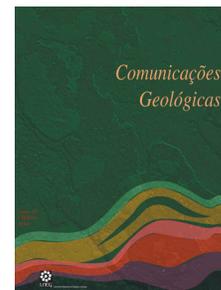


Caracterização litogeoquímica dos granitóides da folha Arraias (TO) Brasil: um modelo de arco magmático paleoproterozóico no bordo ocidental do Craton São Francisco

Litogeochemistry characterization of granitic rocks Arraias Project: a model of Paleoproterozoic Magmatic Arc on the western edge of the Craton São Francisco

S. Abdallah¹

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP



Artigo Curto
Short Article

Resumo: Neste estudo objetivou-se desenvolver estudos dos dados litogeoquímicos das rochas graníticas que ocorrem na folha Arraias, Projeto Sudeste Tocantins (Brasil), para tanto, utilizaram-se de elementos maiores e traços, algoritmizados em gráficos petroquímicos. Os resultados possibilitaram individualizar no antigo embasamento granito-gnássico, nas porções menos deformadas, uma série granítica tipicamente calci-alcalina metaluminosa e outra predominante peraluminosa, ambas do paleoproterozóico e que foram classificadas como granitóides de terrenos acrecionários de Arco Magmático e representam assinatura geoquímica de granitos I/S. Estes aspectos químicos são refletidos na mineralogia, através de paragéneses de granitos com anfibólio e biotita (trend metaluminoso) e outro com granito a duas micas, muscovita primária-biotita+granada (trend peraluminoso). Ambiente convergente de margem continental constitui processo para gerar magmas calci-alcálicos e o magmatismo peraluminoso formado da fusão de crosta continental em regime tectônico colisional.

Palavras-chave: Suite calci-alcalina, Série peraluminosa, Arco magmático paleoproterozóico.

Abstract: This study aims to develop knowledge of quimism of granitic rocks that occur in Arraias, for both, we used the data of major e trace elements in multióxides parameters as R1xR2; AxB, and other graphics. The results have enabled individualize, inside the embasement granite-gnassics, in portions less deformed, a series typically calci-alkaline metaluminous and other peraluminous. Granitics rocks are classified as accretionary magmatic arc and characteristics geochemical signature type I/S. These chemical aspects are reflected in the mineralogy, through paragenesis with amfhibole and biotite (trend metaluminous) and another with two granite micas, primary-biotite+muscovite-garnet (trend peraluminous). The subduction of oceanic lithosphere in convergent continental margin is the geological process to produce magmas calci-alkaline suite of low-K; already the peraluminous magmatism would be generated from the continental crust tectonic regime in sin-colisional.

Keywords: Calci-alkaline series, Peraluminous trend, Accretionary magmatic arc.

1. Introdução e contexto geológico

A região de pesquisa, Folha Arraias, localiza-se no sudeste do estado do Tocantins (Brasil), que conjuntamente com as folhas Gurupi, Alvorada e Dianópolis, constituem o projeto Sudeste do Tocantins (Fig. 1). A região apresenta extensos terrenos de rochas graníticas, deformados (protomilonitos e milonitos bandados) a tipos isótopos, e que formam domos granito gnáissicos, que eram agrupados em complexos indiferenciados. Estes núcleos graníticos apresentam idades paleoproterozóicas, de 2,04 a 2,2 Ga, constituindo suites graníticas calcio-alcálicas metaluminosas e peraluminosas. Dentre as principais unidades litoestratigráficas cartografadas, (Fig. 2) a mais antiga é representada pelo Complexo Granito-greenstone belt (Seqüência vulcano-sedimentar Grupo Riachão do Ouro) e granitoides circunvizinhos das Suites Calcio-alcálica metaluminosa e peraluminosa, onde os terrenos greenstone belt são representados por metavulcânicas máficas-ultramáficas toleiticas e komatiiticas, na base, e pelos metassedimentos (filitos sericíticos com intercalações de BIFs, quartzitos, metacherts, muscovita-cianita-sillimanita, metachert ferríferos, xistos micáceos, metaconglomerados, anfíbolitos e hornblenditos/metagabros. Estas unidades são recobertas, discordantemente, pela seqüência metassedimentar do Grupo Arai (Formação Arraias de 1,77 Ga), principalmente, quartzitos e metaconglomerados fluviais, subordinadamente ocorrem metabásicas relacionadas ao vulcanismo bimodal do Rift Intracontinental. Este conjunto é sobreposto, discordantemente, por diamictitos da Formação Jequitá e rochas pouco deformadas do Grupo Bambuí (Formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré) que constituem sedimentos plataformais pelito-carbonáticos de Bacia Ante-país ou Intracratônicas da Bacia São Franciscana neoproterozóica. A granitogenese é constituída pelas suites graníticas metaluminosas e peraluminosas do complexo Almas –

¹Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

Email: said.abdallah@cprm.gov.br

Arraias e Suite Aurumina, de idades paleoproterozóicas (Riaciano-Orosiriano).

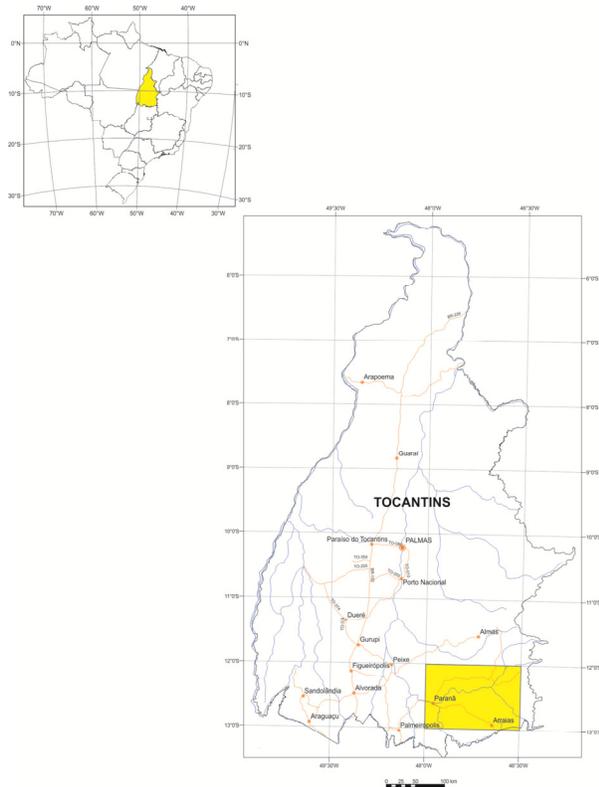


Fig. 1. Mapa de localização da área de estudo, projeto Folha Arraias.

Fig. 1. Location map of the study area, Arraias project.

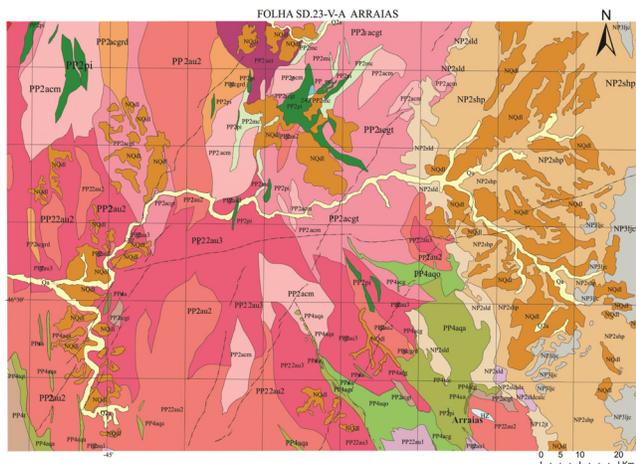


Fig. 2. Mapa geológico da região de pesquisa.

Fig. 2. Geological map of the studied region.

2. Litogeoquímica dos granitoides

Os granitoides do Complexo Almas Cavalcante (CAC) foram classificadas como uma série contínua com termos monzogranitos, granodioritos e quartzo diorito, nos diagramas de classificação química álcalis vs. sílica de Le Maitre (1989) (Fig. 3), diagrama normativo Anortita-Albita-Ortoclásio, O'Connor (1965) e diagrama normativo

de Streckeisen (1976) (Fig. 4). Os granitoides constituem duas suítes, uma com características predominantemente metaluminosa e cálcio-alcálica baixo a médio K, outra predominante peraluminosa de médio a alto K, discriminados no diagrama de SiO_2 vs K_2O . Constitui igualmente um *trend* cálcio-alcálico no diagrama AFM de Irvine & Baragar (1971) e que ocupa o campo das rochas cálcio-alcálicas no diagrama de Dall'agnol *et al.* (1994) $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ vs Al_2O_3 . No diagrama multicatiônico R1xR2, De la Roche *et al.* (1980), as rochas desta unidade segue um *trend* intermediário entre as séries cálcio-alcálicas normais e de alto-K (Fig. 5).

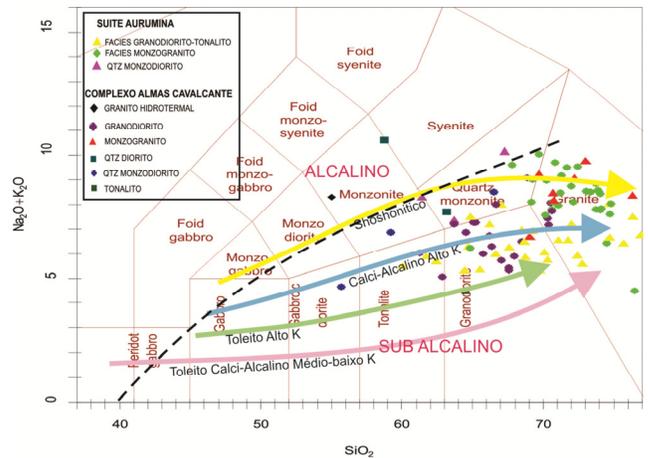


Fig. 3. Diagrama de classificação química SiO_2 vs. álcalis para as rochas do Complexo Almas Cavalcante e Suite Aurumina segundo Le Maitre (1989).

Fig. 3. Diagram of SiO_2 chemical classification vs. alkalis to the rocks of the Complex Almas-Cavalcante and Suite Aurumina according to Le Maitre (1989).

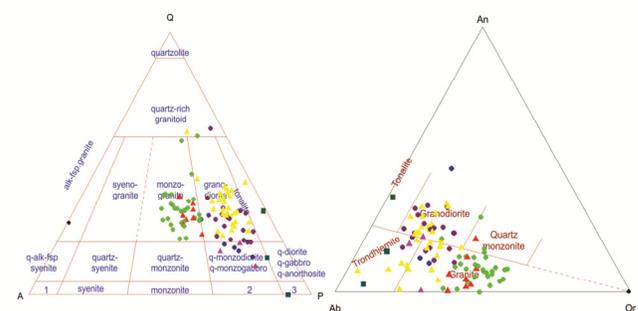


Fig. 4. Diagramas normativos (QAPF) de Streckeisen (1976) e Albita-Anortita-Ortoclásio de O'Connor (1965); Símbolos como na figura 3.

Fig. 4. Normative diagrams (QAPF) of Streckeisen (1976) and Albita-Anorthite-Orthoclase O'Connor (1965); Symbols as the figure 3.

A Suite Aurumina apresenta termos graníticos monzogranitos até granodioritos-tonalitos, sendo menos expressivo os quartzo monzodioritos. Os termos mais ácidos são monzogranitos contendo teores mais elevados de SiO_2 , ocorrendo uma diminuição da sílica nos termos granodioritos-tonalitos, indicando que estes são termos

mais diferenciados. Esta suíte granítica caracteriza-se pela peraluminosidade de média a alta, evidenciando-se através do índice de aluminosidade, gráfico A/CNK x ANK (Fig. 6). Constitui-se igualmente um *trend* cálcio-alcálico no diagrama AFM de Irvine & Baragar (1971) e ocupa o campo das rochas cálcio-alcálicas no diagrama de Dall'agnol *et al.* (1994) $FeO / (FeO+MgO)$ vs Al_2O_3 . No diagrama multicatiônico R1xR2 estes granitos seguem um *trend* das séries cálcio-alcálicas normais e de alto-K.

Os granitóides do CAC constituem uma série mais estendida que os granitóides da Suíte Aurumina e predominam valores mais elevados de MgO , TiO_2 , valores menores de SiO_2 , teores maiores de óxidos ferromagnesianos, coerente com a presença de hornblenda e/ou biotita na composição modal em tonalitos e granodioritos. Diferencia-se também pela maior razão de CaO/Na_2O , e menor de Al_2O_3/TiO_2 em relação aos litotipos da suíte Aurumina.

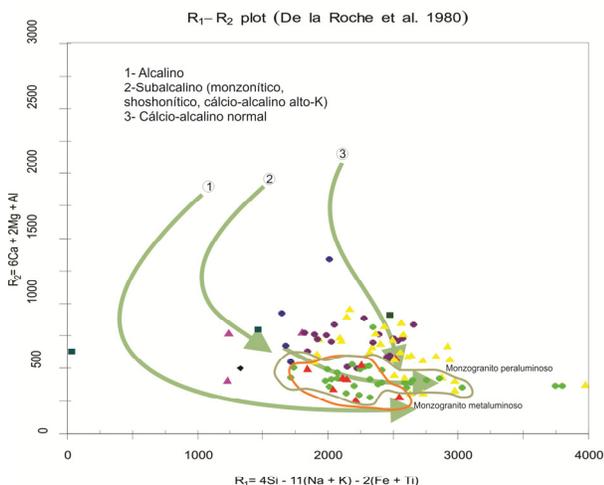


Fig. 5. Diagrama multicatiônico R1xR2 das séries magmáticas, segundo De La Roche *et al.* (1980).

Fig. 5. Multicationic diagram R1xR2 of magmatics series, according to De La Roche *et al.* (1980).

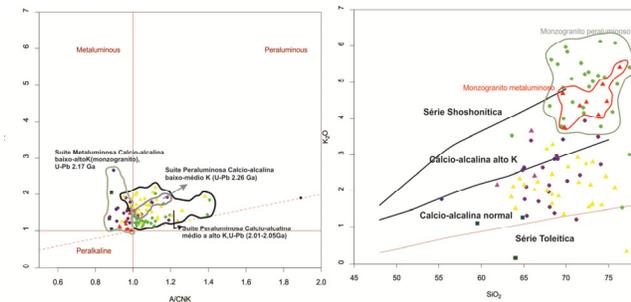


Fig. 6. Diagrama de classificação para as rochas granitóides a partir da razão molecular ANK vs. ACNK (Maniar & Piccoli, 1989); Diagrama SiO_2 vs. K_2O de Peccerillo & Taylor (1976). Símbolos como na figura 5.

Fig. 6. Classification diagram of granitic rocks from the molecular ratio ANK vs. ACNK (Maniar & Piccoli, 1989); Peccerillo & Taylor (1976) diagram of SiO_2 vs. K_2O Symbols as figure 5.

3. Ambiente tectônico

No diagrama de geotectônica R1-R2, Batchelor & Bowden (1985), a suíte Aurumina enquadra-se no campo de granitos sin-colisional a tardi-orogênicos, sendo os monzogranitos predominantemente sin-colisionais. Aplicando conteúdo de $(Nb/Zr)_n$ vs. Zr normalizado ao manto primitivo, segundo (Thiéblemont & Téguey, 1994), a suíte Aurumina enquadra-se amplamente no campo de magmatismo cálcio-alcálico manto derivado de zona de subducção, com algumas amostras no limite do campo de contaminação crustal. Considerando-se que os mesmos evoluíram a partir de arco de margem continental, portanto, mais primitivo e transicional para arco continental normal, segundo o gráfico do grau de maturidade do arco magmático, Brown *et al.* (1984).

Nos diagramas triangulares de Thiéblemont & Cabanis (1990) (Fig. 7); os granitóides da Suíte Aurumina posicionam-se no campo do magmatismo Sin-colisionais a Pós-colisionais - Sin subducção. No diagrama de Harris *et al.* (1986), as amostras enquadram-se no campo de Arco magmático, com tendência para o campo Sin-colisionais e Pós-colisionais. Confirma-se que estes granitos possuem um expressivo diferencial com maior enriquecimento de Rb em relação aos demais. Os granitóides do CAC enquadram-se, preferencialmente, nos campos de zona de subducção Pré-colisional do arco magmático e algumas pós-colisionais, Batchelor & Bowden (1985), este último reflexo de um evento tardio durante a fase de relaxamento do arco. Os monzogranitos apresentam característica tardi-orogênico, enquanto os granodioritos apresentam característica Pré-colisional a Pós-colisional. No diagrama Thiéblemont & Téguey (1994), os granodioritos e tonalitos da série cálcio-alcálica baixo K caracterizam o estágio mais primitivo deste magmatismo de zona de subducção, diagnosticado pelo estágio de maturidade do arco magmático, onde situam-se nos campos de Arco de ilha primitivo-Arco magmático continental normal (Fig. 8). Nos gráficos ternários de Harris *et al.* (1986) e Thiéblemont & Cabanis (1990) confirma-se a ambiência destes granitóides no campo do magmatismo de arco magmático.

4. Tipologia e evolução magmática

As características dos elementos-traço dos granitóides do CAC demonstram afinidade com séries magmáticas cálcio-alcálicas de baixo a alto K, é caracterizada por apresentar, predominantemente, razões $A/CNK < 1$, $A/NK > 1$ estes granitóides preponderantemente metaluminosos. Havendo disponibilidade de óxidos de Na, K, Ca, cujo excesso de CaO manifesta-se na formação de anfibólio cálcico, confirmada pelos altos conteúdos em Al_2O_3 e CaO , baixas razões $FeO^*/(FeO^*+MgO)$, e pode conter na paragênese mineral hornblenda e/ou biotita. O caráter enriquecido em LILE (Rb, Ba, Th, U e K) em relação às ETR leves e HFSE (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, Yb, Y), e o empobrecimento de ETR pesadas em relação às leves, também são típicos de suítes cálcio-alcálicas. O enriquecimento em elementos mais

móveis e/ou litófilos (Rb, Ba, Th, U e K) e anomalias negativas de Nb, P e Ti é interpretado como assinatura de padrão de arco magmático, possivelmente, resultante do metassomatismo da cunha mantélica acima da zona de subducção (Abdallah, 2011).

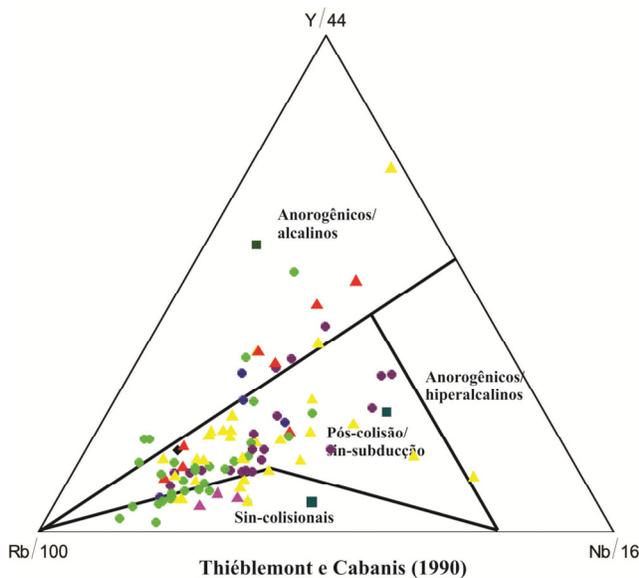


Fig. 7. Diagramas discriminantes de ambientes tectônicos gráfico ternário de Thieblemont & Cabanis (1990).

Fig. 7. Discriminant diagrams ternary graph of tectonics environments according to Thieblemont & Cabanis (1990).

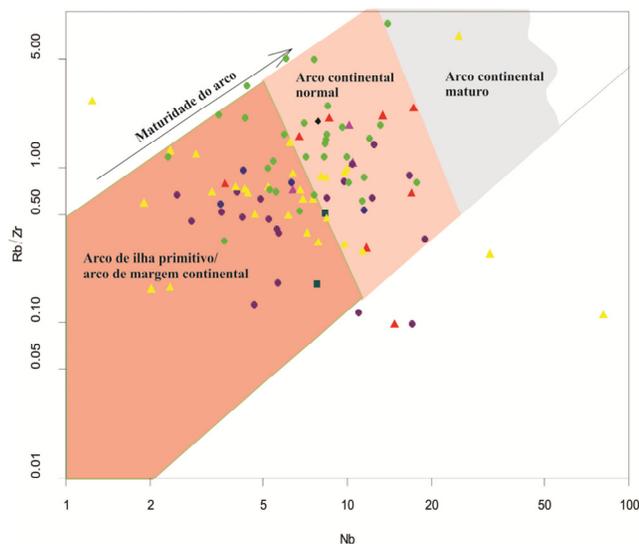


Fig. 8. Diagrama de caracterização da maturidade do arco magmático, Brown *et al.* (1984).

Fig. 8. Diagram of the magmatic arc maturity, according to Brown *et al.* (1984).

Padrões de ETR caracteriza-se por anomalias negativas de Eu, os granodioritos são fortemente fracionados, com alta diferença entre ETR leves e pesados, estilo inclinado devido razão La_N/Yb_N alta, fracionamento menor em ETR leves, La_N/Sm_N e

Ce_N/Sm_N , a razão Gd/Yb nos ETR pesados indicam padrão menos fracionado. Quartzo monzodioritos assemelha-se aos granodioritos-tonalitos, mas apresentam anomalia de Eu acentuada. Monzogranitos apresentam comportamento planar, menores razões entre ETR leves e pesados (La_N/Yb_N), menos fracionados; La_N/Sm_N levemente fracionados em leves, Gd_N/Yb_N (<1-1,3) indicando depleção em ETR pesados. A anomalia negativa de Eu é significativa nesta fácies. A presença de minerais como allanita, zircão explicam este enriquecimento em ETR, e a anomalia negativa de Eu mais acentuada, possivelmente sugere-se que o líquido granítico sofreu fracionamento expressivo de feldspatos. As razões Zr/Nb vs. Y/Nb mostra que o processo de cristalização fracionada foi mecanismo magmático importante, com expressiva contribuição e contaminação crustal.

A suíte Aurumina constitui série granítica cálcio-alcalina normal a alta K, diferenciada e predominante de caráter peraluminoso, média a alta, $A/CNK > 1$, Maniar & Piccoli (1989). Os litotipos compreendem monzogranitos, granodioritos-tonalitos, e subordinadamente quartzo monzodioritos. Os termos mais ácidos são monzogranitos com diminuição da sílica nos granodioritos-tonalitos (termos mais diferenciados). $SiO_2 \times MgO$ mostra correlação negativa, TiO_2 , FeO , P_2O_5 principalmente nos monzogranitos com valores mais baixos de MgO , caracterizando correlação linear negativa em relação a sílica. Observa-se semelhança nas razões MgO/TiO_2 evidenciando a baixa mobilidade destes elementos nos processos pós-magmáticos. Desta forma, constata-se que houve evolução de termos menos evoluídos (monzogranitos) a termos mais evoluídos (granodioritos).

Teores de Rb são altas refletindo a tendência de concentrarem-se em biotita e feldspatos. No entanto, apesar desta acentuada dispersão, o Rb mostra comportamento inverso, apresentando maior enriquecimento nas fases monzograníticas peraluminosas em relação aos granodioritos-tonalitos, principalmente, refletindo no maior conteúdo de feldspato potássico e também na significativa contribuição crustal no processo de geração deste magma. Os valores de Nb e Y mostram pouca dispersão com trends com pequena inclinação e tendem a diminuir com aumento do teor de sílica, apresentando uma correlação negativa, no monzogranito os teores são maiores tanto de Nb e Y. O Nb e Y apresenta valores baixos nesta suíte peraluminosa, já que Nb e Y são compatíveis com as fases hornblenda e zircão. No Zr a correlação negativa é mais acentuada com aumenta de SiO_2 , com tendência de maiores conteúdos nos monzogranitos, e que indicam estarem relacionadas a um trend de diferenciação magmática menos evoluído para mais evoluído.

O caráter de maior enriquecimento em LILE (Rb, Ba, Th, U e K) em relação às ETR leves e HFSE (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, Yb, Y), é característica geoquímica desta série, demonstrado nos diagramas multielementares. O empobrecimento de ETR pesadas em relação às leves

também são típicos de suítes cálcio-alcálicas Brown *et al* (1984). Evidencia-se enriquecimento em elementos mais móveis (Rb, Ba, Th, U e K) e forte anomalia negativa de Nb, P e Ti, principalmente nos monzogranitos peraluminosos, o que é confirmado como assinatura ou padrão de arco magmático, cujo maior conteúdo de Rb e maior quantidade de alumínio indicam contribuição de crosta continental, assimilação ou contaminação de um sistema sin-colisional a pós-Colisional. Os elementos terras raras (ETR) mostram que os litotipos da Suíte Aurumina desenvolvem comportamento inclinado indicando que houve moderado fracionamento. Granodioritos-tonalitos são fortemente fracionados, enriquecidos em ETRL em relação ERTM com razão $(La/Yb)_N$ alta e La_N/Sm_N mais baixo, onde a anomalia negativa de Eu é menos expressiva que nos monzogranitos. Estes apresentam-se enriquecidos em ETR, onde a razão entre leves e pesados (La_N/Yb_N) é positiva e alta, refletida num espectro fracionado, e razão La_N/Sm_N mais baixo. Assim, constata-se que os monzogranitos são menos enriquecidos em ETR que os granodioritos, e desenvolve padrão menos fracionados, a anomalia negativa de Eu_N é acentuada.

5. Petrogênese

Algumas considerações sobre a origem dos granitóides em relação à região fonte e ambientes de formação dos magmas verificando-se os padrões de granitos tipo I, S, A. Neste modelo geoquímico os granitos da Suíte Aurumina e granitóides do CAC, situam-se nos domínios de granitos com fonte crustal, tipo S, o material da fonte deste magma teve forte contribuição de material da crosta inferior, (metassedimentos e rochas ígneas), que segundo Condie (1993), foram gerados em uma crosta com espessura entre 20-30km.

No gráfico discriminante proposto por Dall'Agnol (1994), as amostras distribuem-se nos campos de granito tipo I-S. Assim, considera-se que dentro deste evento gerador de magma dos granitóides do CAC possa desenvolver tipos metaluminosos com características de sistema tipo A pós-colisionais. No entanto, estes diagramas confirmam, inequivocamente, este magmatismo como de características da série cálcio-alcálica e granitos tipo I-S. A derivação crustal da Suíte Aurumina é indicada, principalmente no caso dos monzogranitos, pela composição química peraluminosa, pelo enriquecimento em P, Th, Rb, Li e Ta e pelo grande fracionamento das terras raras $(La/Yb)_N > 50$, conferindo o intenso fracionamento desta suíte. Adicionalmente indicam que os granitos da Suíte Aurumina mapeados podem ser individualizados com base na razão K_2O/Na_2O e no teor de Th.

6. Geocronologia

Foram realizadas cinco datações pelo método U-Pb LA-ICPMS em zircão: três amostras da Suíte Aurumina, fácies monzogranítica e duas do CAC (Complexo Almas Cavalcante). As amostras SA01 e SA130 são

biotita muscovita monzogranitos da Suíte Aurumina. Dados U-Pb (SA01) apresentam dois conjuntos de idades. As regressões dos dois grupos indicam os interceptos superiores (IS) de 2157 ± 28 Ma e 2062 ± 21 Ma, respectivamente. Ambas as regressões mostram perda de chumbo para o final do neoproterozóico. A amostra SA130 (Fig. 9) também forneceu zircão com dois grupos de idade. Os dados mais velhos indicam o IS de 2144 ± 30 Ma e os mais jovens (e predominantes) permitiram o cálculo da Concordia Age de 2013 ± 15 Ma. Os resultados das duas amostras são coerentes e as idades mais jovens são interpretadas como idade de cristalização magmática e a mais antiga herança da fonte. A amostra SA78, (biotita muscovita granodiorito protomilonito), os zircões encontram-se bastante metamictizados, o que gerou grande dispersão das razões obtidas. Análises das áreas com zonação oscilatória indicam o IS de 2027 ± 36 Ma, que é interpretado como a melhor estimativa da idade de cristalização da rocha. Apesar da má qualidade dos cristais e do grande erro associado aos resultados, a idade de 2027 Ma é similar às demais encontradas para a suíte. A TDM Sm-Nd de 2.35Ga e o $\epsilon Nd(T)$ de +0,06 desta rocha indicam o retrabalhamento de uma fonte sideriana. A amostra SA184 (Fig. 10), hornblenda biotita tonalito da Suíte cálcio-alcálica de baixo K, apresentou um conjunto único de dados, cuja regressão indicou os interceptos superior e inferior de 2180 ± 10 Ma e 539 ± 66 Ma, respectivamente. O primeiro é interpretado como a idade de cristalização magmática, e o segundo como perda de Pb para final do neoproterozóico. Amostra SA54, da suíte peraluminosa, obtiveram-se dois conjuntos de idades, a primeira e mais importante de 2265 ± 9.6 Ma (Concordia Age) é interpretada como a idade de cristalização do corpo e o segundo de 2456 ± 6 Ma está relacionado a zircões herdados da rocha fonte.

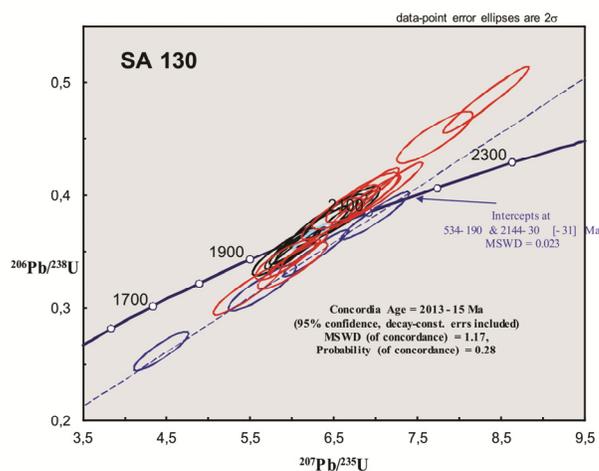


Fig. 9. Diagrama de concórdia pelo método U-Pb em zircão, amostra SA130 (Suíte Aurumina).

Fig. 9. Concordia diagram by U-Pb method in zircon sample SA130 (Aurumina Suíte).

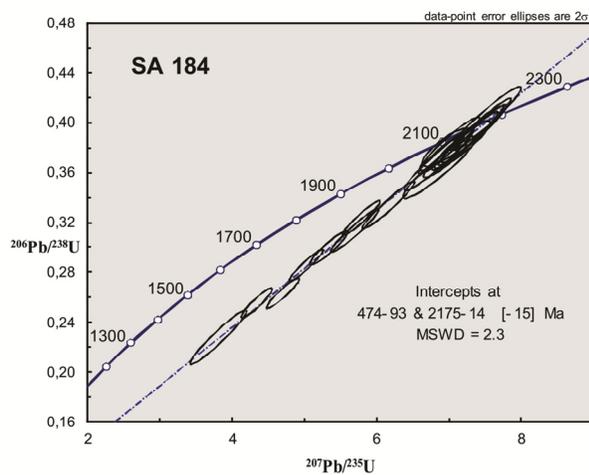


Fig. 10. Diagrama de concórdia pelo método U-Pb em zircão, amostra SA184.

Fig. 10. Concordia diagram by U-Pb method in zircon sample SA184.

Referências

- Abdallah, S., 2011. Interpretação Litogeoquímica das rochas graníticas da folha Arraias. In: *XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica, III Simpósio Geoquímica dos países do Mercosul*, anais CD, 848-851.
- Batchelor, R.A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid series using multicationic parameter. *Chemical Geology*, **48**, 43-55.
- Brown, G.C., Thorpe, R.S., Webb, P.C., 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of the Geological Society (London)*, **141**, 413-426.
- Condie, K.C., 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, **104**, 1-37.
- Dall'agnol, R., Lafon, J.M., Macambira, M.J.B., 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Province, Amazonian Craton: geochronological, petrological and geochemical aspects. *Mineralogy and Petrology*, **50**, 113-138.
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., Marchal, M., 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and major elements analysis its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*, **29**, 183-210.
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A., Tindle, A.G., 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: M.P. Coward, A.C. Ries, (Eds), *Collision Tectonics. London, The Geological Society, Special Publ.*, **19**, 67-81.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal Earth Science*, **8**, 523-548.
- Le Maitre, R.W., 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Blackwell, Oxford, 193 p.
- Maniar, P.D., Piccoli, P.M., 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Bulletin Geological Society of America*, **101**, 635-643.
- O'Connor, J.T., 1965. A classification of quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *United States Geological Survey Professional Paper*, **525-B**, 9-84.
- Streckeisen, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Sciences Reviews*, **12**, 1-33.
- Thiéblemont, D., Cabanis, B., 1990. Utilisation d'un diagramme (Rb/100)-Tb-Ta pour la discrimination géochimique et l'étude pétrogénétique des roches magmatiques acides. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, **8**, 23-35.
- Thiéblemont, D., Tegye, M., 1994. Geochemical discrimination of differentiated magmatic rocks attesting for the variable origin and tectonic setting of Calc-alkaline magmas. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences. Serie 2, Mecanique, physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre*, **319(1)**, 87-94.