

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**GEOQUÍMICA E PETROLOGIA DOS METAGRANITOS  
PORFIRÍTICOS E EQUIGRANULARES DO COMPLEXO  
ENCANTADAS, SANTANA DA BOA VISTA, RS.**

**MARCELO LUSA**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Ruy Paulo Philipp**

**CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Lauro Valentim Stoll Nardi**

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Marcus V. Dorneles Remus – Instituto de Geociências, UFRGS**

**Prof. Dra. Maria de Fátima Bitencourt – Instituto de Geociências, UFRGS**

**Prof. Dr. Romulo Machado – Instituto de Geociências, USP**

**Dissertação de Mestrado apresentada  
como requisito parcial para a  
obtenção do Título de Mestre em  
Geociências.**

**Porto Alegre – 2009**

**DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado ao meu orientador Ruy Paulo Philipp.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), processo n<sup>os</sup> 309232/2003-1 de Ruy Paulo Philipp, e Lauro Valentin Stoll Nardi, pela concessão de bolsa de produtividade em pesquisa. A Jacira pela revisão do Abstract e ao meu amigo Geólogo Roberto Sacks de Campos. Aos professores, Maria de Fátima Bitencourt e Carlos Augusto Sommer, pelas críticas e ideias dadas no trabalho de conclusão de curso e que serviram de base a este trabalho. Aos revisores anônimos da Revista Brasileira de Geociências pelas sugestões e críticas ao texto final. Aos professores do programa de Pós-Graduação, aos funcionários do laboratório de geociências e aos funcionários do CPGGeo.

## Resumo

O Complexo Encantadas é uma unidade Paleoproterozóica constituída por gnaisses tonalíticos, trondhjemiticos e dioríticos com presença subordinada de anfibolitos e rochas metaultramáficas ricas em hornblenda. Este complexo é cortado por corpos tabulares de metagranitos porfíricos e equigranulares que se encontram posicionados ao longo de uma zona de cisalhamento dúctil de disposição subhorizontal. Esta estrutura define o contato entre os Complexos Encantadas e Porongos, respectivamente, infra e supra-estrutura do Domo de Santana da Boa Vista. Os metagranitos têm afinidade cálcico-alcálica médio a alto-K e caráter levemente peraluminoso. A evolução como termos independentes indica que os metagranitos representam unidades petrológicas distintas, sendo afetados por processos de fracionamento de plagioclásio, biotita, zircão e apatita. Os metagranitos apresentam enriquecimento em ETRL e empobrecimento em ETRP, com valores elevados de Ba, Rb, Sr, U e Th, anomalias negativas de Nb e Ti, dispondo-se no campo das rochas geradas em ambientes de arco magmático. Os dados estruturais indicam que os metagranitos tiveram uma evolução complexa, e sua colocação é contemporânea a  $D_1$  e, portanto, de acordo com os dados geocronológicos disponíveis, sua idade situa-se próxima de 2 Ga, que é a idade presumível do metamorfismo de facies anfíbrito, interpretado aqui como um evento orogênico, provavelmente colisional. Os metagranitos porfíricos e equigranulares juntamente com os gnaisses dioríticos, tonalíticos e trondhjemiticos do Complexo Encantadas constituem uma associação magmática de ambiente de margem continental ativa, cujo magmatismo está associado a fontes mantélicas metassomatizadas por fluidos derivados de subducção litosférica durante o Paleoproterozóico.

**Palavras-chave:** Paleoproterozóico, Terreno Tijucas, Complexo Encantadas, Granitos, Geoquímica.

**Abstract**

The Encantadas Complex is a Paleoproterozoic unit constituted by tonalitic, trondhjemitic and dioritic gneisses with rare presence of amphibolites and hornblende-rich metaultramafic rocks. This complex is cut by tabular bodies of porphyritic and equigranular metagranites which are emplaced along a ductile shear zone with subhorizontal disposition. This structure defines the contact between the Encantadas and Porongos complexes, respectively, infrastructure and suprastructure of Santana da Boa Vista Dome. The metagranites have medium to high-K calc-alkaline affinity and slightly peraluminous character. The evolution as independent terms indicates The metagranites represent distinct petrologic units with independent evolution, that are affected by fractionating of plagioclase, biotite, zircon and apatite. The metagranites show enrichment in LRRE and depletion of HREE, with high values of Ba, Rb, Sr, U and Th and negative anomalies of Nb and Ti, like granites of magmatic arc. Structural data indicate that metagranites have had a complex evolution, and their emplacement was simultaneous with D<sub>1</sub> event which, according to the available geochronological data, has age close to 2 Ga. This event is interpreted as a metamorphic one associated with a collisional orogeny. Porphyritic and equigranular metagranites together with gneisses of Encantadas Complex constitute an active continental margin arc association, whose magmatism is related to metasomatised-mantle sources affected by fluids derived from the subducted lithosphere during the Paleoproterozoic times.

**Keywords:** Paleoproterozoic, Tijucas Terrane, Encantadas Complex, Granites, Geochemistry.

**LISTA DE FIGURAS:**

	<b>Pg.</b>
<b>Figura 1</b> – Ambientes de formação das séries graníticas	14
<b>Figura 2</b> – Diagrama de classificação QAP	14
<b>Figura 3</b> – Mapa de pontos da área de estudo. Digitalizado a partir das cartas Santana da Boa Vista e Rodeio	18
<b>Figura 4</b> – Mapa geológico do Escudo Sul-rio-grandense	21
<b>Figura 5</b> – Mapa geológico da região central do Escudo Sul-rio-grandense	22
<b>Figura 6</b> – Mapa geológico da região do Complexo Encantadas	23
<b>Figura 7</b> – Estruturas mesocópicas dos metagranitos do Complexo Encantadas	28
<b>Figura 8</b> – Estruturas mesocópicas do metagranito porfirítico	31
<b>Figura 9</b> – Disposição das amostras dos metagranitos do Complexo Encantadas no diagrama QAP	32
<b>Figura 10</b> – Estruturas mesocópicas do metagranito equigranular	32
<b>Figura 11</b> – Diagramas de Harker com variação dos elementos maiores	36
<b>Figura 12</b> – Diagramas de variação de Rb, Ba, Sr e Zr (ppm) versus SiO <sub>2</sub>	38
<b>Figura 13</b> – Diagrama álcalis total versus sílica (TAS)	39
<b>Figura 14</b> – Diagrama de Shand	39
<b>Figura 15</b> – Disposição dos metagranitos no diagrama AFM	40
<b>Figura 16</b> – Disposição dos metagranitos no diagrama de Jensen	40
<b>Figura 17</b> – Diagrama K <sub>2</sub> O com relação a SiO <sub>2</sub> (Le Maitre, 1989) para classificação das rochas cálcico-alcálicas	41
<b>Figura 18</b> – ETR dos metagranitos porfiríticos e equigranulares	42
<b>Figura 19</b> – Diagramas multi-elementares	42
<b>Figura 20</b> – Disposição dos metagranitos porfiríticos e equigranulares nos diagramas Nb x Y e Rb x Y+Nb	43
<b>Figura 21</b> – Disposição dos metagranitos estudados no diagrama R <sub>1</sub> -R <sub>2</sub>	44

**LISTA DE TABELAS:**

	<b>Pg.</b>
<b>Tabela 1</b> – Tabela comparativa dos diferentes tipos de granitos	15
<b>Tabela 2</b> – Composição representativa dos elementos maiores (% de peso) e traços (ppm) de amostras selecionadas dos Metagranitos Porfíricos	34
<b>Tabela 3</b> – Composição representativa dos elementos maiores (% de peso) e traços (ppm) de amostras selecionadas dos Metagranitos Equigranulares	35

## SUMÁRIO:

	<b>Pg.</b>
<b>1. TEXTO EXPLICATIVO DA ESTRUTURA DE DISSERTAÇÃO</b>	09
<b>2. INTRODUÇÃO</b>	10
<b>2.1 Exposição do Problema</b>	10
<b>2.2 Objetivos</b>	10
<b>2.3 O Estado da Arte</b>	10
<b>2.4 Metodologia</b>	16
<b>2.5 Referências (O Estado da Arte)</b>	19
<b>3. CORPO PRINCIPAL</b>	20
<b>3.1 Introdução</b>	20
<b>3.2 Geologia Regional</b>	24
<b>3.3 Relações Geológicas</b>	26
<b>3.4 Petrografia</b>	29
<b>3.4.1 Metagranito Porfirítico</b>	29
<b>3.4.2 Metagranitos Equigranulares</b>	30
<b>3.5 Geoquímica</b>	32
<b>3.5.1 Série Magmática</b>	37
<b>3.5.2 Elementos Terras Raras</b>	41
<b>3.5.3 Diagramas Multi-elementares</b>	41
<b>3.5.4 Ambiente Geotectônico</b>	43
<b>3.6 Considerações Finais e Conclusões</b>	44
<b>4. REFERÊNCIAS</b>	46
<b>ANEXO-A: Carta de aceite do artigo submetido à Revista Brasileira de Geociências</b>	49
<b>ANEXO-B: Artigo <i>Petrology of dioritic, tonalitic and trondhjemitic gneisses from Encantadas Complex, Santana da Boa Vista, southernmost Brazil: Paleoproterozoic continental-arc magmatism, Philipp et al. (2008)</i></b>	51



## 1. TEXTO EXPLICATIVO DA ESTRUTURA DE DISSERTAÇÃO

Este trabalho, elaborado segundo a estrutura apresentada pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, consiste em uma dissertação de mestrado em forma de artigo científico, estando portanto estruturado em introdução e corpo principal.

A introdução apresenta os seguintes tópicos: Exposição do problema, objetivos do trabalho, o estado da arte, a metodologia empregada na realização deste trabalho e as referências do estado da arte.

O corpo principal deste trabalho é o artigo científico submetido à Revista Brasileira de Geociências.

Em anexo estão, a carta de aceite do artigo submetido à Revista Brasileira de Geociências, (Anexo – A) e o artigo já publicado pelos Anais da Academia Brasileira de Ciências titulado *Petrology of dioritic, tonalitic and trondhjemitic gneisses from Encantadas Complex, Santana da Boa Vista, southernmost Brazil: Paleoproterozoic continental-arc magmatism*, Philipp *et al.* (2008) (Anexo – B).

## **2. INTRODUÇÃO**

### **2.1 Exposição do Problema**

Embora existam diversos trabalhos de pesquisa nesta região abordando a caracterização estrutural, análise cinemática e geocronologia, ainda não foram realizados levantamentos geoquímicos nos metagranitos porfiríticos e equigranulares do Complexo Encantadas. A caracterização geoquímica em associação com as outras ferramentas permitiu uma melhor compreensão das condições de formação, das fontes e do significado geotectônico desta unidade.

### **2.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivos principais a caracterização petrográfica e geoquímica dos metagranitos porfiríticos e equigranulares do complexo encantadas. Com base na caracterização geoquímica, determinar a série magmática e o ambiente geotectônico de geração desta unidade.

### **2.3 O Estado da Arte**

Os gnaisses formam um grupo de rochas metamórficas comumente geradas em condições de fácies anfíbolito médio a granulito e definidos por uma estrutura bandada caracterizada pela alternância de níveis félsicos de composição quartzo-feldspática e níveis máficos.

O bandamento pode ser contínuo a descontínuo, regular a irregular e com espessura variável, comumente em escala milimétrica a centimétrica. As bandas podem representar variações composicionais e/ou granulométricas e podem ter origem reliquiar ou representar um processo de diferenciação metamórfica (segregação mineral) relacionado à atuação simultânea do metamorfismo e da deformação em condições de médio a alto grau metamórfico. O bandamento reliquiar pode ter sua origem vinculada ao acamamento sedimentar, à intrusão de corpos ígneos, ao assentamento gravitacional e/ou piroclástico e ao fluxo magmático.

O bandamento reliquiar é formado anteriormente ao processo metamórfico e pode ser caracterizado por estratificação sedimentar e/ou piroclástica, estratificação ou foliação de fluxo ígnea. No entanto o processo mais comum na formação do bandamento gnáissico é a diferenciação metamórfica. A segregação mineral ou diferenciação metamórfica é caracterizada como um processo metamórfico de redistribuição dos grãos minerais ou dos componentes químicos de uma rocha. Este processo tende a gerar a anisotropia mineral ou química parcial ou total de uma rocha sem modificações significativas de sua composição global (Butcher & Frey, 1994). A segregação ocorre durante o processo de metamorfismo com pressão dirigida associada, desenvolvendo-se planos de orientação mineral. Mesmo sob condições dúcteis, os minerais apresentam comportamentos reológicos distintos, ocorrendo a “acomodação” relativa dos minerais em leitos ou planos de foliação. Acima de determinadas condições termodinâmicas, constituintes minerais mais susceptíveis à dissolução por pressão, como quartzo e carbonatos, são dissolvidos nos pontos de maior tensão e recristalizados em zonas ou bandas com taxas mais baixas de tensão, como bandas paralelas ou zonas de charneiras de dobras. A identificação de estruturas reliquiares superpostas por processos deformacionais pode resultar na formação de um bandamento composto.

O ambiente geológico de formação dos gnaisses é o metamorfismo regional orogênico de médio a alto grau, que ocorre principalmente em limites de placas convergentes, como zonas de subducção (arcos de ilha e arcos de margem continental ativa), e zonas de colisão continental. As rochas formadas neste ambiente ocupam a maior parte dos escudos pré-cambrianos e das faixas Paleozóicas arqueadas e deformadas dos arcos magmáticos e dos cinturões colisionais. A área do metamorfismo ocupa milhares de quilômetros quadrados e pode evoluir através das várias fases deformacionais que constituem o evento orogênico, produzindo dobramentos e estruturas penetrativas, como xistosidade, bandamento, lineações minerais e de estiramento.

Os gnaisses originados do metamorfismo de rochas sedimentares são denominados paragneisses. Os ortogneisses são gerados a partir do metamorfismo de rochas ígneas, que por sua vez podem ter duas origens principais, granitos tipo S e granitos tipo I, este último subdividindo-se em quatro subgrupos (Pitcher, 1983).

Chappell e White (1974) denominaram de granitos tipo I aqueles derivados da fusão de rochas ígneas e de tipo S os derivados da fusão de rochas

sedimentares. Estudos empreendidos por Burnham (1981) levaram à conclusão de que granitos do tipo I podem ser originados da fusão parcial de basaltos anfíbolitizados das placas oceânicas, de hornblenda-gabros, da base da crosta continental ou de rochas continentais quartzo-feldspáticas, tais como os gnaisses tonalíticos e granodioríticos. A fusão parcial de rochas metassedimentares pelíticas com muscovita geraria granitos do tipo S.

A classificação dos granitos em tipo I e S foi ampliada por Pitcher (1983), que subdividiu os granitos tipo I em quatro subtipos, denominados tipo M ou granitos toleíticos, tipo I “das Cordilheiras ou Andino”, tipo I “Caledoniano” e tipo A (anorogênico).

Os granitos tipo M, ou plagiogranitos, são considerados derivados diretamente do manto ou da crosta oceânica. São os aplitos atlânticos de Miyashiro *et al.* (1970) ou os trondhjemitos sódicos de Engels e Fisher (1975), associados às dorsais meso-oceânicas, provavelmente produto de diferenciação dos toleítos típicos desta região. Junto aos arcos insulares em condições restritas pode haver a formação de plagiogranitos do tipo M, em pequeno volume.

Os granitos tipo A seriam os granitos alcalinos derivados da fusão parcial do manto (grau de fusão mantélica menor em relação à geração de granitos tipo M) e/ou da crosta inferior em regiões de extensão crustal ou oceânica (*rifts*) e também em relacionados com a evolução final dos cinturões orogênicos, do tipo intraplaca continentais. Os granitos tipo A parecem equivalentes aos granitos aluminosos potássicos e aos granitóides peralcalinos sódicos e podem ocorrer em ambientes intraplacas (anorogênicos) associados à *riftes* e/ou em ambientes orogênicos no período pós-colisional (Liegeois, 1998).

Os granitos tipo I são equivalentes às séries cálcico-alcalinas. Os granitos tipo I “Cordilheiranos” apresentam composição cálcico-alcalina trondhjemítica a tonalítica pobres em K e estão relacionados ao início da orogênese e situados nas proximidades de zonas de subducção. Estes granitos são considerados de origem mantélica e representam manifestações mais jovens em relação ao pico principal da orogênese e, desta forma, são definidos como pré-colisionais. As primeiras manifestações são de composição cálcico-alcalinas trondhjemíticas, apresentam baixos teores de  $K_2O$  e são relacionadas ao início da orogênese e próximas à linha de subducção, gerando granitos tipo I Cordilheiranos. **(Figura 1A).**

Na margem continental o prolongado processo de subducção permite geração de grandes volumes de granitos cordilheiranos pela fusão da cunha do manto situada acima do plano de subducção e pela interação entre os magmas mantélicos com as rochas da base da crosta. Há variação progressiva da composição conforme o tempo de evolução e a distância da linha de subducção.

Os granitos tipo I “Caledonianos” também são cálcico-alcálicos, entretanto, são considerados mais continentais, refletindo em um conjunto de características mistas (tipos I e S). Em direção ao continente aumenta o teor de  $K_2O$  do plutonismo, aparecendo sucessivamente, as séries cálcico-alcálicas granodioríticas e as séries monzoníticas que apresentam teores mais elevados de K e estão interiorizadas com relação aos limites de placa continental.

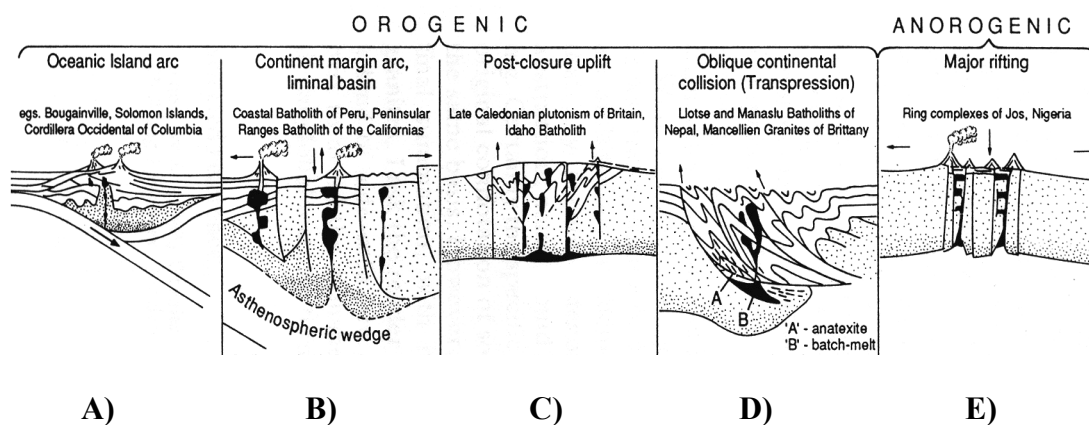
No interior da crosta após o término da subducção e com o fim da compressão e dos movimentos laterais ocorre o relaxamento do cinturão orogênico, gerando uma tectônica extensional e transcorrente com movimentações direcionais e verticais de blocos. Estes deslocamentos propiciam a fusão da base da crosta e o topo do manto litosférico promovendo a produção de magmas graníticos do tipo I “Caledonianos” que são caracteristicamente pós-colisionais (**Figura 1C**). Associados ao magmatismo granítico ocorrem magmas máficos de composição toleítica a cálcico-alcálica.

Os granitos tipo S são gerados na raiz dos cinturões orogênicos, na base da crosta continental, onde o material sedimentar participa decisivamente na composição da placa continental. A espessura na crosta e a compressão típica desta situação geram condições de fusão crustal de rochas pelíticas e quartzo-feldspáticas (metapelitos e metarenitos) e/ou ortogneisses originando as séries tipo S, diretamente relacionadas, temporal e espacialmente, à deformação e ao metamorfismo regional orogênico do tipo colisional (sin-colisionais). Estes granitos foram subdivididos em tipos S típicos, originados a partir da fusão de metassedimentos e caracterizados pela presença de alumino-silicatos (andaluzita e silimanita) e granitos tipo S gerados por fusão de rochas quartzo-feldspáticas ricos em muscovita e biotita, com granada, turmalina e monazita como principais acessórios (Barbarin, 1996). (**Figura 1D**).

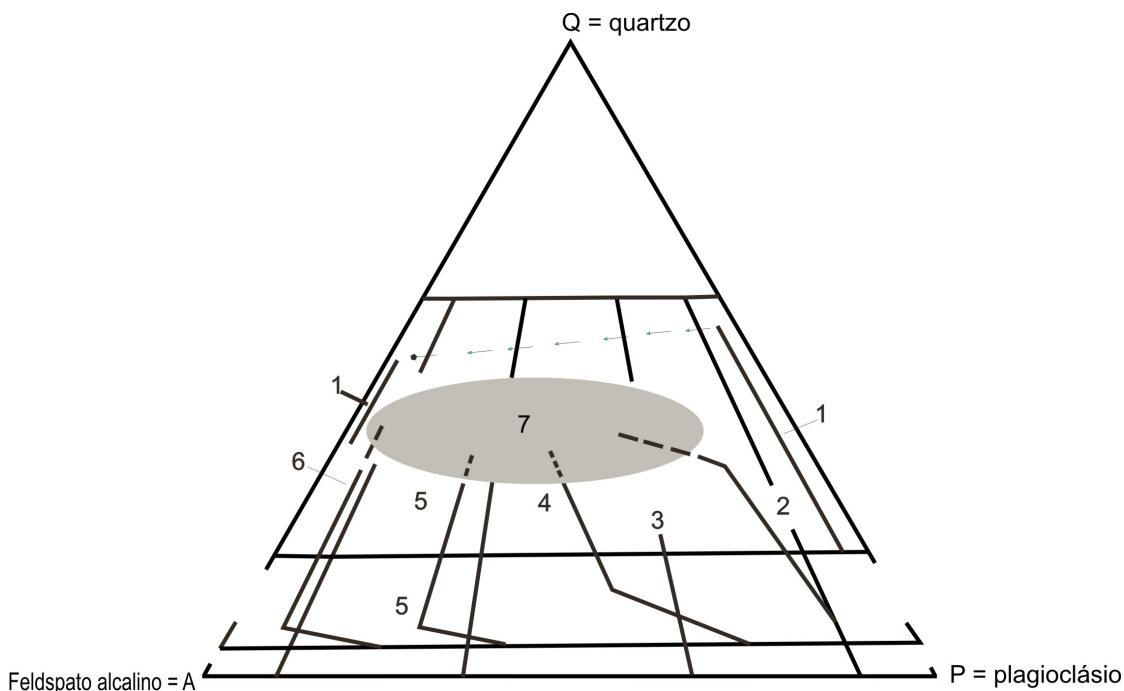
Ainda mais para o interior, relacionadas às zonas de *rift*, aparecem os granitos alcalinos, do tipo A. (**Figura 1E**).

Relacionados às dorsais meso-oceânicas e aos arcos de ilhas aparecem os granitos toleíticos, do tipo M. (**Figura 1B**).

A figura 2 mostra a distribuição dos granitos conforme a distribuição modal de suas amostras com relação ao conteúdo de Q (quartzo), A (feldspato alcalino) e P (plagioclásio) que são estimados em volume %.



**Figura 1** – Ambientes de formação das séries graníticas tipos: A)=I Cordilheiranos, B= M, C)= I Caledoniano, D)= S e E)= tipo A (Pitcher 1983).



**Figura 2** – Diagrama QAP mostrando os domínios ocupados pelas séries graníticas. Domínio 1=granitoides toleíticos; 2=granitoides cálcico-alcinos trondhjemiticos; 3=granitoides cálcico-alcinos; 4=granitoides cálcico-alcinos monzoníticos; 5=granitoides aluminosos potássicos das províncias alcalinas; 6=granitoides peralcalinos sódicos das províncias alcalinas; 7=domínio superposto ocupado pelos granitoides formados pela fusão da crosta (Lameyre & Bowden, 1982).

Tipos de séries graníticas, suas características e ambientes geológicos (Extraído de Pitcher, 1983). (Tabela 1)

	Tipo M	Tipo I das Cordilheiras ou Andino	Tipo I Caledoniano	Tipo S	Tipo A
Composição	Plagioclásios subordinados a gabros.	Predominam os tonalitos. Séries muito diferenciadas (dioritos a monzogranitos) com grande variação de SiO <sub>2</sub> . Associações importantes com gabros.	Granodioritos e granitos em associação contrastante com pequenos corpos de hornblenda, diorito e gabros.	Granitos com altos teores de SiO <sub>2</sub> pouco diferenciados. Predominam monzogranitos leucocráticos. Granitóides com altos teores em biotita são localmente importantes.	Alcali-granitos e sienitos associados a biotita granitos. Composições contrastantes, ácidas-básicas, em uma mesma série.
Minerais máficos	Hornblenda e biotita. Algum piroxênio como acessório.	Hornblenda e biotita. Magnetita e esfero como acessórios.	Predomina a biotita. Ilmenita e magnetita como acessórios.	Muscovita e biotita avermelhada. Principais acessórios são ilmenita, monazita, granada e cordierita.	Biotita verde. Nos plutões alcalinos ocorrem piroxênios e anfibólios alcalinos. A astrofilita é um acessório comum.
K-feldspato	Feldspato K é intersticial e micrográfico.	Feldspato K é intersticial e xenomórfico.	Feldspato K é geralmente intersticial e interpenetrativo. Frequentemente rico em quartzo.	Feldspato K frequentemente em mega-cristais com história evolutiva complexa. Variantes autometassomáticas.	Perlitais.
Enclaves	Xenólitos ígneos básicos.	Xenólitos dioríticos. Podem representar restitos.	População de xenólitos de origem mista.	Predominam xenólitos de metassedimentos.	Xenólitos cognatos, também bolhas de magmas básicos.
Características Geoquímicas	Razão inicial de <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr menor que 0,704.	Al/ (Na + K + Ca/2) menor que 1,1, frequentemente menor que 1,0. Razão inicial de Sr menor que 0,706.	Al/ (Na + K + Ca/2) próxima de 1. Razão inicial de Sr entre 0,705 e 0,709.	Al/ (Na + K + Ca/2) maior que 1,05. Razão inicial de Sr maior que 0,708.	Peralcalinos, relativamente rico em F. Razão inicial de Sr entre 0,703 e 0,712.
Tipos de corpos	Plutões pequenos, de composição entre quartzo dioritos e gabros.	Batólitos lineares, polidiapíricos, com sinais de caldeirizações.	Plutões e intrusões placóides complexas, isoladas e dispersas.	Batólitos polidiapíricos, plutões e intrusões laminares. Menores e mais diapíricos que os do tipo I.	Complexos polidiapíricos centrados em grandes caldeiras. Plutões relativamente pequenos.
Atividade vulcânica	Associados a vulcanismos de arco de ilha.	Associados a grandes volumes de dacitos e andesitos.	Algumas vezes associados a <i>plateaux</i> de lavas basálticas e andesíticas.	Vulcanismo muito restrito ou ausente. Pode associar-se a lavas com cordierita.	Associados a efusões alcalinas derivadas de caldeiras.
Tempo de colocação	Plutonismo breve e reduzido.	Plutonismo episódico de duração muito longa.	Plutonismo breve, pós-cinemático.	Plutonismo de duração moderada, sin e pós-cinemático.	Plutonismo breve.
Ambiente geotectônico	Ocorre em regiões de arcos insulares.	Margens continentais ativas do tipo andina.	Suturas continentais, do tipo Caledoniano, seguidas de soerguimento.	Colisão continental do tipo Herciniano. Também em cinturões de cisalhamentos intracratônicos.	Situações pós-orogênicas ou anorogênicas.
Tipo de Metamorfismo	Dobramentos abertos. Metamorfismo incipiente.	Movimentos verticais e pequeno encurtamento lateral. Metamorfismo incipiente.	Falamentos profundos e cisalhantes. Metamorfismo retrógrado.	Fortes encurtamentos. Metamorfismo de baixa pressão em cinturões clásticos finos.	Rifteamentos e formações de domos.
Depósitos minerais	Depósitos disseminados apicais de Cu-Au.	Depósitos apicais disseminados de Cu e Cu-Mo.	Raramente com mineralizações importantes. Presença de paragêneses complexas.	Greisens e veios de Sn e W.	Columbita, cassiterita e fluorita.

Tabela 1 – Tabela comparativa dos diferentes tipos de granitos.

## 2.4 Metodologia

A metodologia empregada consistiu inicialmente de uma **Etapa Pré-Campo** na qual foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os principais trabalhos abordando a geologia regional da área de Santana da Boa Vista. Também foram interpretadas as imagens de satélite e fotografias aéreas nas escalas 1:110.000 e 1:60.000, com objetivo de investigar as principais estruturas tectônicas encontradas no Complexo Encantadas e selecionar as principais áreas aflorantes para posterior visita ao campo.

A **Etapa de Campo** visou mapear e coletar amostras das unidades selecionadas. Nesta atividade foram fotografados os principais afloramentos, além de coletadas amostras de rochas para estudos petrográficos, micro-estruturais e geoquímicos. Os pontos descritos foram localizados mediante uso do GPS e das cartas topográficas 1:50.000 do Serviço Geográfico do Exército. As cartas utilizadas foram: Santana da Boa Vista (SH-22-Y-A-V-4) e Rodeio (SH-22-Y-A-V-2).

Na **Etapa Pós-Campo** foi gerado um mapa de pontos (**Figura 3**) e realizados os trabalhos de laboratório. As **Análises Petrográficas** procuraram caracterizar a mineralogia metamórfica e/ou reliquiar, suas microestruturas e texturas, a classificação da rocha e, ainda, evidenciar os principais elementos que permitiram obter informações sobre a composição e origem do protólito e das condições de transformação metamórfica. A **Preparação das Amostras** envolveu a confecção de lâminas delgadas para as análises petrográficas e seleção, britagem e moagem de amostras de rochas para análises geoquímicas. As **Análises Geoquímicas** foram utilizadas para caracterizar as unidades estudadas pelo projeto a partir da determinação da composição dos elementos maiores e traços, incluindo elementos terras raras e outros elementos, como U, Th, Cs, Ga, Hf e Ta.

As análises geoquímicas foram feitas no Activations Laboratories Ltda (Canadá) por ICP (*Inductively Coupled Plasma - Emission Spectrometry*) para os elementos maiores, com limite de detecção de 0,01% e para o Sc, Be, V, Ba, Sr, Y e Zr, com limite de detecção de 1 a 5 ppm. Para os demais elementos traço e terras raras utilizou-se a técnica ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma - Emission Mass Spectrometry*) com limite de detecção de 0,005 a 2 ppm.

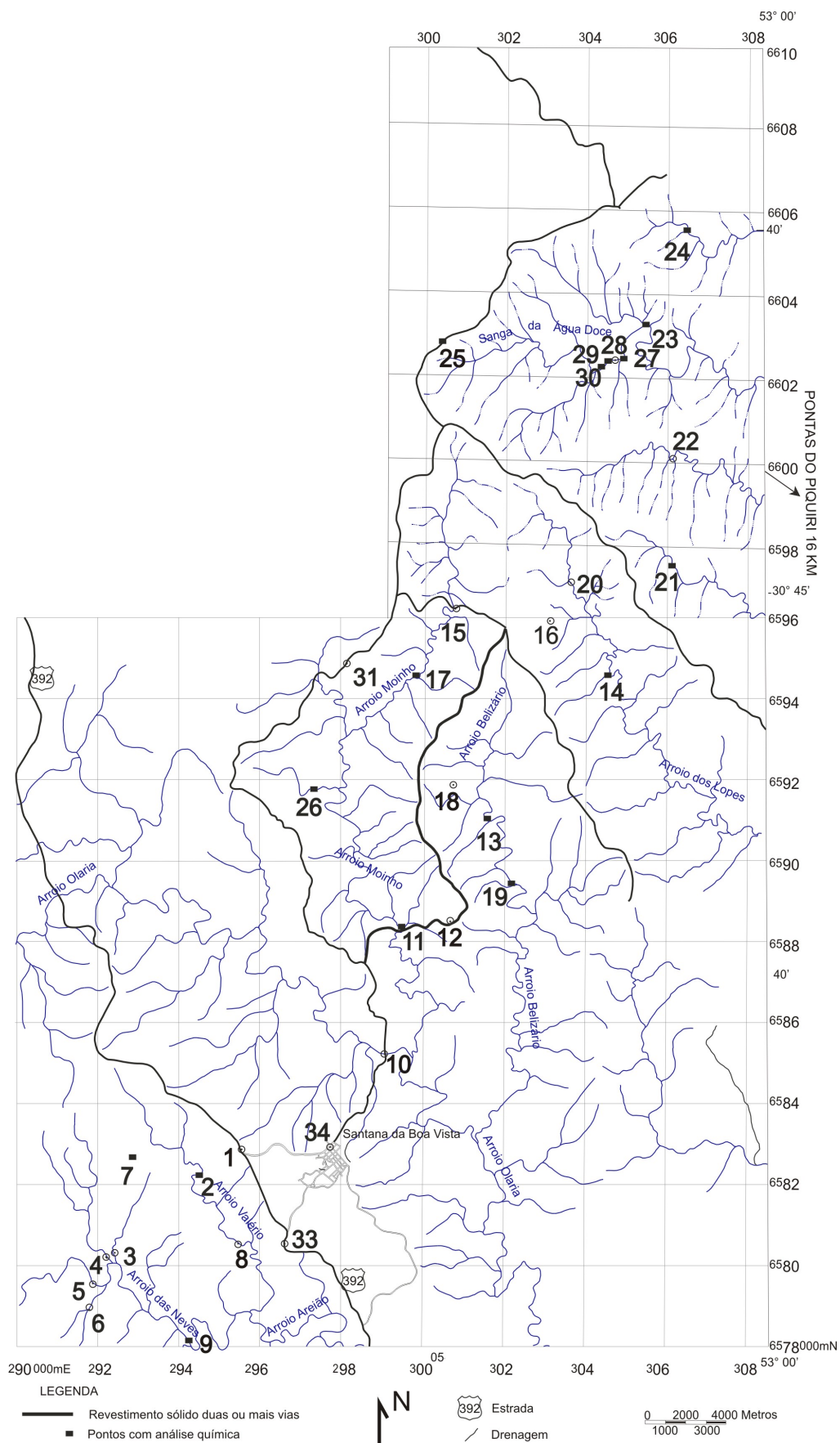
Em princípio o método do ICP é capaz de medir a maioria dos elementos



da tabela periódica com limites de detecção baixos e boa precisão sobre valores de diversas magnitudes. Os elementos são medidos simultaneamente e uma análise completa pode ser feita no espaço de aproximadamente dois minutos, fazendo do ICP um método analítico extremamente rápido.

O ICP é uma técnica de espectrometria que usa a chama com uma temperatura entre 6000 e 10000° K. A amostra necessita de uma abertura ou dissolução por ácidos antes de ser analisada. A solução da amostra é passada como um aerossol através de um nebulizador em um plasma de argônio. O plasma indutivo acoplado consiste em um feixe de átomos do argônio, aquecido pelo calor indutivo de uma bobina de rádio-frequência e inflamado por uma faísca de alta frequência de Tesla. A amostra dissociada no plasma de argônio e um grande número de linhas espectrais atômicas e iônicas são excitadas. As linhas espectrais são detectadas por uma escala de fotomultiplicadores e são comparadas com as linhas da calibração, e suas intensidades são convertidas em concentrações.

A última etapa consistiu na reunião dos dados petrográficos, estruturais e geoquímicos através da *Integração e Tratamento dos Dados Obtidos* e sua *Interpretação Final*, culminando com a divulgação dos resultados na forma de um artigo científico titulado: Geoquímica e Petrologia dos metagranitos porfiríticos e equigranulares do Complexo Encantadas, Santana da Boa Vista, RS, que foi submetido à Revista Brasileira de Geociências e que consiste no corpo principal desta dissertação de mestrado na forma de artigo científico.



**Figura 3** – Mapa de pontos da área de estudo. Digitalizado a partir das cartas Santana da Boa Vista e Rodeio.

## 2.5 Referências (O Estado da Arte)

- Barbarin, B. 1996. Genesis of the two main types of peraluminous granitoids. **Geology**, **24** (4): 295-298.
- Butcher, K. & Frey, M. 1994. **Petrogenesis of Metamorphic Rocks**. Springer-Verlag. 6th Edition, Berlin 318 p.
- Burnhan, C. W. 1981. Physiochemical constraints on porphyry mineralization. *In* W. R. Dickinson & C.J. Payne (orgs.), Relations of Tectonics to Ore Deposits in the Southern Cordillera. **Arizona Geology Soc. Digest**, n° **14**, p. 71-77.
- Chappell, B. W., & White, A. J. R. 1974. Two contrasting granite types. **Pacific Geology**, vol. 8, p. 173-174.
- Engels, C. G., & Fisher, R. L. 1975. Granitic to ultramafic rock complexes of the Indian Ridge system, western Indian Ocean. **Geol. Soc. Am. Bull.**, **86**:1533-1578.
- Miyashiro, A.; Shido, F. & Ewing, M. 1970. Crystallisation and differentiation in abyssal tholeiites and gabros from mid-oceanic ridges. **Earth Planet. Sci. Letters**, n° **7**, p. 311-365.
- Lameyre, J. & Bowden, P. 1982. Plutonic rock type series: discrimination various granitoids series and related rocks. **Jour. Volc. Geother. Res**, **14**:169-186.
- Liégeois, J.P. 1998. Preface – Some words on the post-collisional magmatism, **Lithos**, **45**: xv-xvii.
- Pitcher, W. S. 1983. Granite type and tectonic environment. *In* K. J. Hsü (org.), **Mountain Building Processes**. New York, Academic Press, p. 19-40.

### 3. CORPO PRINCIPAL

## **GEOQUÍMICA E PETROLOGIA DOS METAGRANITOS PORFIRÍTICOS E EQUIGRANULARES DO COMPLEXO ENCANTADAS, SANTANA DA BOA VISTA, RS: evolução final de um arco de margem continental ativa do Paleoproterozóico**

Marcelo Lusa<sup>1</sup>, Ruy Paulo Philipp<sup>2</sup> & Lauro Valentim Stoll Nardi<sup>2</sup>

1 – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pós-Graduação em Geociências,  
Instituto de Geociências,

Av. Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronomia, Porto Alegre, RS

e-mail: lusa\_marcelo@hotmail.com

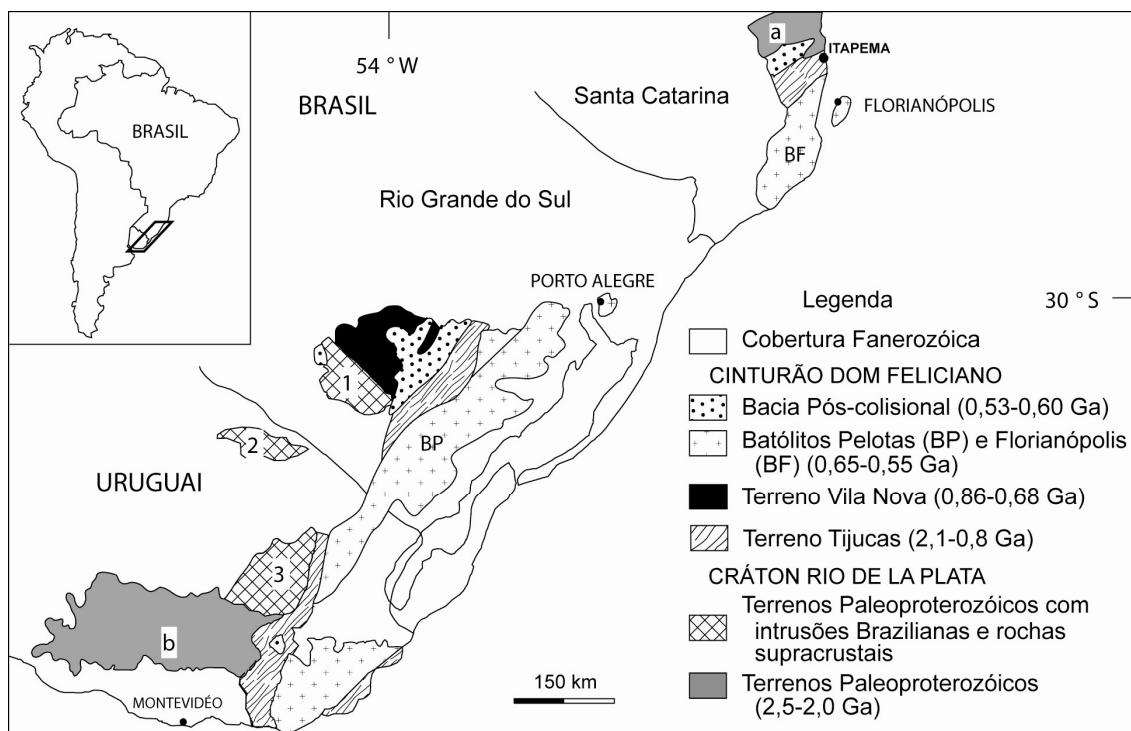
2 – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Centro de  
Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto  
Alegre, RS,

Pesquisador do CNPq, e-mail: ruy.philipp@ufrgs.br; lauro.nardi@ufrgs.br

### 3.1 INTRODUÇÃO

Na região de Santana da Boa Vista afloram rochas gnáissicas e metagranitóides de idade Paleoproterozóica e rochas metavulcanossedimentares pertencentes ao embasamento do Escudo Sul-rio-grandense (Soliani Jr. 1986; Remus *et al.* 1990; Fernandes *et al.* 1992; Hartmann *et al.* 2000). Estas unidades fazem parte do Terreno Tijucas, unidade central do Cinturão Dom Feliciano, dispendo-se com uma forma alongada segundo a direção N30°E, estendendo-se para o estado de Santa Catarina e para o Uruguai (**Figura 4**). Este terreno está representado na litoestratigrafia do RS pelos Complexos Encantadas e Porongos, respectivamente, infra e supraestrutura do embasamento nesta porção do escudo.

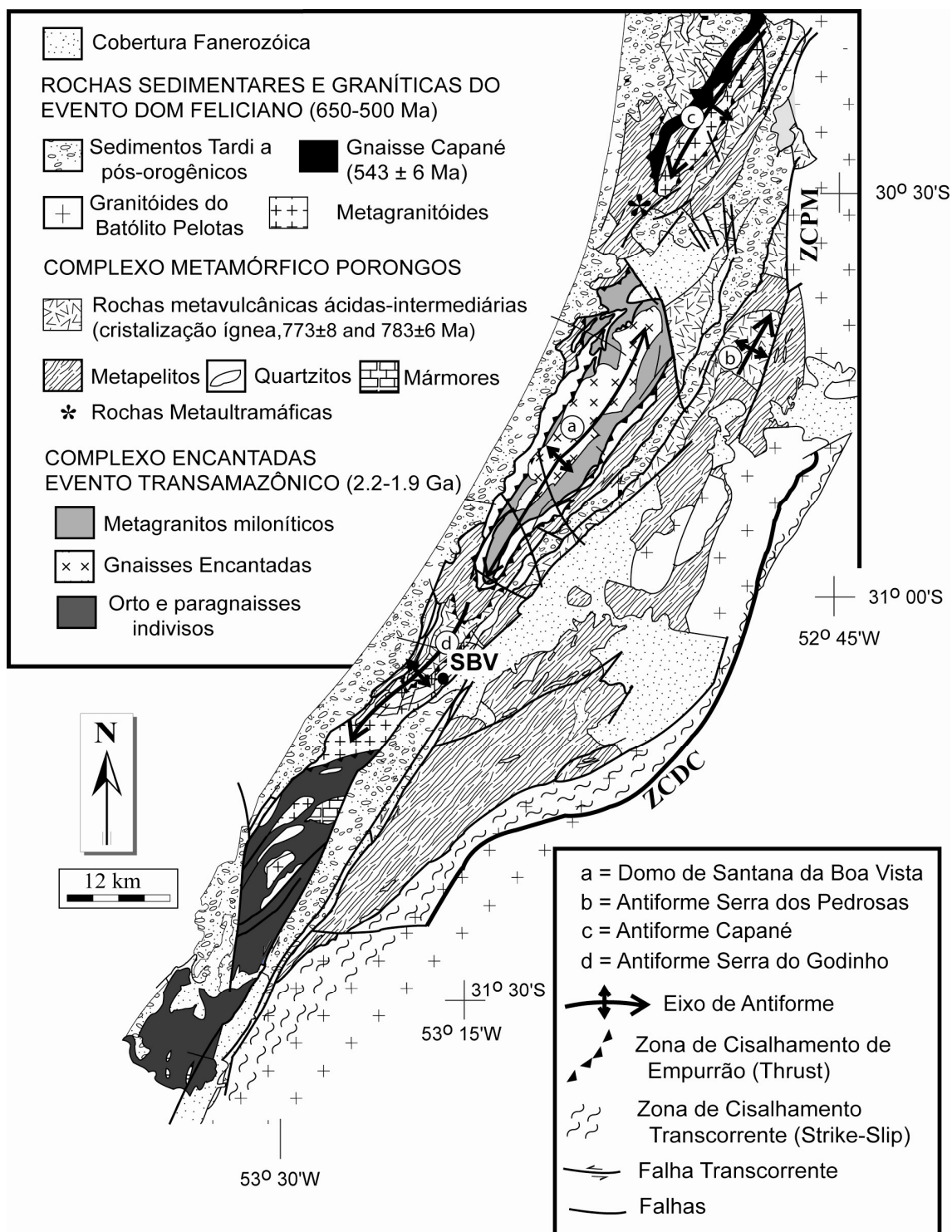
Definidas originalmente como Gnaisse Encantadas por Ribeiro *et al.* (1966), estas litologias ocupam a porção central e infra-estrutural do Domo de Santana da Boa Vista (Jost & Bitencourt, 1980), uma estrutura alongada segundo a direção 30°E com aproximadamente 50 km de extensão e cerca de 8 a 15 km de largura (**Figura5**).



**Figura 4** – Principais unidades geotectônicas do Sul do Brasil e Uruguai. Legenda: a= Terreno Luis Alves, b= Terreno Florida, 1= Terreno Taquarembó, 2= Terreno Rivera, 3= Terreno Valentines. Compilado de Hartmann et al. 2008.

O Complexo Encantadas (Chemale Jr. 2000) é composto pelo Gnaiss Encantadas e por metagranitóides miloníticos. O Gnaiss Encantadas caracteriza-se por uma associação de gnaisses tonalíticos e trondhjemíticos, com ocorrência subordinada de gnaisses dioríticos, anfíbolitos máficos e metaultramafitos ricos em hornblenda (hornblenditos) (Philipp et al. 2008). Os gnaisses são cortados por dois grupos de granitóides milonitizados de composição monzo e sienogranítica. Estes granitóides foram referidos como Granitóides Milonitizados de Santana da Boa Vista (Machado et al. 1987), constituindo corpos individualizados e também lentes de espessura centimétrica a métrica. As relações intrusivas são definidas por relações discordantes e de corte, com disposição em baixo ângulo com relação ao bandamento do Gnaiss Encantadas (Machado et al. 1987; Porcher & Fernandes, 1990; Remus et al. 1990).

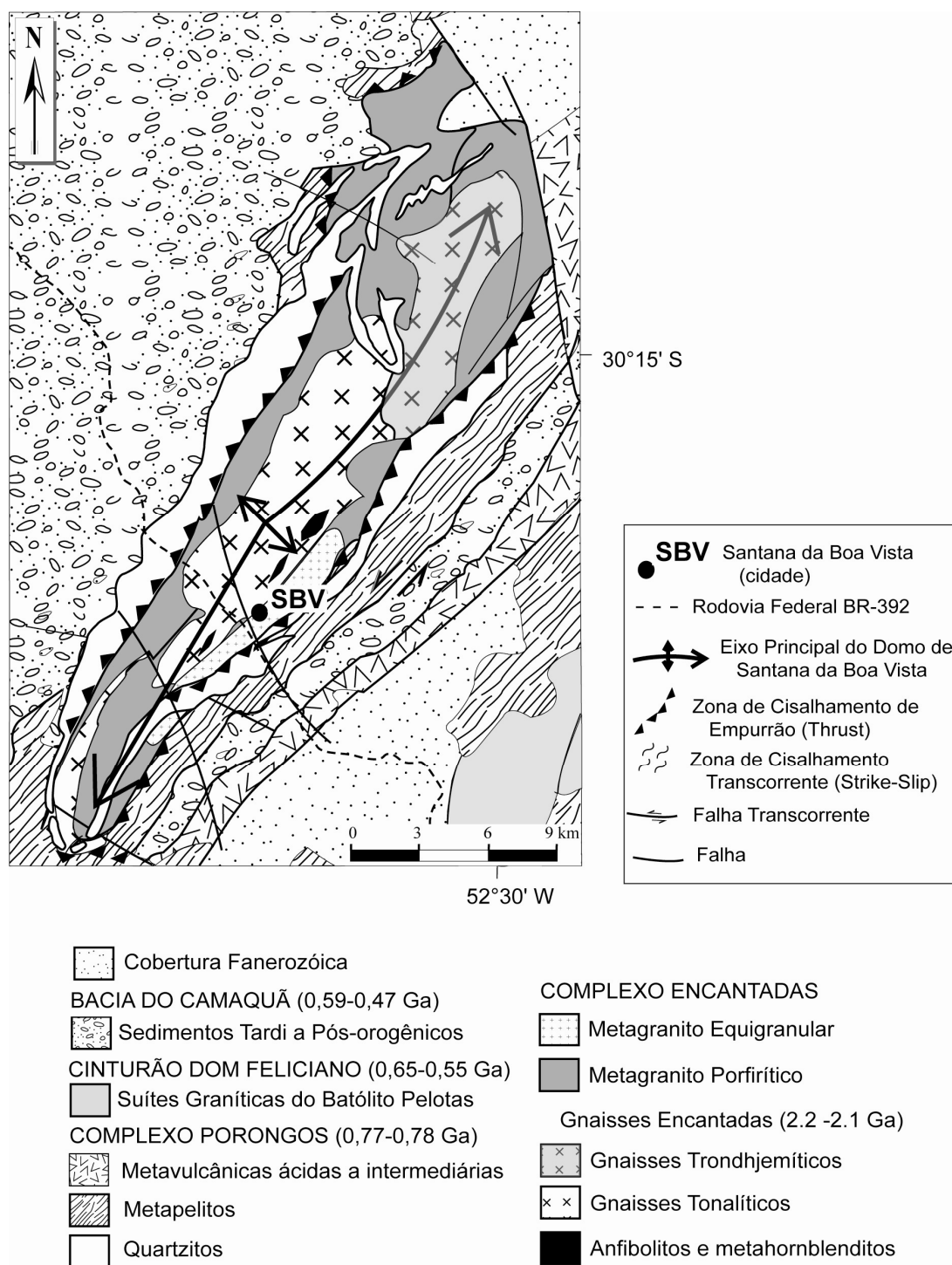
Os granitóides têm formas tabulares, concordantes com o alongamento do Domo de Santana, dispostos ao longo do limite do Complexo Encantadas com o Complexo Porongos. São identificados dois tipos de metagranitos. Os metagranitos porfiríticos são dominantes, possuem composição monzogranítica e textura blastoporfirítica caracterizada por *augen* de megacristais de K-feldspato deformados



**Figura 5** – Mapa geológico da região central do Escudo Sul-rio-grandense destacando o Domo de Santana da Boa Vista e as rochas do Complexo Encantadas. Modificado de Chemale Jr. (2000).

envoltos por uma matriz de textura protomilonítica a milonítica composta por quartzo, plagioclásio e biotita (**Figura 6**). Os metagranitos equigranulares constituem um corpo principal na porção sudeste do domo, ocorrendo, entretanto, em outras áreas como corpos tabulares de espessuras centimétricas a métricas. Possuem composição

sienogranítica, são leucocráticos e apresentam textura blastoequigranular protomilonítica a milonítica. As formas tabulares e o paralelismo entre as foliações magmáticas e tectônicas indicam que os metagranitos têm um posicionamento sincrônico a uma das principais fases de deformação regional que afeta o Complexo Encantadas, como será discutido posteriormente.



**Figura 6** – Mapa geológico da região do Complexo Encantadas, destacando a ocorrência dos metagranitos (Fonte: Philipp et al. 2008).

O contato entre os Complexos Encantadas e Porongos ocorre através de uma zona de cisalhamento dúctil de baixo ângulo, cuja movimentação altera as relações estratigráficas originais e imprime transformações de natureza milonítica. O grau metamórfico do Complexo Encantadas é definido pelos anfibolitos, que apresentam paragêneses representativas de mais de um evento termal, comumente acompanhado por intensa deformação (Philipp *et al.* 1995). O pico do evento inicial de metamorfismo regional atingiu condições de fácies anfibolito médio a superior. O posicionamento dos corpos graníticos está associado ao desenvolvimento de extensas zonas de cisalhamento dúcteis subhorizontais, que formam uma trama milonítica de temperatura elevada, compatível com a fácies anfibolito médio. Fases deformacionais mais tardias, associadas com condições metamórficas da fácies xistos verdes e anfibolito inferior, estão registradas também nas rochas supracrustais do Complexo Porongos (Remus *et al.* 1990).

O principal objetivo deste trabalho é caracterizar os metagranitos porfíricos e equigranulares a partir de dados petrográficos, estruturais e geoquímicos. A reunião destas informações permitirá a determinação da série magmática, investigação de processos de fracionamento e das suas relações estratigráficas e tectônicas com relação aos gnaisses do Complexo Encantadas.

### **3.2 GEOLOGIA REGIONAL**

A ocorrência de rochas gnáissicas na região de Santana da Boa Vista foi mencionada por Carvalho (1932) e por Leinz & Pinagel (1945). O levantamento regional desenvolvido por Ribeiro *et al.* (1966) caracterizou a Formação Encantadas como uma unidade composta por ortognaisses de médio grau. O mapeamento geológico e estrutural do Gnaiss Encantadas por Jost & Bitencourt (1980) reconheceu sua exposição como decorrência de uma estrutura antiformal com duplo caimento denominada Domo de Santana. Os autores identificaram também a zona de falha principal de baixo ângulo, responsável pelo contato entre infra e supra-estrutura. Em função da intensa transformação milonítica os metagranitos foram interpretados como metarcóseos e xistos quartzito-feldspáticos (Jost & Bitencourt, 1980).

O caráter intrusivo dos granitóides no Gnaiss Encantadas foi ressaltado por Machado *et al.* (1987) que os descreveram como “.. corpos individualizáveis e



lentes de granitos a granodioritos róseos a acinzentados com albita-quartzo-biotita-muscovita-epidoto na matriz”. Os autores descrevem relações de intrusão oblíquas em relação ao bandamento gnáissico ( $Sb_1$ ) e definem condições metamórficas da fácies xistos verdes para os eventos deformacionais ocorrentes. A geração dos granitos é interpretada como associada a fases precoces da deformação brasileira na região, caracterizando os granitóides como pré-tectônicos. Remus *et al.* (1990) descrevem as injeções graníticas equigranulares como corpos tabulares que cortam o bandamento ( $Sb_1$ ), posicionando os metagranitos como sin-tectônicos a  $D_2$ . Todos os autores anteriores sugeriram uma idade Neoproterozóica para as intrusões graníticas.

Os levantamentos geológicos da UFRGS (1987), sintetizados por Porcher & Fernandes (1990) caracterizaram as relações de contato entre as rochas gnáissicas e as rochas metavulcano-sedimentares da cobertura como uma zona de cisalhamento dúctil de baixo ângulo produto do escape tectônico promovido por um evento de colisão continental de idade Brasileira. A deformação dúctil nos metagranitóides deu origem a foliações miloníticas e lineações de estiramento indicando a posição do plano sub-horizontal e a direção (NE-SW) do fluxo nessas unidades. Sistemas de porfiroclastos assimétricos (feldspato) indicam uma cinemática lateral esquerda. As condições superiores do metamorfismo, da fácies anfíbolito, são reconhecidas por Porcher & Fernandes (1990), que descrevem microestruturas geradas por deformação dúctil nos porfiroclastos de feldspato dos granitóides que estão milonitizados.

Não existem dados geocronológicos disponíveis para a idade ígnea dos granitos que cortam os Gnaisses Encantadas. Os dados de U-Pb SHRIMP em zircões dos gnaisses tonalíticos fornecem idades de  $2263 \pm 18$  Ma e  $2363 \pm 6$  Ma para os núcleos ígneos, enquanto os cristais metamórficos apresentam idades de  $2045 \pm 10$  Ma e  $2021 \pm 11$  Ma (Chemale Jr. 2000). Mais recentemente Hartmann *et al.* (2003) obtiveram idades U-Pb SHRIMP de  $2256 \pm 8$  Ma para zircões dos gnaisses tonalíticos e de  $2257 \pm 12$  Ma para os núcleos de zircões reliquiares dos metaultramafitos do Passo do Belizário, do Complexo Encantadas. Nas porções de bordo dos zircões desta última unidade foram identificadas idades de  $1989 \pm 21$  e  $702 \pm 21$  Ma, interpretadas como relacionadas aos eventos de metamorfismo regional  $M_1$  (fácies anfíbolito) e  $M_2$  (fácies xistos verdes). Os autores ainda relacionam estes eventos metamórficos como manifestações respectivamente, das orogenias Encantadas e Camboriú, do ciclo

Transamazônico e, a idade mais nova, como relacionada com a orogenia São Gabriel do ciclo Brasileiro.

Para os metagranitos equigranulares com textura milonítica foram obtidas idades pelo método Rb-Sr, de  $507 \pm 38$  Ma e  $524 \pm 17$  Ma. Lenz *et al.*, (2005) interpretam estes valores como indicativos de um evento de geração de trama metamórfica de baixo a médio grau metamórfico durante o Paleozóico Inferior no RS.

### 3.3 RELAÇÕES GEOLÓGICAS

A relação estratigráfica discordante entre os metagranitos e o Gnaiss Encantadas foi observada nos levantamentos geológicos através de contatos intrusivos. Os gnaisses tonalíticos, trondjemíticos e anfíbolitos são as unidades dominantes e mais antigas. Estas unidades estão cortadas por corpos tabulares de metamonzogranitos porfiríticos a inequigranulares. Todas as unidades anteriores são cortadas por corpos tabulares de metaleucogranitos equigranulares com espessuras centimétricas a métricas.

A estruturação geológica da área é caracterizada por dois eventos deformacionais de baixo ângulo denominados  $D_1$  e  $D_2$ . O primeiro evento é responsável pela deformação dos corpos tonalíticos, trondjemíticos e dioríticos e pela geração de um bandamento milimétrico, regular e descontínuo originado pela segregação metamórfica ( $Sb_1$ ) (**Figura 7A**). Este bandamento é de natureza composta, com corpos de tonalitos, trondjemíticos e anfíbolíticos deformados e superpostos por um bandamento contínuo e relativamente regular de espessura milimétrica relacionado à segregação metamórfica (Philipp *et al.* 2008). Durante a evolução final e/ou posterior a este evento alojam-se os corpos de granitos porfiríticos, e mais tardiamente, os metagranitos equigranulares. O segundo evento deformacional afeta o bandamento  $Sb_1$  dos gnaisses e os corpos de metagranitos originando dobras recumbentes ( $F_2$ ) acompanhadas por uma foliação de superfície axial ( $Sb_2$ ) (**Figura 7B**). Um evento transcorrente  $D_3$  redobra as estruturas anteriores produzindo o padrão regional de dobramentos  $F_3$  aproximadamente normais e cilíndricos, direcionados segundo  $N35-55^\circ E$  e com superfície axial subvertical ( $Sb_3$ ) (**Figura 7C**). Uma fase mais tardia redobra os eixos das dobras  $F_3$  e forma dobras assimétricas abertas a suaves com superfície axial marcada por uma clivagem de fratura orientada segundo  $N20-40^\circ W$  (**Figura 7D**). A interação entre as últimas fases deformacionais resultou num padrão de

interferência do tipo 1 de Ramsay (1967), gerando a estrutura dômica da região de Santana da Boa Vista (Machado *et al.* 1987).

Porcher & Fernandes (1990) e Fernandes *et al.* (1992) interpretam a evolução estrutural do complexo e o desenvolvimento de zonas de cisalhamento de baixo ângulo e alto ângulo como simultâneos e relacionados ao escape tectônico promovido durante um evento de colisão continental.

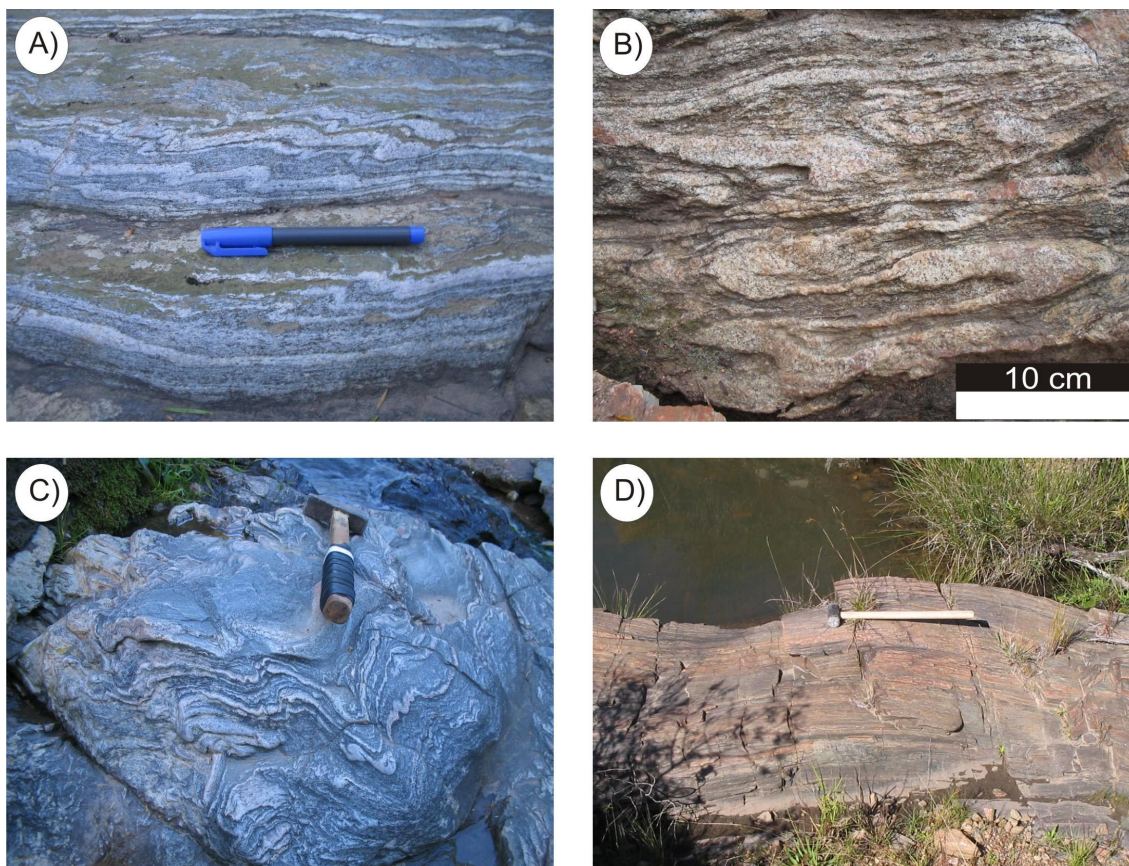
Os metagranitóides estudados estão afetados por todas as fases de deformação que afetam o complexo, sugerindo que tenham uma evolução estrutural comum aos ortognaisses. As relações de corte observadas por vários autores são definidas pela discordância em baixo ângulo entre o bandamento  $Sb_1$  dos gnaisses e a disposição dos corpos tabulares de metagranitos. Esta relação tenderia a posicionar a colocação dos metagranitos como posterior a  $D_1$ . Entretanto, os metagranitos afetados pelas dobras  $F_2$  apresentam uma foliação interna de natureza milonítica, sugerindo que já estavam sendo deformados anteriormente ao dobramento. As relações estruturais são sugestivas que o posicionamento dos metagranitos foi sincrônico ao evento  $D_1$  e, posteriormente, foram afetados pelo evento  $D_2$ .

Os granitóides ocorrem dispostos de forma alongada ao longo da zona de contato entre o Complexo Encantadas e o Complexo Porongos. Esta estruturação posiciona os granitóides como sincrônicos com a zona de cisalhamento dúctil de baixo ângulo que define o contato entre a infra e a supra-estrutura da região.

Os metagranodioritos a monzogranitos porfiríticos constituem um corpo com forma alongada segundo a direção  $N30^\circ E$ , envolvendo a área do domo ao longo do contato entre os complexos. Desdobrando as últimas fases deformacionais é possível supor que este granito cubra uma área com cerca de 70 km de extensão e entre 2 e 6 km de largura. A estrutura é foliada a bandada, com uma textura milonítica caracterizada por proporções entre 5 e 20 % de porfiroclastos estirados de K-feldspato envoltos em uma matriz fina com textura granoblástica nas porções quartzo-feldspáticas e lepidoblástica com orientação de biotita, associadas de modo subordinado com muscovita e clorita (**Figura 8A**). Nos termos protomiloníticos a textura blastoporfirítica é definida por porfiroclastos com formas prismáticas de K-feldspato de 1 a 5 cm, envoltos por uma matriz equigranular média deformada e com alto grau de recristalização. Não foram observadas relações diretas entre os metagranitóides porfiríticos e os ortognaisses, entretanto, a foliação principal dos metagranitóides é afetada pelas dobras recumbentes  $F_2$ , sugerindo que a colocação destes corpos é anterior

ao evento  $D_2$ . Machado *et al.* (1987) descreve contato em baixo ângulo entre intrusões graníticas e os gnaisses tonalíticos.

As intrusões de metagranitos equigranulares mostram formas tabulares, em geral com espessuras entre 2 e 10 metros, rodeados por corpos menores, entre 5 e 20 cm. Um corpo principal é identificado na porção leste do Domo de Santana, apresentando cerca de 10 km de extensão e 1 e 2 km de largura. Apesar de muito deformados identificam-se relações de corte de baixo ângulo com relação ao bandamento ( $Sb_1$ ) dos gnaisses tonalíticos e trondhjemíticos. Na sua extremidade norte os metagranitos equigranulares cortam os metagranitos porfíricos na forma de corpos tabulares com espessuras centimétricas. Assim como os metagranitos porfíricos, os metagranitos equigranulares estão afetados pelas dobras  $F_2$ , indicando que a colocação dos mesmos é anterior a  $D_2$  (**Figuras 8B e 8C**).



**Figura 7** – Estruturas mesocópicas dos metagranitos do Complexo Encantadas. A) Bandamento composto no Gnaiss Encantadas, caracterizado por injeções de metagranito equigranular nos gnaisses tonalíticos com fino bandamento de segregação metamórfica; B) Dobras recumbentes  $F_2$  afetando o bandamento dos gnaisses tonalíticos e as injeções de metagranitos equigranulares; C) Gnaiss tonalítico cortado por injeções de metagranito equigranular afetados por dobras  $F_3$  suaves a abertas. D) Dobra aberta  $F_4$  afetando a foliação milonítica e a lineação de estiramento do metagranito porfírico, destacando a clivagem de fratura de superfície-axial ( $S_4$ ).

### 3.4 PETROGRAFIA

#### 3.4.1 Metagranito Porfirítico

Os metagranitos porfiríticos estão muito deformados, tem cor cinza escura a preta com pontos rosados a alaranjados definidos por porfiroclastos de K-feldspato. Apresenta estrutura foliada a bandada com *augen* de feldspatos envoltos por níveis milimétricos ricos em quartzo e plagioclásio e níveis máficos a base de biotita (**Figura 8C**). A foliação é contínua e bem definida, comumente regular. Os níveis félsicos são compostos predominantemente por K-feldspato, plagioclásio e quartzo, com textura granoblástica interlobada inequigranular média (0,2 a 0,5 mm) envolvendo subgrãos deformados de tamanhos variados dos mesmos minerais. Mostram proporções subordinadas de epidoto e mica branca fina crescendo sobre os feldspatos. Os níveis máficos são ricos em biotita, mostrando texturas lepidoblástica média (0,2 a 0,8 mm).

A composição é variável entre granodiorítica e monzogranítica (**Figura 9**). Os principais minerais constituintes são K-feldspato, plagioclásio, quartzo e biotita tendo como acessórios comuns minerais opacos, alanita, apatita e zircão. O epidoto e a clorita são mais raros e se encontram principalmente preenchendo veios ou nas bordas e núcleos dos plagioclásios ou substituindo a biotita.

O K-feldspato é um *Ortoclásio* e ocorre como porfiroclastos de forma prismática pouco alongada a equidimensional, subédricos a estirados, envoltos por subgrãos e matriz milonítica, com dimensões entre 0,5 a 3 cm, de cor rosa a laranja (**Figura 8D**). As caudas de deformação mostram agregados granoblásticos interlobados a poligonais de diminutos novos grãos de *Microclínio* metamórfico. O *Plagioclásio* ocorre como porfiroclastos equidimensionais, zonados e com tamanhos entre 0,8 a 1,5 mm. Mostram forte extinção ondulante e encurvamento de maclas e contatos suturados entre os grãos. Ao longo dos limites mostra a formação de novos grãos na matriz metamórfica de natureza milonítica, apresentando forma poligonal a equidimensional, limites retos a interlobados e tamanhos entre 0,2 a 0,3 mm. O *Quartzo* está predominantemente recristalizado, constituindo cristais de forma poligonal a equidimensional, subidioblásticos, variando de 0,2 a 0,5 mm. Ocorrem raros porfiroclastos de formas alongadas, com forte extinção ondulante e tamanhos entre 0,5 e 2,5 mm. A *Biotita* é prismática, subidioblástica, com pleocroísmo variando de castanho esverdeado a castanho avermelhado. A presença da paragênese K-

feldspato+plagioclásio+quartzo+biotita caracteriza condições metamórficas máximas da Fácies Anfibolito Médio (Passchier & Trouw, 2005).

### 3.4.2 Metagranitos Equigranulares

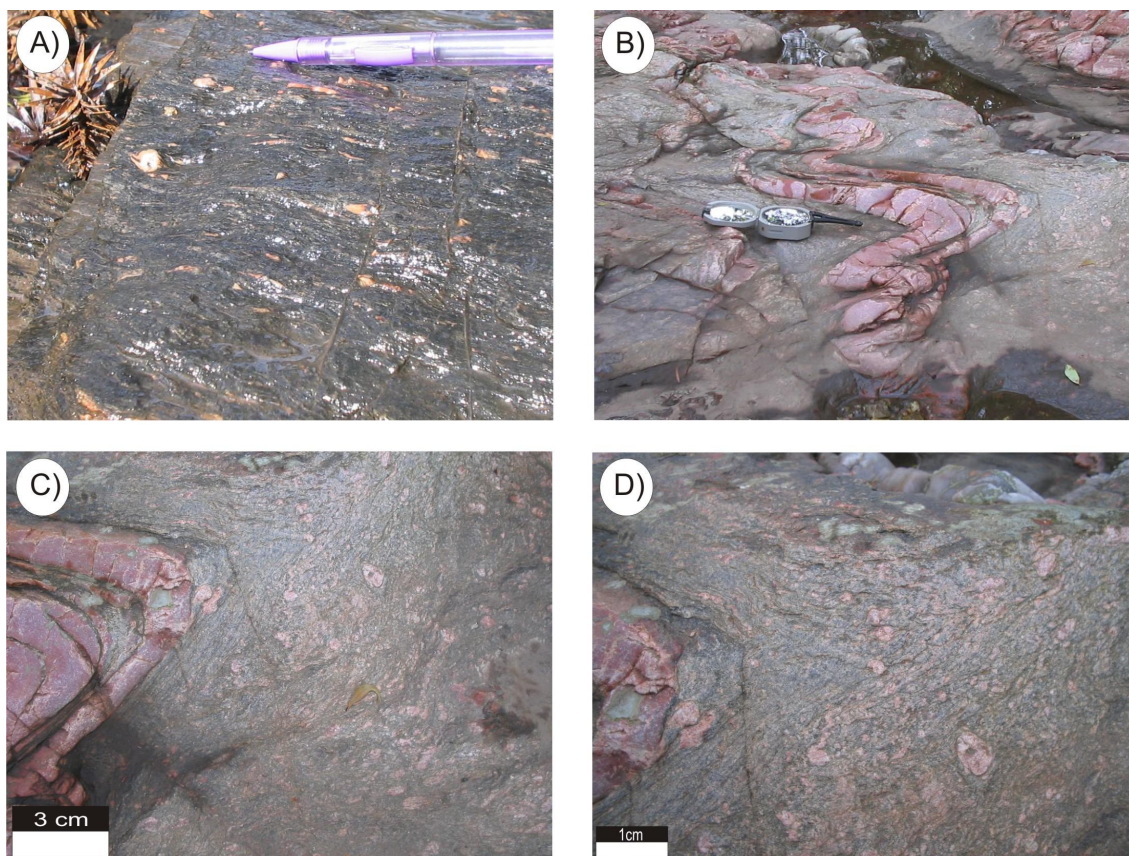
Os metagranitos equigranulares tem cor rosa clara a alaranjada e apresentam uma estrutura foliada caracterizada pela orientação de biotita e porfiroclastos de K-feldspato e quartzo estirados. Em zonas de alta deformação apresentam um bandamento incipiente com níveis milimétricos ricos em quartzo e K-feldspato e níveis máficos muito finos e descontínuos de biotita com textura lepidoblástica média (**Figura 10A**). Estes níveis podem conter muscovita associada. Os níveis félsicos têm textura granoblástica interlobada a poligonal inequigranular média (0,1 a 0,3 mm) e proporções variadas de porfiroclastos de K-feldspato e plagioclásio.

A composição é variável entre sieno e monzogranítica (**Figura 9**). Os minerais principais são K-feldspato (microclínio) e quartzo, com pouco plagioclásio, biotita e muscovita, tendo como acessórios minerais opacos, alanita, zircão e apatita. A muscovita ocorre em zonas de alta deformação do granito associado a presença de fluidos aquosos.

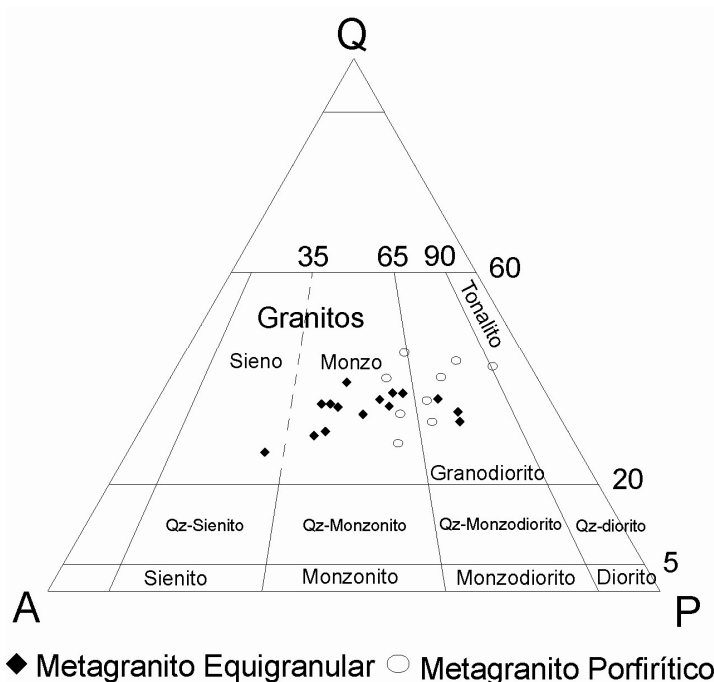
O *K-feldspato* é o microclínio e constitui porfiroclastos de forma prismática pouco alongada, subédrico a estirado, com dimensões entre 0.4 a 1.0 cm e cor rosa e laranja (**Figura 10B**). Estão envoltos por subgrãos e matriz milonítica, parcialmente substituídos por mica branca. O *Plagioclásio* ocorre como raros porfiroclastos equidimensionais, zonados e com tamanhos entre 0,3 a 1,0 mm. Apresentam contatos suturados entre os grãos, com forte extinção ondulante e encurvamento de maclas. Ao longo dos limites mostra a formação de novos grãos metamórficos, com formas poligonal a equidimensional, limites retos a interlobados e tamanhos entre 0,1 a 0,3 mm. O *Quartzo* está predominantemente recristalizado, constituindo mosaicos de grãos poligonais a equidimensional, subidioblásticos, variando de 0,1 a 0,3 mm. Ocorrem também porfiroclastos de formas alongadas, com forte extinção ondulante e tamanhos entre 0,5 e 2.5 mm. A *Biotita* tem forma prismática alongada, subidioblástica, com pleocroísmo castanho esverdeado a castanho avermelhado, variando de 0,3 a 0,8 mm, ocorre de modo intersticial nos níveis félsicos e como agregados nos níveis máficos. A *Muscovita* é rara e ocorre principalmente na matriz metamórfica substituindo o K-feldspato. Também ocorre em termos de textura

blastoequigranular grossa a pegmatítica como cristais hexagonais subédricos, de 1 a 5 cm e cor prata.

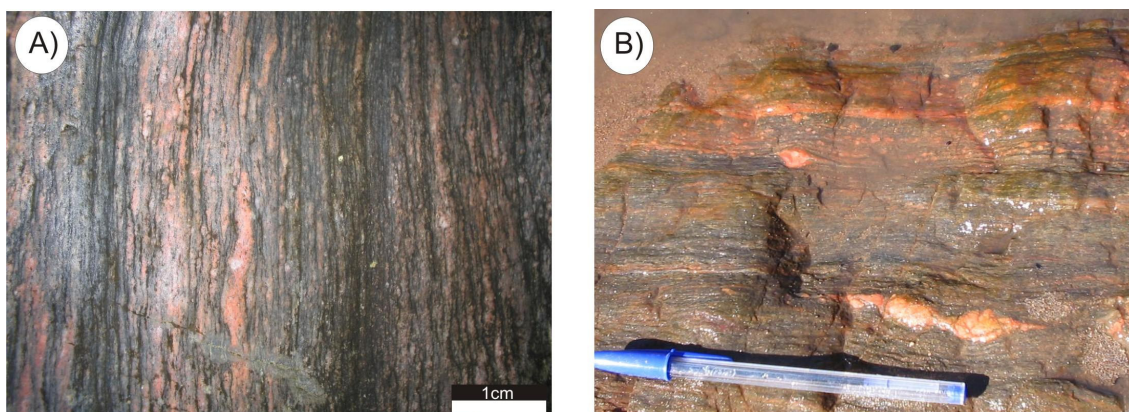
A paragénese K-feldspato + plagioclásio + quartzo + biotita também caracteriza condições metamórficas da fácies Anfibolito Médio (Passchier & Trouw, 2005).



**Figura 8** – Estruturas mesocópicas do metagranito porfirítico. A) Bandamento milonítico definido por bandas quartzo-feldspáticas descontínuas e níveis dominantes de biotita envolvendo porfiroclastos de K-feldspato; B) Dobras recumbentes  $F_2$  afetando a foliação milonítica dos metagranitos porfiríticos e injeções de metagranito equigranular; C) Detalhe de zona de charneira de dobra  $F_2$ , destacando a foliação milonítica do metagranito porfirítico D) Detalhe da textura blastoporfirítica ressaltando porfiroclastos prismáticos de K-feldspato.



**Figura 9** – Disposição das amostras dos metagranitos do Complexo Encantadas no diagrama QAP de Streckeisen (1976).



**Figura 10** – Estruturas mesocópicas do metagranito equigranular. A) Bandamento milonítico, contínuo, regular e milimétrico (1-4 mm) destacando porfiroclastos de feldspatos envolvidos por matriz fina; B) Detalhe de porfiroclastos de K-feldspato assimétricos indicando movimento lateral esquerdo ou de topo para a esquerda.

### 3.5 GEOQUÍMICA

Para a caracterização litogeoquímica dos metagranitos do Complexo Encantadas foram selecionadas e analisadas 24 amostras, sendo 09 do granito porfirítico e 15 do equigranular, para determinação da composição da rocha em termos de óxidos dos elementos maiores (%) e dos elementos traços (ppm), incluindo elementos terras



raras. Os resultados são apresentados nas **Tabelas 2 e 3**. As análises químicas foram realizadas no Activations Laboratories Ltda, Canadá e todos os elementos foram determinados por ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry).

As análises químicas têm por objetivo caracterizar a composição e classificar os metagranitos do Complexo Encantadas. Adicionalmente investigou-se a partir da assinatura geoquímica, os principais processos de fracionamento, de geração e o provável ambiente geológico de formação dos protólitos.

Os óxidos dos elementos maiores foram representados em diagramas de Harker, tendo a  $\text{SiO}_2$  (%) como índice de diferenciação. O conteúdo de  $\text{SiO}_2$  das amostras dos Metagranitos Porfíricos varia de 67,15 % a 74,9 %, cobrindo um intervalo composicional de magmas ácidos caracterizado por granodioritos e monzogranitos. Os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são elevados, com valores entre 15,3 e 12,6 %. Os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (total) são moderados, variando de 6,6 a 1,3 %, com teores mais baixos de  $\text{MgO}$ , variando de 1,8 a 0,3 % e de  $\text{TiO}_2$ , entre 0,1 a 0,8 %. Os metagranitos equigranulares são mais silicosos, com conteúdo de  $\text{SiO}_2$  variando entre 69,7 % e 77,4 %, caracterizando um magma ácido com composição variando entre monzogranitos e sienogranitos. Os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são elevados e variam entre 15,4 e 12,8 %. Os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (total) são baixos, variando de 2,2 a 0,6 %, com teores ainda mais baixos de  $\text{MgO}$ , variando de 0,8 a 0,04 % e de  $\text{TiO}_2$ , entre 0,195 a 0,01 %.

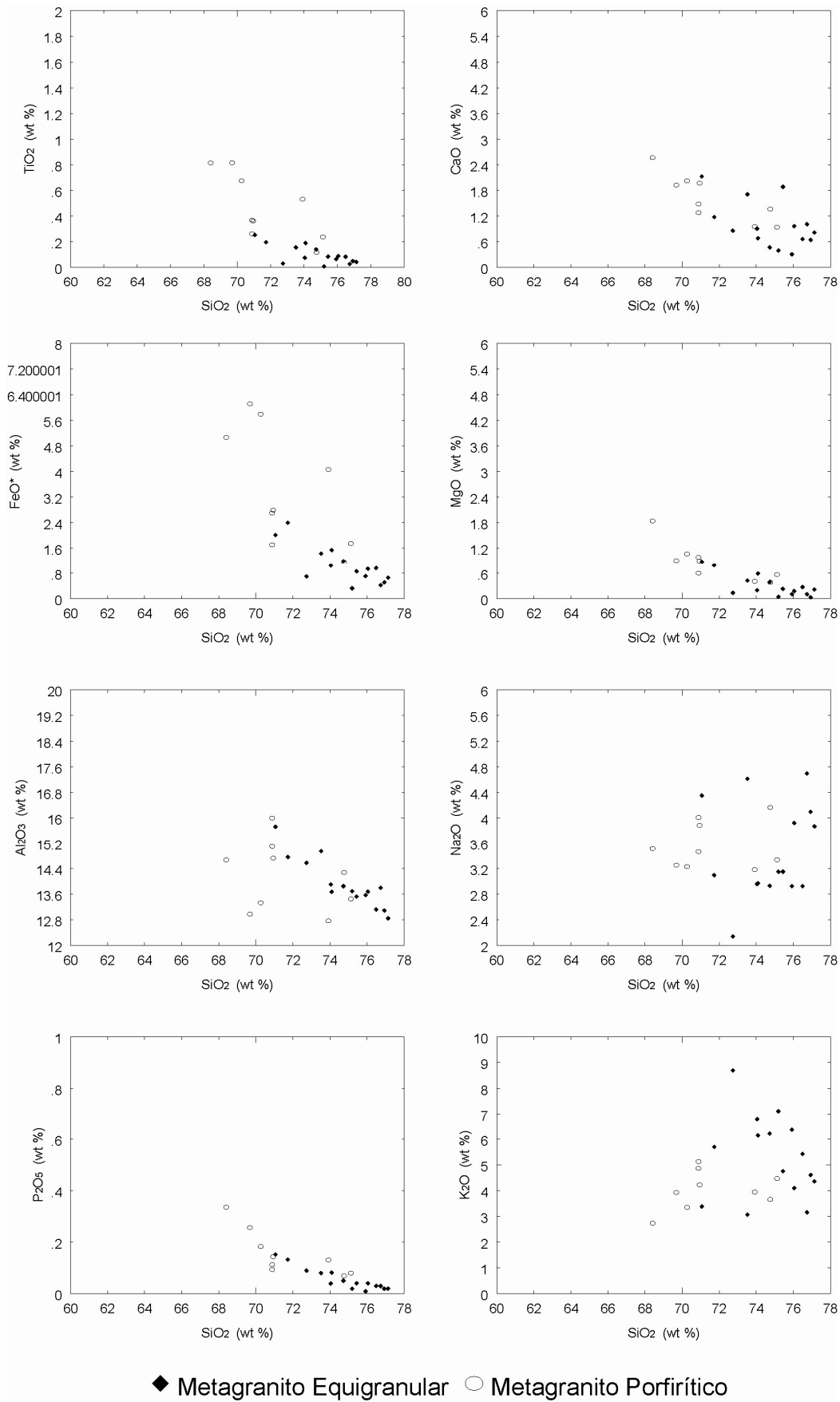
As disposições dos elementos maiores dos metagranitos nos diagramas de Harker definem alinhamentos lineares para a maioria dos elementos. Os metagranitos definem alinhamentos distintos, embora subparalelos, sendo mais bem definidos para os granitos equigranulares. Com o aumento progressivo do teor de  $\text{SiO}_2$  observa-se um decréscimo regular nos teores de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{MnO}$  (**Figura 11**). Os teores de  $\text{Na}_2\text{O}$  mostram tendências distintas de enriquecimento com a diferenciação, apesar de apresentarem uma dispersão dos pontos. Os granitos mostram comportamento distinto com relação ao  $\text{K}_2\text{O}$ . Os termos porfíricos apresentam aumento relativo até cerca de 72% de  $\text{SiO}_2$ , quando invertem o comportamento. Os metagranitos equigranulares mostram um empobrecimento contínuo com relação ao aumento do teor de  $\text{SiO}_2$ . A tendência observada nos elementos maiores sugere que as amostras selecionadas são cogenéticas e representam a evolução de duas unidades magmáticas distintas. Os alinhamentos observados sugerem a atuação de processos de cristalização fracionada, com provável fracionamento de plagioclásio, biotita, K-feldspato e apatita.

Elem.	LR-14B	LR-17A	LR-19A	LR-21	LR-23	LR-25	LR-27B	LR-29C	LR-30
SiO <sub>2</sub>	67.77	69.03	67.19	74.93	74.86	73.33	68.98	68.96	67.91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.3	14.33	14.41	13.42	14.3	12.67	14.69	13.09	12.65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	1.82	3.02	5.53	1.94	1.3	4.48	2.93	6.32	6.62
MnO	0.023	0.047	0.053	0.028	0.036	0.084	0.034	0.067	0.116
MgO	0.58	0.88	1.81	0.57	0.39	0.41	0.96	1.05	0.89
CaO	1.23	1.92	2.52	0.94	1.37	0.95	1.45	1.99	1.88
Na <sub>2</sub> O	3.83	3.78	3.45	3.33	4.17	3.16	3.37	3.17	3.17
K <sub>2</sub> O	4.9	4.11	2.69	4.46	3.66	3.91	4.73	3.29	3.83
TiO <sub>2</sub>	0.251	0.356	0.8	0.238	0.118	0.528	0.36	0.665	0.795
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.09	0.14	0.33	0.08	0.07	0.13	0.11	0.18	0.25
LOI	4.21	0.69	0.96	0.7	0.68	1.09	1.11	0.69	0.74
Total	100	98.3	99.73	100.6	100.9	100.7	98.71	99.46	98.85
Ba	934	1157	1041	631	1049	2446	1359	2744	2894
Sr	306	356	510	198	434	251	398	362	344
Y	14	18	27	14	7	61	14	28	24
Zr	137	212	420	157	83	559	246	810	661
Rb	136	126	83	131	67	46	90	57	56
Nb	12	10	12	11	4	8	9	16	12
Cs	1	1.2	1.8	0.7	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.9	0.7
La	54.2	86.9	145	44.2	24.8	212	69.3	35.9	68.9
Ce	113	160	332	88.9	47.3	213	137	73.8	140
Pr	11.6	18.3	33.8	10.1	5.11	39.3	15.2	9.59	16.2
Nd	33.7	54.7	118	30.4	14.7	124	45.2	34.8	54.3
Sm	5.2	8.4	16.1	5.5	2.3	16.7	7	7.2	8.8
Eu	1.14	1.52	3.24	0.84	0.68	4.43	1.11	4.29	3.23
Gd	3.5	6	9.6	4.1	1.7	13.5	4.7	6.5	6.7
Tb	0.5	0.8	1.2	0.5	0.2	1.7	0.6	1	0.9
Dy	2.4	3.6	5.8	2.5	1.3	8.1	2.8	5	4.4
Ho	0.5	0.7	1.1	0.4	0.3	1.7	0.5	1	0.9
Er	1.5	1.9	2.9	1.3	0.8	4.7	1.4	3	2.4
Tm	0.23	0.26	0.38	0.18	0.13	0.63	0.19	0.46	0.34
Yb	1.6	1.5	2.2	1.1	0.9	3.6	1.2	3.2	2.2
Lu	0.24	0.2	0.32	0.16	0.13	0.54	0.15	0.51	0.34
Hf	4.4	5.3	9.9	4.1	2.2	11.6	6.2	16.5	12.6
Ta	0.9	0.9	0.4	0.8	0.2	0.4	0.7	1.3	0.9
Th	23.8	17.9	15.1	18.9	3.6	7.8	23.1	4.7	7.1
U	2.3	1.4	0.8	1.7	0.8	0.5	0.6	2.2	1.3

**Tabela 2** – Composição representativa dos elementos maiores (% de peso) e traços (ppm) de amostras selecionadas dos Metagranitos Porfíricos.

	LR-2C	LR-7B	LR-9	LR-11d	LR-11C	LR-11E	LR-13B	LR-17B	LR-24	LR-26	LR-29a
SiO <sub>2</sub>	77.38	76.3	74.76	69.75	73.67	74.03	72.6	75.65	73.02	70.43	72.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.17	13.72	12.83	15.44	13.21	13.9	14.55	13.78	14.84	14.49	13.36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>	0.58	0.47	1.05	2.2	0.94	1.16	0.78	0.37	1.59	2.62	1.68
MnO	0.004	0.004	0.011	0.038	0.013	0.019	0.013	0.041	0.032	0.019	0.019
MgO	0.04	0.11	0.27	0.87	0.23	0.2	0.14	0.05	0.43	0.78	0.58
CaO	0.65	1.01	0.65	2.09	1.84	0.91	0.86	0.4	1.7	1.16	0.67
Na <sub>2</sub> O	4.12	4.67	2.86	4.27	3.08	2.96	2.14	3.17	4.58	3.04	2.9
K <sub>2</sub> O	4.63	3.14	5.3	3.32	4.64	6.8	8.68	7.15	3.05	5.59	6
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.027	0.082	0.249	0.084	0.076	0.032	0.01	0.157	0.195	0.187
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.03	0.03	0.15	0.04	0.04	0.09	0.02	0.08	0.13	0.08
LOI	0.32	0.42	0.74	1.33	0.5	0.69	0.4	0.29	0.85	0.89	0.76
Total	101	99.89	98.61	99.71	98.24	100.8	100.3	100.9	100.3	99.35	98.62
V	6	8	7	22	8	14	9	6	14	16	16
Ba	55	652	6343	1828	2184	2567	3601	1097	1006	1624	954
Sr	39	302	514	683	644	458	452	214	541	408	257
Y	8	<2	2	4	<2	6	10	24	2	10	8
Zr	94	54	100	109	92	149	60	49	90	152	154
Rb	143	35	40	70	70	107	92	194	42	112	78
Nb	5	<1	1	2	<1	1	<1	27	3	4	4
Cs	<0.5	<0.5	0.9	0.7	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.7	<0.5
La	4.8	12.4	48	92.8	16.1	33.6	179	7.7	26.9	52.4	48.8
Ce	9.1	24	92.5	164	32.7	80.6	323	21	48.4	89	93.6
Pr	1.42	2.59	9.86	16.8	3.52	7.84	31.1	2.93	5.02	10.5	10.1
Nd	6.7	8	27.7	46.8	11.3	23.5	81.1	13.1	14.4	29.5	29.3
Sm	1.7	1.2	3.5	5.1	1.9	3.9	9.6	3.3	2	4.5	4.7
Eu	0.22	0.77	1.35	1.25	0.94	1.14	1.41	0.25	0.78	0.9	0.7
Gd	1.8	0.8	1.8	2.5	1.1	2.4	5.2	2.7	1.3	3.1	3
Tb	0.3	<0.1	0.2	0.2	0.1	0.3	0.6	0.5	0.1	0.4	0.4
Dy	1.8	0.4	0.7	0.9	0.4	1.4	2.4	3	0.6	1.8	1.6
Ho	0.4	<0.1	0.1	0.2	<0.1	0.3	0.4	0.5	<0.1	0.4	0.3
Er	1.2	0.2	0.3	0.5	0.2	0.8	1.1	1.6	0.3	1.1	0.8
Tm	0.18	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.1	0.15	0.28	<0.05	0.14	0.11
Yb	1.2	0.1	0.3	0.4	0.2	0.7	0.9	1.9	0.2	0.9	0.7
Lu	0.17	<0.04	0.05	0.05	<0.04	0.1	0.12	0.26	<0.04	0.13	0.11
Hf	3.9	2	2.6	2.4	2.7	4.1	1.5	8	2.1	3.7	4.3
Ta	<0.1	0.1	0.2	0.1	<0.1	0.1	0.1	4.4	0.1	0.3	0.2
Th	29.9	4.5	5.9	14.1	2.8	13.7	43.9	11.9	3.2	29	24.5
U	1.5	1.5	0.4	0.3	0.2	0.5	0.8	8	0.4	1.5	2.3

**Tabela 3** – Composição representativa dos elementos maiores (% de peso) e traços (ppm) de amostras selecionadas dos Metagranitos Equigranulares.



**Figura 11** – Diagramas de Harker com variação dos elementos maiores para os metagranitos do Complexo Encantadas.

Os metagranitos estudados mostram teores elevados e variáveis de elementos litófilos de grande raio iônico (LILE) como Rb, Ba, Sr e Ce. Os teores de elementos de alto potencial iônico (HFSE) como o Nb, Zr e Y são moderados a baixos.

Os teores de Rb são moderados e o comportamento deste elemento se caracteriza por uma distribuição pouco regular, com grande dispersão dos dados (**Figura 12A**). O decréscimo de Rb pode ser indicativo do fracionamento de biotita, que é a fase mineral com  $K_d$  mais compatível (Hanson, 1978; Mahood & Hildreth, 1983; Watson & Harrison, 1983). Entretanto, variações tão extremas para amostras com um mesmo teor em  $\text{SiO}_2$  poderiam ser causadas pela atuação de processos metamórficos. Como na tendência geral são rochas miloníticas, o elevado grau de recristalização da biotita ígnea e de K-feldspato pode ter afetado o teor original de Rb. A remobilização destes elementos é atribuída a circulação de fluídos metamórficos (Yardley, 1989).

Os teores de Ba são em geral muito elevados, e mostram-se uma distribuição pouco regular, alternando valores elevados e baixos caracterizando uma tendência pouco definida para o metagranito porfirítico. Os termos equigranulares mostram um empobrecimento relativo com relação a diferenciação, sugerindo o fracionamento de K-feldspato e/ou biotita no período inicial de diferenciação desta unidade magmática (**Figura 12B**).

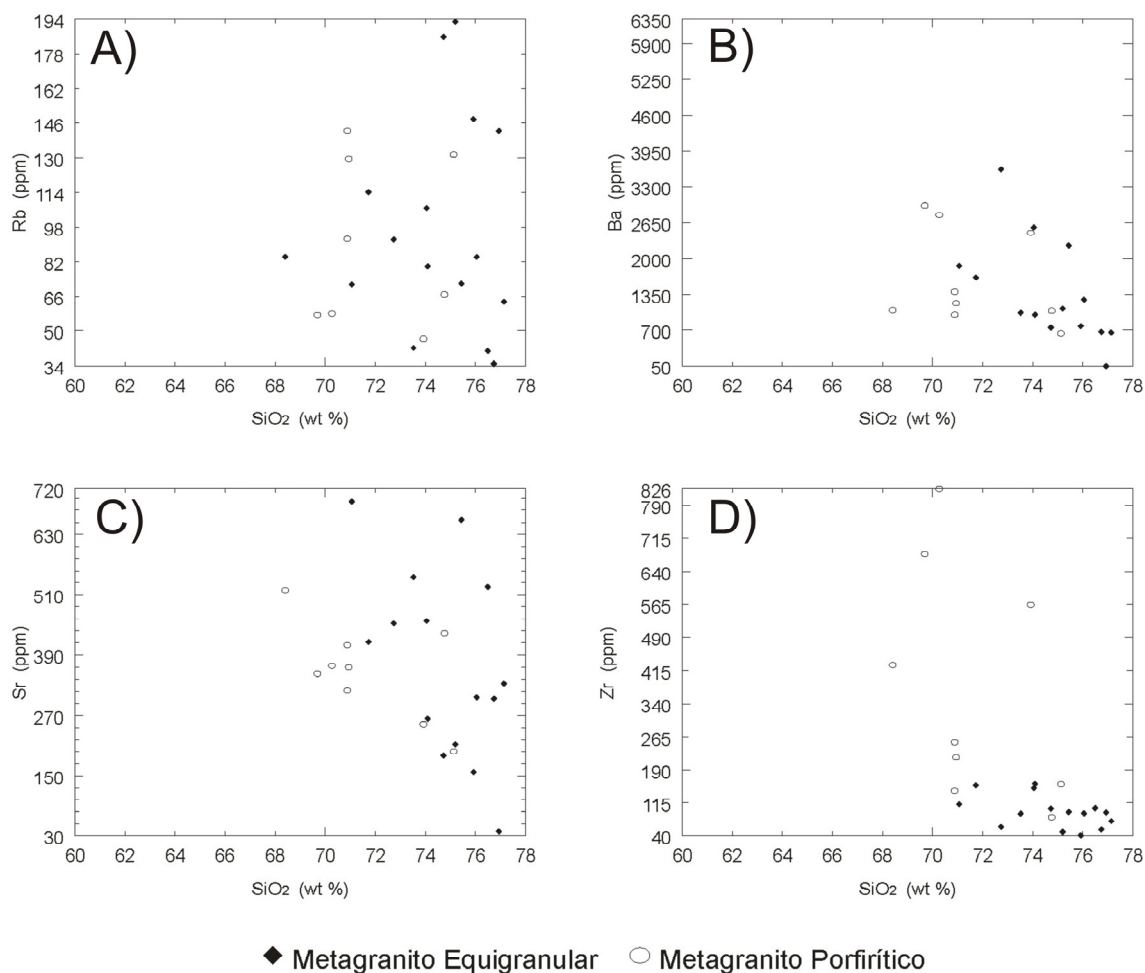
Os teores de Sr são elevados para rochas granitóides de afinidade cálcico-alcalinas, mostrando uma tendência ao empobrecimento com o aumento do teor de  $\text{SiO}_2$ , embora com grande dispersão para os termos equigranulares (**Figura 12C**). O decréscimo de Sr pode ser indicativo do fracionamento de plagioclásio e/ou biotita.

O granito porfirítico possui teores mais elevados de Zr, entretanto, nos dois metagranitos os teores de Zr diminuem com a diferenciação (aumento do teor de sílica), indicando o um fracionamento precoce de zircão (**Figura 12D**).

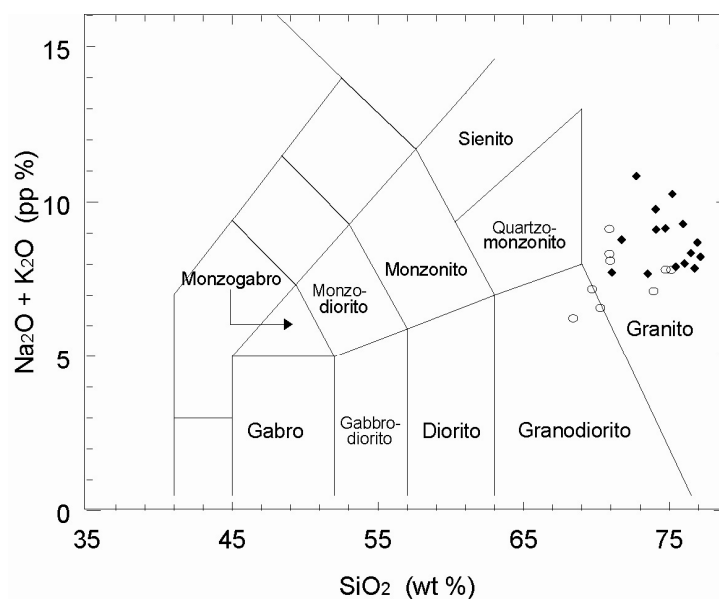
### 3.5.1 Série Magmática

A representação dos dados dos metagranitos do Complexo Encantadas no diagrama de álcali-sílica total (TAS) (Middlemost, 1994) confirma a composição subalcalina, variando de granodiorítica a monzogranítica para os termos porfiríticos e sienogranítica a monzogranítica para os termos equigranulares (**Figura 13**). A análise das relações alumina/cálcio-álcalis demonstra que os metagranitos são de natureza levemente peraluminosa (**Figura 14**).

A disposição das amostras no diagrama AFM, apresentado por Kuno (1968) e aprimorado por Irvine e Baragar (1971), caracteriza os metagranitos como da série cálcico-alcalina (**Figura 15**). A confirmação desta afinidade cálcico-alcalina também pode ser observada no diagrama de Jensen (1976) (**Figura 16**). A disposição das amostras no diagrama  $K_2O$  vs  $SiO_2$  (Le Maitre *et al.*, 1989) caracteriza os metagranitos do Gnaiss Encantadas como pertencentes a série cálcico-alcalina de médio a alto K (**Figura 17**). Algumas amostras têm teores de  $K_2O$  e Ba muito elevados compatíveis com rochas da série shoshonítica. Esta característica pode também representar uma limitação da coleta e análise da amostra em função das rochas serem finamente bandadas e fortemente deformadas.

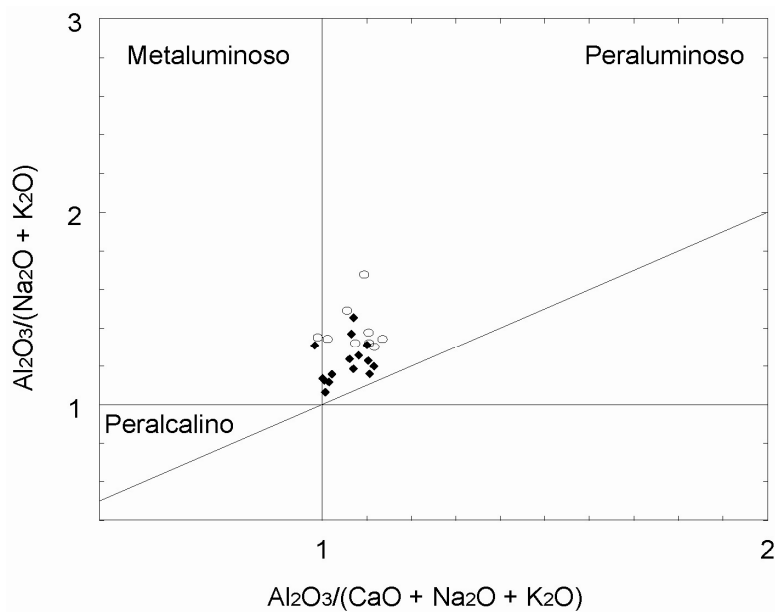


**Figura 12** – Diagramas de variação de Rb, Ba, Sr e Zr (ppm) versus  $SiO_2$  para os metagranitos do Complexo Encantadas.



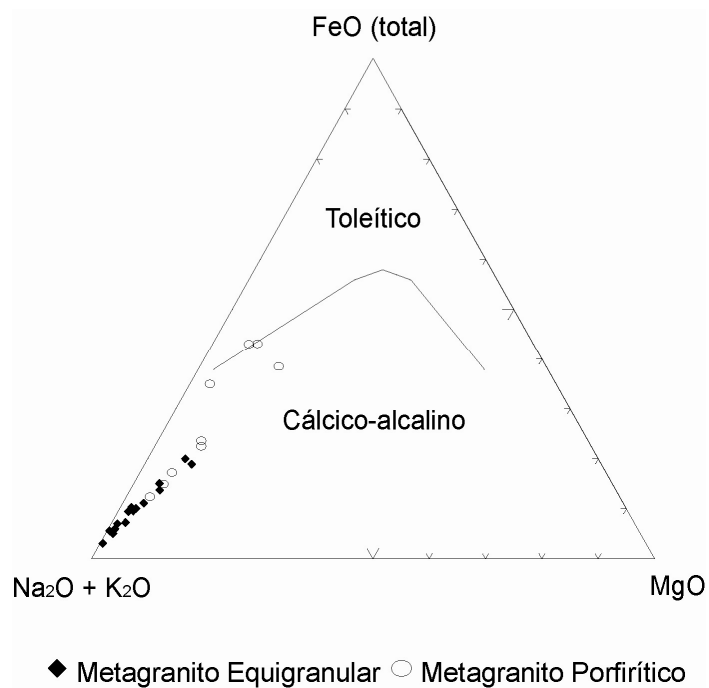
◆ Metagranito Equigranular ○ Metagranito Porfirítico

**Figura 13** – Diagrama álcalis total versus sílica (TAS) para os metagranitos do Complexo Encantadas.

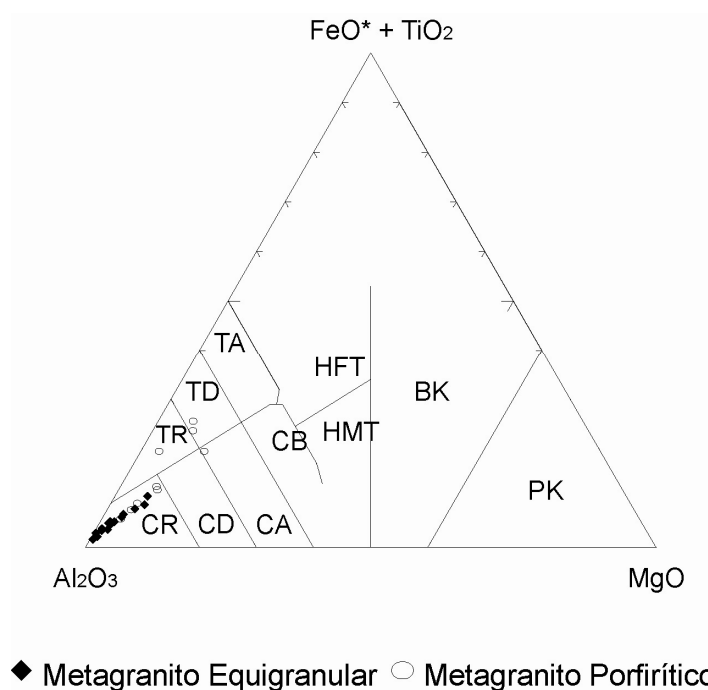


◆ Metagranito Equigranular ○ Metagranito Porfirítico

**Figura 14** – Diagrama de Shand para avaliação das relações entre álcalis e alumina dos metagranitos estudados.

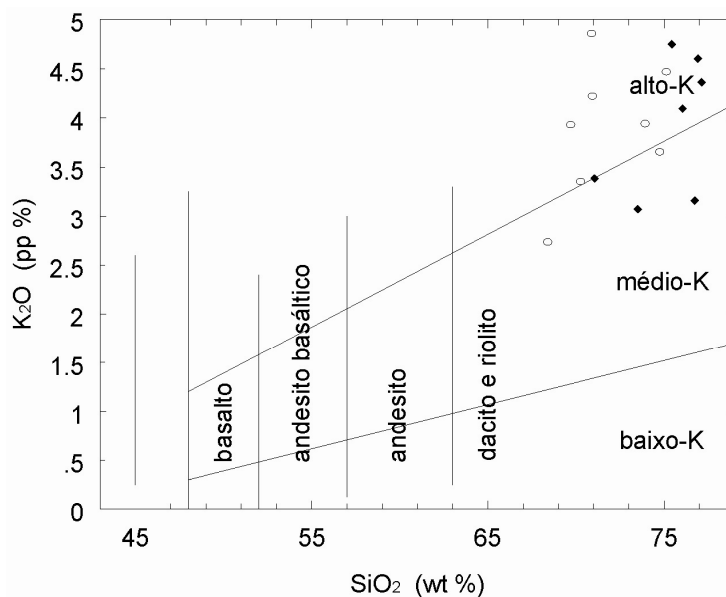


**Figura 15** – Disposição dos metagranitos no diagrama AFM de Irvine & Baragar (1971).



**Figura 16** – Disposição dos metagranitos no diagrama de Jensen (1976).





◆ Metaleucogranito ○ Metagranito Porfírico

**Figura 17** – Diagrama  $K_2O$  com relação a  $SiO_2$  (Le Maitre, 1989) para classificação das rochas cálcico-alcálicas.

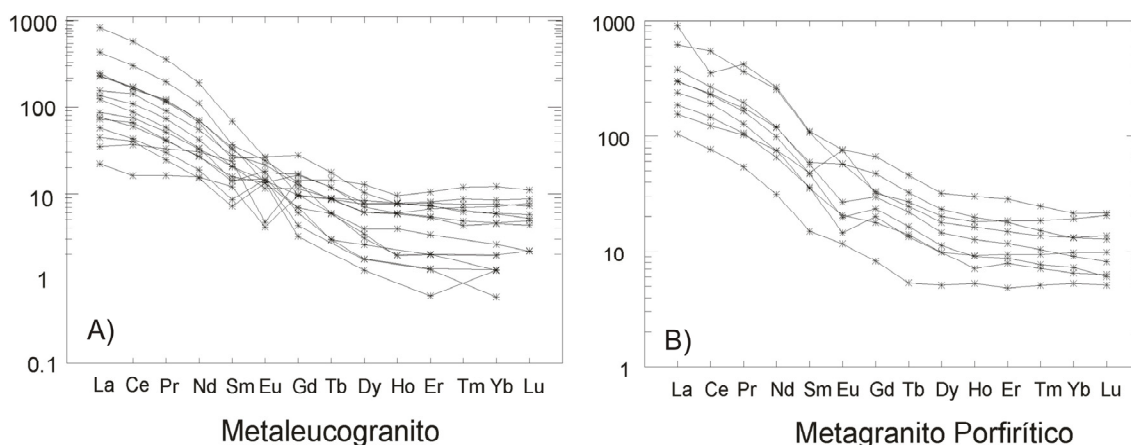
### 3.5.2 Elementos Terras Raras

Os elementos terras raras das amostras dos metagranitos normalizados para valores condríticos, mostraram um padrão similar, caracterizando um conjunto homogêneo de unidades magmáticas (**Figuras 18A e 18B**). Os dois granitos mostram padrões muito semelhantes, entretanto, os termos equigranulares mostram maior variação composicional. As amostras mostram um padrão caracterizado pelo enriquecimento de elementos terras raras leves em relação aos elementos terras raras pesados. Os metagranitos mostram padrões comuns para rochas cálcico-alcálicas, com forte enriquecimento de ETRL e empobrecimento de ETRP, sugerindo uma participação crustal no processo de formação dos magmas ácidos. As anomalias do Eu são negativas e moderadas podendo ser resultado do fracionamento do plagioclásio. Algumas poucas amostras apresentam anomalias positivas de Eu, sugerindo a segregação e concentração localizada de plagioclásio.

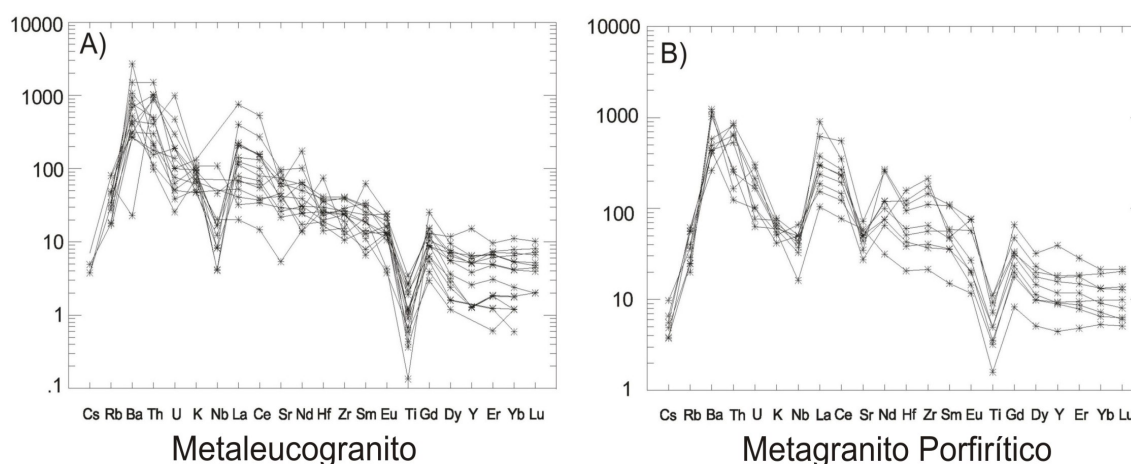
### 3.5.3 Diagramas Multi-elementares

Os padrões obtidos nos diagramas multi-elementares normalizados pelos valores do MORB para os metagranitos do Complexo Encantadas mostram-se muito similares (**Figuras 19A e 19B**). Os metagranitos têm teores em geral elevados para elementos do tipo LILE e elementos terras raras leves. As principais diferenças estão

relacionadas aos teores ligeiramente mais elevados de LILE como Rb, Ba, U, Th e K, as anomalias mais negativas de Nb e Ti e os teores mais baixos de ETR pesadas do metagranito equigranular em comparação como porfirítico. As anomalias de Th e Ba indicam a participação crustal no processo de geração dos magmas, enquanto que as anomalias do Nb/La e Ti/Gd sugerem que a geração dos magmas ocorreu a partir de fontes geradas a partir de um manto modificado por um evento de subducção precedente. A presença de baixas razões La/Nb em todas as litologias dos metagranitos é uma feição sugestiva de magmatismo gerado em zonas de subducção ou a partir de protólitos com esta característica como indicado por Thompson *et al.* (1984).



**Figura 18** – Abundância dos ETR dos metagranitos equigranulares (A) e porfiríticos (B) do Complexo Encantadas normalizados pelo condrito (Sun, 1982).

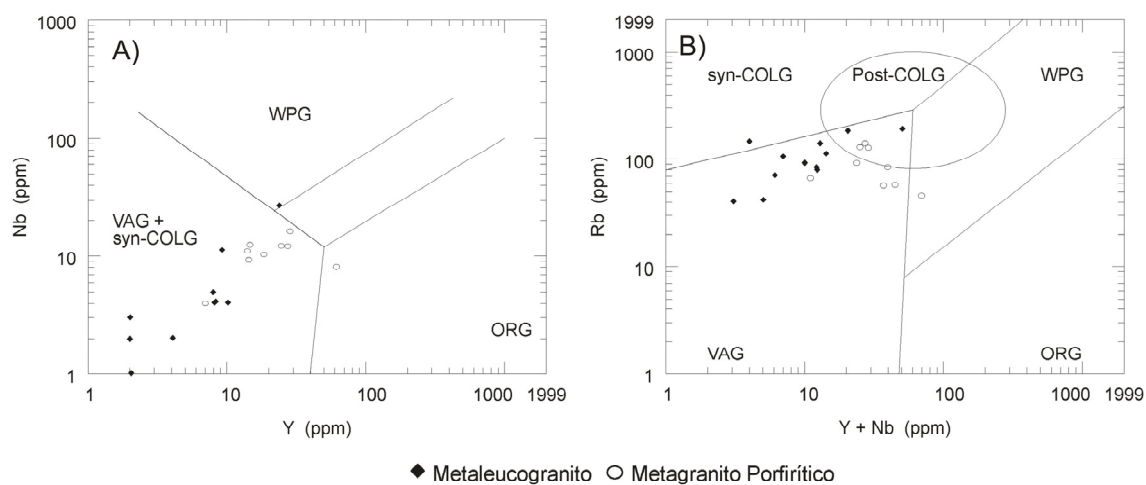


**Figura 19** – Diagramas multi-elementares contendo elementos traços normalizados pelo condrito (Sun, 1982) para os metagranitos estudados.

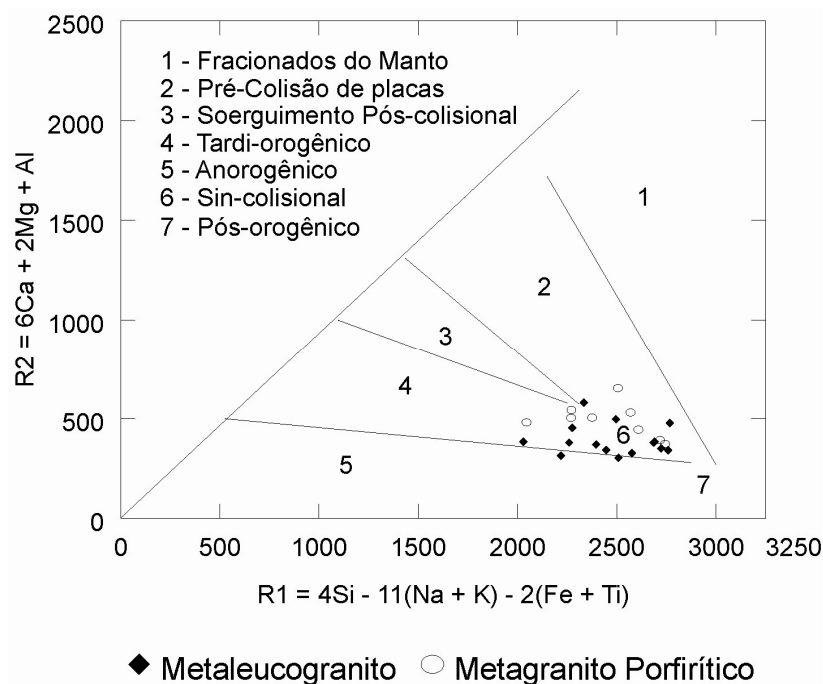
### 3.5.4 Ambiente Geotectônico

Para a determinação do ambiente geotectônico de geração dos metagranitos do complexo, utilizaram-se os diagramas de discriminação de Pearce *et al.* (1984) e Pearce (1996). A representação dos dados no diagrama Nb vs Y formam uma tendência linear definida com as amostras caindo no campo dos granitos de arco vulcânico e granitos sin-colisionais (**Figura 20A**). No diagrama Rb vs (Y+Nb) as amostras dos metagranitos caem de modo dominante no campo dos granitos de arco vulcânico com algumas amostras dispondo-se no campo dos granitos pós-colisionais de Pearce (1996) (**Figura 20B**).

A disposição das amostras no diagrama R1-R2 (De La Roche & Leterrier, 1973), modificado por Batchelor e Bowden 1985), formaram dois *trends* subparalelos e alinhados dentro do campo geotectônico dos granitos sin-colisionais, sugerindo que as amostras analisadas evoluíram em um ambiente de colisão (**Figura 21**).



**Figura 20** – Disposição dos metagranitos porfiríticos e equigranulares nos diagramas Nb x Y e Rb x Y+Nb de Pearce *et al.* (1984) com a subdivisão dos campos dos granitos intra-placa (WPG), arco vulcânico (VAG), sin-colisionais (SYN-COLG), cadeias Oceânicas (ORG) e campo circular definido para granitóides pós-colisionais (Pearce, 1996).



**Figura 21** – Disposição dos metagranitos estudados no diagrama  $R_1$ - $R_2$  (Batchelor and Bowden 1985).

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os dados de campo e petrográficos permitiram reconhecer dois tipos de metagranitos no Complexo Encantadas: granodioritos a monzogranitos porfíricos e sieno a monzogranitos equigranulares. A composição dos metagranitos mostra sua afinidade magmática cálcico-alcalina médio a alto-K, seu caráter levemente peraluminoso e teores relativamente elevados de álcalis principalmente nos termos equigranulares. O desenvolvimento de tendências distintas e subparalelas nos diagramas de Harker sugere que os metagranitos representam unidades petrológicas distintas. Os alinhamentos observados sugerem a atuação de processos de fracionamento e segregação mineral predominantemente de plagioclásio, biotita, zircão, apatita e subordinadamente de K-feldspato.

Os metagranitos possuem enriquecimento em ETRL e empobrecimento em ETRP como é comumente observado em rochas de arco magmático evoluído. Os valores mais elevados LILE e de ETRL e mais baixos de ETRP sugerem uma participação crustal mais efetiva nos processos de geração do metagranito equigranular. As anomalias negativas de Nb e Ti nos diagramas multielementares e as relações entre

Nb, Y e Rb mostradas nos diagramas da figura 17 sugerem que os magmas geradores das rochas graníticas sejam provenientes de fontes afetadas por subducção, atestando a vinculação destas rochas com ambientes de arco magmático maduro, como indicado adicionalmente pelo caráter médio a alto-K dos granitóides.

A integração dos dados petrográficos, estruturais e geoquímicos sugere que os metagranitos representam magmas de afinidade cálcico-alcálica médio a alto-K, derivados de magmatismo mantélico com contaminação crustal ou são produtos da fusão parcial dos Gnaisses Encantadas ou de uma fonte semelhante durante o metamorfismo M1. Os dados estruturais indicam que os granitóides são sin-D1 e, portanto, de acordo com os dados geocronológicos disponíveis, sua idade situa-se próxima de 2 Ga, que é a idade presumível do metamorfismo de facies anfíbolito. A ausência do bandamento  $Sb_1$  e a presença de uma foliação milonítica nos metagranitóides é sugestiva de que os mesmos foram gerados em momento tardio com relação ao pico do metamorfismo regional – M1, interpretado aqui como um evento orogênico, provavelmente colisional. Este evento mais tardio poderia estar marcando a evolução final do magmatismo que gerou o Gnaisse Encantadas, descrita por Philipp *et al* (2008), ou seja, a porção mais matura da evolução de um arco Paleoproterozóico. O magmatismo que gerou os metagranitóides estudados pode também ser relacionado a um processo de colisão do arco de margem continental Paleoproterozóico, contra uma microplaca continental ou cráton.

Os metagranitos porfiríticos e equigranulares do Complexo Encantadas em Santana da Boa Vista, Rio Grande do Sul, juntamente com os gnaisses dioríticos, tonalíticos e trondhjemiticos do mesmo complexo, descritos por Philipp *et al.* (2008), constituem associação magmática de ambiente de margem continental ativa, cujo magmatismo está associado a fontes mantélicas metassomatizadas por fluídos derivados de subducção litosférica durante o Paleoproterozóico.

#### 4. REFERÊNCIAS

- Batchelor, R.A. & Bowden, P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, **48**:43-55.
- Bitencourt, M. F. & Nardi, L. V. S. 2004. The role of xenoliths and flow segregation in the genesis and evolution of the Paleoproterozoic Itapema Granite, a crustally derived magmas of shoshonitic affinity from southern Brazil. *Lithos*, **73**:1-19.
- Carvalho, P.F. de. 1932. Reconhecimento geológico do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro, *Boletim do Instituto Geológico de Mineração Brasileira*, **66**: 1-72.
- Chemale, Jr.F. 2000. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (eds.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, p. 13-52.
- De la Roche, H. & LeTerrier, J. 1973. Transposition du tetraedre mineralogique de Yoder et Tilley dans un diagramme chimique de classification des roches basaltique. *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser.*, **276**:3115-3118.
- Fernandes, L.A.; Tommasi, A. & Porcher, C.C. 1992. Deformation patterns in the Southern Brazilian branch of the Dom Feliciano Belt: a reappraisal. *Journal of South American Earth Sciences*, **5**(1):77-96.
- Hanson, G.N. 1978. The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **38**:26-43.
- Hartmann, L.A.; Leite, J.A.D.; Silva, L.C.; Remus, M.V.D.; McNaughton, N.J.; Groves, D.I.; Fletcher, I.R.; Santos, J.C.O. & Vasconcellos, M. A.Z. 2000. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Australian Journal Earth Sciences*, **47**: 829-844.
- Hartmann, L. A. ; Santos, João Orestes S ; Leite, J. A. D. ; Porcher, C. C. ; McNaughton, Neal J. 2003. Metamorphic evolution and U-Pb zircon SHRIMP geochronology of the Belizário ultramafic amphibolite, Encantadas Complex, southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, **75** (3): 393-403.
- Humphries, S.E. 1984. The mobility of the rare earth elements in the crust. In: Henderson P. (ed.). *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, p. 315-341.
- Irvine, T.N. & Baragar, W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **8**:523-548.
- Jensen, L.S. 1976. A new cationic plot for classifying subalkalic volcanic rocks. *Ontario Div. Mines, Miscel. Paper*, **6**: 22 p.

- Jost, H. & Bitencourt, M.F. 1980. Estratigrafia e tectônica de uma fração da Faixa de Dobramentos Tijucas no Rio Grande do Sul. *Acta Geológica Leopoldensia*, São Leopoldo. **11**(7): 27-59.
- Kuno, H. 1968. Differentiation of basaltic magmas. In: Hess, H.H & Poldervaart, A. (ed.). *Basalts: The Poldervaart treatise on rocks of basaltic composition*. v.2. Interscience. New York, p. 623-688.
- Lameyre, J. & Bowden, P. 1982. Plutonic rock type series: discrimination various granitoids series and related rocks. *Jour. Volc. Geother. Res*, **14**:169-186.
- Leinz, V. & H. Pinagel. 1945. Estanho e Tungstênio no Rio Grande do Sul. *Boletim da Divisão de Fomento a Produção Mineral*, DNPM, **70**: 1-80.
- Le Maitre, R.W. 1989. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Oxford, Blackwell, 193 p.
- Machado, R; Fragoso Cesar, A.R.S. & Faccini, U.F. 1987. O Domo de Santana (RS): domo gnáissico manteado ou figura de interferência tipo domo e bacia. Atas. In: III, SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Curitiba, **SBG**, 1:167-182.
- Mahood, G. & Hildreth, W. 1983. Large partition coefficients for trace elements in high-silica rhyolites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**:11-30.
- Middlemost, E.A.K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, **37**:215-224.
- Passchier, C.W, & Trouw, R. 2005. *Microtectonics*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 366p.
- Pearce, J.A. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C. J. & Norry, (ed.). *Continental basalts and mantle xenoliths*. Nantwich, Chiva, p. 230-249.
- Pearce, J.A.; Harris, N.B.W. & Tindle, A.G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrology*, **25**:956-983.
- Pearce, J.A. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, **19**(4):120-125.
- Philipp, R.P. & Viero, A.P. 1995. Geologia dos anfíbolitos associados ao Gnaiss Encantadas. Abstracts. In: V SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, *Anais*, Gramado, p. 67-68.
- Philipp, R.P.; Lusa, M.; Nardi, L.V.S. 2008. Geochemistry and petrology of dioritic, tonalitic and trondhjemitic gneisses from Encantadas Complex, Santana da Boa Vista, southernmost Brazil: Paleoproterozoic continental-arc magmatism. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **80**(4): 735-748.

- Porcher, C.C. & Fernandes, L.A.D. 1990. Relações Embasamento/“Cobertura” na porção Ocidental do Cinturão Dom Feliciano: um esboço estrutural. *Pesquisas*, **17** (1-2):72-84.
- Remus, M.V.D.; Philipp, R.P.; Faccini, U.F. & Junges, S.L. 1990. Contribuição ao estudo geológico-estrutural dos Gnaisses Encantadas e das relações com as supracrustais Porongos na região de Santana da Boa Vista-RS. Anais, 36. Congresso Brasileiro de Geologia, Natal, **SBG**, **2**:2358-2370.
- Ribeiro, M.; Bocchi, P. A.; Figueiredo F°, P. M. & Tessari, R. I. 1966. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, RS. In: *Boletim Da Divisão De Fomento E Produção Mineral*, DNPM, Rio de Janeiro, **127**:1-232.
- Soliani Jr., E. 1986. *Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica*. São Paulo, 425p. Tese de Doutorado em Geociências., Universidade de São Paulo.
- Streckeisen, A. L. 1976. To each plutonic rock, its proper name. *Earth Science Review*, **12**:1-33.
- Sun S.S. 1982. Chemical Composition and Origin of the Earth's Primitive Mantle. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **46**:179-182.
- Thompson, R.N.; Morrinson, M.A.; Hendry, G.L. & Parry, S.J. 2000. An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. *Phil. Trans. R. Soc. London*, **A310**:549-590.
- UFRGS. 1987. *Mapeamento geológico 1:50.000 da Folha Santana da Boa Vista*. RS, Trabalho de Graduação do Curso de Geologia, IG, UFRGS, (inédito).
- Yardley, B. W.D. 1989. *An introduction to Metamorphic Petrology*. Longman Scientific and Technical, London, England, UK, 248p.



**ANEXO-A: Carta de aceite do artigo submetido à Revista Brasileira de Geociências.**

**Data:** Thu, 30 Apr 2009 14:31:28 -0300 [30-04-2009 14:31:28 BRT] **De:** Alberto Pio Fiori <fiori@ufpr.br> **Para:** Ruy Paulo Phillipp <ruy.phillipp@ufrgs.br> **Assunto:** [RBG] Agradecimento pela Submissão

Ruy Paulo Phillipp,

Agradecemos a submissão do seu manuscrito "GEOQUÍMICA E PETROLOGIA DOS METAGRANITOS PORFIRÍDICOS E EQUIGRANULARES DO COMPLEXO ENCANTADAS, SANTANA DA BOA VISTA, RS: magmatismo sin-colisional associado ao metamorfismo de um arco de margem continental ativa do Paleoproterozóico" para Revista Brasileira de Geociências. Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:

<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/rbg/author/submission/14093>

Login: phillipp

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este email. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Alberto Pio Fiori Revista  
Brasileira de Geociências

Revista Brasileira de Geociências <http://www.ser.ufpr.br/rbg>

**ANEXO-B: Artigo *Petrology of dioritic, tonalitic and trondhjemitic gneisses from Encantadas Complex, Santana da Boa Vista, southernmost Brazil: Paleoproterozoic continental-arc magmatism*, Philipp et al. (2008).**



## Petrology of dioritic, tonalitic and trondhjemitic gneisses from Encantadas Complex, Santana da Boa Vista, southernmost Brazil: Paleoproterozoic continental-arc magmatism

RUY P. PHILIPP<sup>1</sup>, MARCELO LUSA<sup>2</sup> and LAURO V.S. NARDI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências  
Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (CPGq), Av. Bento Gonçalves, 9.500, Bairro Agronomia  
91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências  
Av. Bento Gonçalves, 9.500, Bairro Agronomia, 91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil

*Manuscript received on February 26, 2007; accepted for publication on July 18, 2008;  
contributed by LAURO V.S. NARDI\**

### ABSTRACT

The Encantadas Complex is a unit composed of dioritic, tonalitic and trondhjemitic gneisses with minor hornblende. This complex is intruded by granites of Neoproterozoic age. Major and trace element data indicate metaluminous to slightly peraluminous composition related to the medium-K calc-alkaline series. Compositional parameters are consistent with a common evolution from less differentiated magmas, probably through fractional crystallization. The orthogneisses show  $La_N/Yb_N$  ratios from 10 to 50,  $K_2O/Na_2O$  varying from 1.1 to 3.0, Y contents from 3 to 39 ppm, Yb from 0.3 to 3.7, and Lu with contents in the range 0.06 and 0.54 ppm. Such geochemical features are similar to those of Archaean tonalitic rocks and are usually described in rocks formed by partial melting of mafic rocks under high-pressure conditions leaving an eclogitic residue. The presence of diorites and hornblendites, associated to tonalitic and trondhjemitic gneisses suggests, on the other hand, that tonalitic magmas could be formed by hornblende-controlled fractionation of hydrous basaltic magmas. Tonalitic gneisses show U-Pb SHRIMP zircon age of  $2,263 \pm 6$  Ma for igneous crystallization and  $2,045 \pm 10$  Ma for the metamorphism. The geochemical parameters, tectonic and geochronological features of Encantadas Complex are consistent with magmas derived from mantle metasomatized by subduction-related fluids in a continental-arc.

**Key words:** continental arch, crustal evolution, Encantadas gneisses, Paleoproterozoic, Petrology, TTG.

### INTRODUCTION

The orthogneisses of Santana da Boa Vista, southernmost Brazil were described by Ribeiro et al. (1966) and related to the central part of Santana da Boa Vista Dome by Jost and Bitencourt (1980) (Fig. 1). This dome is a N30°E elongate structure, approximately 50 km long and 8 to 15 km wide (Fig. 2).

The orthogneisses referred to as Encantadas Complex, are metatonalites and metatrondhjemitic with minor amphibolites and meta-ultramafic hornblende-rich rocks of Paleoproterozoic age. The complex is crosscut by monzogranites and syenogranites of Neoproterozoic age (R. Machado, A.R.S. Fragozo Cesar and U. Faccini, unpublished data, Remus et al. 1990, Porcher and Fernandes 1990).

The contact of Encantadas Complex gneisses with metasedimentary and metavolcanic rocks of the Porongos Metamorphic Complex is marked by low-angle ductile

\*Member Academia Brasileira de Ciências

Correspondence to: Ruy Paulo Philipp

E-mail: ruy.philipp@ufrgs.br

Present address: Rua Ângelo Possebon, 105/203, 92310-140 Canoas, RS, Brasil

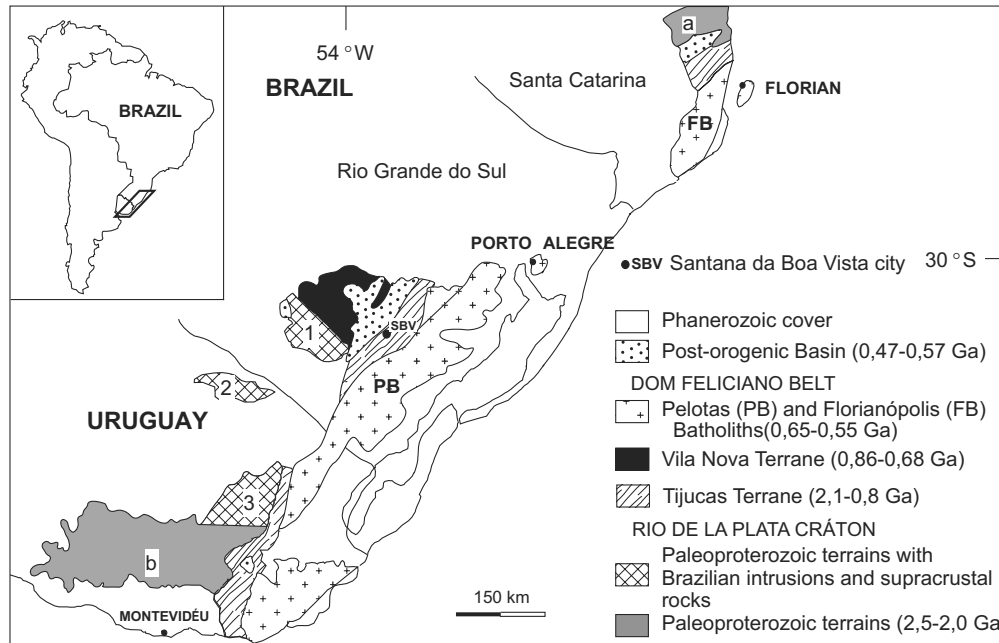


Fig. 1 – Main geotectonic units from southern Brazil and Uruguay. a = Luis Alves Terrane, b = Florida Terrane, 1 = Taquarembó Terrane, 2 = Rivera Terrane, 3 = Valentines Terrane. Modified from Chemale Jr. (2000).

tile shear zones which generate mylonites and modify the stratigraphic relations. Both units are part of the Tijucas Terrane, central portion of Dom Feliciano Belt in Rio Grande do Sul (Hartmann et al. 2007) (Fig. 1).

The studied orthogneisses show composite banding ( $Sb_1$ ) which alternates trondhjemite and dioritic irregular bands with continuous and regular millimeter-sized banding attributed to metamorphic segregation. This banding is deformed by a low-angle event which generated  $F_2$  recumbent folding and  $Sb_2$  axial surface.

A third folding event is represented by normal and non-cylindrical folds oriented  $N35-55^\circ E$  with sub vertical axial surface.  $F_3$  axes are deformed generating smooth and open asymmetric folds oriented  $N20-40^\circ W$  ( $F_4$ ). The interaction of the last two events formed type 1 interference pattern which led to the Santana da Boa Vista structural dome (Machado et al., unpublished data). Porcher and Fernandes (1990) and Fernandes et al. (1992) interpreted the structural evolution of this complex and the shear zone development, as coeval, and related it to tectonic escape during the Brasiliano continental collision.

Dioritic gneiss and hornblendites form tabular bodies with thickness varying from 10 cm to 100 m.

Their mineral parageneses record several metamorphic and deformational events that have affected them (R.P. Philipp and A.P. Viero, unpublished data). The older one is an orogenic regional metamorphism of medium to upper amphibolite facies, followed by a new metamorphic peak related with the intrusion of syntectonic Neoproterozoic granitoids. Granitoid emplacement is controlled by sub-horizontal ductile shear zones, which form a high-temperature mylonite fabric.

Later deformational phases of greenschist to lower-amphibolite facies are overprinted also in the supracrustal sequences of Porongos Group (Remus et al. 1990).

The Encantadas Complex gneisses are among the most important basement units of Paleoproterozoic age in the Sul-rio-grandense Shield. Recent geochemical, geochronological and structural researches indicate that this stratigraphic unit is NW-SE elongated and extends to southwest nearby Pinheiro Machado town (Philipp 1998) and to northeast towards the cities of Arroio dos Ratos (Leite et al. 1998) and Porto Alegre (Philipp and Campos 2004).

The main purpose of this paper is to characterize the geochemistry of the Encantadas Complex ortho-

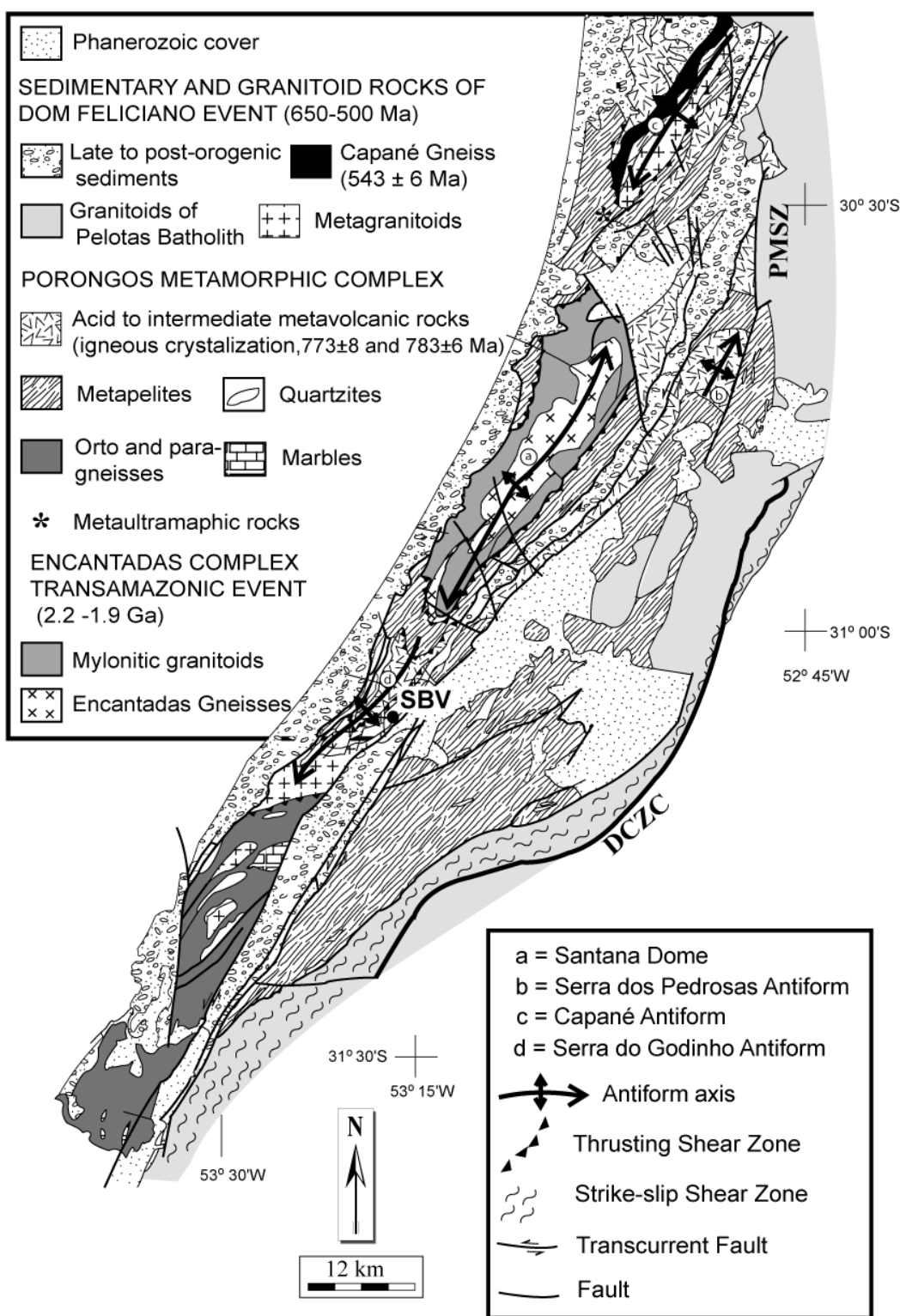


Fig. 2 – Geological map of the central region of Sul-Rio-Grandense Shield, with emphasis in the Santana da Boa Vista Dome and Encantadas Complex rocks. Modified from Chemale Jr. (2000).

gneisses in order to discuss the probable sources and tectonic setting of their protoliths, as well as to investigate the evolution of metamorphism by studying microstructures and their relationship with tectonic foliations.

#### PREVIOUS WORK

Gneissic rocks in Santana da Boa Vista region were first described by Carvalho (1932) and Leinz and Pinagel (1945). Orthogneisses were considered medium-grade and included in the Encantadas Formation by Ribeiro et al. (1966). Based on field and structural data, Jost and Bitencourt (1980) recognized the gneissic sequence as forming a double plunging antiform structure and named it the Santana Dome.

Fernandes et al. (1992) defined the tectonic contact of gneissic rocks with metavolcanic and metasedimentary sequences of Porongos Metamorphic Complex as a low-angle ductile shear zone related to tectonic escape of the Brasiliano continental collision. Machado et al. (unpublished data) recognized part of the gneissic sequence as mylonite granitoids intruded by monzogranites and syenogranites.

Tabular amphibolite bodies were described as metamorphosed mafic dykes (Remus et al. 1990), in which Philipp and Viero (unpublished data) identified three different metamorphic events: (i) a thermal phase preceding the sub-horizontal shear zones, (ii) a second one related to mylonite formation in ductile shear zones, and (iii) a late phase associated with high-angle ductile and ductile-ruptile shear zones.

U-Pb isotope determinations by SHRIMP in igneous zircon from the tonalitic gneisses yielded ages of  $2,263 \pm 18$  Ma and  $2,363 \pm 6$  Ma, whilst metamorphic zircons show ages of  $2,045 \pm 10$  Ma and  $2,021 \pm 11$  Ma (Chemale Jr. 2000). A younger event of isotope resetting with age of  $803 \pm 14$  Ma was identified by Chemale Jr. (2000). U-Pb data on zircon from metamorphosed magnesian metabasalts or pyroxenites were interpreted by Hartmann et al. (2003) as confirming the ages of igneous protoliths and allowed the determination of  $M_1$  and  $M_2$  regional metamorphism age as  $1989 \pm 21$  Ma and  $702 \pm 21$  Ma, respectively. These authors related the  $M_1$  and  $M_2$  metamorphic events to the Encantadas and Camboriu orogenies of Transamazonian Cycle, and the Neoproterozoic one to the São Gabriel orogeny.

#### GEOLOGICAL RELATIONS

The stratigraphic relationship of Encantadas Complex units was based mostly on intrusion relationship. Tonalitic and trondhjemitic gneisses, as well as dioritic gneisses, are the oldest units followed by tabular intrusions of metagranodiorites and metamonzogranites with porphyritic and equigranular textures (Fig. 3). The youngest unit is constituted of tabular bodies of equigranular metaleucogranites with thickness of up to a few meters.

Two low-angle deformational events,  $D_1$  and  $D_2$ , control the structural framework.  $D_1$  is observed mostly in tonalitic, trondhjemitic and dioritic gneiss and generates regular and discontinuous millimeter-sized banding, which is caused by metamorphic segregation.

$D_2$  leads to recumbent folding ( $F_2$ ) associated with axial surface foliation (Fig. 4).  $D_3$  is a transcurrent event, which refolds the previously formed structure and generates the  $F_3$  pattern, characterized by normal and cylindrical folding with  $N35-55^\circ E$  direction and sub vertical axial plane. The youngest deformation leads to the formation of asymmetric, open and smooth  $F_4$  folds, with axial planes oriented along  $N20-40^\circ W$ .

Tonalitic gneisses occupy most of the studied area, whilst the trondhjemitic compositions predominate in the northern part of Santana Dome, where they form an elongated ( $N10-20^\circ E$ ) body approximately 28 km long and 8 km wide (Fig. 3).

Dioritic gneisses are exposed along two linear trends oriented NE-SW mostly in the eastern part of Santana Dome (Fig. 3). The tabular or lensiform bodies are deformed and are concordant with the metamorphic banding of tonalitic and trondhjemitic gneisses. When occurring along ductile shear zones show banding and mylonite texture with amphibole porphyroclasts. The smaller lenses are 5 to 15 cm thick whilst the larger ones can reach up to 2 m of thickness. Mylonite deformation is more intensive in the smaller dioritic gneisses bodies. In the highly-deformed zones they occur as disrupted, very elongated bands with thickness ranging from 2 to 5 cm and length of 3 to 5 m, which suggests high stretching rates.

The hornblende bodies are less abundant and the major exposition show dimensions of 1.3 km and 150-350 m. The contacts are tectonic, and the ultramafic

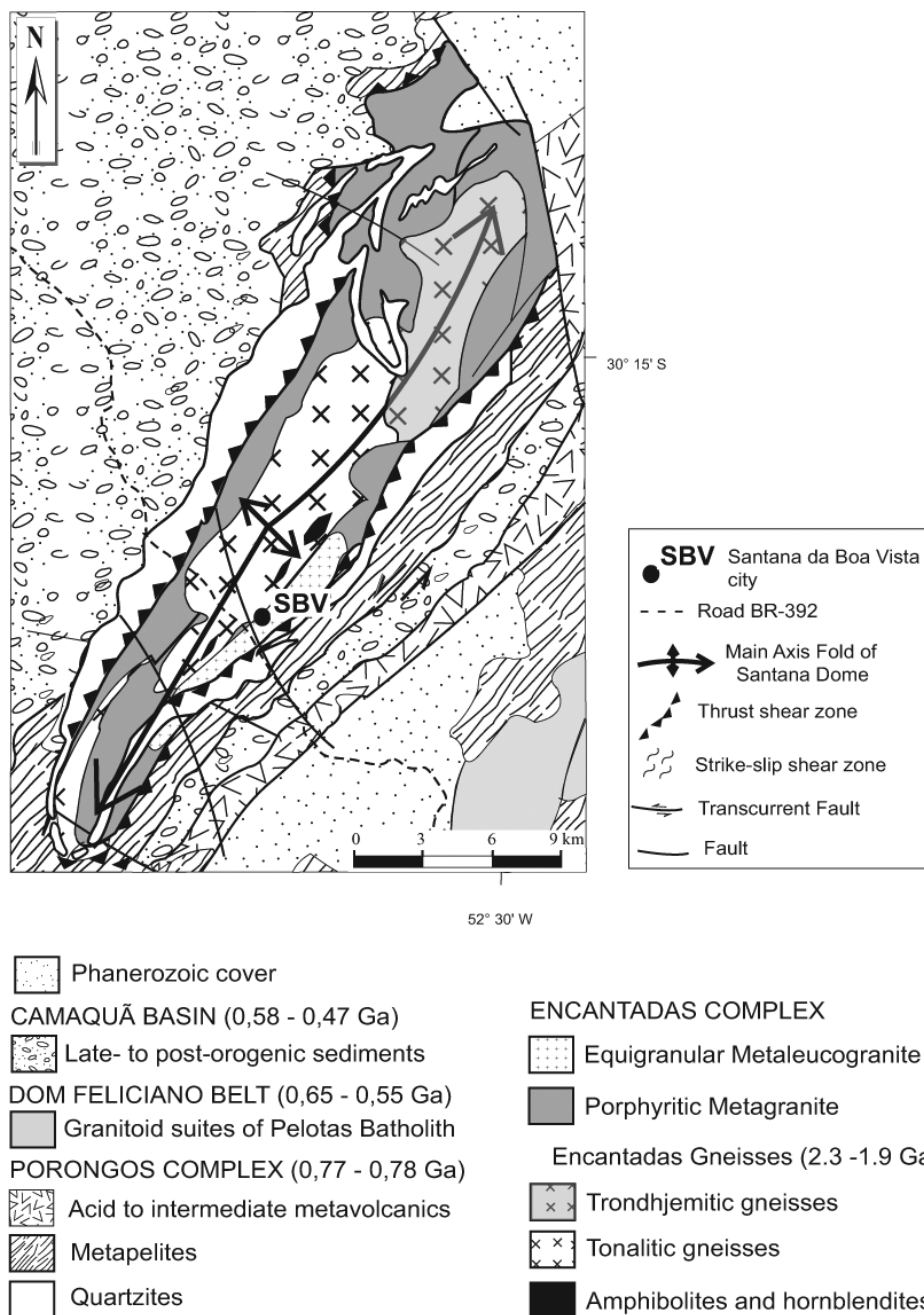


Fig. 3 – Geological map of Encantadas Complex.

body is involved by the low-angle mylonite foliation overprinted in the orthogneisses.

Porphyritic metagranodiorites and metamonzogranites are exposed as two aligned (N10-15°E) bodies in the northern part of the dome, with about 24 km of length and 5 to 8 km wide. They show blastoporphyratic texture with 1 to 5 cm long K-feldspar porphyroclasts

engulfed in a granoblastic and lepidoblastic groundmass made of quartz, feldspar and biotite. Although the field-relations of metagranitoids and orthogneisses are not exposed, the main foliation showed by metagranitoids is concordant with  $Sb_1$  banding and, is affected by  $F_2$  folding, suggesting that the emplacement of the metagranitoids is coeval with the  $D_1$  event.



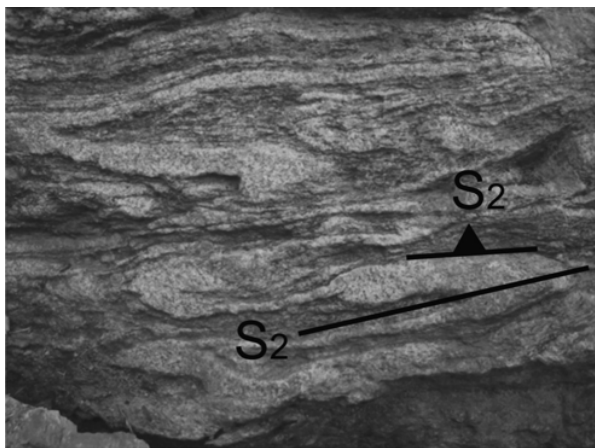


Fig. 4 –  $F_2$  recumbent folding affecting the tonalitic gneiss banding and the leucogranite intrusions.

Metaleucogranites form tabular bodies with thicknesses varying from 0.05 to 10 m. They are strongly deformed and show discordant intrusive contacts with the regional banding of the tonalitic and trondhjemitic gneisses.

Like the previously described metagranitoids, the metaleucogranites show a foliation concordant with  $Sb_1$  and they are affected by  $F_2$  folding, which suggests that they are coeval with  $D_1$ .

#### PETROGRAPHY

##### TONALITIC GNEISS

Tonalitic gneisses are dark grey with banded fabric, alternating millimeter-size layers of quartz and plagioclase with mafic ones containing biotite and amphibole. The felsic layers show interlobate granoblastic and polygonal heterogranular medium-grained textures (0.2 to 0.5 mm) (Figs. 4 and 5). Mafic layers show lepidoblastic to nematoblastic textures and are also medium grained (0.2-0.8 mm). Along high-deformation  $D_2$  zones, the banding is more regular and thinner. Locally, the banded structure disappears and turns to homogeneous. Tonalitic gneisses have composition varying from tonalite to quartz diorite, with biotite, hornblende, allanite, apatite, zircon and Fe-Ti oxides (Fig. 6). Epidote and chlorite are secondary phases found mostly filling veins, replacing plagioclase and mafic minerals.

Calcic plagioclase occurs generally in the metamorphic groundmass and forms rare prismatic euhedral to

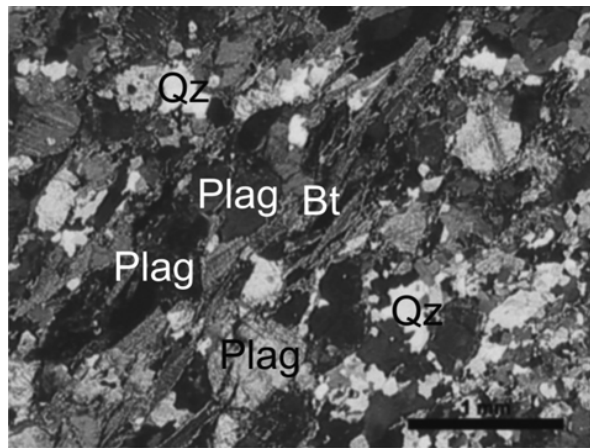


Fig. 5 – Incipient banding formed in tonalitic gneiss by alternation of mafic (biotite-rich) and felsic layers of quartz and plagioclase.

subhedral porphyroclasts with compositional zoning and size from 0.8 to 1.5 mm. Intergranular contacts are sutured with metamorphic recrystallization along the borders. Metamorphic plagioclase crystals, 0.2 to 0.5 mm long, shows polygonal to equidimensional forms, with sharp and interlobate contacts. Quartz is generally recrystallized, but can, rarely, form elongated sub grains with strong undulose extinction and size from 0.5 to 1 mm. Biotite is subhedral with greenish brown to reddish brown pleochroism. Hornblende forms subhedral grains with sizes from 0.3 to 0.8 mm.

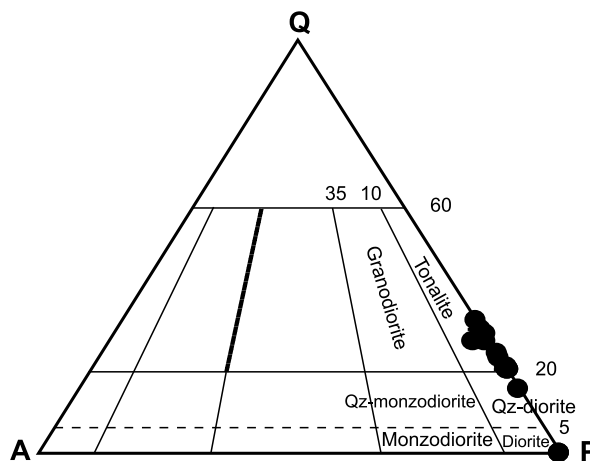


Fig. 6 – Modal classification of Encantadas Complex orthogneisses in the QAP diagram (Streckeisen 1976).

The  $Sb_1$  banding containing the metamorphic mineral assemblage calcic plagioclase + quartz + biotite + hornblende with the development of granoblastic

polygonal textures characterizes medium-amphibolite facies conditions.

#### TRONDHJEMITIC GNEISS

Trondhjemitic gneisses are light grey and show incipient banding, alternating felsic with mafic layers where biotite is the major constituent. Their textures are similar to those observed in the tonalitic gneisses. In the highly deformed zones biotite is oriented, while quartz and plagioclase grains are recrystallized. Microcline, allanite, zircon, apatite and Fe-Ti oxides are common accessory phases. Chlorite, epidote and muscovite are secondary retrometamorphic phases.

Plagioclase is the major phase of trondhjemitic gneisses, sometimes occurring as euhedral to subhedral porphyroclasts with sizes from 0.4 to 1.0 mm. The contacts are sutured with small-recrystallized grains along the porphyroclasts. Metamorphic plagioclase shows polygonal and equidimensional subidioblastic forms, straight to interlobate contacts, and sizes from 0.4 to 1.0 mm. Quartz occurs as polygonal to equidimensional metamorphic grains, subidioblastic, with dimensions varying from 0.2 to 0.5 mm. Microcline can occur as metamorphic polygonal or equidimensional grains, and more rarely as subhedral porphyroclasts with sizes from 2 to 3 mm. The metamorphic grains show straight to interlobate contacts and sizes from 0.1 to 0.4 mm.

Biotite occurs as interstitial grains in the felsic layers and as mineral aggregates in the mafic ones. Muscovite is rare and can replace plagioclase and K-feldspar.

The metamorphic assemblage calcic plagioclase + quartz + biotite is characteristic of medium amphibolite facies conditions.

#### DIORITIC GNEISS AND HORNBLENDITES

The dioritic gneisses are foliated with orientation of plagioclase and hornblende grains and show medium to coarse grained nematoblastic texture. Heterogranular granoblastic interlobated textures are more localized and defined by plagioclase, diopside, opaque minerals and, sometimes, epidote and clinozoisite. The main mineralogical constituents are hornblende (42 to 65 vol%), Na-rich plagioclase (38-58 vol%), diopside (2 to 10 vol%), titanite (0.5 vol%) and opaque minerals (0.5 to 2.5 vol%). Along highly deformed zones there are mylonites with a

banded structure alternating mafic and plagioclase layers with thickness from 0.2 to 2 mm. Their texture is porphyroclastic with stretched amphibole and plagioclase grains with dimensions around 0.5 to 2 mm.

The hornblende shows massive structure and a coarse-grained (5-40 mm) equigranular hypidiomorphic texture in some cases evolving to pegmatoid. Amphibole composes 90 to 95 vol% of the rock and is subhedral to euhedral with size varying from 0.5 to 4 cm. Plagioclase (4 to 9 vol%) occurs as subhedral to anhedral grains with dimensions from 5 to 10 mm. Veins of granitic composition with thickness of 1 to 20 mm are locally concentrated. They show massive structure and equigranular hypidiomorphic texture.

#### GEOCHEMISTRY AND PETROGENESIS

Twelve samples from the Encantadas Gneisses were selected for major and trace elements determinations (Tables I, II and III). The determinations were performed in Activation Laboratories, Canada, by X-ray Fluorescence for major elements and by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) for trace elements.

The studied orthogneisses show SiO<sub>2</sub> contents ranging from 56.5% to 70 wt%, corresponding to diorite, quartz diorites, tonalites and trondhjemites. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents are relatively high, 14 to 17 wt%, like those of tonalitic associations of active continental margins (Arth 1979).

LIL elements show relatively high contents, particularly Ba and Sr, whilst the Zr contents vary generally from 100 to 200 ppm (Fig. 7). Rb shows a wide dispersion in compositional diagrams and relatively low contents, which can be caused by metamorphic fluids. The decreasing Rb contents in more differentiated trondhjemites could be caused by biotite fractionation, however, the overprinted metamorphism probably modified the igneous patterns of highly mobile elements, like Rb, Cs, U, and Th (Fig. 7). Sr contents (449-693 ppm) are relatively high, but commonly observed in Paleoproterozoic and Achaean tonalitic associations (Condie 2005) (Fig. 7). Zr, Nb, Ta, and Hf contents are relatively low as can be expected in tonalitic magmas produced by partial crustal melting of amphibolites or eclogites in Paleoproterozoic settings (Rapp et al. 1991, Martin 1993).

The studied gneisses have subalkaline character

**TABLE I**  
**Chemical composition of Encantadas Complex gneisses – major elements.**

Sample	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO(t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
2A	65.16	15.81	4.73	0.072	2.05	4.22	4.08	1.93	0.477	0.23	0.74	99.5
4A	63.59	15.65	6.17	0.112	2.1	4.63	3.64	2.41	0.573	0.23	0.61	99.72
5A	67.91	15.81	3.24	0.036	1.2	3.31	3.79	2.91	0.481	0.11	0.58	99.37
6A	5.47	16.56	8.14	0.122	4.21	6.56	3.44	2.65	0.721	0.17	0.77	99.82
7A	64.86	16.77	4.27	0.062	1.92	3.37	4.91	1.96	0.469	0.27	0.73	99.6
11B	56.74	14.91	9.8	0.21	4.38	6.65	3.4	1.76	0.765	0.21	0.86	99.68
13	70.03	15.58	2.4	0.035	1.15	3.72	4.24	1.4	0.265	0.09	0.64	99.56
14C	69.22	15.51	3.05	0.046	1.35	3.55	4.14	2.08	0.338	0.16	0.51	99.96
15	66.35	16.81	3.28	0.038	1.94	3.66	3.85	2.19	0.346	0.11	0.88	99.46
16A	58.74	16	7.73	0.111	3.94	4.78	2.25	3.3	0.713	0.26	1.85	99.67
19A	67.09	14.19	5.47	0.054	1.74	2.53	3.41	3.13	0.789	0.31	0.79	99.52
20	68.7	15.64	3.25	0.045	1.29	2.98	4.31	2.33	0.368	0.15	0.9	99.95

**TABLE II**  
**Chemical composition of Encantadas Complex gneisses – trace elements.**

Sample	Sc	Be	V	Ba	Sr	Y	Zr	Ga	Rb	Nb	Cs	Hf	Ta	Th	U
2A	8	2	70	761	610	13	121	14	48	5	1.1	3.2	0.2	3.4	0.4
4A	14	2	95	869	589	25	175	15	45	11	<0.5	4.6	0.9	12.8	0.7
5A	2	2	34	913	449	6	105	14	28	8	0.6	2.8	0.3	6.1	0.2
6A	15	1	105	1322	515	28	113	16	52	10	0.8	3.2	0.7	2.8	0.5
7A	7	3	58	811	693	11	228	18	67	8	2	503	0.4	9.1	0.6
11B	25	2	178	419	459	39	69	16	36	10	<0.5	2.3	0.5	0.8	0.1
13	3	<1	23	455	469	3	107	13	31	3	0.9	3.1	0.1	6.7	0.2
14C	5	2	45	1276	626	7	118	13	40	4	0.8	3.1	0.2	9.5	0.4
15	6	<1	38	408	457	5	97	15	31	2	0.6	2.6	0.1	0.5	0.1
16A	20	1	139	621	636	20	174	14	60	7	1.3	4.7	0.4	7.2	0.3
19A	12	2	60	1480	540	24	358	16	64	10	1.4	8.5	0.4	12	0.6
20	4	1	37	1054	543	6	124	14	35	4	<0.5	3.4	0.2	9.1	0.3

**TABLE III**  
**Chemical composition of Encantadas Complex gneisses – rare earth elements.**

Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
2A	37.7	72.6	8.5	30	5	1.71	3.9	0.5	2.2	0.4	1.1	0.15	1	0.15
4A	41	77	8.89	31.3	5.8	1.54	5.3	0.7	4.1	0.8	2.4	0.38	2.5	0.35
5A	30	55.4	5.83	18.6	2.6	1.02	2	0.2	1	0.2	0.5	0.07	0.5	0.07
6A	29.3	66.3	8.68	32.1	6.4	1.71	5.8	0.9	4.8	0.9	2.7	0.4	2.6	0.38
7A	32.7	68.2	8.03	27.3	4.5	1.16	3.4	0.4	2	0.4	1	0.14	0.8	0.12
11B	17.2	45.5	6.88	30.8	8.2	2.27	7.6	1.2	7	1.4	4.1	0.59	3.7	0.54
13	28.3	54.7	5.92	18.6	2.6	0.83	1.8	0.2	0.7	0.1	0.4	<0.05	0.3	0.05
14C	31.6	60.7	6.82	22.5	3.2	1.28	2.3	0.3	1.2	0.2	0.5	0.08	0.6	0.07
15	8.3	16.4	2.02	7.5	1.6	0.62	1.4	0.2	1	0.2	0.5	0.07	0.4	0.06
16A	32.9	69.4	8.47	31.4	6	1.47	5	0.7	3.7	0.7	2	0.29	1.8	0.25
19A	109	215	25.2	84.3	12.1	2.61	8.9	1	4.7	0.8	2.2	0.32	1.9	0.26
20	30.6	59.3	6.71	21.8	3.2	1.03	2.3	0.2	1.1	0.2	0.5	0.07	0.4	0.07

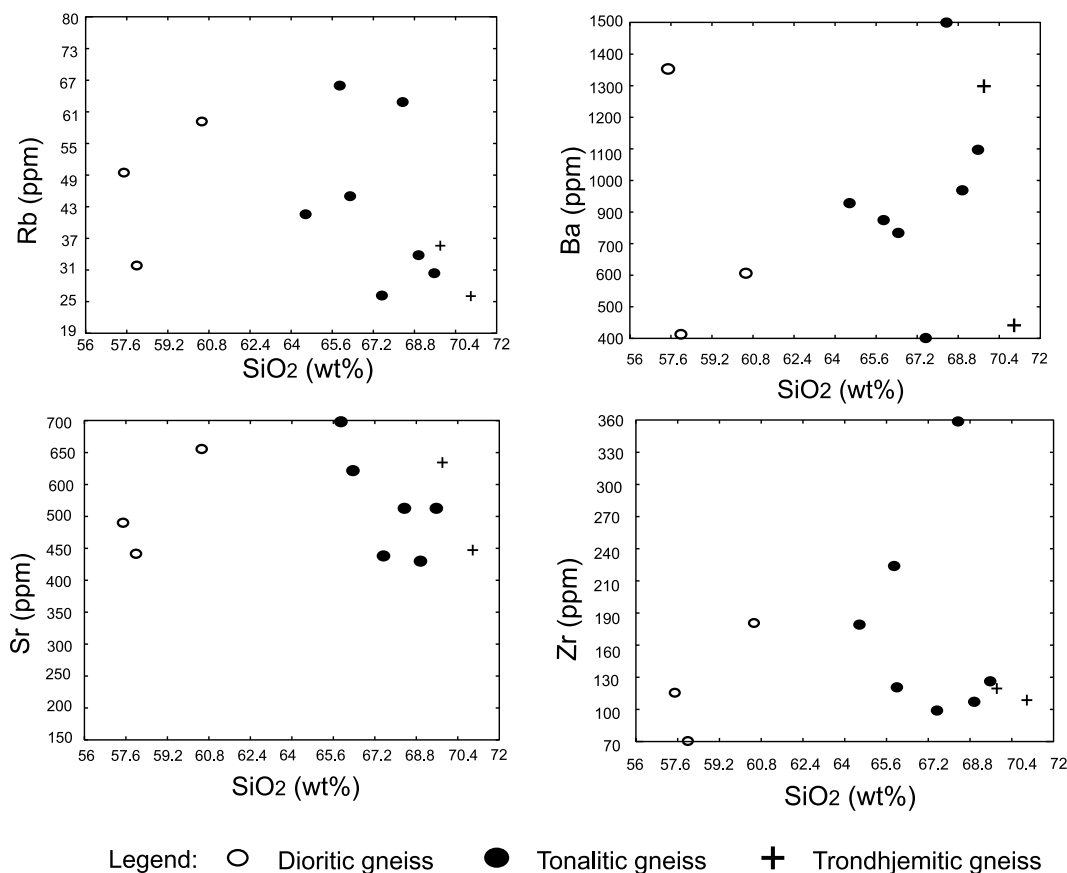


Fig. 7 – Variation diagrams for Rb, Ba, Sr and Zr against SiO<sub>2</sub> as the differentiation index, for the orthogneisses from Encantadas Complex.

defined by relatively low alkali content in the TAS diagram and are metaluminous to slightly peraluminous (Figs. 8 and 9). The non-tholeiitic affinity of these rocks is indicated by the AFM diagram (Fig. 10) and by the (Fe<sub>tot</sub>+Ti)-Al-Mg classification diagram (Jensen 1976) (Fig. 11). These diagrams are used based on the assumption that most samples represent crystallized magmatic liquids; those which are interpreted as cumulates were excluded. The K<sub>2</sub>O contents in relation to SiO<sub>2</sub> classify them as medium-K subalkaline rocks as proposed by Le Maitre (1989) (Fig. 12).

The tonalitic and trondhjemitic gneisses of Encantadas Complex are compositionally classified as a TTG association, following the concept adopted by Condie (2005), since they show Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents at 70 wt% SiO<sub>2</sub> larger than 15 wt%, Mg # [(100MgO)/(FeO<sub>T</sub>+MgO)] varying from 20 to 40, Sr > 300 ppm, Y < 20 ppm, Yb < 1.8 ppm and Nb < 10 ppm. The Y contents are in fact lower than 10 ppm at 70 wt% SiO<sub>2</sub>, which is very

typical of Achaean tonalites, whilst the Proterozoic ones have contents around 15, as referred by Condie (2005).

K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratios are around 0.55 in the Encantadas tonalites which are comparable to those of tonalites of Achaean or Proterozoic ages, whilst those of Proterozoic age have higher ratios close to 0.68 (Condie 2005).

According to the discriminating parameters suggested by Condie (2005) for TTG, adakites and their differentiated products, and sanukitoids (Lopez et al. 2005), the tonalitic association that originated the Encantadas gneisses is a TTG association typical of Achaean or Proterozoic ages.

REE patterns normalized against chondrite values show decreasing of HREE in the more differentiated rocks (Fig. 12). The patterns are approximately parallel, suggesting that dioritic and tonalitic rocks can be co-magmatic or cogenetic. Dioritic gneisses show La<sub>N</sub> values close to 100 and Yb<sub>N</sub> close to 10, whilst tonalites and trondhjemites have La<sub>N</sub> around 100 and Yb<sub>N</sub> vary-

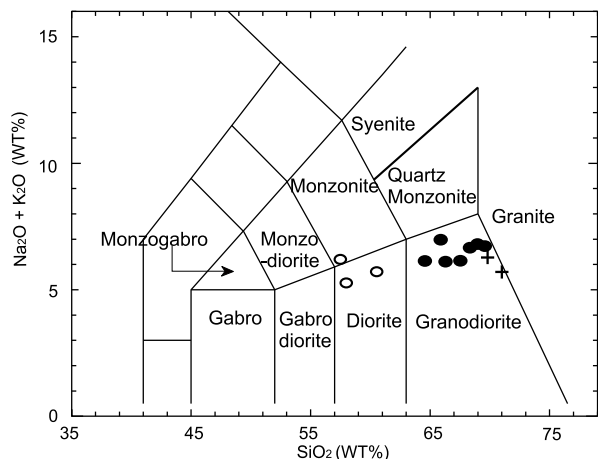


Fig. 8 – TAS diagram. Symbols as in Figure 7.

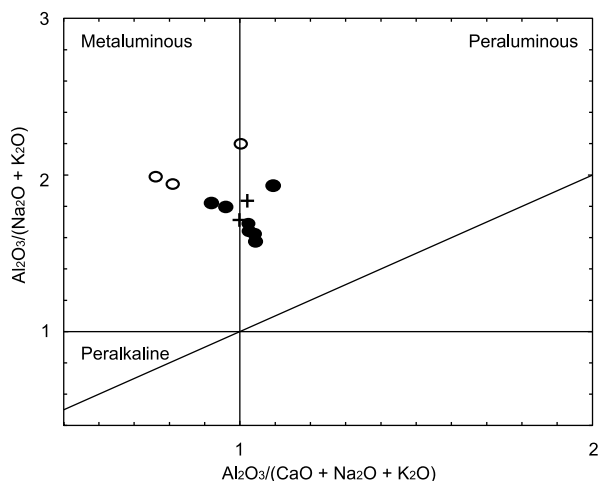


Fig. 9 – SHAND's classification. Symbols as in Figure 7.

ing from 4 to 2, which leads to  $La_N/Yb_N$  values around 25 to 50. REE patterns of Encantadas tonalitic gneisses are similar to those referred by Rapp et al. (1991) and Condie (2005) as typical of high-pressure melts equilibrated with eclogitic residue like Achaean tonalites. The lack of negative Eu-anomalies indicates low abundance of plagioclase as a fractionated or residual phase. The highly fractionated REE patterns require the presence of garnet in the residuum or as a fractionated phase (Martin 1993).

Spidergrams of gneisses from Encantadas Complex samples normalized against primitive mantle values show enrichment of LIL and LREE elements and sharp negative anomalies of Nb, Ti, and U, like continental-arc magmatism (Fig. 14).

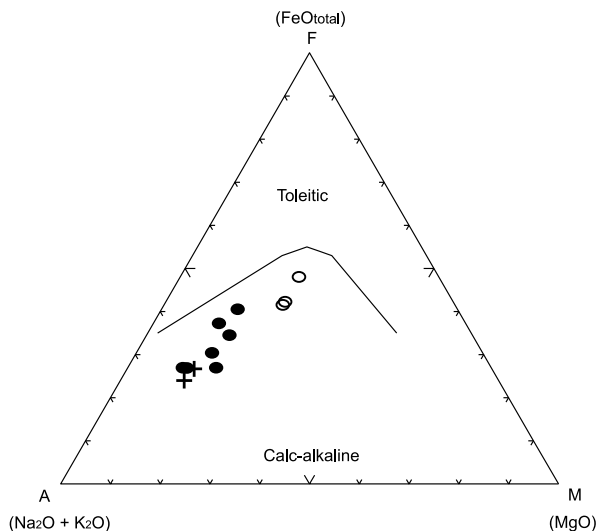


Fig. 10 – AFM diagram (Irvine and Baragar 1971) for the Encantadas Complex orthogneisses. Symbols as in Figure 7.

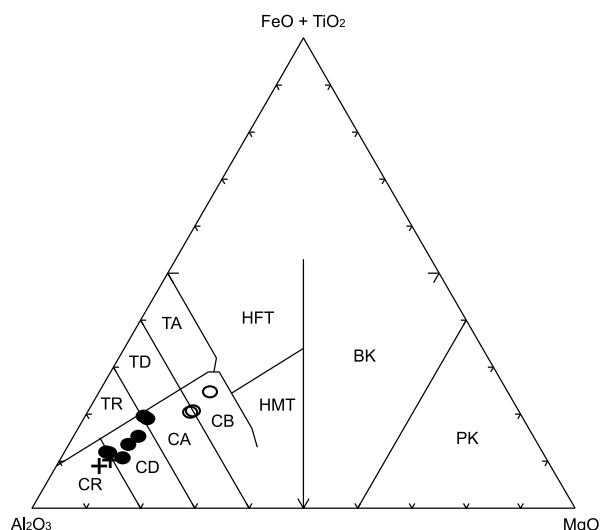


Fig. 11 – Encantadas Complex orthogneisses plot in the Jensen's diagram (1976). Symbols as in Figure 7.

#### MAGMATIC SOURCES AND SETTINGS

Tonalitic and trondhjemitic Encantadas gneisses show patterns in the diagrams suggested by Pearce et al. (1984) with strong negative anomalies for U, Rb, Nb, and Ti. The two former are probably explained by the high mobility of both elements during metamorphism, whilst Nb and Ti anomalies indicate that these magmas were produced from mantle sources modified by metasomatism associated to lithosphere subduction (Thompson et al. 1984).

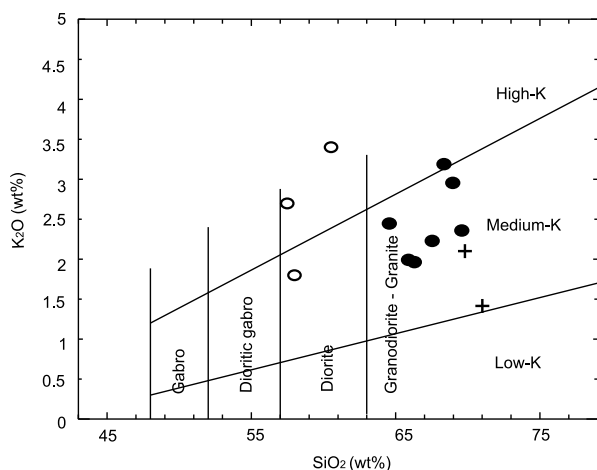


Fig. 12 – Encantadas Complex orthogneisses in the  $K_2O \times SiO_2$  diagram (Le Maitre 1989). Symbols as in Figure 7.

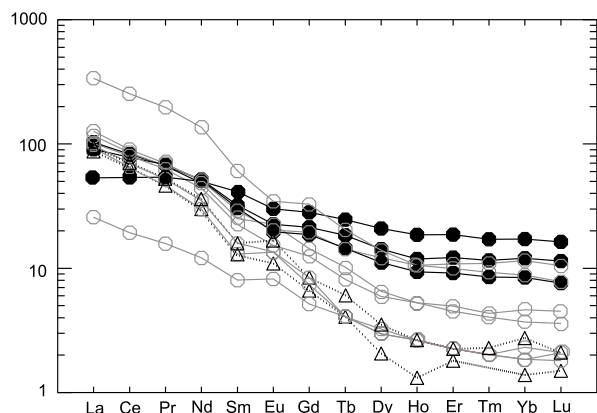


Fig. 13 – Encantadas Complex orthogneiss REE patterns normalized against chondritic values.

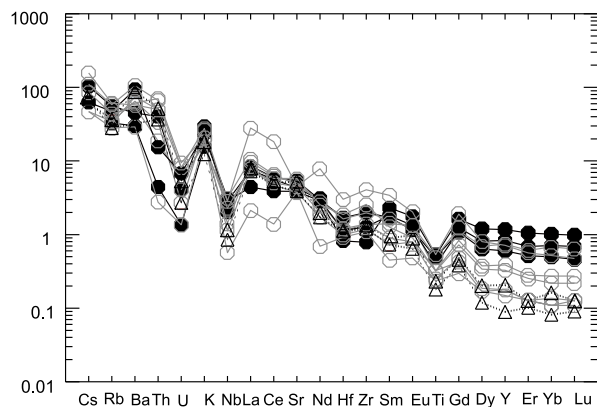


Fig. 14 – Encantadas Complex gneiss spiderdiagrams for incompatible elements. Legend: ● Dioritic gneiss; ○ Tonalitic gneiss; △ Trondhjemitic gneiss.

The major element parameters R1-R2 (Batchelor and Bowden 1985) and the Y versus Nb and Rb versus (Y + Nb) diagrams (Pearce et al. 1984, Pearce 1996) points to the similarity of the studied rocks with magmatic arc associations (Figs. 15 and 16).

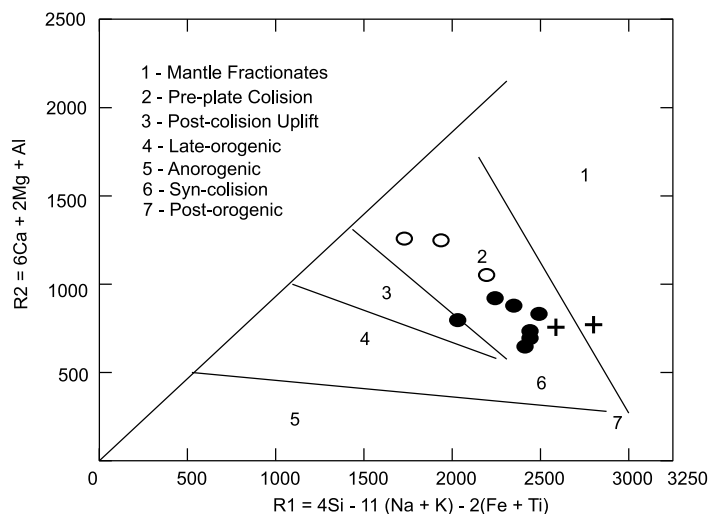
Condie (2005) admits that “adakites are probably slab melts, whilst high-Al TTG may be produced by partial melting of the lower crust in arc systems or in the root zones of oceanic plateaus”. High-Al TTG, that means tonalitic rocks with  $Al_2O_3 > 15$  wt% (Rapp et al. 1991, Condie 2005), from Encantadas Gneisses could be produced by partial melting of amphibolites or eclogites under high pressures (depths from 40 to 80 km), since their Sr and HREE contents indicate the presence of garnet and the lack of plagioclase in the residuum or fractionation of hornblende. The relatively high Nb/Ta ratios (20-25) of Encantadas tonalitic gneisses are comparable to those of tonalite derived from less differentiated mantle melts or high-pressure melts equilibrated with eclogitic residue (Condie 2005).

TTG associations can also be formed by differentiation of komatiitic or adakitic mantle-derived magmas. The available data do not allow opting between these two possible origins for Encantadas Complex magmas. As far as the tectonic setting is concerned, the root zones of oceanic plateaus are ruled out for the Encantadas Complex, since there is no evidence of oceanic magmatic associations in this context. An arc continental system seems an adequate model for the available data.

CONCLUSIONS

Dioritic, tonalitic and trondhjemitic protoliths of Encantadas Gneisses are typical high-AL TTG associations according to the criteria suggested by Condie (2005), which are commonly found in active continental margins.

Most compositional parameters and particularly the association of mafic and tonalitic rocks are consistent with a common evolution from less differentiated magmas, probably through fractional crystallization, since hornblendites and dioritic gneisses that occur in the same association could represent cumulates. However, the relationship of tonalitic and dioritic rocks should be discussed with a better geochemical and isotopic data set, not yet available. This Paleoproterozoic magmatism is



Legenda: ○ Dioritic gneiss ● Tonalitic gneiss + Trondhjemitic gneiss

Fig. 15 – Plot R1-R2 (Debon and Le Fort 1983) for the Encantadas Complex orthogneisses.

metaluminous to slightly peraluminous and can be related to a medium-K calc-alkaline magmatic series.

Trace and major element patterns of tonalitic gneisses, such as  $La_N/Yb_N$  and  $K_2O/Na_2O$  ratios and Y, Yb and Lu contents, are very similar to Archaean tonalites as discussed by Condie (2005), which is coherent with the Paleoproterozoic ages found by U/Th determinations in zircons (Chemale Jr. 2000) and Rb-Sr in whole rocks samples (Soliani Jr. 1986).

The compositional features of Encantadas tonalitic gneisses are usually described in rocks formed by partial melting of mafic rocks under high-pressure conditions, leaving an eclogitic residue (Rapp et al. 1991, Condie 2005). However, the presence of abundant dioritic rocks and hornblendites, which may represent cumulates, associated to tonalitic and trondhjemitic Encantadas gneisses suggest that tonalitic magmas could be formed by hornblende-controlled fractionation of hydrous basaltic magmas as discussed by Rapp et al. (1991). The medium to low-K calc-alkaline affinity, as well as the high LREE/Nb ratios, and the patterns illustrated in Pearce et al. (1984) diagrams are consistent with continental arc magmatism.

The geochemical parameters, as well as the tectonic and geochronological features, of dioritic, tonalitic and trondhjemitic gneisses from Encantadas Complex are consistent with a continental-arc magmatism of Paleoproterozoic age. So that, the Paleoproterozoic age in

southernmost Brazil was a period of vertical accretion, with magmas derived from a mantle metasomatized by subduction-related fluids.

#### ACKNOWLEDGMENTS

We are indebted to the Instituto de Geociências of UFRGS for support for field work and, to prof. Luis Fernando De Ros for making available the microscope for digital photomicrographs. This research was supported by Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Project Programa de Apoio a Núcleos de Excelência (PRONEX) no. 04/0825-3, project no. 309232/2003-1, and by CNPq grants to the first and third authors.

#### RESUMO

O Complexo Encantadas é constituído por gnaisses tonalíticos, trondhjemiticos e dioríticos com presença subordinada de hornblenditos. Os elementos maiores e traços indicam uma composição metaluminosa a fracamente peraluminosa relacionada às séries cálcico-alcálicas médio-K. Os parâmetros composicionais são consistentes com uma evolução associada provavelmente a cristalização fracionada a partir de magmas menos diferenciados. Os ortogneisses mostram razões  $La_N/Yb_N$  variando entre 10 até 50,  $K_2O/Na_2O$  entre 1,1 e 3,0, com conteúdos de Y entre 3 e 39, Yb entre 0,3 e 3,7 e Lu entre 0,06 e 0,54. Estas feições são similares às descritas em tonalitos

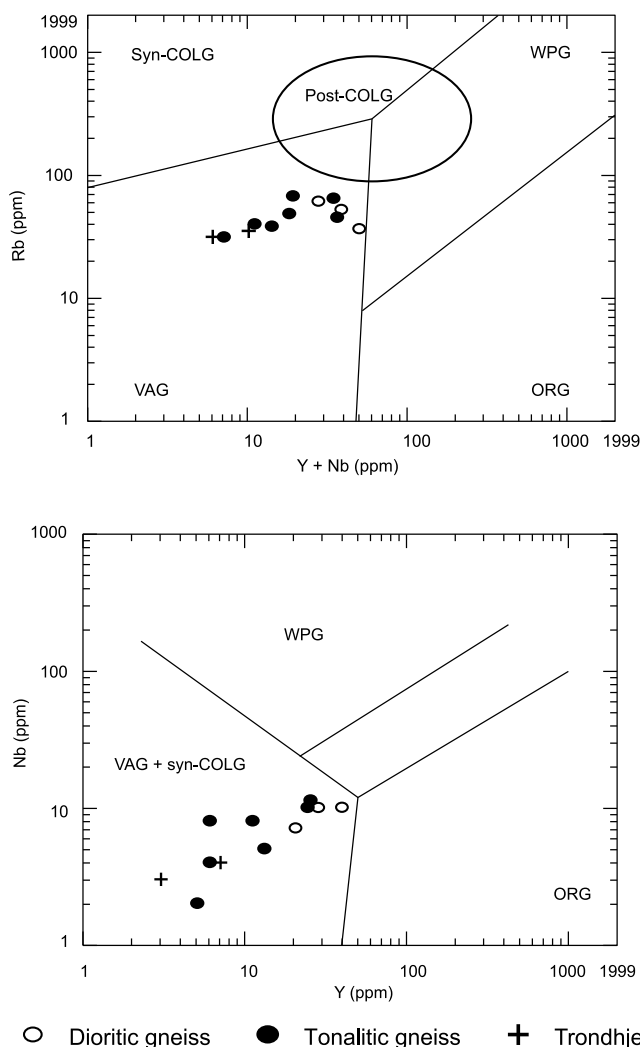


Fig. 16 – Plots of gneisses from Encantadas Complex in the Rb  $\times$  Y+Nb and Nb  $\times$  Y (Pearce et al. 1984, Pearce 1996) diagrams.

arqueanos, usualmente atribuídas à fusão parcial de seqüências máficas sob condições de alta pressão deixando um resíduo eclogítico. A presença de dioritos e hornblenditos, associados aos gnaisses tonalíticos e trondhjemiticos sugere, por outro lado, que os mesmos podem representar rochas com uma evolução comum, geradas provavelmente por fracionamento de hornblenda a partir de magmas básicos hidratados. Os tonalitos apresentam idade U-PbSHRIMP em zircão de  $2,263 \pm 6$  Ma para a cristalização e  $2,045 \pm 10$  Ma para o metamorfismo. Os parâmetros geoquímicos, tectônicos e geocronológicos são consistentes com magmas derivados de manto metassomatizado por fluídos relacionados com subducção oceânica em uma margem continental ativa.

**Palavras-chave:** arco magmático, evolução crustal, gnaisses Encantadas, Paleoproterozóico, Petrologia, TTG.

## REFERENCES

- ARTH JG. 1979. Some trace elements in trondhjemitites – their implications to magma genesis and paleotectonic settings. In: BARKER F (Ed.), *Trondhjemitites, Dacites and related rocks*. New York: Elsevier, New York, USA, p. 123–132.
- BATCHELOR RA AND BOWDEN P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chem Geol* 48: 43–55.
- CARVALHO PF. 1932. Reconhecimento geológico do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro, *Bol Inst Geol Min Bras* 66: 1–72.
- CHEMALE JR. F. 2000. Evolução Geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: HOLZ M ET AL. (Eds), *Geologia do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre: CIGO, Porto Alegre, Brasil, p. 13–52.



- CONDIE KC. 2005. TTGs and adakites: are they both slab melts? *Lithos* 80: 33–44.
- DEBON F AND LE FORT P. 1983. A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Trans Roy Soc Edin* 73: 135–149.
- FERNANDES LA, TOMMASI A AND PORCHER CC. 1992. Deformation patterns in the Southern Brazilian branch of the Dom Feliciano Belt: a reappraisal. *J South Am Earth Sci* 5: 77–96.
- HARTMANN LA, SANTOS JOS, LEITE JAD, PORCHER CC, MCNAUGHTON I AND NEAL J. 2003. Metamorphic evolution and U-Pb zircon SHRIMP geochronology of the Belizário ultramafic amphibolite, Encantadas Complex, southernmost Brazil. *An Acad Bras Cienc* 75: 393–403.
- HARTMANN LA, CHEMALE JR. F AND PHILIPP RP. 2007. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: FRANTZ JC ET AL. (Eds), 50 anos de Geologia no Rio Grande do Sul, Porto Alegre: Comunicação e Identidade, Porto Alegre, RS, Brasil, p. 97–123.
- IRVINE TN AND BARAGAR WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can J Earth Sci* 8: 523–548.
- JENSEN LS. 1976. A new cationic plot for classifying sub-alkalic volcanic rocks. *Ontario Div. Mines, Miscel Paper* 6: 1–22.
- JOST H AND BITENCOURT MF. 1980. Estratigrafia e tectônica de uma fração da Faixa de Dobramentos Tijucas no Rio Grande do Sul. *Acta Geol Leop* 11(7): 27–59.
- LEITE JAD, HARTMANN LA, MCNAUGHTON NJ AND CHEMALE JR. F. 1998. SHRIMP U/Pb zircon geochronology of Neoproterozoic juvenile and crustal-reworked terranes in southernmost Brazil. *Inter Geol Rev* 40: 688–705.
- LE MAITRE RW. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Oxford: Blackwell, 193 p.
- LEINZ V AND PINAGEL H. 1945. Estanho e tungstênio no Rio Grande do Sul. *Bol Div Fom Prod Min* 70: 1–80.
- LOPEZ S, CASTRO A AND GARCIA-CASCO A. 2005. Production of granodiorite melt by interaction between hydrous mafic magma and tonalitic crust. Experimental constraints and implications for the generation of Archaean TTG complexes. *Lithos* 79: 229–250.
- MARTIN H. 1993. The mechanisms of petrogenesis of the Archean continental crust- comparison with modern processes. *Lithos* 30: 373–388.
- PEARCE JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes* 19(4): 120–125.
- PEARCE JA, HARRIS NBW AND TINDLE AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J Petrol* 25: 956–983.
- PHILIPP RP. 1998. A Evolução Geológica e Tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul. Universidade de São Paulo, SP. Tese de Doutorado, 255 p.
- PHILIPP RP AND CAMPOS RS. 2004. Geologia, petrografia e litogeoquímica dos Gnaisses Porto Alegre, RS, Brasil: implicações geotectônicas. *Pesq Geoc* 31(2): 79–94.
- PORCHER CC AND FERNANDES LAD. 1990. Relações Embasamento/“Cobertura” na porção Ocidental do Cinturão Dom Feliciano: um esboço estrutural. *Pesq* 17(1-2): 72–84.
- RAPP RP, WATSON EB AND MILLER CF. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. *Precam Res* 51: 1–25.
- REMUS MVD, PHILIPP RP, FACCINI UF AND JUNGES SL. 1990. Contribuição ao estudo geológico-estrutural dos Gnaisses Encantadas e das relações com as supracrustais Porongos na região de Santana da Boa Vista-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, Natal, RN, Brasil, SBG 1: 2358–2370.
- RIBEIRO M, BOCCHI PA, FIGUEIREDO F<sup>o</sup> PM AND TESSARI RI. 1966. Geologia da quadrícula de Caçapava do Sul, RS. *Bol Div Fom Prod Min*, Rio de Janeiro, DNPM, 1966, 127: 1–232.
- SOLIANI JR. E. 1986. Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica. São Paulo, Tese de Doutorado em Geociências, 425 p.
- STRECKEISEN AL. 1976. To each plutonic rock, its proper name. *Earth Sci Rev* 12: 1–33.
- THOMPSON RN, MORRISON MA, HENDRY GL AND PARRY SJ. 1984. An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. *Phil Trans R Soc Lon A* 310: 549–590.