# **3 LITOGEOQUÍMICA**

#### 3.1 Introdução

A litogeoquímica é uma ferramenta de grande utilidade para a geologia, e foi utilizada nesta dissertação a fim de caracterizar os litotipos diversos observados e descritos para o Maciço Intrusivo Santa Clara (MISC), como apresentado no Capítulo 2. Neste sentido, os principais objetivos incluem a definição da natureza química do magmatismo envolvido, e assim compreender os processos petrogenéticos, possíveis fontes e ambientes geodinâmicos de geração para os litotipos analisados. Para tanto, uma abordagem com a utilização de diversos diagramas já consagrados pela comunidade científica foram utilizados neste capítulo.

Para melhor compreensão do leitor, este capítulo foi subdividido em seções, cada qual com seus principais objetivos, e com o uso de diagramas específicos, e suas interpretações. As fácies observadas para o MISC são tratadas em conjunto, e quando necessário, individualmente. Porém, é importante ressaltar que a caracterização e a subdivisão em fácies litológicas foram feitas de acordo com dados de campo e análises petrográficas. Assim, é possível observar que dentro de uma mesma fácies há heterogeneidades em termos de caracterização química.

Nesta dissertação de mestrado, foi analisado um total de vinte e oito amostras de litotipos do Maciço Santa Clara durante a fase de mapeamento geológico (Capítulo 2). A seleção das amostras para litogeoquímica foi feita com o objetivo de se analisar todas as cinco fácies descritas no capítulo anterior e, portanto, ser a mais abrangente possível. As análises foram realizadas no *Activation Laboratories Ltda*. (ACTLABS, no Canadá), e todas as etapas do processamento das amostras selecionadas encontram-se descritas no Anexo B, bem como o tipo de análise litogeoquímica escolhida e seus limites de detecção.

Das vinte e oito amostras analisadas, catorze fazem parte da fácies porfirítica, de maior predomínio na área de estudo, cinco amostras da fácies equigranular, cinco amostras da fácies de granulação fina, três amostras da fácies piterlítica e apenas uma amostra da fácies viborgítica. A tabela com os resultados das análises de litogeoquímica é apresentada no Anexo C, e inclui a análise de elementos maiores (SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), perda ao fogo (PF) e a soma de todos os óxidos (TOTAL). Além disso, inclui os elementos traços incompatíveis móveis (Ba, Rb, Sr, U e Th) e os imóveis (Zr, Y, Nb, Hf), os elementos compatíveis (Ni, Cr, V e Co) e elementos terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu). Considerando que foram usadas bolas de tungstênio no processamento das amostras para litogeoquímica (Anexo B), as interpretações usando o elemento-traço Ta foram evitadas. Os elementos maiores são expressos em porcentagem por peso (% peso), e os demais elementos são expressos sob a forma de ferro férrico total (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>), e os dados foram recalculados para 100% em base anídrica para plote nos diagramas apresentados.

Os gráficos apresentados neste capítulo da dissertação foram confeccionados com o auxílio do software gratuito *GCDkit 2.3 (Geochemical Data Toolkit)* e do programa *Microsoft Excel.* O programa *CorelDRAW X5*, do pacote *CorelDRAW Graphics Suite X5*, também foi utilizado a fim de melhorar o *design* dos gráficos, tornando-os mais adequados para a editoração do texto.

Os valores das somas dos óxidos variam entre 98,09% e 100,90% peso. Os valores mais baixos podem estar relacionados a alguma perda de álcalis durante o processo de fusão executado para a análise das amostras em laboratório (Anexo B). Das trinta amostras analisadas, treze exibem total de óxidos abaixo de 99% (SC-01A, SC-01G, SC-2B, SC-03, SC-04, SC-06, SC-08, SC-09, SC-17, SC-19A, SC-24, SC-25 e SC-30B). Ainda assim, todas as trinta amostras analisadas foram utilizadas nesta dissertação. Uma atenção maior foi dada às listadas acima, em casos de discrepâncias em interpretações. É também importante ressaltar que o processamento das amostras selecionadas foi feito de maneira bastante cuidadosa, cuidando-se para que apenas a matriz dos tipos porfirítico, piterlítico e viborgítico fosse analisada. No entanto, é possível que quantidades inadequadas de fenocristais de feldspato potássico, muito comuns nestas fácies (Capítulo 2), tenham também sido analisados. Assim, interpretações para estas fácies foram feitas de maneira cautelosa.

## 3.2 Discriminação de Séries, Suítes e Classificações dos Litotipos

O cálculo normativo é um método bastante conhecido a fim de caracterizar quimicamente rochas ígneas, e baseia-se nos teores dos elementos maiores. É muito usado para análises petrogenéticas que envolvem geoquímica de elementos principais; a partir da composição química em rocha total, o método é capaz de calcular um total de trinta e quatro "minerais normativos", e faz a simulação matemática de cristalização. Os minerais normativos não necessariamente entram na composição da rocha, e podem não ser observados em lâmina petrográfica. Os resultados dos cálculos normativos CIPW (Tabela 2) revelam que, predominantemente, as amostras do Maciço Santa Clara são supersaturadas em sílica, possuindo quartzo e hiperstênio normativos. No entanto, é importante notar que as amostras que fazem parte das fácies de granulação fina e viborgitica, bem como duas amostras da fácies piterlítica, possuem coríndon normativo, o que nesse caso indica que estas amostras possuem grandes quantidades de feldspato.

Tabela 2 -	Valores obtidos c	om o uso da norma	CIPW, inclu	indo mínimos	, máximos,	médias e desvios-	padrão. 7	Fodos os valores são	)
expressos	em %peso.								

Fácies	Amostra	Quartzo	Corindon	Ortoclásio	Albita	Anortita	Diopsídio	Hiperstênio	Ilmenita	Total
Porfirítica	SC-01A	22,69	0	30,97	17,09	11,09	2,32	11,27	1,77	97,19
Porfirítica	SC-01C	17,80	0	36,11	22,00	11,59	2,01	8,88	1,39	99,78
Porfirítica	SC-01G	18,87	0	31,20	22,25	11,76	2,52	9,01	1,41	97,02
Porfirítica	SC-02A	18,66	0	23,46	23,27	14,46	4,06	12,34	1,99	98,23
Porfirítica	SC-03	18,66	0	27,54	22,42	14,56	2,06	10,20	1,62	97,06
Porfirítica	SC-04	14,23	0	32,44	21,24	11,18	4,32	11,78	2,04	97,23
Porfirítica	SC-05	18,15	0	26,83	25,64	14,87	3,22	9,61	1,35	99,67
Porfirítica	SC-06	16,51	0	29,73	21,83	14,36	0,90	11,92	1,91	97,15
Porfirítica	SC-13	24,05	0,57	41,19	18,79	5,76	0,00	7,40	1,05	98,81
Porfirítica	SC-19A	27,70	0	27,89	20,56	11,44	2,14	6,97	1,07	97,77
Porfirítica	SC-24	19,46	0	29,55	23,69	12,97	1,42	8,79	1,39	97,26
Porfirítica	SC-25	20,11	0	30,14	23,35	12,33	0,89	9,17	1,31	97,30
Porfirítica	SC-29	30,86	0	23,99	24,88	11,54	1,89	5,68	0,86	99,70
Porfirítica	SC-30B	20,78	0	27,36	25,13	12,75	1,56	8,25	1,13	96,97
Equigranular	SC-01F	16,31	0	23,52	24,29	16,37	3,56	12,15	2,09	98,28
Equigranular	SC-01J	51,39	0	18,79	15,57	6,63	0,27	5,42	0,90	98,97
Equigranular	SC-07	17,71	0	25,06	26,06	17,50	2,44	9,72	1,49	99,98
Equigranular	SC-2B	20,78	0	15,42	32,41	15,18	2,86	9,32	1,65	97,62
Equigranular	SC-2C	32,24	0	32,92	25,22	5,48	0,02	2,76	0,30	98,93
Fina	SC-14A	28,33	0,77	34,34	21,32	6,05	0	6,32	0,87	98,00
Fina	SC-14B	27,93	0,46	33,45	21,75	6,85	0	7,53	0,88	98,83
Fina	SC-14C	28,67	0,51	32,03	20,65	7,64	0	8,13	1,09	98,71
Fina	SC-14E	30,55	1,55	34,10	21,41	5,06	0	5,26	0,83	98,74
Fina	SC-14F	29,28	0,11	35,99	20,65	5,76	0	5,48	0,77	98,02
Piterlítica	SC-08	50,86	0,60	13,83	21,49	6,05	0	4,31	0,36	97,51
Piterlítica	SC-09	38,53	0,75	13,71	25,55	10,92	0	6,45	0,73	96,64
Piterlítica	SC-15	12,77	0,00	39,65	26,65	9,26	2,18	7,33	1,00	98,85
Viborgítica	SC-17	23,75	0,81	27,89	22,00	11,21	0	10,72	1,51	97,90
	Mínimo	12,77	0,00	13,71	15,57	5,06	0,00	2,76	0,30	96,64
	Máximo	51,39	1,55	41,19	32,41	17,50	4,32	12,34	2,09	99,98
	Média	24,91	0,22	28,54	22,76	10,74	1,45	8,29	1,24	98,15
	Desvio-Padrão	9,63	0,39	7,05	3,22	3,69	1,39	2,52	0,48	0,97

Fonte: Hutchison, 1974;1975.

As rochas do Maciço Santa Clara foram divididas em três associações distintas, observando-se especialmente as características geoquímicas das mesmas. Assim, a "associação A" compreende as amostras das fácies porfirítica e equigranular; a "associação B" compreende as amostras das fácies de granulometria fina e piterlítica, e a "associação C" é composta pela única amostra da fácies viborgítica. A subdivisão nestas associações mostra-se bastante pertinente neste estudo, visto que, como será mostrado nos diagramas adiante, cada qual possui padrões e características bastante semelhantes. Na verdade, esta subdivisão também pode ser aplicada em termos de aspectos de campo e caracterização petrográfica (Capítulo 2). As rochas porfiríticas e equigranulares ocorrem espacialmente associadas, e o mesmo é observado para as rochas de granulometria fina e piterlíticas. Já a fácies viborgítica possui características próprias, o que também será evidenciado em sua geoquímica, e por isso foi considerada uma "associação" a parte, apesar de possuir apenas uma amostra. O diagrama ternário de classificação modal para rochas plutônicas de O'Connor (1965; Figura 18) indica composições médias semelhantes às de quartzo-monzonitos e granitos, com granodioritos subordinados.



Figura 18 - Diagrama ternário de classificação modal para rochas plutônicas com mais de 10% de quartzo normativo, caso das rochas do Maciço Santa Clara. Fonte: O'Connor, 1965

O conjunto de amostras analisado apresenta uma ampla variação nos teores de SiO<sub>2</sub> (entre 62,38% e 79,90%), sendo portanto classificadas como intermediárias a ácidas. A amostra de menor conteúdo de SiO<sub>2</sub> corresponde àquela de código SC-04 (fácies porfirítica), e a de maior conteúdo corresponde àquela de código SC-01J (fácies equigranular). As razões Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O variam entre 0,32 e 1,47, e as razões FeO<sub>t</sub>/(FeO<sub>t</sub>+MgO) variam entre 0,81 e 0,96. Para efeitos de comparação, esses valores são compatíveis com aqueles publicados por Dall'Agnol et al. (1999) para os granitos Jamon e Musa (Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O entre 0,56 e 1,00; FeO<sub>t</sub>/(FeO<sub>t</sub>+MgO) entre 0,83 e 0,96), granitos anorogênicos do Paleoproterozóico da Província Amazônica Central.

Os diagramas de discriminação de séries indicam que os litotipos do Maciço Santa Clara possuem assinatura compatível com séries subalcalinas (Figura 19a) e são pobres em MgO. As razões A/CNK *vs.* A/NK indicam que as amostras possuem caráter metaluminoso a fracamente peraluminoso, com índice de Shand menor que 1,1 (Figura 19b). Para efeitos de comparação, os valores de A/CNK verificados para os litotipos do Maciço Santa Clara ficam entre 0,89 e 1,13,

semelhantes aos valores publicados para os stocks graníticos Artjärvi e Sääskjärvi (entre 0,92 e 1,05), localizados na margem ocidental do Batólito Wiborg, na Finlândia (LUKKARI, 2002).



Figura 19 - Diagramas de caracterização química para os granitoides do Maciço Intrusivo Santa Clara (a) Diagrama  $K_2O+Na_2O vs. SiO_2$ ; (b)  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) mol vs. Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O) mol (índice de Shand); (c) Na_2O+K_2O vs. SiO_2.$ Fonte: Le Maitre et al., 1989; Maniar e Piccoli, 1989; Lameyre, 1987.

#### 3.3 Geoquímica Multielementar

Diagramas de variação são especialmente úteis para que se faça uma identificação preliminar dos processos petrogenéticos envolvidos na evolução de líquidos magmáticos. Mais especificamente, diagramas de variação para elementos maiores mostram a importância dos processos de cristalização fracionada e fusão parcial, e diagramas de variação para elementos-traços refletem as características da fonte geradora do magma primário. A análise de possíveis *trends* observados em diagramas desse tipo é comumente utilizada para que se identifique mecanismos de diferenciação magmática, como cristalização fracionada (com ou sem mudanças na assembléia fracionante), misturas de magmas, fusão parcial (em equilíbrio ou não) e AFC (assimilação e cristalização fracionada). Este último mecanismo é melhor detectado através de variações de isótopos ou razões isotópicas.

Nos diagramas de variação, o SiO<sub>2</sub> foi utilizado como índice de diferenciação, visto que os líquidos analisados correspondem a granitoides. A análise dos diagramas indica que os litotipos do Maciço Intrusivo Santa Clara definem *trends* lineares e sem *gaps* composicionais significativos. Tal padrão observado sugere que o mecanismo de mistura magmática não foi importante na evolução dos líquidos, e, mais ainda, indica que processos petrogenéticos relacionados à cristalização fracionada sem retirada significativa de assembléia fracionante ou AFC são os mais prováveis para explicar a evolução dos líquidos analisados. Os valores semelhantes verificados para os níveis de significância lineares e polinomiais também sugerem não ter ocorrido mudanças na assembléia fracionante.

Em alguns diagramas de variação (Figuras 20 e 21), os pontos analisados mostram certa dispersão, especialmente no caso do K<sub>2</sub>O. Os diagramas de variação indicam que os líquidos do Maciço Intrusivo Santa Clara ora analisados apresentam correlação negativa para óxidos como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO e TiO2 e elementos-traços como Ba, Sr, Y, Zr, Ga, Nb e V em relação à SiO<sub>2</sub> (Figuras 20 e 21). Essas características sugerem que a assembléia fracionante para estes líquidos pode corresponder a plagioclásio, anfibólio,

apatita, titanita e óxidos de Fe-Ti. O feldspato alcalino possivelmente constitui a fase mineral principal que cristaliza ao longo da evolução do magma. No entanto, não é possível dizer ao certo devido à dispersão de pontos verificada para K<sub>2</sub>O, o que pode ser resultado de envolvimento de fase fluida no processo de cristalização dos líquidos magmáticos.

É possível observar que as fácies litológicas não se distribuem de forma regular nos diagramas; dentro de uma mesma fácies, há líquidos mais evoluídos, e há aqueles menos evoluídos. Porém, ainda assim, as fácies da "associação A" parecem ser menos evoluída do que as fácies da "associação B". De fato, esta observação pode ser confirmada pelos elevados conteúdos de SiO<sub>2</sub> verificados para os tipos equigranulares (SiO<sub>2</sub>=70,65%, em média) e de granulação fina (SiO<sub>2</sub>=71,33%, em média), por exemplo.



Figura 20 - Diagramas de variação para óxidos maiores com a  $SiO_2$  como índice de diferenciação. Todos os valores estão expressos em %peso.



Figura 21 - Diagramas de variação para elementos-traços com a  $SiO_2$  como índice de diferenciação. Os valores de  $SiO_2$  são expressos em %peso, e os conteúdos dos elementos-traços são expressos em partes por milhão (ppm).

Nos diagramas multielementares normalizados (Figuras 22 e 23), as "associações" apresentam padrões relativamente similares. De maneira geral, observa-se anomalias negativas de Ba, Sr, Nb e Ti. De acordo com os gráficos, as amostras representantes da "associação B" são aquelas que apresentam anomalias negativas mais acentuadas nestes elementos. É comum que anomalias negativas de Nb-Ta sejam associadas à fusão de crosta litosférica superior. Estas características podem estar relacionadas ao fracionamento de minerais como feldspato, hornblenda, biotita e titanita. Anomalias positivas pronunciadas de elementos como Rb, Th, La, Ce e Nd e discretas anomalias positivas de K e Sm também são observadas. Tais características são compatíveis com aquelas observadas para granitos rapakivi (LARIN, 2009).

A fácies porfirítica do maciço Santa Clara é a menos evoluída dentre as observadas, com SiO<sub>2</sub>=66,39% em peso de óxido, em média. As rochas desta fácies apresentam conteúdos de ETR que variam bastante, entre 15,95 e 338,07 vezes o condrito (Figura 24a), enriquecimento fraco de ETRL [(La/Yb)<sub>N</sub> = 3,26 a 9,86], com valor destoante de (La/Yb)<sub>N</sub> de 34,36 para a amostra SC-24, que pode representar uma amostra que não faz parte da sequência estudada. Também apresentam anomalias de Eu de graus fraco a moderado [(Eu/Eu\*)<sub>N</sub> = 0,54-1,07].

Os litotipos da fácies equigranular possuem teores de SiO<sub>2</sub> que variam entre 62,81 e 79,90% em peso de óxido. As rochas da fácies equigranular apresentam conteúdos moderados a elevados de ETR, entre 22,36 e 416,06 vezes o condrito (Figura 24b). Exibem enriquecimento fraco a moderado de ETRL [(La/Yb)<sub>N</sub> = 6,24 a 29,59] e anomalias negativas de Eu de graus fraco a moderado [(Eu/Eu\*)<sub>N</sub> = 0,33-0,95].

Os granitoides da fácies fina da intrusão em estudo possuem teores de SiO<sub>2</sub> que variam entre 70,81 e 72,04% em peso, sendo portanto os mais evoluídos do grupo de litotipos analisados nesta dissertação. As rochas desta fácies apresentam conteúdos elevados de ETR, entre 134,57 e 201,07 vezes o condrito (Figura 24c). Exibem enriquecimento fraco a moderado de ETRL [(La/Yb)<sub>N</sub> = 8,85 a 12,32] e anomalias negativas de Eu de grau fraco [(Eu/Eu\*)<sub>N</sub> = 0,29-0,34].

Os granitoides que compreendem a fácies piterlítica do maciço Santa Clara possuem teores de SiO<sub>2</sub> que variam entre 65,33 e 79,20% em peso de óxido, além de conteúdos elevados de ETR, entre 119,91 e 333,89 vezes o condrito (Figura 24d). Também apresentam enriquecimento fraco a moderado de ETRL [(La/Yb)<sub>N</sub> = 3,50 a 22,50] e anomalias negativas fracas de Eu [(Eu/Eu<sup>\*</sup>)<sub>N</sub> = 0,13-0,41].

Apenas uma amostra da fácies viborgítica foi analisada nesta dissertação, visto que este litotipo foi observado em apenas um ponto do mapeamento (Figura 6). Assim, não é possível reconhecer agrupamentos e nem desenvolver interpretações mais extensivas para estas rochas. A amostra analisada possui teor de  $SiO_2 = 67,07\%$  em peso de óxido e conteúdos moderados de ETR, de 78,44 vezes o condrito (Figura 24e). Também apresenta enriquecimento pouco moderado de ETRL [(La/Yb)<sub>N</sub> = 9,66] e anomalia negativa moderada de Eu [(Eu/Eu\*)<sub>N</sub> = 0,76].

Os padrões de Elementos Terras Raras indicam, portanto, que de uma maneira geral os litotipos das fácies que compõem o maciço Santa Clara apresentam enriquecimento moderado de ETRL em relação aos ETRP, o que pode ser controlado por fases minerais como hornblenda, titanita e zircão, que tendem a reter ETRs médios e pesados. O empobrecimento em Elementos Terras Raras Pesados em relação aos leves é indicativo de retenção de granada na fonte que gerou estes líquidos magmáticos. A hornblenda também pode contribuir para este empobrecimento, mas em menores proporções do que a granada.

Padrões de Elementos Terras Raras com enriquecimento em ETRL em relação aos ETRP e anomalias negativas de Eu, acompanhadas de anomalias negativas de elementos como Nb e Ta são comuns em granitos tipo-A de ambientes pós-colisionais (BARROS et al., 2011).

As anomalias negativas de Eu indicam que os líquidos magmáticos em estudo sofreram fracionamento de plagioclásio ao longo do seu processo de evolução, ainda que em quantidades variáveis, já que algumas fácies exibem anomalias negativas mais acentuadas neste elemento do que outras. Por exemplo, a "associação A", menos evoluída, exibe anomalias negativas menos pronunciadas do que aquelas verificadas para as amostras da "associação B" (fácies fina e piterlítica; Figura 24).



Figura 22 - Diagramas multielementares para os granitoides do Maciço Intrusivo Santa Clara (a) associação A; (b) associação B; (c) associação C. Valores normalizados para ORG. Fonte: Pearce et al., 1984



Figura 23 - Diagramas multielementares para os granitoides do Maciço Intrusivo Santa Clara (a) associação A; (b) associação B; (c) associação C. Valores normalizados para condrito.

Fonte: Thompson, 1982



Figura 24 - Diagramas com padrões de ETR para os granitoides do Maciço Intrusivo Santa Clara (a) associação A; (b) associação B; (c) associação C. Valores normalizados para condrito. Fonte: Boynton, 1984

## 3.4 **Fontes e Ambientes Tectônicos**

Além dos diagramas de variação do tipo Harker, o diagrama Rb/Sr vs. Sr (Figura 25) também sustenta que a cristalização fracionada pode ter sido o processo de diferenciação magmática de maior importância na geração das associações de rochas do MISC analisados.

Quanto ao ambiente tectônico de geração, as rochas do Maciço Intrusivo Santa Clara possuem características semelhantes àquelas observadas para os granitos tipo-A. Uma comparação com dados publicados e reunidos por Bonin (2007) sugere que os granitóides analisados nesta dissertação são muito semelhantes aos mesmos. As razões  $FeO_t/(FeO_t + MgO)$  entre 0,81 e 0,96 são compatíveis com aquelas propostas por Frost et al. (2001) para granitos tipo-A *"ferroan"* (Figura 26a), e razões  $FeO_t/MgO$  entre 4,27 e 26,22 sugerem tratar-se de uma série de granitos félsicos fracionados, satisfazendo a condição 4 <  $FeO_t/MgO < 16$ , proposta por Bonin (2007).



Figura 25 - Diagrama Rb/Sr *vs*. Sr para os granitoides do Maciço Intrusivo Santa Clara, mostrando que os mesmos provavelmente evoluíram por cristalização fracionada. Fonte: Markl e Höhndorf, 2003

O diagrama mostrado na Figura 26b apresenta o chamado MALI (FROST et al., 2001), índice modificado do "*index-lime*", de Peacock (1931) *vs.* SiO<sub>2</sub>. Segundo a classificação proposta pelos autores, os granitoides do Maciço Santa Clara são alcálicos a calci-alcálicos, enquadrando-se, portanto, no campo dos granitos tipo-A, como pode ser observado. Das trinta amostras analisadas, apenas sete ficam fora dos campos propostos pelos autores.

Frost e Frost (2010) reconhecem oito "famílias" de granitos tipo "*ferroan*". Segundo os autores, essa grande variedade observada pode ser produzida por dois processos distintos: fusão parcial de rochas crustais de composição quartzo-feldspática ou pela diferenciação de magmas basálticos – ou ainda, pela combinação dos dois processos.



Figura 26 - Diagramas para os granitoides do Maciço Intrusivo Santa Clara (a)  $FeO_t/(FeO_t + MgO)$  vs.  $SiO_2$ ; em comparação com campos para granitos cordilheiranos e granitos tipo-A; (b)  $(Na_2O+K_2O-CaO)$  vs.  $SiO_2$  (MALI), em comparação com campos para granitos tipo-A e granitos tipo-I.

Fonte: Frost et al., 2001; Anderson e Bender, 1989; Frost et al., 2001

Os diagramas para os granitoides analisados em comparação com dados publicados por Frost et al. (2001) sugerem seu caráter tipo-A, apesar de algumas amostras ficarem fora dos campos (Figura 27). Estes diagramas mostram comparações entre os granitoides do Maciço Santa Clara desta dissertação com dados reunidos por Dall'Agnol e Oliveira (2007). Neste conjunto de gráficos, observa-se que os granitoides ora estudados possuem química semelhante àquelas dos granitos tipo-A; apenas algumas amostras têm seu plote no campo de granitos cálcio-alcalinos (Figura 27a,b). Os diagramas com campos de granitos tipo-A reduzidos e oxidados, e granitos cálcio-alcalinos sugerem que os granitoides do Maciço Santa Clara encaixam-se no tipo reduzido, apesar da superposição de alguns campos (Figura 27c, d).

Alguns autores consideram que granitos tipo-A oxidados são derivados de fonte crustal de composição quartzo-feldspática. Granitos tipo-A reduzidos seriam derivados de fontes quartzo-feldspáticas com caráter reduzido (ANDERSON e MORRISON, 2005), ou com contribuição de rochas metassedimentares (DALL'AGNOL et al., 2005), ou ainda de fontes toleíticas, por diferenciação (FROST e FROST, 1997; FROST et al., 1999).



Figura 27 - Diagramas (a) CaO/(FeOt+MgO+TiO<sub>2</sub>) *vs*. (CaO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); (b) CaO/(FeOt+MgO+TiO<sub>2</sub>) *vs*. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (c) FeOt/(FeOt+MgO) *vs*. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (d) FeOt/(FeOt+MgO) *vs*. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O) para os granitoides do Maciço Intrusivo Santa Clara analisados, em comparação com campos para granitos cálcio-alcalinos e granitos tipo-A. Os diagramas (c) e (d) mostram também campos de granitos tipo-A oxidados e reduzidos. O campo de granitos cálcio-alcalinos é baseado em dados de Frost et al. (2001), e os demais campos são baseados em dados publicados por Dall'Agnol e Oliveira (2007). Fonte: Frost et al., 2001; Dall'Agnol e Oliveira, 2007

Os diagramas discriminantes de ambientes tectônicos (Pearce et al., 1984; Figura 28a,b) mostram que os granitoides do Maciço Intrusivo Santa Clara analisados nesta dissertação distribuem-se no campo de rochas geradas em ambiente intraplaca.



Figura 28 - Diagramas discriminantes de ambientes tectônicos para os granitoides do MISC, confirmando seu caráter predominantemente intraplaca. Fonte: Pearce et al., 1984

Os diagramas discriminantes de ambientes tectônicos elaborados por Whalen et al. (1987; Figuras 29 e 30) sugerem que os granitoides analisados nesta dissertação distribuemse predominantemente no campo de granitos tipo-A.



Figura 29 - Diagramas (a) Zr vs. 10000\*Ga/Al; (b) Nb vs. 10000\*Ga/Al; (c) Ce vs. 10000\*Ga/Al; (d) Y vs. 10000\*Ga/Al; (e) Zn vs. 10000\*Ga/Al e (f) (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)/CaO vs. (Zr+Nb+Ce+Y) discriminantes de ambientes tectônicos para os granitoides analisados nesta dissertação. **I&S**: Granitos tipo-I e Granitos tipo-S; **A**: Granitos tipo-A; **FG**: Granitos Fracionados e **OGT**: Granitos Comuns. Fonte: Whalen et al., 1987



Figura 30 - Diagramas (a) Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O *vs*. 10000\*Ga/Al; (b) (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)/CaO *vs*. 10000\*Ga/Al; (c) K<sub>2</sub>O/MgO *vs*. 10000\*Ga/Al discriminantes de ambientes tectônicos para os granitoides analisados nesta dissertação. **I&S**: Granitos tipo-I e Granitos tipo-S; **A**: Granitos tipo-A. Fonte: Whalen et al., 1987

Eby (1992) sugeriu que, com base na sua distribuição de elementos-traços granitoides tipo-A poderiam ser divididos em dois grupos distintos, de acordo com o ambiente tectônico de geração. Assim, no diagrama ternário Y-Nb-Ce (EBY, 1992), granitos tipo-A que distribuem-se no campo A<sub>1</sub> seriam diferenciados de magma basáltico gerado através de uma fonte do tipo-OIB (basaltos de ilhas coeânicas). Granitos tipo-A que distribuem-se no campo A<sub>2</sub> do mesmo gráfico seriam derivados de litosfera subcontinental

ou crosta inferior. Em termos de ambientação tectônica, granitos tipo-A1 são associados a hotspots, plumas ou zonas de rift continental localizados em ambientes anorogênicos, enquanto granitos tipo-A<sub>2</sub> são gerados em ambientes pós-orogênicos e àqueles que de fato representariam magmatismo anorogênico. A análise deste diagrama (Figura 31) sugere que os granitoides do Maciço Santa Clara ora analisados possuem características semelhantes àquelas verificadas para granitos tipo-A gerados ambientes pósem orogênicos/anorogênicos. Segundo o autor, o magmatismo tipo-A2 costuma ser gerado entre um período que varia entre 10 e 20 milhões de anos após um evento compressional. Além disso, esses granitóides não costumam ocorrer associados a rochas alcalinas ou subsaturadas em SiO<sub>2</sub>, e perfazem o tipo mais comum de magmatismo tipo-A. As características geoquímicas - padrões de elementos-traços e associações litológicas observadas nos granitoides do maciço Santa Clara confirmam a tendência de magmatismo tipo-A<sub>2</sub>.



Figura 31 - Diagrama ternário Y-Nb-Ce para os granitoides do Maciço Santa Clara. A<sub>1</sub>: granitoides tipo-A associados a hotspots, plumas e zonas de rift continental em ambientes anorogênicos; A<sub>2</sub>: granitoides tipo-A associados a ambientes póscolisionais/pós-orogênicos e granitos anorogênicos propriamente ditos. Fonte: Eby, 1992