa. As pressões utilizadas foram de 1, 2, 3 e 4 kbar, e a fugacidade de oxigênio foi mantida baixa e próxima ao buffer QFM. As fases minerais incluídas no processo foram aegirina, anfíbólio, apatita, bt, cpx, cummingtonita, feldspato, hbl, opx, qtz e fluido. A composição dos líquidos durante a cristalização foi comparada com a composição média das amostras peralcalinas e metaluminosas da associação alcalina da Província Graciosa.

**Tabela 2: Fontes de dados geoquímicos para comparação com a Província Graciosa pertencentes a províncias similares (do Tipo-A) do Brasil, compilados por Garcia (dados inéditos) e Vilalva e Vlach (dados inéditos), reorganizados para o propósito deste trabalho.**

Autor(es)	Ano	Região	Local	Associação geoq.
Hartmann e Nardi	1982	Granitos do Sul	Saibro	Alcalina
Gava et al.	1984	Província Borborema	Serra da Aldeia	Aluminosa
Long et al.	1986	Província Borborema	Cabo de St. Agostinho	Alcalina
Sial et al.	1986	Província Borborema	Catingueira	Alcalina
Sial	1989	Província Borborema	Mocambo e Meruoca	Aluminosa
Jorge João et al.	1991	Cráton Amazônico	Serra da Seringa	Aluminosa
Naime e Nardi	1991	Granitos do Sul	Ramada	Aluminosa
Philipp et al.	1991	Granitos do Sul	Bela Vista	Alcalina
Gimenez Filho	1993	Província Mantiqueira	Maciço Correias	Aluminosa
Dall'Agnol et al.	1994	Cráton Amazônico	Jamon, Cigano	Aluminosa
Fernandes et al.	1994	Província Mantiqueira	Borrachudos, Itu	Aluminosa
Lindenmayer et al.	1994	Cráton Amazônico	Salobo Novo, Salobo Velho	Aluminosa
Barros et al.	1995	Cráton Amazônico	Serra dos Carajás	Aluminosa
Dall'Agnol et al.	1995	Cráton Amazônico	Cigano	Aluminosa
Gimenez Filho et al.	1995	Província Mantiqueira	Maciço Correias	Aluminosa
Negri	1995	Província Mantiqueira	São Francisco Xavier	Aluminosa
Almeida	1997	Cráton Amazônico	Marié-Mirim	Alcalina
Barros et al.	1997	Cráton Amazônico	Estrela	Aluminosa
Bilal et al.	1997	Província Tocantins	Serra Dourada, Sucuri	Aluminosa
Vasquez	1997	Granitos do Sul	Suíte Encruzilhada do Sul, Batólito Pelotas	Aluminosa
Teixeira	1999	Cráton Amazônico	Antônio Vicente	Aluminosa
Dall'Agnol et al.	1999	Cráton Amazônico	Jamon, Musa	Aluminosa
Costi	2000	Cráton Amazônico	Madeira	Alcalina e aluminosa
Galindo e Sá	2000	Província Borborema	Catingueira	Alcalina
Moura e Botelho	2000	Província Tocantins	Mangabeira	Aluminosa
Plá Cid et al.	2000	Província Borborema	Couro de Onça, Serra do Meio	Alcalina
Goraieb	2001	Província Mantiqueira	Maciço Correias	Aluminosa
Almeida et al.	2002	Província Borborema	Queimadas	Aluminosa
Janasi	2002	Província Mantiqueira	São Pedro de Caldas, Cunha, Divinolândia, Fartura, Itobi	Aluminosa
Leite Jr.	2002	Cráton Amazônico	Oriente Novo, Santa Clara	Alcalina e aluminosa
Lenharo et al.	2002	Província Tocantins	Serra Dourada, Mocambo, Pedra Branca	Aluminosa
Vasquez et al.	2002	Cráton Amazônico	Maloquinha	Aluminosa
Lenharo et al.	2003	Cráton Amazônico	Madeira, Água Boa	Alcalina e aluminosa
Guimarães et al.	2004	Província Borborema	São José do Campestre, Complexo Prata	Aluminosa
Dall'Agnol et al.	2005	Cráton Amazônico	Serra dos Carajás	Aluminosa
Philipp e Machado	2005	Granitos do Sul	Suíte Encruzilhada do Sul, Batólito Pelotas	Aluminosa
Dall'Agnol e Oliveira	2007	Cráton Amazônico	Jamon, Bannach, Musa, Redenção	Aluminosa



**Tabela 3: Fontes de dados geoquímicos para comparação com a Província Graciosa pertencentes a províncias similares (do Tipo-A) ao redor do mundo, compilados por Garcia (dados inéditos) e Vilalva e Vlach (dados inéditos), reorganizados para o propósito deste trabalho.**

<b>Autor(es)</b>	<b>Ano</b>	<b>Região</b>	<b>Local</b>	<b>Associação geoq.</b>
Barker et al	1975	USA, Colorado	Pikes Peak Batholith	Aluminosa
Neumann	1976	Sweden	Oslo graben	Alcalina
Bonin et al	1978	Southeastern France	Corsican Anorogenic Province	Alcalina
Walsh et al	1979	NW Scotland	Mull Island	Aluminosa
Neumann	1980	Sweden	Oslo graben	Alcalina
Petersen	1980	Southwest Norway	Rogaland Igneous Province	Aluminosa
Ewart	1981	Australia	Anorogenic Tertiary Silicic Volcanics of SE Queensland and NE New South Wales	Aluminosa
Collins et al	1982	Australia	Lachlan Fold Belt (post-orogenic)	Aluminosa
Radain et al	1982	Saudi Arabia	Arabian Peninsula	Alcalina
Michael	1984	Southern Chile	Cordillera Paine Granites	Aluminosa
Abaa	1985	Nigeria	Mada Younger Granite Complex	Alcalina
Bowden	1985	Nigeria	Anorogenic Alkali Sienito-Granite complexes	Alcalina
Ike	1985	Nigeria	Ningi-Burra Anorogenic Ring Complex	Alcalina
Kinnaird et al	1985	Nigeria	Ririwai Complex	Alcalina
O'Halloran	1985	Sudan	Ras ed Dom Complex	Alcalina
Barker	1987	Texas	Trans Pecos Magmatic Province	Alcalina
Capaldi et al	1987	Yemen Plateau	Yemen Tertiary Anorogenic Granites	Alcalina
Fletcher e Beddoe-Stephens	1987	Bolivia	Velasco Alkaline Province	Alcalina
Lightfoot et al	1987	India, Deccan Trap	Salsette Island	Aluminosa
MAcDonald et al	1987	Kenya Rift Valley	Naivasha	Alcalina
Whalen et al	1987	Nigeria	Shira Complex	Alcalina
Woolley e Jones	1987	Malawi	Zomba-Malosa	Alcalina
Worlmalde e Price	1988	Temora, New South Wales	Narraburra Complex	Alcalina
Abdel-Rahman e Martin	1990	Egypt	Mount Gharib	Alcalina
Eby	1990	USA, New Hampshire	White Mountain Batholit	Alcalina
Cullers et al	1992	USA, Colorado	Wet Mountains	Aluminosa
Eby et al	1992	USA, New Hampshire	White Mountain Batholit	Alcalina
Turner et al	1992	South Australia (post-orogenic)	Padthaway Ridge	Aluminosa
Kerr e Fryer	1993	Labrador-Canada, Canadian Shield	Makkovic Province	Aluminosa
Martin et al	1994	Southeast China	Zhejiang and Fujian Province	Alcalina
Nédélec et al	1995	Madagascar	Stratoid Granites	Alcalina
Poitrasson et al	1995	Southeastern France	Corsican Anorogenic Province	Alcalina e aluminosa
Hong et al	1996	Southeast China	Zhejiang and Fujian Province	Alcalina e aluminosa
Landenberger e Collins	1996	Australia	Chaelundi Complex	Aluminosa

**Tabela 3: Fontes de dados geoquímicos para comparação com a Província Graciosa pertencentes à províncias similares (do Tipo-A) ao redor do mundo. (Continuação).**

Autor(es)	Ano	Região	Local	Associação geoq.
Bohrson e Reid	1997	Mexico	Socorro Ocean Island	Alcalina
Duchesne e Wilmart	1997	Southwest Norway	Bjerkreim-Sokndal Layered Intrusion	Aluminosa
Han et al	1997	China	Ulungur River	Alcalina e aluminosa
King et al	1997	Australia	Lachlan Fold Belt (post-orogenic)	Aluminosa
Nägler e Frei	1997	Oman	Masirah Island	Aluminosa
Civetta et al	1998	Italia	Pantelleria Island	Alcalina
Ewart et al	1998	Namibia	Damara Belt	Aluminosa
Ferré et al	1998	Eastern Nigeria	Post-collisional alkali granites	Alcalina
Jung et al	1998	Namibia	Damara Belt	Aluminosa
Frost et al	1999	USA, SE Wyoming	Sherman Batholith	Aluminosa
Smith et al	1999	USA, Central Colorado	Pikes Peak Batolith	Aluminosa
Goodenough et al	2000	South Greenland	Ivigtut Granite	Alcalina
Schmitt et al	2000	Namibia	Damara Belt	Aluminosa
Volkert et al	2000	USA, New Jersey Highlands	Vernon Supersuite	Aluminosa
King et al	2001	Australia	Lachlan Fold Belt (post-orogenic)	Aluminosa
Maheshwari et al	2001	India, Rajasthan	West Barmer	Alcalina
Moufti	2001	Arabian Shield	Ablah Graben	Aluminosa
Troll e Schmincke	2002	Canaria Island	MiocenePeralkaline Ignimbrite "A"	Alcalina
Welkner et al	2002	Chile	Eastern Patagonian Andes, Aisén	Alcalina
Wu et al	2002	Northeast China	Tianqiaogang, Dawangzhezi, Baishilazi, Daheishan	Alcalina e aluminosa
Auwers et al	2003	South Norway	Mandal-Ustaset Line	Aluminosa
Njonfang e Nono	2003	Central Africa	Cameron Line	Alcalina
Frindt et al	2004	Namibia	Damara Belt	Aluminosa
Kahoui e Mahdjoub	2004	Algeria	Eglab Shield	Alcalina
Qiu et al	2004	Southeast China	Zhejiang and Fujian Province	Aluminosa
Tollo et al	2004	Central and Southern Appalachians	Roberston River, Rockfish River, Polly Wright, Irish Creek, Suck Mountain, Crowell Gap, Stewartville, Striped Rock, Buckeye Knob, Beech, Lansing-Warrens ville, Pound Ridge, Yonkers	Alcalina e aluminosa
White et al	2005	Italia	Pantelleria Island	Alcalina
Abdel-Rahman	2006	Eastern Egypt	Mounts Abu-Kharif e El-Dob	Alcalina
Bucher e Frost	2006	Antarctica	Thor Range	Aluminosa
Yang et al	2006	Northeast China	Liadong Peninsula	Aluminosa
Katzir et al	2007	Egypt	Gebel Mussa	Aluminosa
Espinoza et al	2008	Central Patagonia	Western Meseta del Lago Buenos Aires	Alcalina

## 5. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A comparação da composição média da Província Graciosa e províncias similares com outras classes de granitos permitiu reafirmar diferenças significativas nas características das associações petrográficas características de granitos Tipo-A. Uma das características mais marcantes é o empobrecimento em MgO e CaO e enriquecimento em Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O dos granitos Tipo-A, especialmente na associação alcalina, o que lhes confere altos valores de Fe# (Tabela 4). Entre as associações petrográficas, a alcalina apresenta conteúdos significativamente maiores em Zn, Zr, Ta, Pb, Sn, Y e ETR (exceto EU) e menores em Ba e Sr (Figura 3, Figura 4 e Tabela 6).

As rochas da Província Graciosa são ferroanas. Entre as rochas que compõem a associação alcalina, os álcali-feldspato granitos são, na maioria, álcali-cálcicos e peralcalinos a marginalmente peraluminosos, enquanto os álcali-feldspato quartzo sienitos são alcálicos e metaluminosos a marginalmente peralcalinos. Já a associação aluminosa apresenta álcali-feldspato granitos e sienogranitos metaluminosos a peraluminosos e, na maioria, álcali-cálcicos; os álcali-feldspato sienitos, quartzo-álcali-feldspato sienitos e quartzosienitos são metaluminosos e alcálicos, sendo que estes últimos também são álcali-cálcicos.

**Tabela 4: Composição média das associações da Província Graciosa e de províncias similares, comparadas com granitos Tipo-I, Tipo-S e Tipo-A de Lachlan Fold Belt (White e Chappell, 1983). Província Graciosa: média de 86 amostras da associação alcalina, e 137 da associação aluminosa. Províncias similares: média de 239 amostras da associação alcalina, e 652 da associação aluminosa.**

	Província Graciosa		Províncias similares		Lachlan Fold Belt		
	Associação alcalina	Associação aluminosa	Associação alcalina	Associação aluminosa	Tipo-I	Tipo-S	Tipo-A
SiO <sub>2</sub>	72.19	72.75	70.11	71.20	67.98	69.08	73.60
TiO <sub>2</sub>	0.29	0.29	0.38	0.40	0.45	0.55	0.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.82	13.35	13.32	13.56	14.49	14.30	12.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16	0.07	1.02	1.00	1.27	0.73	0.99
FeO	2.84	2.06	3.09	2.40	2.57	3.23	1.72
MnO	0.08	0.05	0.12	0.07	0.08	0.06	0.06
MgO	0.13	0.34	0.18	0.33	1.75	1.82	0.33
CaO	0.72	1.14	0.78	1.38	3.78	2.49	1.09
Na <sub>2</sub> O	4.69	3.95	5.17	3.76	2.95	2.20	3.34
K <sub>2</sub> O	5.07	4.82	4.95	4.96	3.05	3.63	4.51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.07	0.07	0.12	0.11	0.13	0.09
Total	99.04	98.89	99.18	99.18	98.48	98.22	98.75
Mg#	7.54	22.69	9.43	19.80	54.83	50.11	25.48
Fe#	0.96	0.86	0.94	0.88	0.59	0.64	0.84
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	9.77	8.77	10.12	8.72	6.00	5.83	7.85
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.08	1.22	0.96	1.32	1.03	1.65	1.35
IA	1.03	0.88	1.04	0.85	0.56	0.53	0.82
A/CNK	0.92	1.05	0.91	1.06	1.25	1.46	1.12
A/NK	0.97	1.14	0.96	1.17	1.78	1.89	1.22
MALI	9.04	7.63	9.34	7.34	2.22	3.34	6.76

**Tabela 5: Média de elementos traços da Província Graciosa e de províncias similares, comparadas com granitos Tipo-I, Tipo-S e Tipo-A de Lachlan Fold Belt (White e Chappell, 1983). Província Graciosa: média de 86 amostras da associação alcalina, e 137 da associação aluminosa. Províncias similares: média de 239 amostras da associação alcalina, e 652 da associação aluminosa.**

	Província Graciosa		Províncias similares		Lachlan Fold Belt		
	Associação alcalina	Associação aluminosa	Associação alcalina	Associação aluminosa	Tipo-I	Tipo-S	Tipo-A
Ba	214.24	611.92	435.65	855.19	520.00	480.00	605.00
Rb	180.49	210.04	244.73	214.15	132.00	180.00	199.00
Sr	29.22	163.26	89.97	144.59	253.00	139.00	105.00
Cs	1.83	2.96	8.24	9.85			
Y	90.36	74.95	82.33	71.56	27.00	32.00	76.00
La	94.56	63.20	94.37	95.94	29.00	31.00	55.00
Ce	164.35	99.66	198.53	185.03	63.00	69.00	134.00
Pr	26.03	12.73	28.36	21.56			
Nd	70.23	43.46	87.69	77.67	23.00	25.00	56.00
Sm	11.89	9.22	18.63	15.93			
Eu	0.64	1.24	1.67	1.79			
Gd	10.89	6.01	14.53	12.09			
Tb	4.00	1.41	2.98	5.17			
Dy	12.00	6.19	14.03	10.77			
Ho	2.53	1.51	3.40	5.72			
Er	7.40	3.63	7.17	5.93			
Tm	2.07	0.73	1.30	1.28			
Yb	7.29	3.78	9.52	7.37			
Lu	0.98	0.69	1.41	1.37			
Zr	616.81	235.82	731.11	448.45	143.00	170.00	342.00
Nb	41.70	44.81	135.85	36.66	9.00	11.00	22.00
Hf	34.73	12.78	27.55	24.64			
Ta	26.86	7.34	25.27	4.67			
Pb	44.11	21.25	47.48	31.23	16.00	27.00	29.00
Th	19.67	17.14	31.93	26.33	16.00	19.00	23.00
U	4.37	5.35	8.97	6.11	3.00	3.00	5.00
Ga	25.43	22.82	33.42	24.80	16.00	17.00	21.00
Sc	7.00	7.65	4.69	6.72	15.00	14.00	14.00
V	21.85	59.05	10.42	15.24	74.00	72.00	10.00
Cr	17.70	17.54	16.82	8.60	27.00	46.00	3.00
Co	4.00	10.58	14.83	5.18	12.00	13.00	4.00
Ni	5.10	8.25	8.04	9.87	9.00	17.00	2.00
Cu	5.65	9.12	12.67	19.42	11.00	12.00	6.00
Zn	152.51	56.79	170.07	95.34	52.00	64.00	102.00
Sn	6.23	3.95	330.58	13.31			

Os dados de ambas associações são caracterizados como granitoides Tipo-A pelos diagramas de Whalen et al. (1987), sendo que a associação alcalina é enriquecida em Zr + Nb + Ce + Y em relação à aluminosa. Entre a associação alcalina, os álcali-feldspato granitos apresentam valores maiores de Ga/Al e (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/CaO. Essa relação se mantém na associação aluminosa, porém menos pronunciada. A maioria das amostras de ambas

associações são classificadas como granitos intra-placa pelos diagramas de Pearce et al. (1984), sendo que parte significativa da associação aluminosa se encontra nos campos de granitos sin-colisionais, de arco vulcânico ou de cadeia oceânica. Os álcali-feldspato granitos de ambas associações são ligeiramente enriquecidos em Rb e Ta.

As amostras cujas análises não distinguem entre  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$  foram recalculadas para exibir os respectivos valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e FeO. A análise dos diagramas ASI vs. A/NK com círculos com os dados da Província Graciosa mostrou que amostras peralcalinas da Província Graciosa apresentam os maiores valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Zr, Zn, Y e ETR (principalmente pesados), e menores de Ba; as amostras peraluminosas compreendem os menores conteúdos em FeO; e as amostras metaluminosas mostram os maiores valores de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , FeO, Ba e Sr, e menores de  $\text{SiO}_2$  (são rochas menos evoluídas), Rb, Nb, Y, Ga, Th e Hf. Essas tendências se mantêm em províncias similares, porém de forma menos pronunciada.

A Figura 6 e a Figura 5 mostram diagramas eficientes para distinguir as associações petrográficas tanto da Província Graciosa quanto de províncias similares, baseados nos conteúdos em  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . A associação aluminosa mostra uma relação diretamente proporcional entre Ba e Sr e baixos valores de Zn, Hf e Ta, enquanto a associação alcalina apresenta valores diretamente proporcionais entre Hf e Zn e entre Hf e Ta, e baixos conteúdos em Ba e Sr (Figura 7 e Figura 8). A associação alcalina também mostra valores baixos de Ni e baixos a altos de Y, enquanto a associação aluminosa apresenta conteúdo pequeno em Y e pequeno a alto em Ni (Figura 8).

De acordo com o modelo Rhyolite-MELTS, sob pressões de 1 a 4 kbar, a temperatura *liquidus* para a composição da amostra Co-5 de Garin (2002), um sienito verde metaluminoso, de estrutura maciça, equigranular de granulação média, é de aproximadamente 1050°C, enquanto para a amostra GRA-81A de Gualda e Vlach (2007a), um álcali-feldspato sienito metaluminoso similar da região da Serra da Graciosa, ela é de cerca de 1080°C. Até temperaturas de 900°C, com cerca de 26% e 16% de líquido restante para as amostras Co-5 e GRA-81A, respectivamente, as fases líquidas apresentam composições francamente peralcalinas, com valores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , MgO e  $\text{K}_2\text{O}$  menores e  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , FeO, MnO, CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  maiores do que as médias das amostras peralcalinas e metaluminosas da associação alcalina da Província Graciosa (Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9). De forma geral, as composições, inicialmente metaluminosas, ficam progressivamente mais peralcalinas (Figura 9), sugerindo que a cristalização fracionada sob baixas pressões (2 kbar) de composições metaluminosas pode gerar líquidos peralcalinos, os quais poderiam cristalizar como álcali-feldspato granitos peralcalinos, similares aos encontrados na província. É importante ressaltar, entretanto, que estes modelamentos devem ser considerados ainda preliminares, uma vez que as fases minerais disponíveis para o modelamento, bem como as suas composições, são idealizadas e não exatamente iguais às observadas nas rochas.

**Tabela 6: Composição normativa das associações petrográficas da Província Graciosa e de províncias similares.**

	Província Graciosa		Províncias similares	
	Associação alcalina	Associação aluminosa	Associação alcalina	Associação aluminosa
Q	25.50	29.26	19.72	27.85
Or	26.52	25.36	27.24	26.41
Ab	37.71	33.39	40.91	31.81
An	0.00	4.47	0.00	5.48
Ns	0.35	0.00	0.00	0.00
Wo	1.39	0.30	1.43	0.26
Mt	0.00	0.10	1.48	1.44
Il	0.55	0.56	0.72	0.76
Ap	0.10	0.17	0.17	0.27
Bi	6.05	5.29	3.46	4.90
Hbl	0.91	0.00	4.91	0.00
Ri	0.91	0.00	4.91	0.00
Total	99.96	98.90	104.95	99.19

**Tabela 7: Composições da fase líquida durante cristalização de um sistema com composição inicial igual à amostra Co-5 (Garin, 2002) obtidas com o modelo Rhyolite-MELTS em função da temperatura (pressão de 2 kbar).**

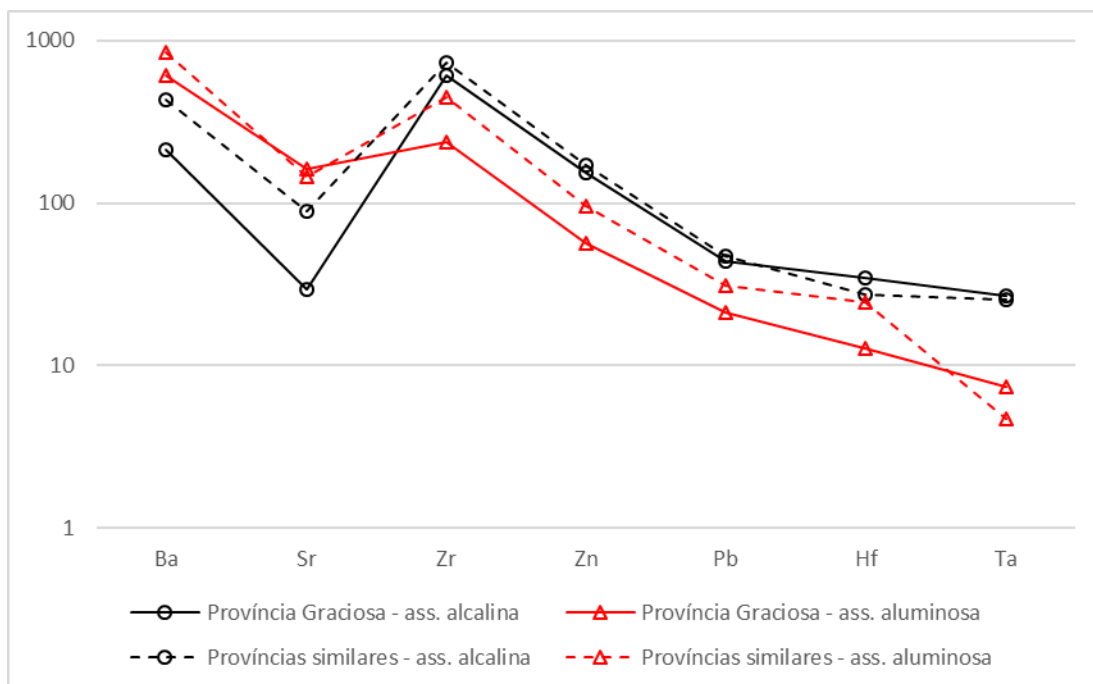
Amostra	Co-5				
Temperatura	1061.7°C	1050°C	1000°C	950°C	900°C
% líquido	99.92	93.02	59.47	28.29	25.48
% sólidos	0.00	6.90	40.45	61.61	74.41
SiO <sub>2</sub>	63.90	63.87	62.87	62.64	64.11
TiO <sub>2</sub>	0.57	0.61	0.95	1.46	1.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.41	16.02	13.79	11.68	10.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.99	1.07	1.67	2.08	2.01
FeO	3.86	4.14	6.48	7.66	6.61
MnO	0.19	0.21	0.32	0.50	0.75
MgO	0.24	0.26	0.41	0.20	0.08
CaO	1.48	1.38	1.50	1.79	1.83
Na <sub>2</sub> O	5.91	5.78	5.46	5.64	6.08
K <sub>2</sub> O	5.87	6.06	5.60	4.88	4.43
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.07	0.10	0.16	0.24
H <sub>2</sub> O	0.50	0.54	0.85	1.32	1.98
Classificação	Metaluminosa	Peralcalina	Peralcalina	Peralcalina	Peralcalina

**Tabela 8: Composições da fase líquida durante cristalização de um sistema com composição inicial igual à amostra GRA-81A (Gualda e Vlach, 2007a) obtidas com o modelo Rhyolite-MELTS em função da temperatura (pressão de 2 kbar).**

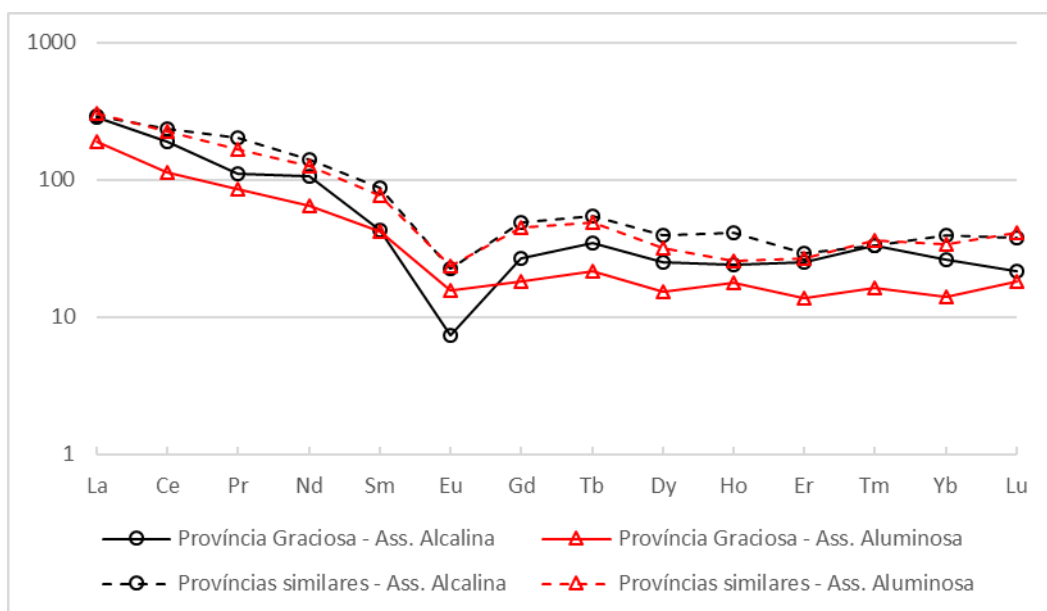
Amostra	GRA-81A				
Temperatura	1078.9°C	1050°C	1000°C	950°C	900°C
% líquido	99.98	75.61	42.83	25.49	15.80
% sólidos	0.00	24.36	57.13	74.47	84.14
SiO <sub>2</sub>	63.83	63.45	62.69	64.56	68.82
TiO <sub>2</sub>	0.54	0.72	1.26	1.92	1.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.87	14.35	11.03	9.01	7.88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.16	1.52	2.29	2.25	1.59
FeO	4.63	6.12	9.28	8.16	5.03
MnO	0.20	0.27	0.47	0.79	1.27
MgO	0.23	0.30	0.24	0.07	0.03
CaO	1.77	1.76	2.34	2.67	2.43
Na <sub>2</sub> O	5.45	5.09	4.98	5.25	5.45
K <sub>2</sub> O	6.07	6.10	4.85	4.39	4.22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.09	0.16	0.28	0.44
H <sub>2</sub> O	0.17	0.23	0.40	0.67	1.08
Classificação	Metaluminosa	Peralcalina	Peralcalina	Peralcalina	Peralcalina

**Tabela 9: Composições médias das amostras metaluminosas e peralcalinas da associação alcalina da Província Graciosa.**

Composição	Metaluminosas	Peralcalinas
SiO <sub>2</sub>	72.12	72.26
TiO <sub>2</sub>	0.25	0.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.05	12.61
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10	0.21
FeO	2.98	2.71
MnO	0.08	0.08
MgO	0.09	0.17
CaO	0.69	0.76
Na <sub>2</sub> O	4.76	4.63
K <sub>2</sub> O	5.04	5.11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.06
H <sub>2</sub> O	0.32	0.37

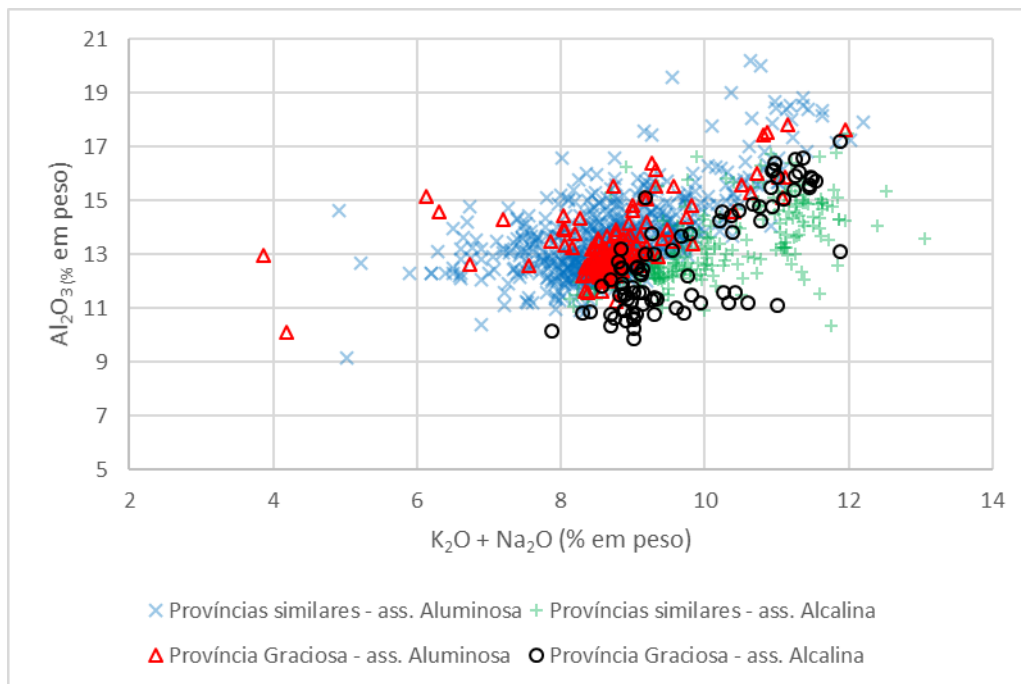


**Figura 3: Conteúdos de elementos traços significativamente distintos entre as associações petrográficas da Província Graciosa (linha cheia) e de províncias similares (linha tracejada).**

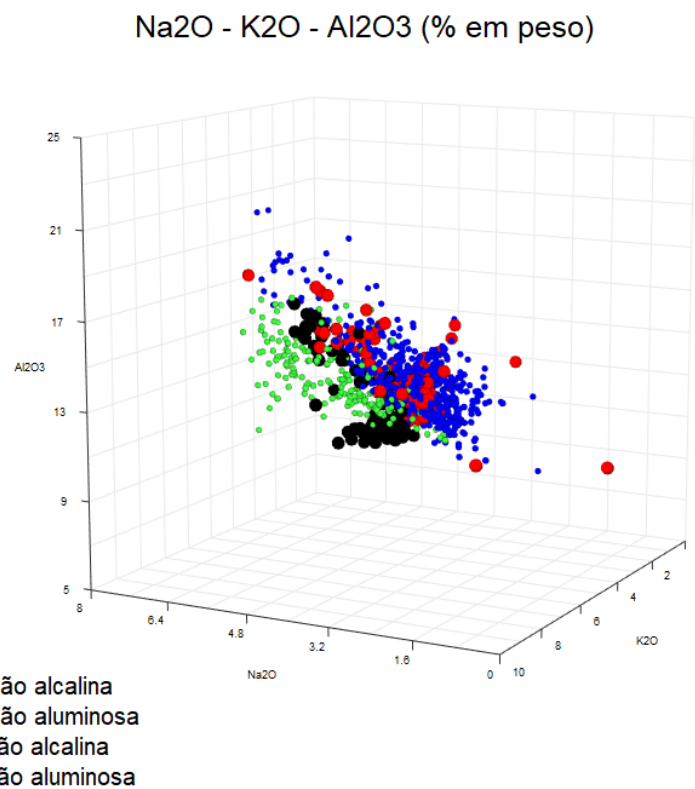


**Figura 4: Diagrama ETR normalizado segundo Boynton (1984) para dados da Província Graciosa e de províncias similares.**



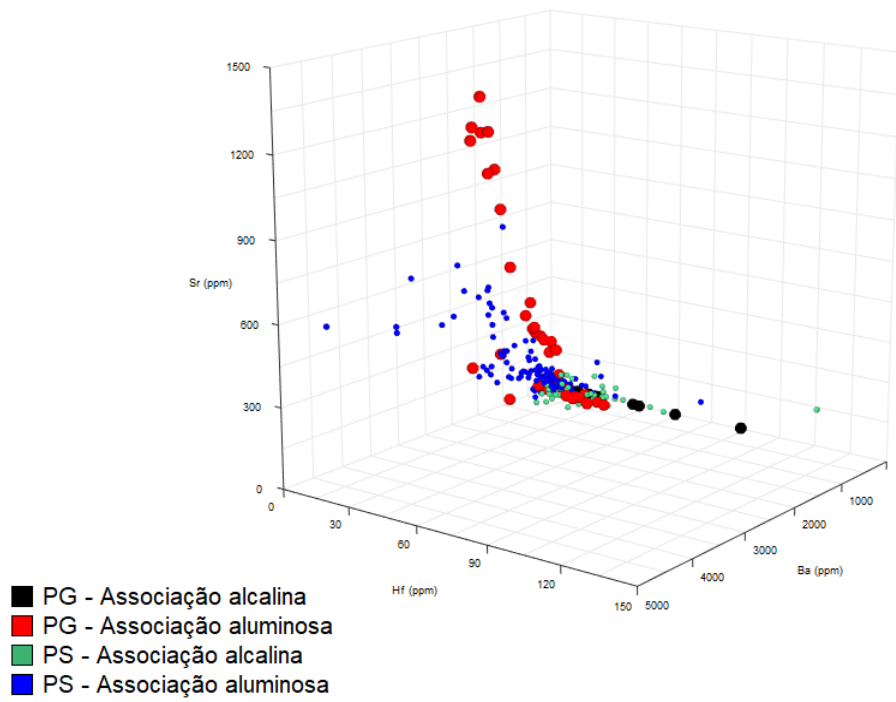


**Figura 5: Diagrama  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vs.  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  para dados da Província Graciosa e províncias similares. Notar o campo distinto entre as associações alcalina e aluminosa.**

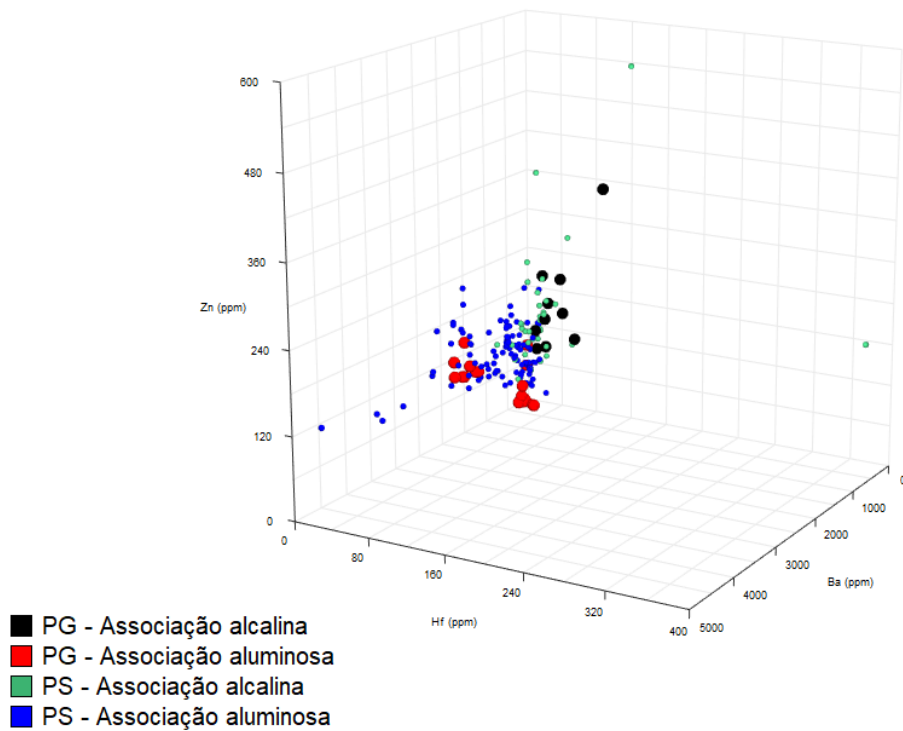


**Figura 6: Diagrama  $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$  (% em peso) com dados da Província Graciosa (PG) e de províncias similares (PS).**

### Ba - Hf - Sr

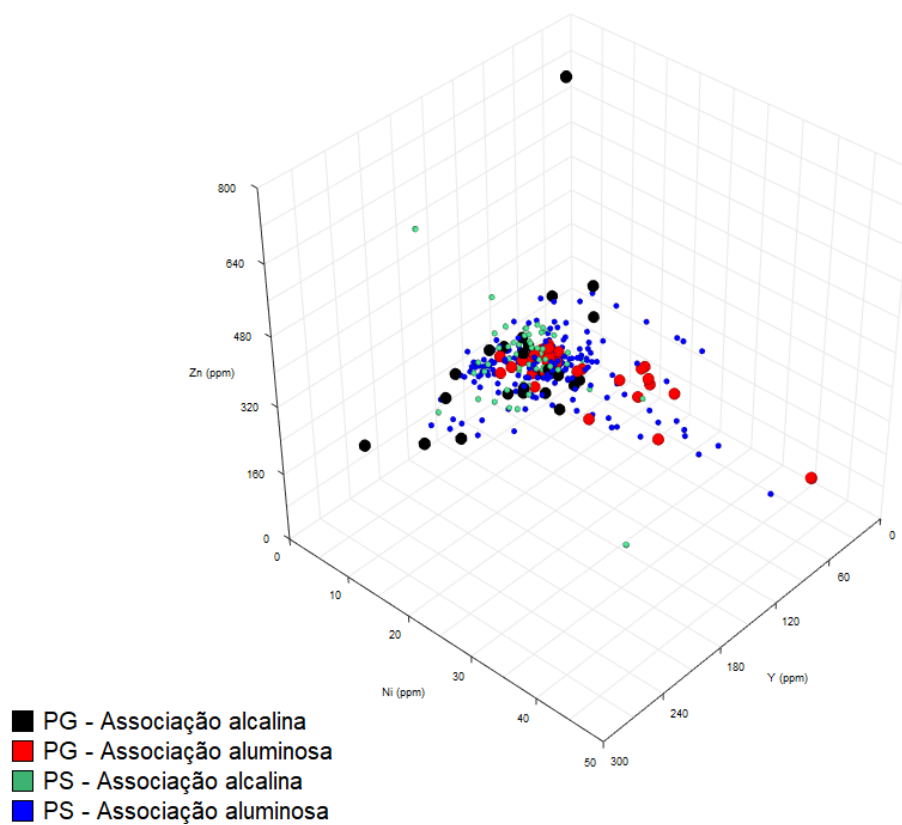


### Ba - Hf - Zn

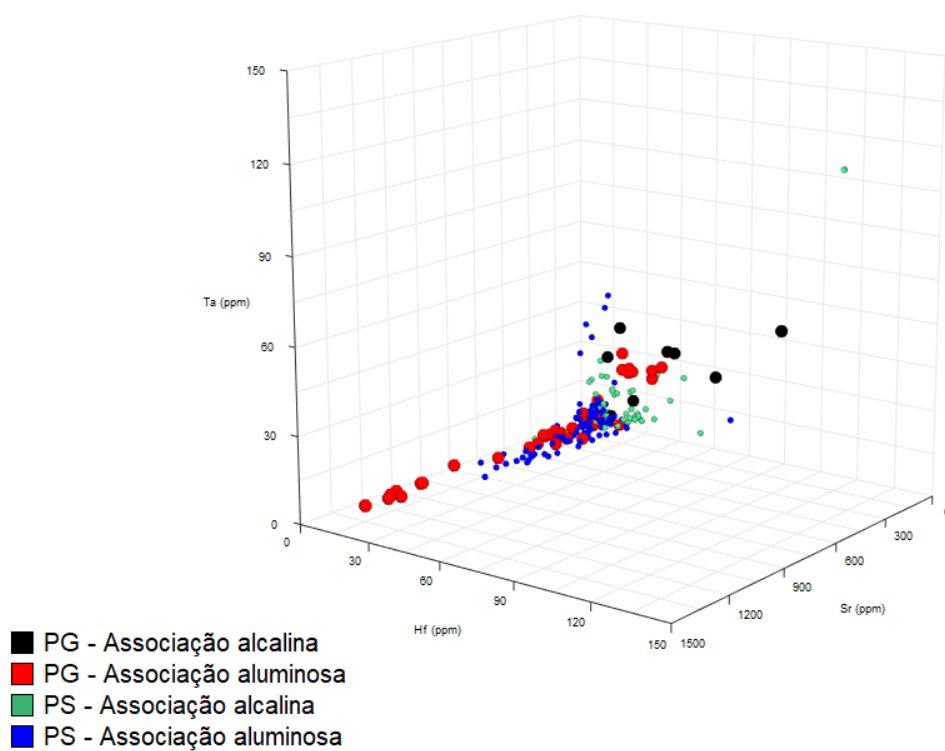


**Figura 7: Diagramas Ba - Hf - Sr e Ba - Hf - Zn (ppm) com dados da Província Graciosa (PG) e de províncias similares (PS).**

Y - Ni - Zn



Sr - Hf - Ta



**Figura 8: Diagramas Y - Ni - Zn e Sr - Hf - Ta (ppm) com dados da Província Graciosa (PG) e de províncias similares (PS).**

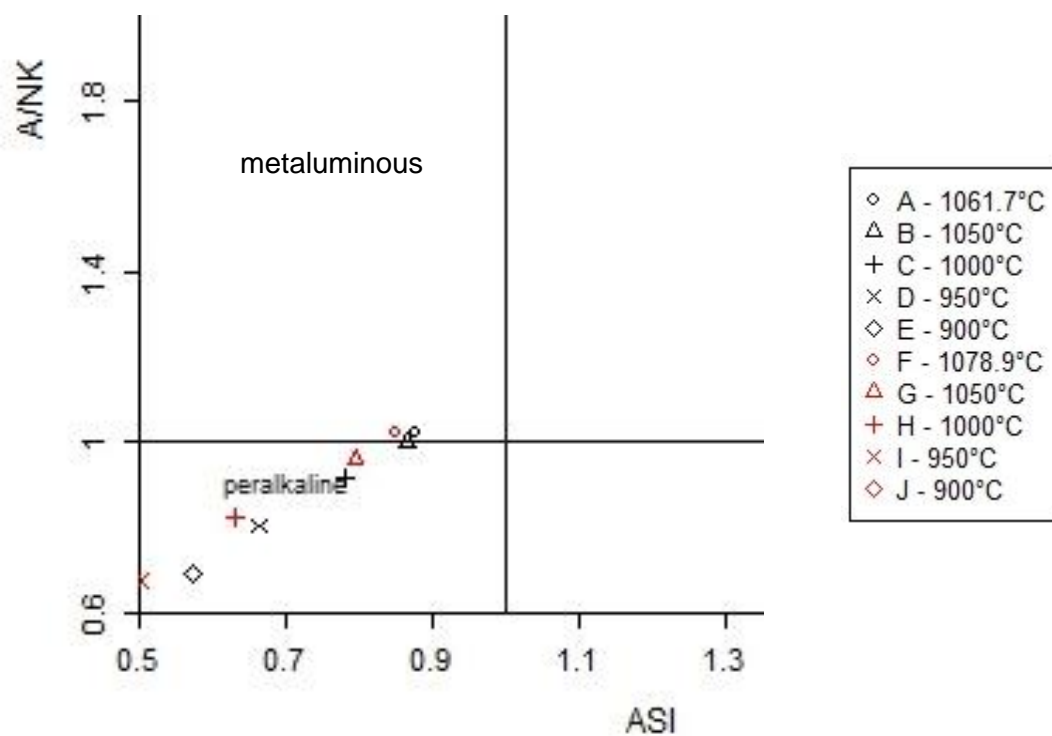


Figura 9: Classificação (Frost et al., 2001) para as fases líquidas durante a cristalização de sistemas com composições iniciais iguais às amostras CO-5 (Garin, 2002) e GRA-81A (Gualda e Vlach, 2007a) sob diferentes temperaturas. Símbolos negros (A-E) são correspondentes à amostra CO-5, e símbolos vermelhos (F-J), à amostra GRA-81A.

## 6. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Os granitos e sienitos da Província Graciosa, aflorantes desde o sudeste de São Paulo até o leste de Santa Catarina, têm sido alvo de diferentes estudos para caracterizar sua gênese e evolução. A análise integrada dos dados geoquímicos de elementos maiores e traços disponibilizados por tais trabalhos para seus diferentes plútons permitiu a caracterização dessas rochas e de suas duas associações petrográficas, identificando suas principais diferenças. Como um todo, os granitos e sienitos da Província apresentam conteúdos menores em MgO e CaO e maiores em  $\text{FeO}^{\text{total}}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , características de granitos Tipo-A, resultando em altos valores de  $\text{Fe}^\#$ .

A associação alcalina, que corresponde à minoria das ocorrências descritas, constitui em totalidade os plútons Corupá, Mandira e Papanduva (Morro Redondo) e parcialmente os plútons Alto Turvo e Anhangava, Farinha Seca e Órgãos (Serra da Graciosa) (ver Tabela 1). É constituída por rochas metaluminosas a peralcalinas; as primeiras são menos evoluídas e portam anfibólio cálcico, enquanto as segundas são mais evoluídas e contêm anfibólio sódico. São rochas *hipersolvus*, apresentando uma única fase feldspática primária composta por feldspato alcalino. Seus minerais acessórios típicos são chevkinita, ilmenita, titanita, magnetita, zircão e esfalerita. (e.g. Gualda e Vlach, 2007a, b, c; Crisma, 2013). Nos plútons da Serra da Graciosa, apresenta chevkinita-(Ce) primária, com ETR + Y compondo de 43% a 49 % em peso desse mineral (Gualda e Vlach, 2007a). Em sua composição modal, apresenta Hbl e Ri, que a distinguem da associação aluminosa. Como o nome sugere, a associação alcalina é enriquecida em elementos alcalinos (Na, K e Li), HFSE (principalmente Zr e Th), além de Fe, Mn, Cr, Zn, Pb, Hf, Ta, Ga, Sn, Y e ETR (exceto Eu), quando comparada à associação aluminosa. As amostras peralcalinas, em particular, apresentam conteúdos significativamente maiores em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Zr, Zn, Y e ETR, principalmente ETR pesados. As condições de cristalização são estimadas como relativamente reduzidas (próximo ao buffer QFM) (Vlach e Gualda, 2007).

A associação aluminosa, mais frequente e de ocorrência mais generalizada, constitui em totalidade os plútons Agudos, Dona Francisca, Ilha do Cardoso, Guaraú, Quiriri (Morro Redondo), Serra do Paratiú/Cordeiro, Votupoca, Capivari e Marumbi (estes dois últimos pertencentes à Serra da Graciosa), e parcialmente os plútons Alto Turvo e Anhangava, Farinha Seca e Órgãos (Serra da Graciosa) (ver Tabela 1). Compreende rochas usualmente leucocráticas, metaluminosas a peraluminosas, com biotita e anfibólio cálcico como principais fases máficas. São rochas *subsolvus*, com feldspato alcalino e plagioclásio como fases primárias, e seus minerais acessórios típicos são allanita, magnetita, titanita, ilmenita, zircão e apatita (e.g. Gualda e Vlach, 2007a; Vilalva, 2012). Quando comparada à associação alcalina, a associação aluminosa é enriquecida em Cu, V e alcalino-terrosos (Mg, Ca, Sr e Ba); além disso, não apresenta Hbl ou Ri em sua composição modal. As amostras

peraluminosas, em particular, apresentam os menores conteúdos em FeO. As condições de cristalização estão próximas ao buffer TMQAI (Vlach e Gualda, 2007).

Índices que utilizam os conteúdos em MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O são comumente utilizados para classificação de rochas graníticas (e.g. Shand, 1943; Frost et al., 2001), e são eficientes também em separar as associações petrográficas das rochas graníticas do Tipo-A, uma vez que tais associações apresentam valores significativamente diferentes desses elementos. Tanto o diagrama Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) quanto o diagrama de dispersão em três dimensões Na<sub>2</sub>O - K<sub>2</sub>O - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (% em peso) mostra com clareza os diferentes campos das associações, e são válidos tanto para amostras da Província Graciosa quanto de províncias similares. Outros diagramas em três dimensões que distinguem com sucesso diferentes tendências entre as associações são baseados em elementos traços como Sr, Ba, Hf, Ta, Zn, Y, Ni.

O modelamento de cristalização de composições sieníticas metaluminosas sob pressões próximas a 2kbar, utilizando o programa Rhyolite-MELTS, produziu com sucesso fases líquidas peralcalinas. A partir de sistemas com composições iniciais iguais às amostras Co-5 (Garin, 2002) e GRA-81A (Gualda e Vlach, 2007a), essas fases líquidas se tornam progressivamente mais peralcalinas com o avanço da cristalização, sugerindo que é possível produzir líquidos peralcalinos a partir da cristalização fracionada de líquidos sieníticos (traquíticos) com composições metaluminosas. Neste panorama, os álcali-feldspato granitos peralcalinos da associação alcalina que afloram na província poderiam ser gerados a partir de processos normais de cristalização fracionada de magmas parentais sieníticos (possivelmente derivados a partir de magmas originados pela fusão de manto litosférico enriquecido, e.g. Vilalva et al., inédito) e suportam algumas inferências petrográficas preliminares levantadas por Garin (2002). No caso da associação aluminosa, uma alternativa a ser explorada está relacionada à fusão por desidratação de granitoides cálcio-alcalinos na crosta rasa ( $\leq$  ca. 600 Kbar, Patiño Douce, 1997), motivada possivelmente pelo aquecimento gerado durante a colocação de magmas básico-intermediários na crosta, como atestado pela ocorrência de rochas gabrodioríticas contemporâneas na província. Um aspecto importante deste processo é a profusa cristalização de plagioclásio e ortopiroxênio durante a fusão incongruente de rochas portadoras de biotita e hornblenda. Os processos de formação de ambas associações se dariam em ambientes extensionais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abaa, S. I. (1985). The structure and petrography of alkaline rocks of the Mada Younger Granite Complex, Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 3(1-2), 107-113.
- Abdel-Rahman, A. M. (2006). Petrogenesis of anorogenic peralkaline granitic complexes from Eastern Egypt. *Mineralogical Magazine*, 70(1), 27-50.
- Abdel-Rahman, A. M., Martin, R. F. (1990). The Mount Gharib A-type granite, Nubian Shield: petrogenesis and role of metasomatism at the source. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104(2), 173-183.
- Albarède, F. (2009). *Geoquímica: uma introdução*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Almeida, C. N., Guimarães, I. P., Silva Filho, A. D. (2002). A-type post-collisional granites in the Borborema Province – NE Brazil: the Queimadas Pluton. *Gondwana Research*, 5(3), 667-681.
- Almeida, F. F. M. (1983). Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozoicas da região meridional da plataforma sul-americana. *Revista Brasileira de Geociências*, 13(3), 139-158.
- Almeida, M. E. (1997). Petrografia e geoquímica de elementos maiores da Suíte Intrusiva Tiquié: o caso dos Granitos Tiquié e Marié-Mirim no Estado do Amazonas. In: Costa, M. L., Angélica, R. S. (Eds.) *Contribuições à Geologia da Amazônia* (v. 1, 22-45). Belém: FINEP-SBG.
- Anderson, J. L. (1983). Proterozoic anorogenic granite plutonism of North America. In: Medaris Jr., L. G., Byers, C. W., Mickelson, D. M., Shanks, W. C. (Eds.) *Proterozoic geology: selected papers from an international Proterozoic Symposium*. 133-154. (Geological Society of America Memoir, 161).
- Asimow, P. D., Ghiorso, M. S. (1998). Algorithmic modifications extending MELTS to calculate subsolidus phase relations. *American Mineralogist*, 83, 1127-1132.
- Auwers, J. V., Bogaerts, M., Liégeois, J.-P., Demaiffe, D., Wilmart, E., Bolle, O., Duchesne, J. C. (2003). Derivation of the 1.0-0.9 Ga ferro-potassic A-type granitoids of Southern Norway by extreme differentiation from basic magmas. *Precambrian Research*, 124(2-4), 107-148.
- Barker, D. S. (1987). Tertiary alkaline magmatism in the Trans-Pecos, Texas. In: Fitton, J. G., Upton, B. G. J. (Eds.) *Alkaline Igneous Rocks*. Geological Society of London. 415-431. (Geological Society of London Special Publication, 30).
- Barker, F., Wones, D. R., Sharp, W. N., Desborough, G. A. (1975). The Pikes Peak Batholith, Colorado Front Range, and a model for the origin of the gabbro-anorthosite-syenite-potassic granite suite. *Precambrian Research*, 2(2), 97-160.
- Barros, C. E. M., Dall'Agnol, R., Vieira, E. A. P., Magalhães, M. S. (1995). Granito Central da Serra dos Carajás: avaliação do potencial metalogenéticos para estanho com base em estudos da borda oeste do corpo. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – Série Ciências da Terra*, 7, 93-123.
- Barros, C. E. M., Dall'Agnol, R., Barbey, P., Boullier, A-M. (1997). Geochemistry of the Estrela Granite Complex, Carajás region, Brazil: an example of an Archean A-type granitoid. *Journal of South American Earth Sciences*, 10(3-4), 321-330.
- Basei, M. A. S., Frimmel, H. E., Nutman, A. P., Preciozzi, F. (2008). West Gondwana amalgamation based on detrital zircon ages from Neoproterozoic Ribeira and Dom Feliciano belts of South America and comparison with coeval sequences from SW Africa. In: Pankhurst, R. J., Trouw, R. A. J., Brito Neves, B. B., de Wit, M. J. (Eds.) *West Gondwana: Pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic region*. Geological Society, London. 239-256. (Geological Society of London Special Publication, 294).
- Bilal, E., Moute, J., Botelho, N. F., Marini, O. J., Andrade, G. F. (1997). Geochemistry of two Proterozoic A-type granites of Goiás State, Brazil: possible links with rapakivi series. *Anuário da Academia Brasileira de Ciências*, 69, 349-365.

- Blundy, J. D., Wood, B. J. (1994a). Energetics of element partitioning between minerals and melts. *Mineralogical Magazine*, 58A, 101-102.
- Blundy, J. D., Wood, B. J. (1994b). Prediction of crystal-melt partition coefficients from elastic moduli. *Nature*, 372, 452-454.
- Bonin, B. (2007). A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97, 1-29.
- Bonin, B., Giret, A. (1990). Plutonic alkaline series: Daly gap and intermediate compositions for liquids filling up crustal magma chambers. *Schweizerische Mineralogisch und Petrographische Mitteilungen*, 70(2), 175-187.
- Bonin, B., Grelou-Orsini, C., Vialette, Y. (1978). Age, origin and Evolution of the anorogenic complex of Evisa (Corsica): A K-Li-Rb-Sr study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 65(4), 425-432.
- Bohrson, W. A., Reid, M. R. (1997). Genesis of silicic peralkaline volcanic rocks in an ocean island setting by crustal melting and open-system processes: Socorro Island, Mexico. *Journal of Petrology*, 38(9), 1137-1166.
- Bowden, P. (1985). The geochemistry and mineralization of alkaline ring complexes in Africa (a review). *Journal of African Earth Sciences*, 3, 17-39.
- Boynton, W. V. (1984). Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: meteorite studies. In: Henderson, P. (Ed). *Rare Earth Element Geochemistry*. 63-114. Elsevier. (Developments in Geochemistry, 2).
- Bucher, K., Frost, B. R. (2006). Fluid transfer in high-grade metamorphic terrains intruded by anorogenic granites: the Thor Range, Antarctica. *Journal of Petrology*, 47(3), 567-593.
- Capaldi, G., Chiesa, S., MAnetti, P., Orsi, G., Poli, G. (1987). Tertiary anorogenic granites of the western border of the Yemen Plateau. *Lithos*, 20(6), 433-444.
- Chappell, B. W., White, A. J. R. (1974). Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8, 173-174.
- Civetta, L., D'Antonio, M., Orsi, G., Tilton, G. R. (1998). The geochemistry of volcanic rocks from Pantelleria Island, Sicily Channel: petrogenesis and characteristics of the Mantle Source Region. *Journal of Petrology*, 39(8), 1453-1491.
- Clarke, F. W. (1911). *The Data of Geochemistry* (2a ed.). Washington: United States Geological Survey, Bulletin 491.
- Clemens, J. D., Holloway, J. R., White, A. J. R. (1986). Origin of an A-type granite: experimental constraints. *American Mineralogist*, 71, 317-314.
- Cohen, K. M., Finney, S. C., Gibbard, P. L., Fan, J. -X. (2013; atualizado). The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36, 199-204. Acesso em 15 de agosto de 2018, <<http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2017-02.pdf>>.
- Collins, W. J., Beams, S. D., White, A. J. R., Chappell, B. W. (1982). Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80, 189-200.
- Cordani, U. G. (1974). Comentários sobre as determinações geocronológicas disponíveis nas Folhas Assunção e Curitiba. In: Monaco, O. A., Zir Filho, J. A., Valentine, N. (Eds.) *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Folha Asunción – SG. 21 e Curitiba – SG. 22*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral. 58-67.
- Cordani, U. G., Kaul, P. A. T., Siga Jr., O. (2000). Geochronology of the neoproterozoic granitoid complexes of the Serra do Mar, Southern Brazil. In: *International Geological Congress*, 31. IUGS.
- Costi, H. T. (2000). *Petrologia de granitos alcalinos com alto flúor mineralizados em metais raros: o exemplo do Albita-granito da mina Pitinga, Amazonas, Brasil*. Tese (Doutorado). Belém: Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará.
- Creaser, R. A., Price, R. C., Wormald, R. J. (1991). A-type granites revisited: assessment of a residual-source model. *Geology*, 19, 163-166.



- Crisma, P. R. (2013). Petrografia e mineralogia de rochas graníticas e gabro-diríticas dos Plútons Palermo e Rio Negro, região do Alto Rio Negro, PR-SC, Província Graciosa. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Cullers, R. L., Griffin, T., Bickford, M. E., Anderson, J. L. (1992). Origin and chemical evolution of the 1360 Ma San Isabel Batholith, Wet Mountains, Colorado: a mid-crustal granite of anorogenic affinities. *Geological Society of America Bulletin*, 104(3), 316-328.
- Dall'Agnol, R., de Oliveira, D. C. (2007). Oxidized, magnetite-series, rapakivi -type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, 93(3-4), 215-233.
- Dall'Agnol, R., Lafon, J. -M., Macambira, M. J. B. (1994). Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Province, Amazonian Craton: geochronological, petrological and geochemical aspects. *Mineralogy and Petrology*, 50(1-3), 113-138.
- Dall'Agnol, R., Rämö, O. T., Magalhães, M. S., Macambira, M. J. B. (1999). Petrology of the anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites, Amazonian Craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos*, 46(3), 431-462.
- Dall'Agnol, R., Teixeira, N. P., Rämö, O. T., Moura, C. A. V., Macambira, M. J. B., de Oliveira, D. C. (2005). Petrogenesis of the Paleoproterozoic rapakivi A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil. *Lithos*, 80, 101-129.
- Duchesne, J.-C., Wilmart, E. (1997). Igneous Charnockites and related rocks from the Bjerkreim-Sokndal Layered Intrusion (Southwest Norway): a Jotunite (Hypersthene Monzodiorite)-derived A-type granitoid suite. *Journal of Petrology*, 38(3), 337-369.
- Eby, G. N. (1979). Mount Johnson, Quebec – an example of silicate-liquid immiscibility? *Geology*, 7, 491-494.
- Eby, G. N. (1990). The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26, 115-134.
- Eby, G. N. (1992). Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenic and tectonic implications. *Geology*, 20, 641-644.
- Eby, G. N., Krueger, H. W., Creasy, J. W. (1992). Geology, geochronology, and geochemistry of the White Mountain Batholith, New Hampshire. In: Puffer, J. H., Ragland, P. C. (Eds.) *Eastern North American Mesozoic magmatism*. Geological Society of America. 379-398. (Geological Society of America Special Paper, 268).
- Emslie, R. F. (1991). Granitoids of rapakivi granite-anorthosite and related associations. *Precambrian Research*, 51, 173-192.
- Espinoza, F., Morata, D., Polvé, M., Lagabriele, Y., Maury, R. C., Guivel, C., Cotten, J., Bellon, H., Suárez, M. (2008). Bimodal back-arc alkaline magmatism after ridge subduction: Pliocene felsic rocks from Central Patagonia (47°S). *Lithos*, 101(3-4), 191-217.
- Ewart, A. (1981). The Mineralogy and chemistry of the anorogenic tertiary silicic volcanics of S.E. Queensland and N.E. New South Wales, Australia. *Journal of Geophysical Research*, 86(B11), 10242-10256.
- Ewart, A., Milner, S. C., Armstrong, R. A., Dungan, A. R. (1998). Etendeka volcanism of the Goboboseb Mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: Geochemical evidence of early cretaceous Tristan Plume melts and the role of crustal contamination in the Paraná-Etendeka CFB. *Journal of Petrology*, 39(2), 191-225.
- Fernandes, M. L. S., Marciano, V. R. P. R. O., Oliveira, R. C., Neves, J. M. C., Dilásio, M. V. (1994). Granitos Borrachudos: um exemplo de granitogênese anorogênica na porção central do Estado de Minas Gerais. *Geonomos*, 2(2): 23-29.
- Ferré, E. C., Caby, R., Peucat, J. J., Capdevila, R., Monié, P. (1998). Pan-African, post-collisional, ferro-potassic granite and quartz-monzonite plútons of Eastern Nigeria. *Lithos*, 45(1-4), 255-279.

- Fletcher, C. J. N., Beddoe-Stephens, B. (1987). The petrology, chemistry and crystallization history of the Velasco alkaline province, Eastern Bolivia. In: *Alkaline Igneous Rocks*. Geological Society of London. 403-413. (Geological Society of London Special Publication, 30).
- Frindt, S., Trumbull, R. B., Romer, R. L. (2004). Petrogenesis of the Gross Spitzkoppe topaz granite, Central Western Namibia: a geochemical and Nd-Sr-Pb isotope study. *Chemical Geology*, 206(1-2), 43-71.
- 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, 2033-2048.
- Frost, B. R., Frost, C. D. (2008). A Geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology*, 49(11), 1955-1969.
- Frost, C. D., Frost, B. R., Chamberlain, K. R., Edwards, B. R. (1999). Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman Batholith, SE Wyoming, USA: a reduced, rapakivi-type anorogenic granite. *Journal of Petrology*, 40(12), 1771-1802.
- Galindo, A. C., Sá, J. M. (2000). Contexto tectônico e geoquímico do Granitóide Catingueira: um magmatismo alcalino-peralcalino no limite norte da zona transversal da Província Borborema. *Geochimica Brasiliensis*, 14(1), 1-21.
- Garcia, R. P. (2011). *Magmatismo granítico e alteração hidrotermal: exemplo do Plúton Desembarque, Maciço Guaraú (SP), Província Graciosa*. Dissertação (Graduação). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Garcia, R. P. (2015). *Evolução magmática e hidrotermal de granitos de "Tipo-A" reduzidos: o exemplo do Plúton Desembarque, Maciço Guaraú, SP*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Garin, Y. (2002). *Mineralogia e petrologia da associação alcalina de sienitos e granitos de Tipo-A do Maciço Corupá (SC)*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Garin, Y., Vlach, S. R. F., Tassinari, C. C. G. (2003). Sr and Nd isotope signatures of A-type alkaline syenites, granites, and associated diorites and hybrid rocks from the Corupá Massif (SC), Serra do Mar Province, S Brazil. *Symposium on Isotope Geology*, 4, 556-559. Salvador.
- Gava, A., Montes, A. S. L., Oliveira, E. P. (1984). Granitos alcalinos no sudeste do Piauí: caracterização geológica, petrográfica e geoquímica. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*, 2767-2785.
- Ghiorso, M. S., Sack, R. O. (1995). Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolations and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(2-3), 197-212.
- Gimenez Filho, A. (1993). *Evolução do Complexo Granítico Três Córregos a Noroeste de Apiaí – SP*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Gimenez Filho, A., Teixeira, W., Figueiredo, M. C. H., Trevizoli Júnior, L. E. (1995). Geologia, petrografia e litogeoquímica do Complexo Granítico Três Córregos na região de Barra do Chapéu e Ribeirão Branco, SP. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(2), 92-106.
- Góis, J. R. (1995). *Contribuição à petrografia e geoquímica da parte setentrional do complexo vulcano-plutônico Morro Redondo, divisa do Paraná com Santa Catarina*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Goodenough, K. M., Upton, B. G. J., Ellam, R. M. (2000). Geochemical evolution of the Ivigtut granite, South Greenland: a fluorine-rich "A-type" intrusion. *Lithos*, 51(3), 205-221.
- Goraieb, C. L. (2001). *Contribuição à Gênese do Depósito Primário Polimetálico (Sn, W±, Zn, Cu, Pb) Correas, Ribeirão Branco (SP)*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Gualda, G. A. R. (2001). *Evolução petrográfica e mineralógica das associações alcalina e aluminosa dos granitos Tipo-A da Graciosa, PR*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

- Gualda, G. A. R., Ghiorso, M. S. (2015). MELTS\_Excel: A Microsoft Excel-based MELTS interface for research and teaching of magma properties and Evolution. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16, 315-324.
- Gualda, G. A. R., Vlach, S. R. F. (2007a). The Serra da Graciosa A-type granites and syenites, Southern Brazil. Part 1: Regional setting and geological characterization. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79, 405-430.
- Gualda, G. A. R., Vlach, S. R. F. (2007b). The Serra da Graciosa A-type Granites and Syenites, Southern Brazil. Part 2: Petrographic and mineralogical evolution of the alkaline and aluminous associations. *Lithos*, 93, 310-327.
- Gualda, G. A. R., Vlach, S. R. F. (2007c). The Serra da Graciosa A-type Granites and Syenites, Southern Brazil. Part 3: Magmatic evolution and post-magmatic breakdown of amphiboles of the alkaline association. *Lithos*, 93, 328-339.
- Gualda, G. A. R., Ghiorso, M. S., Lemons, R. V., Carley, T. L. (2012). Rhyolite-MELTS: a modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, 53(5), 875-890.
- Guimarães, I. P., Silva Filho, A. D., Melo, S. C., Macambira, M. B. (2005). Petrogenesis of A-type granitoids from the Alto Moxoto and Alto Pajeu Terranes of the Borborema Province, NE Brazil: constraints from geochemistry and isotopic composition. *Gondwana Research*, 8(3), 347-362.
- Haapala, I., Rämö, O. T. (1992). Tectonic setting and origin of the Proterozoic rapakivi granites of South-eastern Fennoscandia. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh (Earth Sciences)*, 83, 165-171.
- Hall, A. (1996). *Igneous Petrology*. Essex: Pearson Education Limited.
- Hallinan, S. E., Mantivani, M. S. M., Shukowsky, W., Braggion Jr., I. (1993). Estrutura do escudo Sul-Brasileiro: uma revisão através de dados gravimétricos e magnetométricos. *Revista Brasileira de Geociências*, 23, 201-214.
- Han, B., Wang, S., Jahn, B., Hong, D., Kagami, H., Sun, Y. (1997). Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138(3-4), 135-159.
- Harara, O. M. M. (2001). *Mapeamento e investigação petrológica e geocronológica dos litotipos da região do Alto Rio Negro (PR-SC): um exemplo de sucessivas e distintas atividades magmáticas durante o Neoproterozoico III*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Hartmann, L. A., Nardi, L. V. S. (1982). Os granitos Santo Afonso, Saibro e Vauthier da Região do Arroio Santa Maria Chico, Dom Pedrito, RS. *Acta Geológica Leopoldensia*, 8, 153-178.
- Henderson, P. (1984). General geochemical properties and abundances of the Rare Earth Elements. In: Henderson, P. (Ed.) *Rare Earth Element Geochemistry*. 1-32. Elsevier. (Developments in Geochemistry, 2).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Han Baofu, Jin Manyuan (1996). Post orogenic alkaline granites from China and comparisons with anorogenic alkaline granites elsewhere. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13(1), 13-27.
- Ike, C. (1985). Postmagmatic arfvedsonite-aenigmatite paragenesis in the ring-dyke of the Burra Centre, Ningi-Burra Complex, Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 3, 101-105.
- Janasi, V. A. (2002). Elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of two Neoproterozoic mangerite suites in SE Brazil: implications for the origin of the mangerite-charnockite-granite series. *Precambrian Research*, 119(1-4), 301-327.
- Jorge João, X. S., Lobato, T. A. M., Marques, M. T. G. (1991). Litogeoquímica-petroquímica. In: Araújo, O. J. B., Maia, G. G. M. (Eds.) *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – Programa Grande Carajás – Subprojeto Recursos Minerais – Serra dos Carajás: Folha SB.22-Z-A – Estado do Pará*. Brasília: DNPM. 79-95.
- Jung, S., Mezger, K., Hoernes, S. (1998). Petrology and geochemistry of syn- to post-collisional metaluminous A-Type granites – a major and trace element and Nd-Sr-Pb-O-isotope study from the Proterozoic Damara Belt, Namibia. *Lithos*, 45(1-4), 147-175.

- Kahoui, M., Mahdjoub, Y. (2004). An Eburnian alkaline-peralkaline magmatism in the Reguibat rise: the Djebel Drissa ring complex (Eglab Shield, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 39(3-5), 115-122.
- Katzir, Y., Eyal, M., Litvinovsky, B. A., Jahn, B. M., Zandvilevich, A. N., Valley, J. W., Beerli, Y., Pelly, I., Shimshilashvili, E. (2007). Petrogenesis of A-type granites and origin of vertical zoning in the Katharina Pluton, Gebel Mussa (Mt. Moses) area, Sinai, Egypt. *Lithos*, 95(3-4), 208-228.
- Kaul, P. F. T. (1984). Significado dos granitos da Suíte Intrusiva Serra do Mar na evolução da crosta do sul-sudeste do Brasil, no âmbito das folhas SG.22 – Curitiba e SG.23 – Iguape. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*, 6, 2815-2947.
- Kaul, P. F. T. (1997). O magmatismo na Serra do Mar e adjacências (sul do Brasil) no final do proterozoico e seus condicionantes tectônicos. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Kerr, A., Fryer, B. J. (1993). Nd isotope evidence for crust-mantle interaction in the generation of A-type granitoid suites in Labrador, Canada. *Chemical Geology*, 104(1-4), 39-60.
- Kinnaird, J. A., Bowden, P., Iver, R. A., Odling, N. W. A. (1985). Mineralogy, geochemistry and mineralization at the Ririway Complex, Northern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 3, 185-222.
- King, P. L., White, A. J. R., Chappell, B. W., Allen, C. M. (1997). Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3), 371-391.
- King, P. L., Chappell, B. W., Allen, C. M., White, A. J. R. (2001). Are A-type granite the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4), 501-514.
- Landenberger, B., Collins, W. J. (1996). Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: evidence from the Chaelundi Complex, Eastern Australia. *Journal of Petrology*, 37(1), 145-170.
- Leite Junior, W. B. (2002). *A Suíte Intrusiva Santa Clara (RO) e a mineralização primária polimetálica (Sn, W, Nb, Ta, Zn, Cu, Pb) associada*. Tese (Doutoramento). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Lenharo, S. L. R., Moura, M. A., Botelho, N. F. (2002). Petrogenetic and mineralization processes in Paleo- to Mesoproterozoic rapakivi granites: examples from Pitinga and Goiás, Brazil. *Precambrian Research*, 119(1-4), 277-299.
- Lenharo, S. L. R., Pollard, P. J., Born, H. (2003). Petrology and textural evolution of granites associated with tin and rare metals mineralization at the Pitinga mine, Amazonas, Brazil. *Lithos*, 66(1-2), 37-61.
- Liégeois, J-P. (1998). Preface: Some words on the post-collisional magmatism. *Lithos*, 45, xv-xvii.
- Lindenmayer, Z. G., Fyfe, W. S., Bocalon, V. L. S. (1994). Nota preliminar sobre as intrusões granitóides do depósito de cobre do Salobo, Carajás. *Acta Geológica Leopoldensia*, 40, 153-184.
- Lightfoot, P. C., Hawkesworth, C. J., Sethna, S. F. (1987). Petrogenesis of rhyolites and trachytes from the Deccan Trap: Sr, Nd and Pb isotope and trace element evidence. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(1), 44-54.
- Loiselle, M. C., Wones, D. R. (1979). Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11(7) 468.
- Long, L. E., Sial, A. N., Nekvasil, H., Borba, G. S. (1986). Origin of granite at Cabo de Santo Agostinho, Northeast Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(3), 341-350.
- MacDonald, R., Davies, G. R., Bliss, C. M., Leat, P. T., Bailey, D. K., Smith, R. L. (1987). Geochemistry of high-silica peralkaline rhyolites, Naivasha, Kenya Rift Valley. *Journal of Petrology*, 28(6), 979-1008.
- Maheshwari, A., Sial, A. N., Coltorti, M., Chittora, V. K., Cruz, M. J. M. (2001). Geochemistry and petrogenesis of Siwana Peralkaline Granites, West of Barmer, Rajasthan, India. *Gondwana Research*, 4(1), 87-95.
- Martin, H., Bonin, B., Capdevila, R., Jahn B. M., Lameyre, J., Wang, Y. (1994). The Kuiqi Peralkaline Granitic Complex (SE China): Petrology and geochemistry. *Journal of Petrology*, 35(4), 983-1015.

- Martin, R. F. (2006). A-type granites of crustal origin ultimately result from open-system fenitization-type reactions in an extensional environment. *Lithos*, 91, 125-136.
- Martins, F. A. G., Silva, A. C. G. de A. e., Oliveira, M. C. B. de. (2004). Petrografia, petroquímica e metalogenia do Granito Serra do Paratiú, Cananéia, Estado de São Paulo. *Boletim Paranaense de Geociências*, 54, 19-39.
- Mason, B., Moore, C. B. (1982). *Principles of Geochemistry* (4a ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Michael, P. J. (1984). Chemical differentiation of the Cordillera Paine granite (Southern Chile) by *in situ* fractional crystallization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 87(2), 179-195.
- Moufti, M. R. H. (2001). Age, geochemistry and origin of peraluminous A-type granitoids of the Ablah-Shuwas Pluton, Ablah Graben, Arabian Shield. *Acta Mineralogica-Petrographica*, 42, 5-20.
- Moura, M. A., Botelho, N. F. (2000). The topaz-albite granite and related rocks from the Sn-In mineralized zone of Mangabeira Granitic Massif (GO, Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, 30(2), 270-273.
- Nägler, T. F., Frei, R. (1997). True K-feldspar granites in oceanic crust (Masirah ophiolite, Sultanate of Oman): A U-Pb and Sm-Nd isotope study. *Chemical Geology*, 138(1-2), 119-126.
- Naime, R. H., Nardi, L. V. S. (1991). O Granito Ramada, Porção Oeste do Escudo Sul-Rio-Grandense: geologia, petrologia e geoquímica. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(3), 266-274.
- Nédélec, A., Stephens, E. W., Fallick, A. E. (1995). The Panafrican Stratoïd Granites of Madagascar: alkaline magmatism in a post-collision extensional setting. *Journal of Petrology*, 36(5), 1367-1391.
- Negri, F. A. (1995). *Geologia das rochas charnockíticas e associadas da região de São Francisco Xavier, SP*. Dissertação (Mestrado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- Neumann, E.-R. (1976). Compositional relations among pyroxenes, amphiboles and other mafic phases in the Oslo Region plutonic rocks. *Lithos*, 9(2), 85-109.
- Neumann, E.-R. (1980). Petrogenesis of the Oslo Region Larvikites and associated rocks. *Journal of Petrology*, 21(3), 499-531.
- Njonfang, E., Nono, A. (2003). Clinopyroxene from some felsic alkaline rocks of the Cameroon Line, Central Africa: Petrological implications. *European Journal of Mineralogy*, 15(3), 527-542.
- Nordstrom, D. K., Munoz, J. L. (1994). *Geochemical Thermodynamics* (2a ed.). Boston: Blackwell Scientific Publications.
- O'Halloran, D. A. (1985). Ras ed Dom migrating ring complex: A-type granites and syenites from the Bayuda Desert, Sudan. *Journal of African Earth Sciences*, 3, 61-75.
- Oliveira, M. C. B. de. (1989). Petrologia do Maciço Granítico Mandira – SP. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Passarelli, C. R. (2001). *Caracterização estrutural e geocronológica dos domínios tectônicos da porção sul-oriental do Estado de São Paulo*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Passarelli, C. R., Basei, M. A. S., Campos Neto, M. da C., Siga Jr., O., Prazeres Filho, H. J. dos. (2004). Geocronologia e geologia isotópica dos terrenos Pré-Cambrianos da porção sul-oriental do Estado de São Paulo. *Geologia USP – Série Científica*, 4(1), 55-74.
- Patiño Douce, A. E. (1997). Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 25, 743-746.
- Peacock, M. A. (1931). Classification of igneous rock series. *Journal of Geology*, 39(1), 65-67.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 29, 956-983.

- Petersen, J. S. (1980). The zoned Kleivan granite – an end member of the anorthosite suite in southwest Norway. *Lithos*, 13(1), 79-95.
- Philipp, R. P., Machado, R. (2005). The Late Neoproterozoic granitoid magmatism of the Pelotas Batholith, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 19(4), 461-478.
- Philipp, R. P., Almeida, D. P. M., Gomes, M. E. B., Pintaúde, D. A. (1991). Geoquímica do Granito Bela Vista, Piratini, RS: uma contribuição ao conhecimento do magmatismo alcalino no setor Oriental do Escudo. *Acta Geológica Leopoldensia*, 34, 95-122.
- Pitcher, W. S. (1993). *The nature and origin of granite*. Glasgow: Blackie Academic & Professional.
- Plá Cid, J., Bitencourt, M. F., Nardi, L. V. S., Conceição, H., Bonin, B., Lafon, J. M. (2000). Paleoproterozoic late-orogenic and anorogenic alkaline granitic magmatism from northeast Brazil. *Precambrian Research*, 104(1-2), 47-75.
- Poitrasson, F., Duthou, J.-L., Pin, C. (1995). The relationship between petrology and Nd isotopes as evidence for contrasting anorogenic granite genesis: example of the Corsican Province (SE France). *Journal of Petrology*, 36(5), 1251-1274.
- Qiu, J., Wang, D., McInnes, B., Jiang, S., Wang, R., Kanisawa, S. (2004). Two subgroups of A-type granites in the coastal area of Zhejiang and Fujian Provinces, SE China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95(1-2), 227-236.
- Radain, A. A. M., Fyfe, W. S., Kerrich, R. (1982). Origin of peralkaline granites of Saudi Arabia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78(3), 358-366.
- Railsback, L. B. (2012). *An Earth Scientist's Periodic Table of the Elements and Their Ions, Version 4.8e*. Acesso em 27 de abril de 2017, < <http://www.gly.uga.edu/railsback/PT/815PeriodicTable48e029834.jpg>>.
- Rollinson, H. (1993). Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Essex: Longman Scientific & Technical.
- Salazar Naranjo, A. F. (2016). *Experimentos de fusão-desidratação (400 MPa, 950°C) de granitos cálcio-alcalinos de alto K (Bragança Paulista, SP) e implicações para a geração de granitos ferroanos peraluminosos*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Schmitt, A. K., Emmermann, E., Trumbull, R. B., Bühn, B., Henjes-Kunst, F. (2000). Petrogenesis and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of the Brandberg Complex, Namibia: evidence for a major mantle contribution in metaluminous and peralkaline granites. *Journal of Petrology*, 41(8), 1207-1239.
- Shand, S. J. (1943). *Eruptive rocks: their genesis, composition, classification, and their relation to ore-deposits with a chapter on meteorites* (2a ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Shand, S. J. (1951) *Eruptive Rocks*. New York: John Wiley.
- Sial, A. N. (1989). *Petrologia, geoquímica de elementos maiores, traços, terras raras e isótopos (Sr, O, H, S) nos batólitos da Meruoca e Mucambo, Ceará, Nordeste do Brasil*. Tese (Livre Docência). Recife: Departamento de Geologia, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco.
- Sial, A. N. (1986). Granite-types in Northeast Brazil: current knowledge. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(1), 54-72.
- Siga Jr., O. (1995). *Domínios tectônicos do Sudeste do Paraná e Nordeste de Santa Catarina: geocronologia e evolução crustal*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Siga Jr., O., Basei, M. A. S., Machiavelli, A. (1993). Evolução geotectônica da porção NE de Santa Catarina e SE do Paraná, com base em interpretações geocronológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 23, 215-223.
- Siga Jr., O., Basei, M. A. S., Sato, K., Citroni, S. B., Reis Neto, J. M., Harara, O. M. M., Passarelli, C. R., Prazeres Filho, E. J., Weber, W., Lima, P. S., Machiavelli, A. (1997). Ages and tectonic setting of alkaline-peralkaline

- granitoids of Paraná and Santa Catarina States, Southern Brazil. In: *South American Symposium on Isotope Geology*, 1, 301-303.
- Siga Jr., I., Basei, M. A. S., Sato, K., Cordani, U. G., Citroni, S. B. (2000). U-Pb and Sm-Nd isotopic studies of Campo Alegre and Guaratubinha volcano-sedimentary basins, Southern region. In: *International Geological Congress*, 31.
- Smith, D. R., Noblett, J., Wobus, R. A., Unruh, D., Douglass, J., Beane, R., Davis, C., Goldman, S., Kay, G., Gustavson, B., Saltoun, B., Stewart, J. (1999). Petrology and geochemistry of late-stage intrusions of the A-type, mid-Proterozoic Pikes Peak Batholith (Central Colorado, USA): implications for petrogenetic models. *Precambrian Research*, 98(3-4), 271-305.
- Streckeisen, A. L. (1974). Classification and Nomenclature of Plutonic Rocks: Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geologische Rundschau: Internationale Zeitschrift für Geologie*. Stuttgart, 63, 773-785.
- Tollo, R. P., Aleinikoff, J. N., Bartholomew, M. J., Rankin, D. W. (2004). Neoproterozoic A-type granitoids of the central and Southern Appalachians: intraplate magmatism associated with episodic rifting of the Rodinian supercontinent. *Precambrian Research*, 128(1-2), 3-38.
- Troll, V. R., Schmincke, H.-U. (2002). Magma mixing and crustal recycling recorded in ternary feldspar from compositionally zoned peralkaline ignimbrite 'A', Gran Canaria, Canary Islands. *Journal of Petrology*, 43(2), 243-270.
- Turner, S. P., Foden, J. D., Morrison, R. S. (1992). Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: an example from the Pathaway Ridge, South Australia. *Lithos*, 28(2), 151-179.
- Vasquez, M. L. (1997). *Evolução petrogenética dos granitos da Suíte Intrusiva Encruzilhada do Sul-RS*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Vasquez, M. L., Rissi, P. S. F., Klein, E. L. (2002). Granitoides pós-colisionais da porção leste da Província Tapajós. In: Klein, E. L., Vasquez, M. L., Rosa-Costa, L. T. (Eds.) *Contribuições à Geologia da Amazônia* (v. 3, 67-84). Belém: Sociedade Brasileira de Geologia.
- Vilalva, F. C. J. (2012). Petrologia do Complexo Morro Redondo, Província Graciosa, e implicações para o magmatismo de Tipo-A pós-colisional ao final do Ciclo Brasileiro – Pan-Africano no Sul-Sudeste do Brasil. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Vilalva, F. C. J., Vlach, S. R. F. (2014). Geology, petrography and geochemistry of the A-type granites from the Morro Redondo Complex (PR-SC), Southern Brazil, Graciosa Province. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86(1), 85-116.
- Vilalva, F. C. J., Vlach, S. R. F., Simonetti, A. (2016). Chemical and O-isotope compositions of amphiboles and clinopyroxene from A-type granites of the Papanduva Pluton, South Brazil: insights into late- to post-magmatic evolution of peralkaline systems. *Chemical Geology*, 420, 186-199.
- Vlach, S. R. F., Gualda, G. A. R. (2007). Allanite and chevkinite in A-type granites and syenites of the Graciosa Province, Southern Brazil. *Lithos*, 97, 98-121.
- Vlach, S. R. F., Janasi, V. A., Vasconcellos, A. C. B. C. (1991). O magmatismo granitoide tardi- a pós-orogênico de idade Brasileira no Estado de São Paulo. *Boletim IG-USP: Publicação Especial*, 9, 99-101.
- Vlach, S. R. F., Siga Jr., O., Harara, O. M. M., Gualda, G. A. R., Basei, M. A. S., Vilalva, F. C. J. (2011). Crystallization ages of the A-type magmatism of the Graciosa Province (Southern Brazil): Constraints from zircon U-Pb (ID-TIMS) dating of coeval K-rich gabbro-dioritic rocks. *Journal of South American Earth Sciences*, 32(4), 407-415.
- Vogado, F. P. (2010). *Geologia e petrologia do Maciço Granítico Alto Turvo (PR), Província Graciosa, região S-SE do Brasil*. Dissertação (Graduação). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

- Volkert, R. A., Feigenson, M. D., Patino, L. C., Delaney, J. S., Drake Jr., A. A. (2000). Sr and Nd isotopic compositions, age and petrogenesis of A-type granitoids of the Vernon Supersuite, New Jersey Highlands, USA. *Lithos*, 50(4), 325-347.
- Walsh, J. N., Beckinsale, R. D., Skelhorn, R. R., Thorpe, R. S. (1979). Geochemistry and petrogenesis of tertiary granitic rocks from the Island of Mull, Northwest Scotland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 71(2), 99-116.
- Weber, W. (1998). *Geologia e geocronologia da Ilha do Cardoso, Sudeste do Estado de São Paulo*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Weber, W., Basei, M. A. S., Siga Jr., O., Sato, K. (2001). O magmatismo alcalino Neoproterozoico na Ilha do Cardoso, sudeste do Estado de São Paulo. *Geologia USP – Série Científica*, 1, 115-128.
- Wedepohl, K. H. (1971). *Geochemistry*. Holt, Rinehart and Winston, Inc.
- Welkner, D., Godoy, E., Bernhardt, H.-J. (2002). Peralkaline rocks in the Late Cretaceous Del Salto Pluton, Eastern Patagonian Andes, Aisén, Chile (47°35'S). *Revista Geológica de Chile*, 29(1), 3-15.
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W. (1987) A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95, 407-419.
- White, A. J. R. (1979). Sources of Granitic Magma. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11, 539.
- White, A. J. R., Chappell, B. W. (1983). Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. In: Roddick, J. A. (Ed.) *Circum-Pacific Plutonic Terranes*. Geological Society of America. 21-34. (Geological Society of America Memoir, 159).
- White, J. C., Ren, M., Parker, D. F. (2005). Variation in mineralogy, temperature, and oxygen fugacity in a suite of strongly peralkaline lavas and tuffs, Pantelleria, Italy. *Canadian Mineralogist*, 43(4), 1331-1347.
- White, W. M. (2013). *Geochemistry*. Wiley-Blackwell.
- Woolley, A. R., Jones, G. C. (1987). The petrochemistry of the northern part of the Chilwa Alkaline Province, Malawi. In: Fitton, J. G., Upton, B. G. J. (Eds.) *Alkaline Igneous Rocks*. Geological Society of London. 335-356. (Geological Society of London Special Publication, 30).
- Wormald, R. J., Price, R. C. (1988). Peralkaline granites near Temora, southern New South Wales: tectonic and petrological implications. *Australian Journal of Earth Sciences*, 35, 209-221.
- Wu, F., Sun, D., Li, H., Jahn, B., Wilde, S. (2002). A-type granites in Northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1-2), 143-173.
- Yang, J., Wu, F., Chung, S., Wilde, S. A., Chu, M. (2006). A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, Northeast China: geochemical and Sr-Nd-Hf evidence. *Lithos*, 89(1-2), 89-106.



## 8. ANEXO I: EXEMPLO DE ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Tabela 10: Exemplo da organização da tabela de dados. Análise de elementos maiores. Amostras de Gualda e Vlach (2007a).

<b>Amostra</b>	<b>GRA-77</b>	<b>GRA-78A</b>	<b>GRA-76</b>	<b>GRA-83</b>	<b>GRA-51</b>	<b>GRA-56</b>	<b>GRA-95</b>	<b>GRA-88A</b>	<b>GRA-70</b>	<b>GRA-58</b>
<b>Autor</b>	Gualda e Vlach 2007	Gualda e Vlach 2007	Gualda e Vlach 2007	Gualda e Vlach 2007	Gualda e Vlach 2007	Gualda e Vlach 2007	Gualda e Vlach 2007	Gualda e Vlach 2007	Gualda e Vlach 2007	Gualda e Vlach 2007
<b>Ano</b>	2007	2007	2007	2007	2007	2007	2007	2007	2007	2007
<b>Maciço</b>	Anhangava	Anhangava	Anhangava	Anhangava	Farinha Seca	Farinha Seca	Marumbi	Marumbi	Órgãos	Órgãos
<b>Rocha</b>	1	1	2	2	3	3	2	2	3	3
<b>Associação petrográfica</b>	Alcalina	Alcalina	Aluminosa	Aluminosa	Alcalina	Alcalina	Aluminosa	Aluminosa	Alcalina	Alcalina
<b>SiO<sub>2</sub></b>	70.93	69.34	75.10	72.70	74.90	75.15	73.30	76.20	71.95	76.32
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.16	0.18	0.12	0.21	0.21	0.19	0.21	0.11	0.23	0.11
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14.79	15.37	12.60	13.70	12.45	12.54	13.40	12.20	13.82	12.51
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2.38	2.75	1.84	2.29	2.35	2.10	2.04	1.51	2.68	1.41
<b>MnO</b>	0.05	0.06	0.03	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06	0.03
<b>MgO</b>	0.03	0.05	0.05	0.21	0.08	0.09	0.13	0.06	0.09	0.01
<b>CaO</b>	0.62	0.67	0.56	1.00	0.57	0.59	0.64	0.52	0.79	0.47
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	5.58	5.71	4.47	4.10	4.23	4.05	4.00	3.71	4.30	4.16
<b>K<sub>2</sub>O</b>	5.18	5.53	4.62	5.01	4.91	5.02	5.84	5.05	6.09	4.70
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.01	0.01		0.02	0.01	0.01			0.01	0.01
<b>LOI</b>	0.44	0.44	0.46	0.40	0.36	0.41	0.34	0.30	0.22	0.43
<b>Total</b>	100.18	100.08	99.85	99.70	100.12	100.21	99.94	99.70	100.24	100.15

Tabela 11: Exemplo de organização da tabela de dados. Análise de elementos menores e traços. Amostras de Gualda e Viach (2007a).

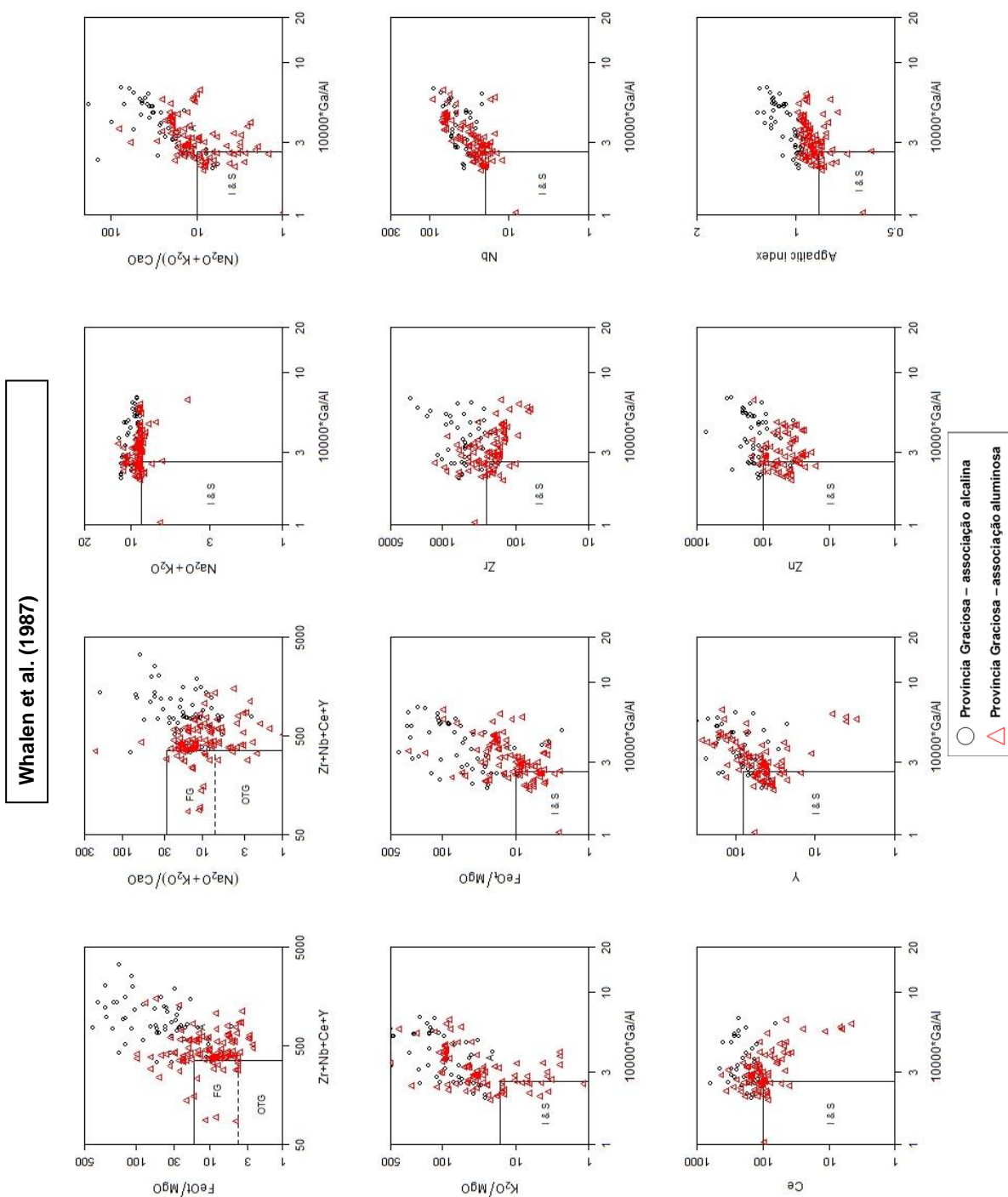
Amostra	GRA-77	GRA-78A	GRA-76	GRA-83	GRA-51	GRA-56	GRA-95	GRA-88A	GRA-70	GRA-58
Associação petrográfica										
Cl	Alcalina 248.00	Alcalina 254.00	Aluminosa 197.00	Aluminosa 193.00	Alcalina 235.00	Alcalina 241.00	Aluminosa 129.00	Aluminosa 471.00	Alcalina 242.00	Alcalina 136.00
V		9.00	7.00	11.00	11.00	12.00	9.00	9.00	11.00	5.00
Cr			2.00			3.00	45.00	11.00		
F	3356.00	2253.00	4019.00	2467.00	2245.00	2495.00	2601.00	2328.00	1234.00	3843.00
Co			1.00				1.00			
Ni			2.00	3.00	1.00	1.00	2.00	1.00	2.00	2.00
Cu	2.00	1.00	1.00	2.00	1.00	1.00	2.00	4.00	2.00	2.00
Zn	114.00	114.00	141.00	47.00	141.00	134.00	59.00	72.00	169.00	139.00
Ga	26.00	23.00	24.00	18.00	22.00	17.00	18.00	16.00	19.00	21.00
Rb	232.70	200.00	275.00	235.00	219.50	175.30	162.00	210.00	108.60	195.00
Sr	16.91	16.61	13.00	74.00	30.98	34.40	30.00	14.00	32.42	12.18
Y	86.40	79.09	93.00	51.00	82.28	62.36	39.00	41.00	140.14	233.20
Zr	411.57	420.70	322.00	260.00	464.88	505.45	275.00	188.00	527.58	275.10
Nb	42.60	45.60	63.00	32.00	52.20	32.50	24.00	27.00	20.80	34.80
Ba	66.44	46.75	51.00	361.00	167.11	165.24	187.00	52.00	180.14	13.00
La	123.00	142.00	50.00	53.00	92.00	81.00	106.00	53.00	270.00	219.00
Ce	245.00	270.00	124.00	110.00	181.00	170.00	109.00	100.00	340.00	447.00
Nd	100.00	117.00	44.00	52.00	82.00	65.00	45.00	45.00	194.00	191.00
Pb	30.00	21.00	19.00	18.00	33.00	22.00	15.00	50.00	20.00	31.00
Th	16.00	16.00	20.00	14.00	22.00	14.00	9.00	16.00	14.00	17.00
U	6.00	4.00	8.00	6.00	6.00	5.00	4.00	7.00	5.00	6.00

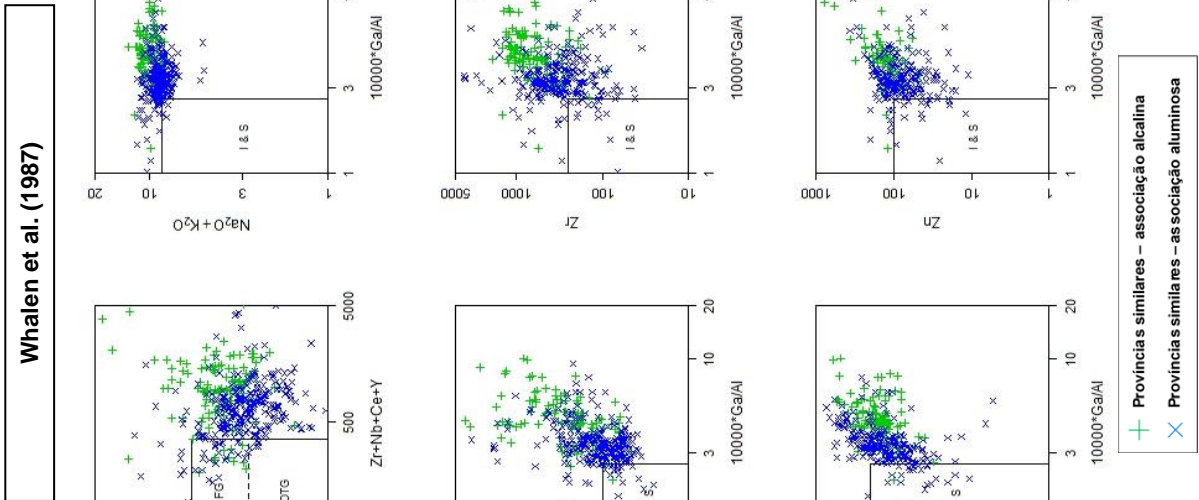
Tabela 12: Exemplo de organização da tabela de dados. Composição modal calculada para amostras de Gualda e Vlach (2007a).

Amostra	GRA-77	GRA-78A	GRA-76	GRA-83	GRA-51	GRA-56	GRA-95	GRA-88A	GRA-70	GRA-58
<b>Associação petrográfica</b>	Alcalina	Alcalina	Aluminosa	Aluminosa	Alcalina	Alcalina	Aluminosa	Aluminosa	Alcalina	Alcalina
<b>Q</b>	18.655	14.997	31.424	29.683	31.510	32.386	27.688	35.298	23.637	34.141
<b>C</b>	0.003	0.000	0.246	1.532	0.176	0.444	0.498	0.630	0.154	0.579
<b>Or</b>	30.542	32.564	27.187	29.123	28.831	29.458	34.212	29.705	35.781	27.751
<b>Ab</b>	47.214	48.265	37.822	34.691	35.791	34.268	33.845	31.391	36.383	35.199
<b>Ns</b>	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>Il</b>	0.107	0.128	0.064	0.128	0.107	0.107	0.086	0.086	0.128	0.064
<b>Hm</b>	2.380	2.750	1.840	2.290	2.350	2.100	2.040	1.510	2.680	1.410
<b>Ap</b>	0.024	0.024	0.000	0.047	0.024	0.024	0.000	0.000	0.024	0.024
<b>Fr</b>	0.845	0.915	0.780	1.356	0.775	0.803	0.891	0.724	1.082	0.636
<b>MgSp</b>	0.000	0.000	0.000	p 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>FeSp</b>	0.000	0.000	0.000	p 0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>Bi</b>	0.099	0.165	0.165	0.694	0.264	0.297	0.429	0.198	0.297	0.033
<b>Total</b>	99.868	99.819	99.527	99.544	99.829	99.887	99.690	99.542	100.167	99.837

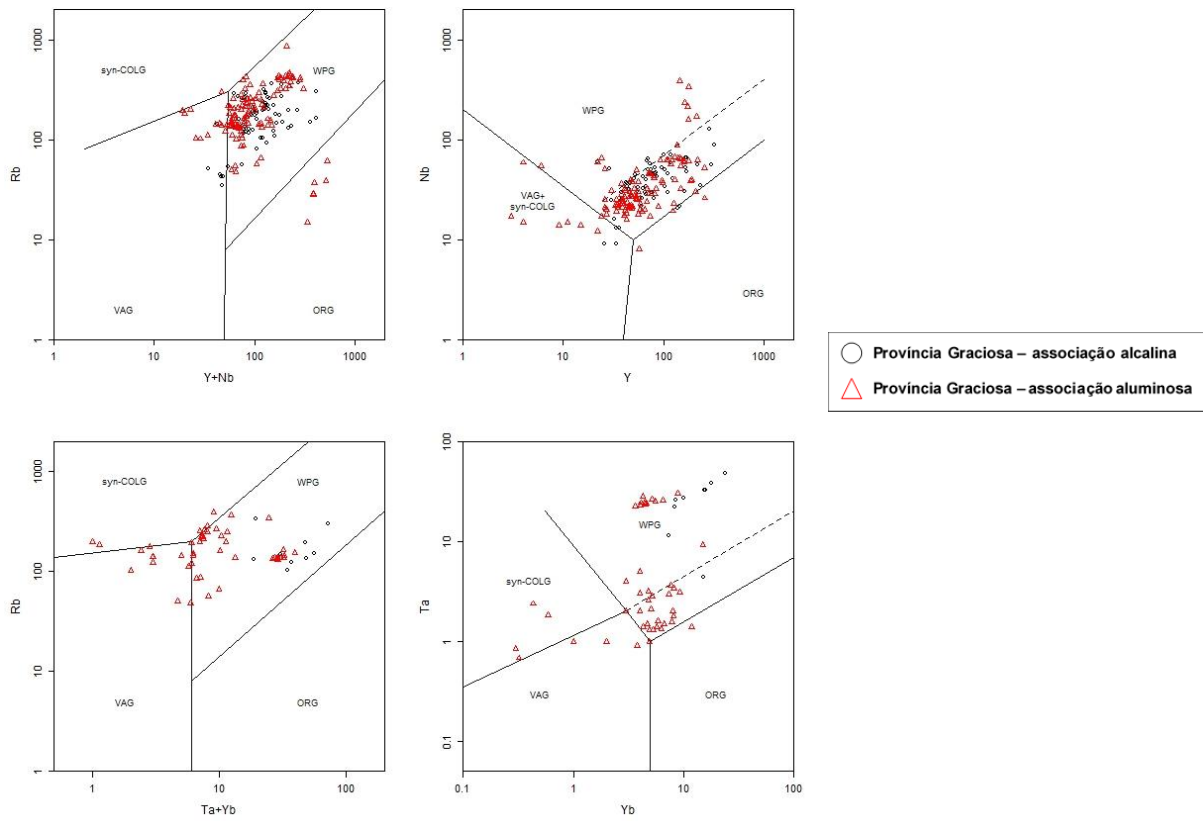
48

## 9. ANEXO II: DIAGRAMAS SELECIONADOS

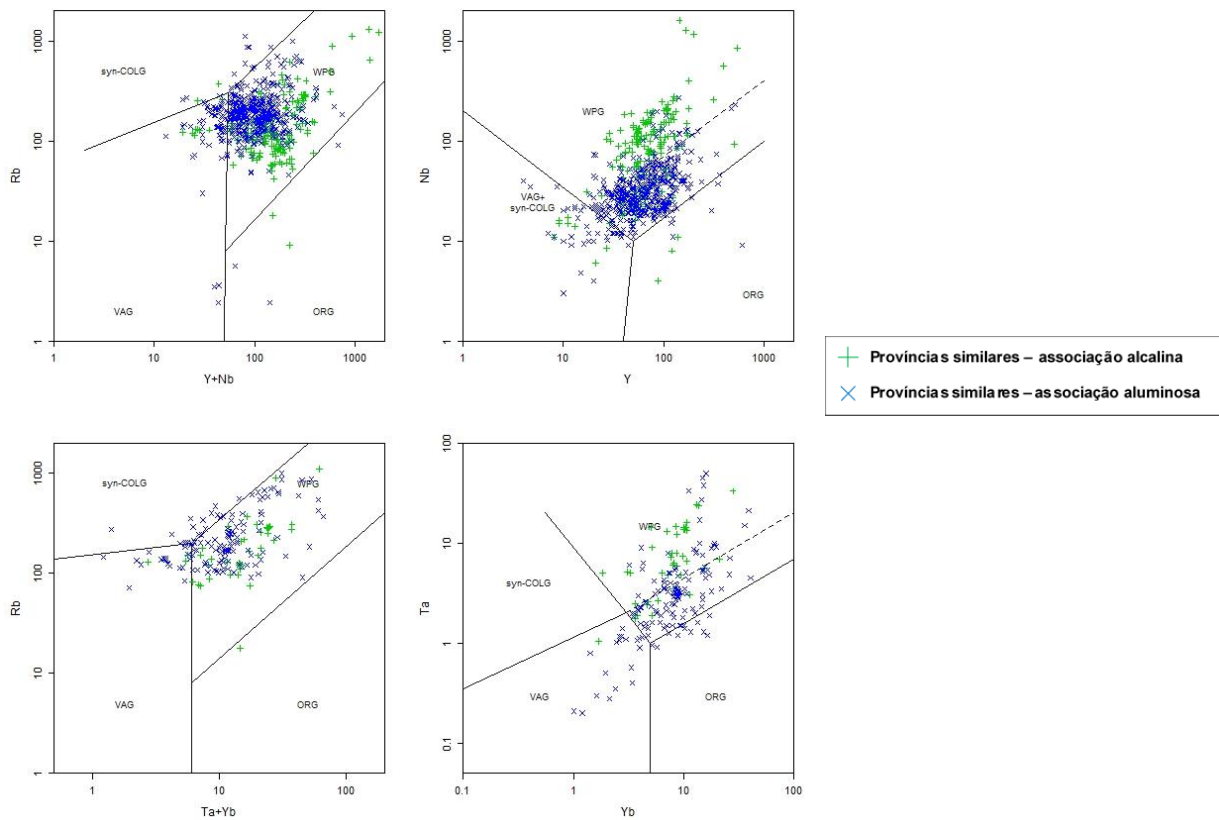




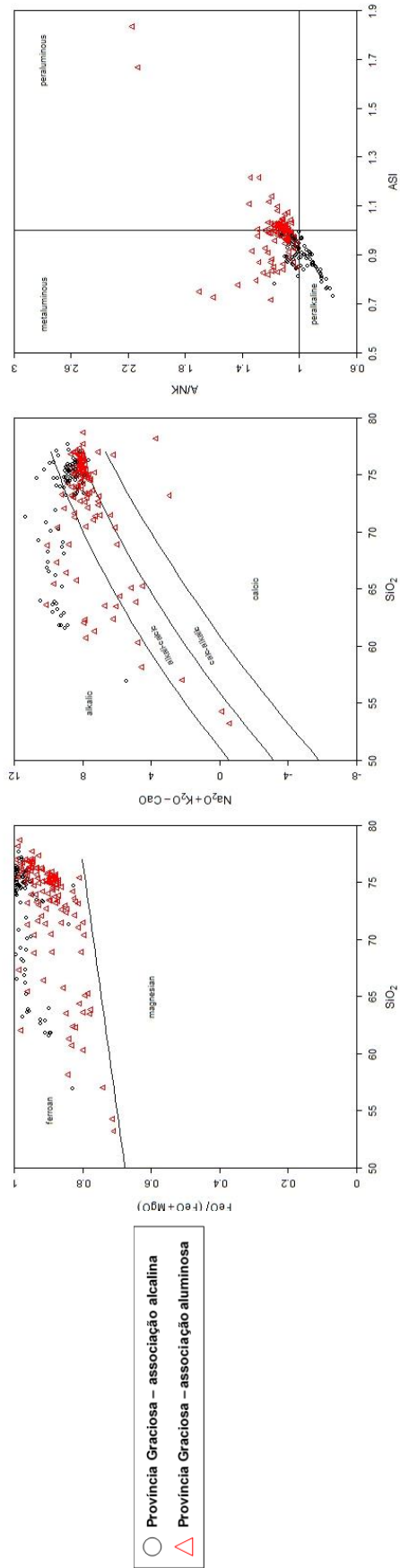
Pearce et al. (1984)



Pearce et al. (1984)



Frost et al. (2001)



Frost et al. (2001)

