

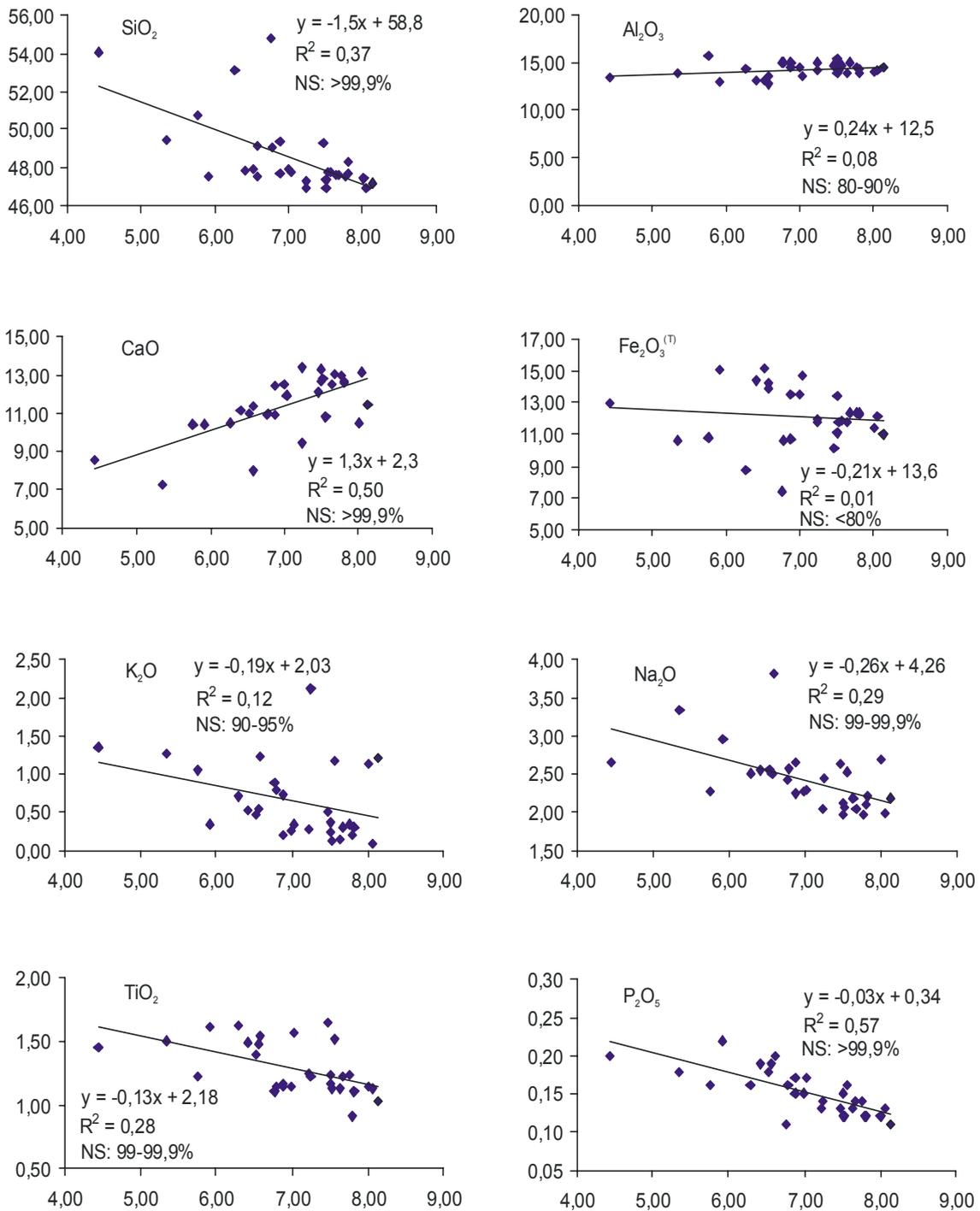
## CAPÍTULO 4: PETROGÊNESE DA SUÍTE DE BAIXO-TiO<sub>2</sub>

### 4.1: Introdução

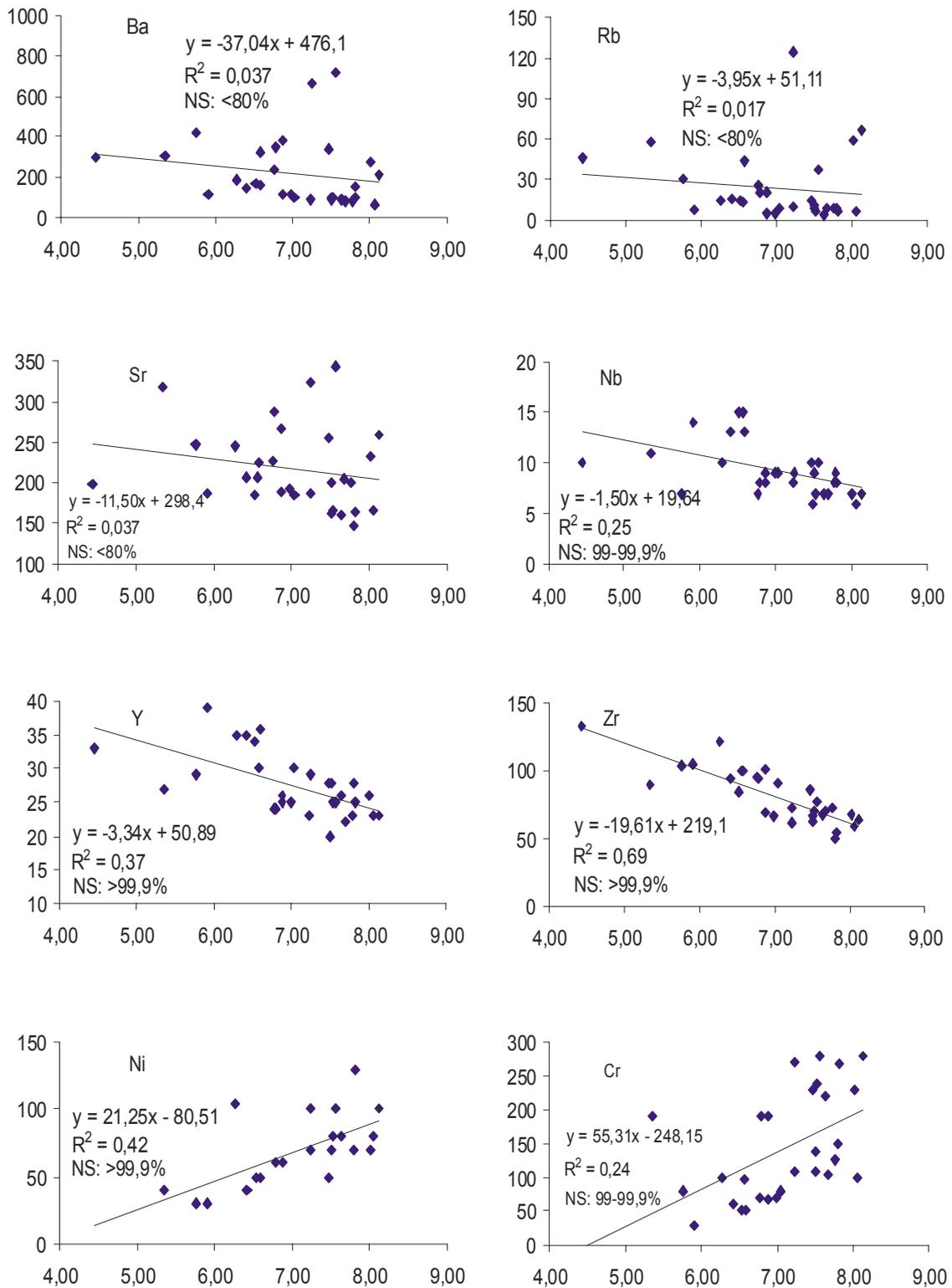
Dados litogeoquímicos de trinta amostras de diques de basaltos toleíticos de baixo-TiO<sub>2</sub> que ocorrem na área de estudo foram utilizados na análise petrogenética que será apresentada neste capítulo. A análise petrogenética envolveu tanto processos evolutivos quanto a discriminação de fontes mantélicas relacionadas à suíte estudada (**Seção 4.2**). Análise regressiva pelos mínimos quadrados (**Anexo IV**) aplicada à diagramas de variação com elementos maiores, elementos traços incompatíveis móveis (Ba, Rb e Sr) e incompatíveis imóveis (Zr, Y e Nb), tendo o MgO como índice de diferenciação, foi o método utilizado na discriminação de processos evolutivos. Diagramas multielementares normalizados para condrito (**Thompson, 1982**) foram utilizados na discriminação de prováveis fontes mantélicas. A seguir, foram modelados processos evolutivos e de fusão parcial (**Seções 4.3 e 4.4**). Finalmente, os dados litogeoquímicos dos diabásios da suíte estudada foram utilizados em comparações com basaltos que ocorrem em províncias regionais consideradas contemporâneas ao evento de fragmentação do Gondwana (**Seção 4.5**). As conclusões foram, então, apresentadas no final deste capítulo (**Seção 4.6**).

### 4.2 Processos evolutivos e discriminação de fontes

As **Figuras 4.1 e 4.2** e os dados da **Tabela 4.1** indicam dispersão para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>†</sup>, K<sub>2</sub>O, Ba, Rb e Sr, haja vista os valores de níveis de significância inferiores a 95%. Deste modo, interpretações petrogenéticas baseadas nestes óxidos e elementos serão evitadas ou feitas somente em associação com dados litogeoquímicos robustos.



**Figura 4.1:** Diagramas de variação para MgO para elementos maiores discriminantes de processos evolutivos para a suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> da área estudada. As curvas lineares, suas respectivas equações e quadrados dos coeficientes de correlação ( $R^2$ ) são mostrados no diagrama.



**Figura 4.2:** Diagramas de variação para MgO para elementos traços discriminantes de processos evolutivos para a suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> da área estudada. As curvas lineares, suas respectivas equações e quadrados dos coeficientes de correlação ( $R^2$ ) são mostrados no diagrama.

**Tabela 4.1** – Valores dos quadrados de coeficientes de correlação de Pearson ( $R^2$ ) e níveis de significância (NS) para os basaltos de baixo-TiO<sub>2</sub> da área estudada. ( $R^2$ )<sub>L</sub>= coeficiente de correlação linear, ( $R^2$ )<sub>P</sub>= coeficiente de correlação polinomial, NS<sub>L</sub>= nível de significância para a correlação linear, NS<sub>P</sub>= nível de significância para a correlação polinomial e  $n$  = número de amostras. Valores de NS<95% indicam dispersão.

Elemento	( $R^2$ ) <sub>L</sub>	( $R$ ) <sub>L</sub>	NS <sub>L</sub>	( $R^2$ ) <sub>P</sub>	( $R$ ) <sub>P</sub>	NS <sub>P</sub>	$n$
SiO <sub>2</sub>	0,374	<b>0,612</b>	>99,9%	0,387	<b>0,622</b>	>99,9%	<b>30</b>
TiO <sub>2</sub>	0,284	<b>0,533</b>	99%-99,9%	0,325	<b>0,570</b>	99,9%	<b>30</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,082	<b>0,287</b>	80%-90%	0,083	<b>0,288</b>	80%-90%	<b>30</b>
CaO	0,491	<b>0,701</b>	>99,9%	0,496	<b>0,704</b>	>99,9%	<b>30</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup>	0,010	<b>0,100</b>	< 80%	0,016	<b>0,126</b>	< 80%	<b>30</b>
Na <sub>2</sub> O	0,295	<b>0,544</b>	99%-99,9%	0,319	<b>0,564</b>	99%-99,9%	<b>30</b>
K <sub>2</sub> O	0,124	<b>0,351</b>	90%-95%	0,155	<b>0,394</b>	95%-99%	<b>30</b>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,573	<b>0,757</b>	>99,9%	0,611	<b>0,781</b>	>99,9%	<b>30</b>
Ba	0,037	<b>0,192</b>	< 80%	0,037	<b>0,193</b>	< 80%	<b>30</b>
Rb	0,017	<b>0,130</b>	< 80%	0,070	<b>0,264</b>	80%-90%	<b>30</b>
Sr	0,037	<b>0,192</b>	< 80%	0,047	<b>0,218</b>	< 80%	<b>30</b>
Y	0,371	<b>0,609</b>	>99,9%	0,410	<b>0,640</b>	>99,9%	<b>30</b>
Zr	0,687	<b>0,829</b>	>99,9%	0,695	<b>0,834</b>	>99,9%	<b>30</b>
Cr	0,249	<b>0,498</b>	99%-99,9%	0,329	<b>0,573</b>	>99,9%	<b>30</b>
Ni	0,419	<b>0,647</b>	>99,9%	0,419	<b>0,647</b>	>99,9%	<b>30</b>
Nb	0,253	<b>0,503</b>	99%-99,9%	0,366	<b>0,605</b>	>99,9%	<b>30</b>
La	0,493	<b>0,702</b>	>99,9%	0,493	<b>0,702</b>	>99,9%	<b>30</b>
Ce	0,623	<b>0,789</b>	>99,9%	0,623	<b>0,789</b>	>99,9%	<b>30</b>
Pr	0,588	<b>0,767</b>	>99,9%	0,623	<b>0,589</b>	>99,9%	<b>30</b>
Nd	0,652	<b>0,807</b>	>99,9%	0,652	<b>0,807</b>	>99,9%	<b>30</b>
Sm	0,610	<b>0,781</b>	>99,9%	0,610	<b>0,781</b>	>99,9%	<b>30</b>
Eu	0,385	<b>0,620</b>	>99,9%	0,438	<b>0,662</b>	>99,9%	<b>30</b>
Gd	0,513	<b>0,716</b>	>99,9%	0,516	<b>0,718</b>	>99,9%	<b>30</b>
Tb	0,390	<b>0,624</b>	>99,9%	0,402	<b>0,634</b>	>99,9%	<b>30</b>
Dy	0,362	<b>0,602</b>	>99,9%	0,388	<b>0,623</b>	>99,9%	<b>30</b>
Ho	0,365	<b>0,604</b>	>99,9%	0,410	<b>0,640</b>	>99,9%	<b>30</b>
Er	0,273	<b>0,523</b>	99%-99,9%	0,324	<b>0,569</b>	99%-99,9%	<b>30</b>
Tm	0,267	<b>0,517</b>	99%-99,9%	0,308	<b>0,555</b>	99%-99,9%	<b>30</b>
Yb	0,246	<b>0,496</b>	99%-99,9%	0,280	<b>0,529</b>	99%-99,9%	<b>30</b>
Lu	0,216	<b>0,465</b>	99%-99,9%	0,255	<b>0,505</b>	99%-99,9%	<b>30</b>

À exceção destes poucos óxidos e elementos citados, os diagramas de variação da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> (**Figuras 4.1 e 4.2**) apresentam correlações lineares e polinomiais significantes (**Tabela 4.1**), sendo também caracterizados pela ausência de hiatos composicionais. Valores muito próximos dos níveis de

significância para as curvas lineares, comparativamente às polinomiais foram identificados, e portanto os lineares foram usados para explicar os processos evolutivos da suíte. (**Tabela 4.1**) Os valores dos níveis de significância lineares indicam que esta suíte evoluiu por cristalização fracionada ou por AFC (*Assimilation and Fractional Crystallisation*), sem mudança de assembléia fracionante.

O aumento das concentrações de óxidos e elementos com o progresso da diferenciação (isto é, com o decréscimo de MgO) indica o comportamento incompatível de TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, além de Y, Zr, Nb e elementos terras raras. Ou seja, o aumento da concentração destes óxidos e elementos em líquidos cada vez mais evoluídos denota que os mesmos não estiveram envolvidos em cristalização de fases tais como óxidos (p.ex.: ilmenita e titanomagnetita), álcali-feldspatos, apatita e zircão, por exemplo. Contrariamente, a diminuição nas concentrações de CaO, Cr e Ni indica a compatibilidade destes óxidos e elementos e, portanto, seu envolvimento na cristalização de minerais durante o processo evolutivo (**Figuras 4.1 e 4.2**). Assim sendo, a diminuição dos valores de CaO e, talvez também do Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (apesar da dispersão), sugere a cristalização de plagioclásio rico em cálcio. A diminuição dos teores de CaO e Cr é frequentemente associada à cristalização de um piroxênio rico em cálcio (p.ex.: a augita) em líquidos basálticos (p.ex.: **Cox et al., 1979**). A diminuição nos teores de MgO e Ni sugere também a cristalização de olivina rica em Mg, ou seja, olivina forsterita. Estes dados indicam uma assembléia fracionante possivelmente constituída de olivina, clinopiroxênio e/ou plagioclásio. Isto é, de modo geral, corroborado pela assembléia de fenocristais discriminada pela análise petrográfica destas rochas. Esta assembléia de fenocristais foi estimada (em %vol.) em 15% de olivina, 40% de augita e 45% de plagioclásio (**Capítulo 3, seção 3.3**).

A discriminação do processo evolutivo de cristalização fracionada e AFC pode ser feita com base na variação da razão de elementos traços incompatíveis dentro da suíte (p.ex.: **Cox et al., 1979**). De um modo geral, estas razões não variam acima de 50% durante o processo evolutivo de

cristalização fracionada, ao contrário do que ocorre quando a suíte evolui por AFC.

Elementos traços incompatíveis que apresentaram níveis de significância superiores a 99,9% (**Tabela 4.1**) foram utilizados para discriminar entre os processos de cristalização fracionada e AFC. A análise foi feita com base na variação das razões destes elementos traços incompatíveis (Zr/Y, Zr/Nb, Y/Nb e La/Yb) considerando-se suas concentrações na amostra parental (CF-TD-14b) e na amostra mais evoluída da suíte (CF-TD-03a). Os resultados (**Tabela 4.2**) mostram que estas razões variaram no máximo 22%, indicando cristalização fracionada como o processo evolutivo mais provável para a suíte.

**Tabela 4.2:** Variação da razão entre elementos traços incompatíveis imóveis na suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> da área de estudo.

Amostras	Razões			
	Zr/Y	Zr/Nb	Y/Nb	La/Yb
CF-TD-14b (parental)	2,8	9,1	3,3	3,7
CF-TD-03a (evoluída)	2,7	7,5	2,8	3,5
Varição (%)	3	22	18	7

Em conclusão, a análise petrogenética apresentada demonstra que os diques de basalto de baixo-TiO<sub>2</sub> que ocorrem na área de estudo evoluiu por cristalização fracionada sem mudança de assembléia fracionante.

Vale ressaltar que há amostras dentro da série estudada que apresentam razões de elementos traços incompatíveis imóveis distintas, embora tenham concentrações semelhantes de MgO, ou seja, estejam associadas a um mesmo grau de diferenciação. Este é o caso, por exemplo, das amostras CF-TD-08a e FC-WT-31 que apresentam razões Zr/Y= 3,9 e 2,8; Zr/Nb= 12,8 e 7,7; Y/Nb= 3,3 e 2,8; La/Yb= 8,6 e 3,7 (**Tabela 4.3**), respectivamente, embora possuam a mesma concentração de MgO (6,88% peso; **Anexo II**).

**Tabela 4.3:** Variação da razão entre elementos traços incompatíveis imóveis dentro da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> e suas respectivas concentrações de MgO em % de peso.

Amostras	MgO	Zr/Y	Zr/Nb	Y/Nb	La/Yb
CF-TD-14b	8,13	2,78	9,14	3,29	3,71
FC-TD-01a	8,06	2,57	9,83	3,83	3,33
CF-TD-15a	8,01	2,62	9,71	3,71	3,62
FC-WT-14	7,81	2,20	6,88	3,13	3,87
CF-TD-06a	7,80	1,79	5,56	3,11	5,86
FC-WT-62	7,77	3,13	9,00	2,88	3,55
FC-WT-48	7,68	3,18	10,00	3,14	3,41
CF-TD-16	7,63	2,62	9,71	3,71	3,73
CF-TD-07a	7,56	3,12	7,80	2,50	3,91
CF-TD-13b	7,53	2,80	10,00	3,57	3,77
CF-TD-02b	7,51	2,36	7,33	3,11	3,21
FC-WT-04 DQ 2	7,50	3,15	10,50	3,33	3,50
CF-TD-07b	7,47	3,07	8,60	2,80	4,04
CF-TD-11b	7,24	2,48	8,00	3,22	3,81
CF-TD-01	7,23	2,70	7,75	2,88	3,65
FC-WT-36	7,03	3,03	10,11	3,33	3,03
FC-WT-28	6,99	2,64	7,33	2,78	3,81
CF-TD-08a	6,88	3,92	12,75	3,25	8,57
FC-WT-31	6,88	2,76	7,67	2,78	3,67
CF-TD-08b	6,78	3,92	11,75	3,00	8,50
SQ-TD-01c	6,76	4,00	13,71	3,43	7,15
CF-TD-03d	6,58	2,81	7,77	2,77	3,49
FC-WT-06	6,57	3,33	6,67	2,00	4,76
CF-TD-05	6,52	2,50	5,67	2,27	3,78
CF-TD-03b	6,41	2,69	7,23	2,69	3,46
FC-WT-09	6,28	3,49	12,20	3,50	6,00
CF-TD-03A	5,91	2,69	7,50	2,79	3,46
CF-TD-09	5,76	3,59	14,86	4,14	5,89
CF-TD-11a	5,34	3,30	8,09	2,45	4,85
SQ-TD-02	4,44	4,03	13,30	3,30	6,87

A considerar-se que estas variações não podem ser atribuídas a erros analíticos (**Anexo III**), os dados indicam a existência de mais de uma suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> na área de estudo. Porém, não há ainda critérios geoquímicos suficientemente robustos para discriminar inequivocamente diferentes suítes de baixo-TiO<sub>2</sub> na área de estudo, especialmente em função da pouca quantidade

de amostras. É interessante notar que, testes feitos com base nas análises regressivas excluindo-se amostras supostamente pertencentes a outras suítes de baixo-TiO<sub>2</sub> não alteram os resultados obtidos e, portanto, a discriminação do processo evolutivo.

Uma vez discriminado o processo evolutivo, o objetivo da análise petrogenética passou a ser a discriminação de prováveis fontes mantélicas relacionadas à suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> estudada. Este estudo foi feito com base na composição do magma parental representado pela amostra CF-TD-14b. A composição química desta amostra é aquela que mais deve se aproximar da fonte mantélica geradora, muito embora ela não represente a composição de um líquido basáltico primário (**Anexo II**).

A discriminação de prováveis fontes foi feita principalmente com base na análise do padrão da amostra parental CF-TD-14b em diagramas de variação multi-elementares, onde foram plotados elementos incompatíveis e elementos terras raras. Este é um procedimento adotado pela maioria dos autores e implica a normalização da composição parental segundo um padrão determinado. Três tipos de padrões são comumente utilizados durante este tipo de análise (**Rollinson, 1993**):

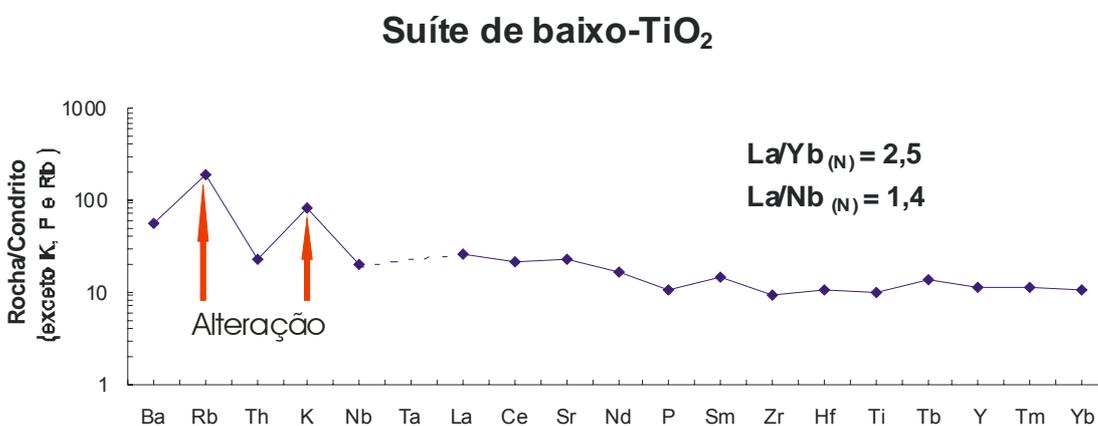
- 1- Condritos
- 2- Manto primitivo (isto é, a composição que o manto possuía antes da formação da crosta continental)
- 3- MORB

Nesta dissertação o padrão utilizado nos diagramas discriminantes de fontes foi o condrito de **Thompson (1982)**, com valores de K, P e Rb de **Sun (1980)** e Ba= 3,85 de **Hawkesworth et al., (1984)**. O condrito de **Nakamura (1974)** foi usado como padrão discriminante no caso dos diagramas de elementos terras raras, com valores de Pr, Tb, Ho e Tm de **Haskin et al. (1968)**. O critério utilizado para discriminação de fontes empobrecidas e

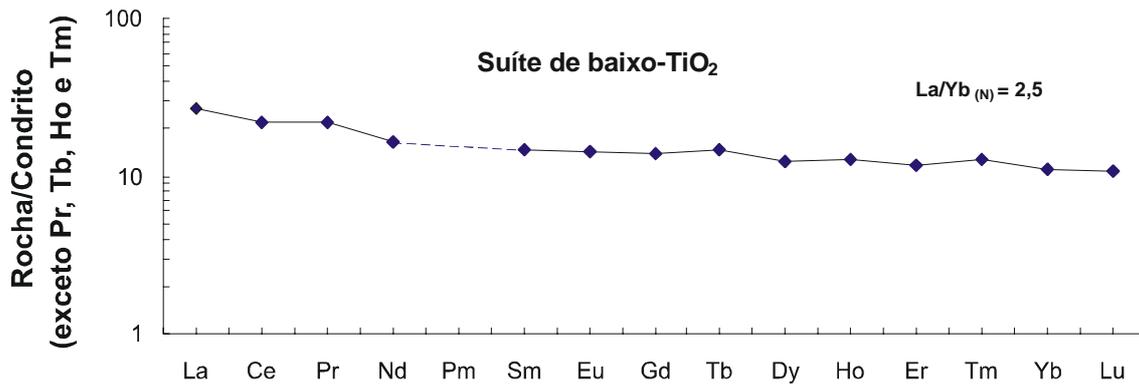
enriquecidas está relacionado com os valores normalizados da razão de  $La/Yb_{(N)}$  e  $La/Nb_{(N)}$  (**Tabela 4.4**). Segundo estes critérios, as razões  $La/Yb_{(N)}$  (2,5) e  $La/Nb_{(N)}$  (1,4) da amostra CF-TD-14b indicam que a suíte de baixo- $TiO_2$  originou-se de fontes enriquecidas, tendo, assim, pelo menos uma contribuição de componentes litosféricos (**Figuras 4.4 e 4.5**).

**Tabela 4.4:** Critérios geoquímicos para a discriminação de três tipos fundamentais de fontes geradoras de magmas basálticos.

Tipo de fonte	$La/Yb_{(N)}$	$La/Nb_{(N)}$	Tipo de manto
Fértil	>1	<1	Astenosférico (tipo pluma)
Enriquecida	>1	>1	Litosférico
Empobrecida	<1	<1	Astenosférico (tipo N-MORB)



**Figura 4.3:** Concentrações de elementos traços da amostra parental CF-TD-14b da suíte de baixo- $TiO_2$  da área de estudo plotadas num diagrama de variação multi-elementar normalizado para condrito (**Thompson, 1982; Sun, 1980 e Hawkesworth et al., 1984**).



**Figura 4.4:** Concentrações de elementos traços da amostra parental CF-TD-14b da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> da área de estudo plotadas num diagrama de elementos terras-raras normalizado para condrito (Nakamura, 1974 e Haskin *et al.*, 1968).

### 4.3 Modelagem geoquímica do processo de cristalização fracionada

Os dados litogeoquímicos apresentados anteriormente mostraram que a suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> estudada evoluiu por cristalização fracionada (Seção 4.2). Nesta seção será apresentado um modelo deste processo com base na Lei de Rayleigh. Esta lei explica o processo de cristalização onde os cristais são removidos efetivamente do líquido no momento em que são gerados. A equação de fracionamento de Rayleigh (Wood & Fraser, 1976) pode ser expressa por :

$$C_L/C_0 = F^{(D-1)} \quad (\text{equação 4.1}), \text{ onde:}$$

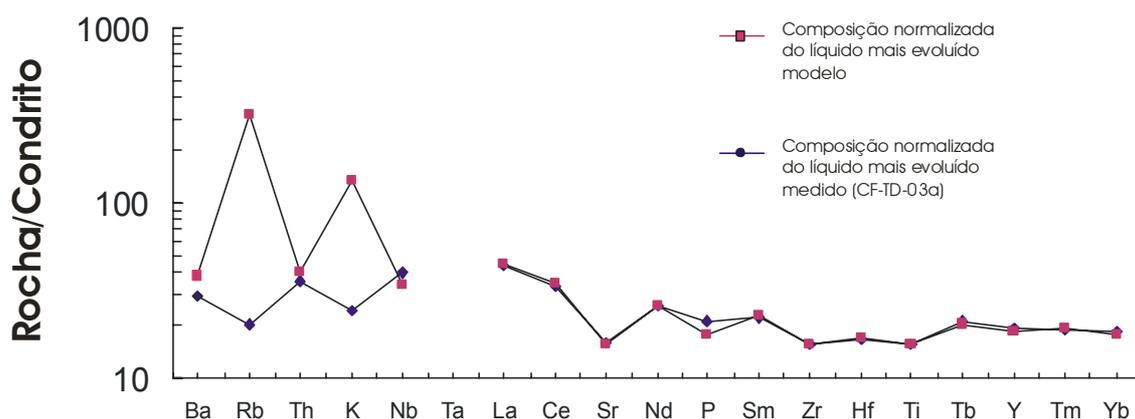
- $C_L$  = concentração dos elementos traços no líquido evoluído;
- $C_0$  = concentração dos elementos traços no líquido primário ou parental;
- $F$  = quantidade de líquido remanescente; (sendo 1-F, portanto, a quantidade de cristalização fracionada), e
- $D$  = coeficiente de partição total. D pode ser expresso por:

$D = \sum_{i=1}^n W_i K_{d_i}$ , onde  $W$  é a proporção de fracionamento da fase  $i$  e  $K_{d_i}$  é o coeficiente de partição mineral/líquido para líquidos (basálticos) da fase  $i$ .

Um modelo de cristalização fracionada foi elaborado para os basaltos da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> do Enxame de Diques da Serra do Mar para elementos traços móveis e imóveis, incluindo alguns dos elementos terras raras (Ba, Rb,

Th, K, Nb, La, Ce, Sr, Nd, P, Sm, Zr, Hf, Ti, Tb, Y, Tm e Yb), assumindo-se como composição do líquido parental ( $C_0$ ) aquelas da amostra CF-TD-14b e como composições do líquido mais evoluído ( $C_L$ ) aquelas da amostra CF-TD-03a, que possuem, respectivamente, as maiores e menores concentrações de MgO. Os elementos seleccionados apresentam níveis de significância lineares acima de 99% em diagramas de variação para MgO, com exceção do Ba, Rb, Sr e K, cujos valores de níveis de significância são indicativos de dispersão, possivelmente como consequência de processos pós-magmáticos (**Tabela 4.1**). A assembléia fracionante utilizada no modelo corresponde à assembléia de fenocristais estimada na petrografia (**Seção 3.3**). Os valores de  $Kd_i$  utilizados no modelo são aqueles sugeridos por **Rollinson (1993)**.

Os resultados do modelo são apresentados na **Figura 4.5**.



**Figura 4.5:** Diagrama de elementos traços móveis e imóveis normalizado para condrito com o resultado do modelo de cristalização fracionada para os basaltos da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> estudada. O elemento Ta não foi considerado na modelagem devido a possíveis processos de contaminação durante a preparação das amostras (**Anexo III**).

Os resultados mostram que as variações das concentrações de Ti, Nb, Y, Zr, Th, Hf e elementos terras raras (La, Ce, Nd, Sm, Tb, Tm e Yb) na suíte podem ser explicadas por 42% de cristalização fracionada envolvendo uma assembléia de fenocristais composta por 15% de olivina, 40% de augita e 45%

de plagioclásio, a partir de um líquido parental, representado pela amostra CF-TD-14b, até um líquido evoluído, representado pela amostra CF-TD-03a (**Figura 4.5**). Para a maioria destes elementos (Ti, Y, Zr, Hf, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Tm e Yb), a diferença entre valores medidos e modelados ficou abaixo de 10%, com uma média de 5,3% (**Tabela 4.5**).

**Tabela 4.5:** Concentrações normalizadas dos elementos traços incompatíveis no líquido mais evoluído modelo ( $C_{L}^{Modelo(N)}$ ) e no líquido mais evoluído medido ( $C_{L}^{Medido(N)}$ ) (amostra CF-TD-03a).  $\%C_{L(N)}$  é a diferença, em porcentagem, do  $C_{L}^{Modelo(N)}$  e  $C_{L}^{Medido(N)}$ .

	$C_{L}^{Modelo(N)}$	$C_{L}^{Medido(N)}$	$\%C_{L(N)}$
<b>Ba</b>	38	29	-
<b>Rb</b>	321	20	-
<b>Th</b>	40	36	12
<b>K</b>	132	24	-
<b>Nb</b>	34	40	16
<b>Ta</b>	0	0	
<b>La</b>	44	43	3
<b>Ce</b>	35	34	4
<b>Sr</b>	16	16	2
<b>Nd</b>	26	26	1
<b>P</b>	18	21	17
<b>Sm</b>	22	22	1
<b>Zr</b>	16	15	2
<b>Hf</b>	17	17	2
<b>Ti</b>	16	16	1
<b>Tb</b>	20	21	5
<b>Y</b>	18	20	5
<b>Tm</b>	19	19	2
<b>Yb</b>	18	19	6
Média			5,3

O modelo de cristalização fracionada não mostrou resultados satisfatórios para Ba, Rb, K e Sr. No entanto, as concentrações destes

elementos não têm nenhum valor petrogenético devido a prováveis processos secundários (**Seção 4.2 e Figura 4.3**). O modelo também não apresentou resultados tão satisfatórios, isto é, com diferenças entre valores medidos e modelados superiores a 10%, para o Th (12%, talvez também como consequência de alguma mobilidade), o Nb (16%) e o P (17%). A discrepância do modelo para Nb não pode ser atribuída a processos secundários dada a reconhecida imobilidade deste elemento. Vale notar que se um valor de  $C_0=7,6\text{ppm}$  para Nb for utilizado no modelo, os valores normalizados de  $C_L$ , nos líquidos modelo e da amostra CF-TD-03a, passam a ser, respectivamente, 40 e 37 ao invés de 40 e 34, obtidos para um valor de  $C_0=7\text{ppm}$ , correspondente à amostra parental CF-TD-14b (**Figura 4.5 e Anexo II**). Esta diferença percentual entre os dois valores de  $C_0$  (isto é,  $\{[(7,6/7)\times 100] - 100\}=8,6\%$ ) é próximo ao valor de exatidão (8,9%) obtido para as análises de Nb (**Anexo III**), o que implica que os dois valores de  $C_0$  (7,6 e 7 ppm) podem ser considerados virtualmente idênticos. Isto melhora consideravelmente o modelo fazendo com que a diferença percentual obtida inicialmente para os valores medido e modelo para Nb seja reduzida dos 16% originais para 7%. Se o mesmo exercício for feito para P, obtém-se uma redução de 17% para 10% no valor de diferença percentual entre as concentrações deste elemento no líquido modelo e no líquido evoluído medido (CF-TD-03a). Esses ajustes propostos para Nb e P resultariam numa diferença percentual média de 4,2% (ao invés de 5,3%) para todos os elementos traços imóveis utilizados na modelagem. Este parece ser um valor satisfatório e capaz de validar o modelo de cristalização fracionada proposto.

Segundo o modelo de cristalização fracionada apresentado, a razão La/Yb do líquido evoluído modelo é 4,0. Logo, o processo de cristalização fracionada não pode explicar as razões La/Yb > 4,0 de nove amostras dentro desta suíte ( $4,0 < \text{La/Yb} < 8,6$ ) (**Tabela 4.3**). Assim, essas nove amostras devem integrar outra(s) suíte(s) de baixo-TiO<sub>2</sub> na área, conforme sugerido em seções anteriores desta dissertação. Vale ressaltar mais uma vez, no entanto, que a exclusão dessas nove amostras da população ( $n=30$ ) utilizada nas análises dos processos evolutivos não altera o resultado apresentado na **Seção 4.2**.

#### 4.4 Modelagem geoquímica do processo de fusão parcial: Quantas fontes?

Nesta seção será modelado o processo de fusão parcial relacionado à(s) fonte(s) geradora(s) dos basaltos de baixo-TiO<sub>2</sub> que ocorrem na área estudada.

Existem quatro tipos de modelos mais simples de fusão parcial (**Wilson, 1989**), quais sejam:

1. Equilíbrio modal
2. Equilíbrio não-modal
3. Fracionada modal
4. Fracionada não-modal

No caso do modelo de fusão parcial em equilíbrio, o líquido reage continuamente e permanece em equilíbrio com a fase residual sólida até que condições mecânicas sejam alcançadas de modo a expulsar o líquido de uma só vez. Neste caso, portanto, o líquido segrega de uma só vez, ao término da fusão. Em contrapartida, no modelo do tipo fracionado, conhecido como fusão de Rayleigh, apenas uma quantidade de líquido é gerada e instantaneamente isolada da fonte. Neste caso, o líquido segrega ao longo do processo de fusão parcial. Os modelos de fusão parcial em equilíbrio e fracionada podem ser modais ou não-modais. Em um modelo de fusão parcial modal, as proporções dos minerais (a moda) da fonte são mantidas constantes ao longo do processo. No caso de modelos de fusão parcial não-modal, há mudança nas proporções dos minerais ao longo do processo.

A fusão fracionada, em geral, parece representar o modelo mais aplicável para explicar a petrogênese de basaltos alcalinos, por exemplo. No entanto, na natureza, o processo de fusão fracionada é possivelmente infrequente, pois é difícil a segregação instantânea de líquidos magmáticos da trama da fonte peridotítica, geralmente granoblástica. Contudo, modelos físicos de extração de líquidos comprovam que pequenas frações de líquidos podem

ser extraídas do manto a muito pouca quantidade de fusão parcial (**McKenzie, 1985; O’Nions and McKenzie, 1988**).

A fusão parcial não-modal deve ser mais freqüente que a modal. Entretanto, os resultados, em termos de concentração de elementos nos líquidos formados, são muito similares utilizando-se as equações que regem os dois tipos de processo (**Wilson, 1989**). Logo, na construção de modelos simples de fusão parcial, pode-se usar as equações de equilíbrio modal.

Com base no exposto, um modelo de fusão parcial de equilíbrio modal foi construído para testar a possibilidade de gerar os líquidos basálticos de baixo-TiO<sub>2</sub> estudados, com distintos valores de La/Yb<sub>(N)</sub>, a partir de uma mesma fonte. A fórmula da equação (**Wood & Fraser, 1976**) é:

$$C_L/C_O = 1/(F + D_{RS} - F D_{RS}) \quad (\text{equação 4.2}), \text{ onde:}$$

**C<sub>L</sub>** = concentração do elemento traço no líquido;  
**C<sub>O</sub>** = concentração do elemento traço no sólido (fonte) residual;  
**D<sub>RS</sub>** = coeficiente de partição total no sólido residual;  
**F** = fração de peso do líquido formado, isto é, o grau (%) de fusão parcial (p.ex.: F=0.1 = 10% de fusão parcial).

**D<sub>RS</sub>** pode ser expresso por:

**D<sub>RS</sub> =  $\sum_{i=1}^n W_i K_{d_i}$** , onde **W** é a proporção da fase *i* no sólido residual e **K<sub>d<sub>i</sub></sub>** é o coeficiente de partição mineral/líquido para líquidos (basálticos) (**Rollinson, 1993**).

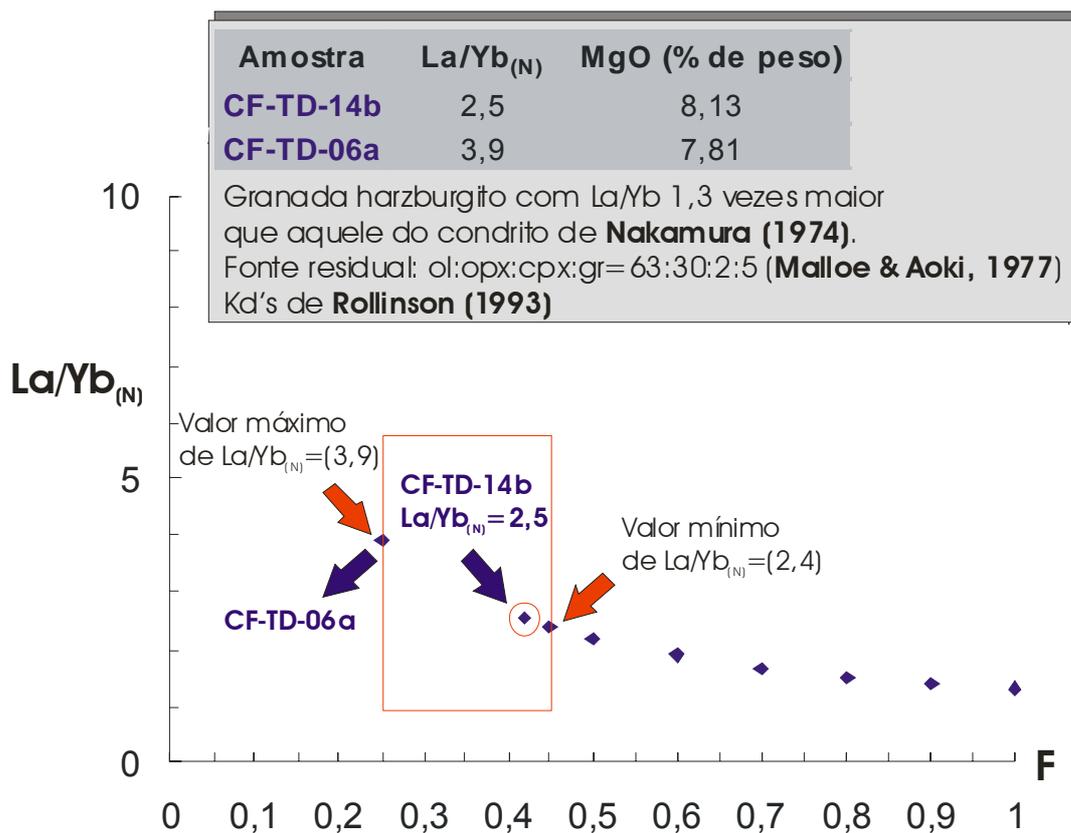
Os principais problemas intrínsecos à modelagem são: 1) a escolha de fases estáveis na fonte mantélica residual e; 2) a fixação de valores médios de fusão parcial para a geração de líquidos olivina-toleítos a partir de um manto lherzolítico ou harzburgítico.

Análises experimentais mostraram que para a média de valores de fusão parcial necessária à geração de líquidos olivina-toleítos (*i.e.* 25-45% de fusão parcial da fonte) a grandes profundidades (35GPa), o resíduo seria harzburgítico com fase aluminosa não-modal (**Mysen & Kushiro, 1977**). Mais

recentemente, cálculos termodinâmicos também têm mostrado que o clinopiroxênio, preferencialmente à fase aluminosa, desaparecerá do resíduo acima de aproximadamente 18% fusão parcial sob pressões menores que 1GPa (**Hirschmann *et al.*, 1999**). Em ambos os casos, portanto, os resultados experimentais demonstram que a fase aluminosa permanece no sólido residual durante o processo de fusão parcial sob as condições de pressão mencionadas acima.

Duas amostras de basalto de baixo-TiO<sub>2</sub> com distintas razões La/Yb<sub>(N)</sub> foram selecionadas para a modelagem. A amostra CF-TD-14b é a amostra parental (MgO=8,13%peso) da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub>. A outra amostra selecionada (CF-TD-06a) tem um valor de MgO (7,80%peso) que pode ser considerado igual àquele da amostra CF-TD-14b uma vez que a diferença (4%) dos valores de MgO entre as duas amostras selecionadas é menor que o valor da exatidão (5%) obtido para este óxido (**Anexo III**). Assim, as amostras CF-TD-14b e CF-TD-06a representam líquidos basálticos com o mesmo grau de evolução, muito embora possuam razões de La/Yb<sub>(N)</sub> muito distintas (respectivamente, 2,5 e 3,9). Essa diferença de razões La/Yb<sub>(N)</sub> e os resultados de modelagem do processo de cristalização fracionada apresentados anteriormente (**Seção 4.3**) sugerem que estas amostras não pertencem a mesma suíte. Assim, o principal objetivo do modelo de fusão parcial é verificar se estas amostras podem estar relacionadas a diferentes quantidades de fusão parcial a partir de uma mesma fonte ou se elas foram geradas a partir de fontes distintas, com base nos seus diferentes valores de La/Yb<sub>(N)</sub>.

Os resultados do modelo são apresentados na **Figura 4.6**. A fonte residual escolhida foi um granada harzburgito (**Maaloe & Aoki, 1977**) representativa do manto litosférico subcontinental, considerado uma fonte do tipo enriquecida (**Figuras 4.3 e 4.4**). O fator de enriquecimento escolhido para a fonte harzburgítica equivale a 1,3 vezes o valor da razão La/Yb do condrito de **Nakamura (1974)** (ou seja, La=0,8554ppm e Yb=0,44ppm). Esta fonte, portanto, representa um manto que teria sido mais enriquecido (cerca de 2,6 vezes) em La do que em Yb (cerca de 2,0 vezes), comparativamente aos valores condríticos considerados no modelo, gerando uma razão La/Yb=1,9.



**Figura 4.6:** Diagrama mostrando os testes de modelos de fusão parcial em equilíbrio modal para discriminação das fontes das suítes de baixo-TiO<sub>2</sub> do enxame na área. O retângulo vermelho delimita o intervalo de F gerador de magmas basálticos toleíticos (**Mysen & Kushiro, 1977; Jacques & Green, 1980**). F= a quantidade de fusão parcial.

O modelo proposto foi elaborado assumindo que a fusão em equilíbrio ocorreu a profundidades dentro do campo do granada peridotito ( $\geq 3.0$  GPa; e.g. **Kogiso et al., 1998**) devido à existência de uma litosfera espessa do Gondwana no Cretáceo Inferior bem como pela caracterização do envolvimento de um componente litosférico na petrogênese dos basaltos estudados (**Figura 4.3**). Os testes foram feitos com base em um resíduo harzburgítico com 63% de olivina, 30% de ortopiroxênio, 2% de clinopiroxênio e 5% de granada (**Maaloe & Aoki, 1977**). O modelo assume que o clinopiroxênio e a granada são fases estáveis no resíduo durante todo o intervalo de fusão parcial requerido para produzir magmas basálticos toleíticos (25%-45%), com base

nos dados de petrologia experimental apresentados anteriormente (**Mysen & Kushiro, 1977; Hirschmann et al., 1999**). O modelo foi construído de modo a que a razão  $\text{La/Yb}_{(N)}$  da amostra CF-TD-06a (3,9) pudesse ser gerada sob o valor mínimo de fusão parcial (*i.e.* 25%) (**Figura 4.6**). Nas mesmas condições, a razão  $\text{La/Yb}_{(N)}$  da amostra CF-TD-14b (2,5) poderia ser geradas no valor próximo do máximo de fusão parcial (*i.e.* 42%) (**Figura 4.6**).

Os dados obtidos pela modelagem geoquímica do processo de fusão parcial permitem concluir que os basaltos das suítes de baixo- $\text{TiO}_2$  do Enxame de Diques da Serra do Mar na porção referente a Região dos Lagos têm valores de razões  $\text{La/Yb}_{(N)}$  que podem ser gerados no intervalo de 25% a 45% de fusão parcial necessários para a geração de líquidos toleíticos (**Mysen & Kushiro, 1977**). Logo, os basaltos desta suíte podem ter sido gerados a partir de uma mesma fonte sob diferentes quantidades de fusão parcial.

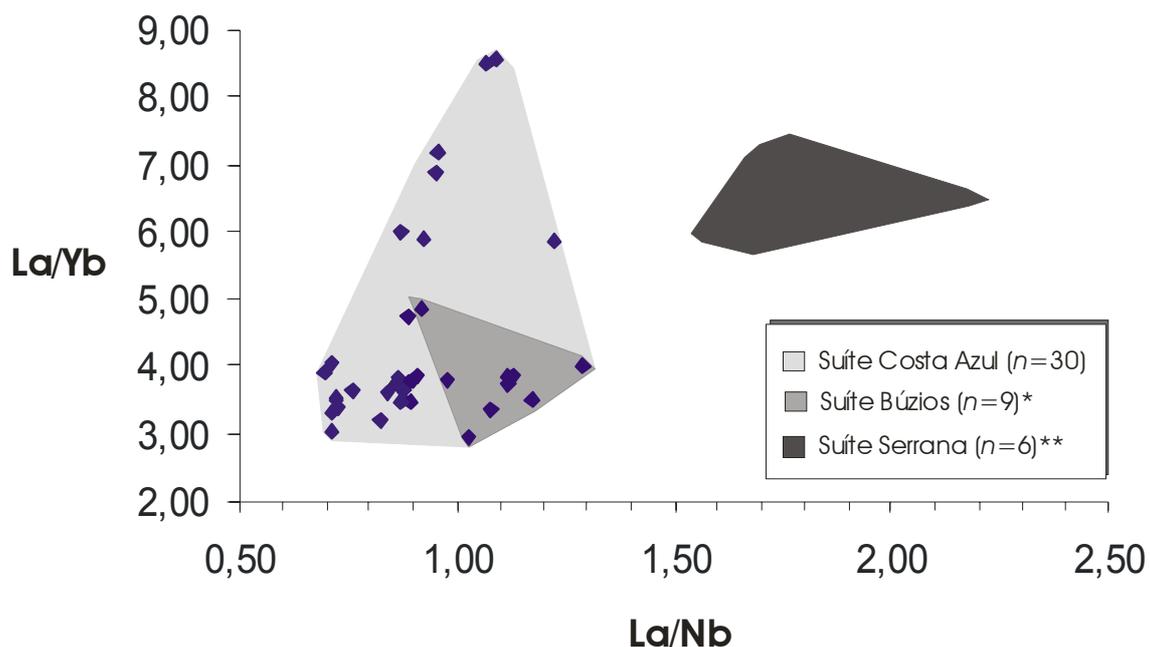
Testes alternativos ao modelo de fusão parcial apresentado acima envolvendo uma fonte harzburgítica sem granada, bem como fonte harzburgítica com espinélio foram efetuados. No entanto, os modelos não foram capazes de gerar as diferentes razões  $\text{La/Yb}_{(N)}$  (isto é, 2,5 e 3,9) dos dois líquidos dentro do intervalo de fusão parcial considerado (25-45%). Deste modo, considerando-se a validade do modelo proposto, a petrogênese dos basaltos de baixo- $\text{TiO}_2$  do Enxame de Diques da Serra do Mar na área de estudo parece ter envolvido necessariamente um componente litosférico espesso, isto é, com fase aluminosa representada por granada.

#### 4.5 Comparações regionais

No Enxame de Diques da Serra do Mar existem pelo menos duas suítes de baixo- $\text{TiO}_2$ , a saber, suítes Serrana e Búzios, discriminadas em base geoquímica (**Monteiro & Valente, 2003**).

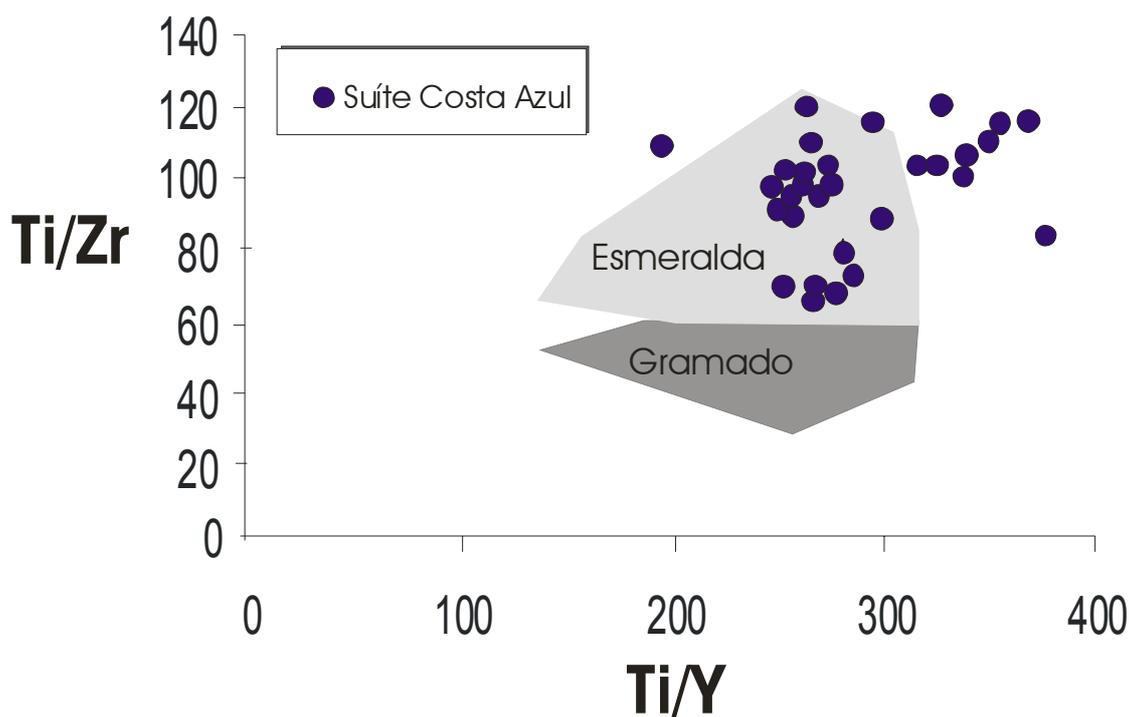
A **Figura 4.7** apresenta um diagrama  $\text{La/Nb}$  versus  $\text{La/Yb}$ . Este diagrama discriminou bem as duas suítes de baixo- $\text{TiO}_2$  do Enxame de Diques da Serra do Mar, separando-as em quadrantes diferentes (**Monteiro &**

Valente, 2003; Dutra *et al.*, 2005) Neste diagrama, os basaltos da Suíte Serrana plotam em um campo com La/Yb (>5ppm) e La/Nb (>1,5ppm), enquanto que os basaltos da Suíte Búzios apresentam valores comparativamente mais baixos destas mesmas razões de elementos traços incompatíveis (La/Yb < 5ppm e La/Nb < 1,5ppm). É importante notar que os campos foram discriminados com um número restrito ( $n=15$ ) de amostras. O diagrama da **Figura 4.7** mostra que a inclusão das amostras desta dissertação amplia bastante o intervalo de um dos parâmetros discriminantes (La/Yb). Contudo, as razões La/Nb continuam como parâmetros discriminantes entre as suítes. Assim, dados geoquímicos agora disponíveis permitem criar uma suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> mais ampla, que abrange a Suíte Búzios, sendo aqui denominada de Suíte Costa Azul ( $0,6 < \text{La/Nb} < 1,4$  e  $2,5 < \text{La/Yb} < 9,0$ ) (**Figura 4.7**).



**Figura 4.7:** Diagrama La/Nb versus La/Yb discriminante das suítes de baixo-TiO<sub>2</sub> (Serrana e Búzios) do Enxame de Diques da Serra do Mar, baseado em razões de elementos traços incompatíveis imóveis (Monteiro & Valente, 2003) com as amostras estudadas nesta dissertação. \* Amostras retiradas de Tetzner, 2002. \*\* Amostras retiradas de Ludka, 1997; Corval, 2005. O campo da suíte Costa Azul inclui 21 amostras analisadas nesta dissertação e 9 amostras da suíte Búzios.

Os dados litogeoquímicos desta dissertação também foram utilizados em comparações com os basaltos da Província Paraná-Etendeka. A comparação se justifica porque essa província basáltica toleítica continental tem destaque regional e está inserida no mesmo contexto de fragmentação do Gondwana ao qual o Enxame de Diques da Serra do Mar está associado. As comparações foram feitas com base nos parâmetros discriminantes baseados na razão entre elementos traços incompatíveis (**Hergt *et al.*, 1991; Peate *et al.*, 1992**). De acordo com o diagrama bivalente apresentado na **Figura 4.8**, a suíte de baixo  $\text{TiO}_2$  estudada nesta dissertação pode ser relacionada com a Suíte Esmeralda, muito embora abrangendo um espectro de razões  $\text{Ti/Y}$  mais amplo.



**Figura 4.8:** Diagrama  $\text{Ti/Y}$  versus  $\text{Ti/Zr}$  discriminante das suítes de baixo- $\text{TiO}_2$  (Esmeralda e Gramado) da Província Magmática Paraná-Etendeka, baseado em razões de elementos traços incompatíveis imóveis (**Hergt *et al.*, 1991; Peate *et al.*, 1997**) com as amostras estudadas nesta dissertação.

#### 4.6: Conclusões

Os diagramas de variação para elementos maiores e a variação da razão dos elementos traços incompatíveis (Zr/Y, Zr/Nb, Y/Nb e La/Yb) da amostra parental (CF-TD-14b) e da amostra mais evoluída (CF-TD-03a) da suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> que ocorre na Região dos Lagos, no Estado do Rio de Janeiro indicam que ela evoluiu por cristalização fracionada sem mudança de assembléia fracionante. Fontes enriquecidas estiveram associadas à petrogênese destes basaltos, o que implica em pelo menos uma contribuição de componentes litosféricos. As variações das concentrações de Ti, Nb, Y, Zr, Th, Hf, e elementos terras raras (La, Ce, Nd, Sm, Tb, Tm e Yb) na suíte podem ser explicadas por 42% de cristalização fracionada envolvendo uma assembléia de fenocristais composta por 15% de olivina, 40% de augita e 45% de plagioclásio, a partir de um líquido parental (amostra CF-TD-14b) até um líquido evoluído (amostra CF-TD-03a). Amostras com a mesma concentração de MgO e razões de elementos traços incompatíveis imóveis que excedem os 50% toleráveis para a evolução por cristalização fracionada foram encontradas na área de estudo. Isto evidencia a existência de mais de uma suíte de baixo-TiO<sub>2</sub> na área. Os dados obtidos pela modelagem geoquímica do processo de fusão parcial permitem concluir que os basaltos de pelo menos algumas destas suítes de baixo-TiO<sub>2</sub> podem ter sido gerados pela mesma fonte sob diferentes quantidades de fusão parcial. No entanto, o número ainda restrito de amostra impede a discriminação destas possíveis diferentes suítes. Assim, preliminarmente os basaltos de baixo-TiO<sub>2</sub> da área estudada foram inseridos numa única e mais ampla suíte, aqui denominada Suíte Costa Azul, que pode ser distinta de outra grande suíte de baixo-TiO<sub>2</sub>, denominada Suíte Serrana, já identificada à noroeste da área estudada em trabalhos anteriores. Em termos regionais, a Suíte Costa Azul pode ser relacionada com a Suíte Esmeralda que ocorre na subprovíncia Sul de Paraná-Etendeka, muito embora abrangendo um espectro mais amplo de razões Ti/Y.