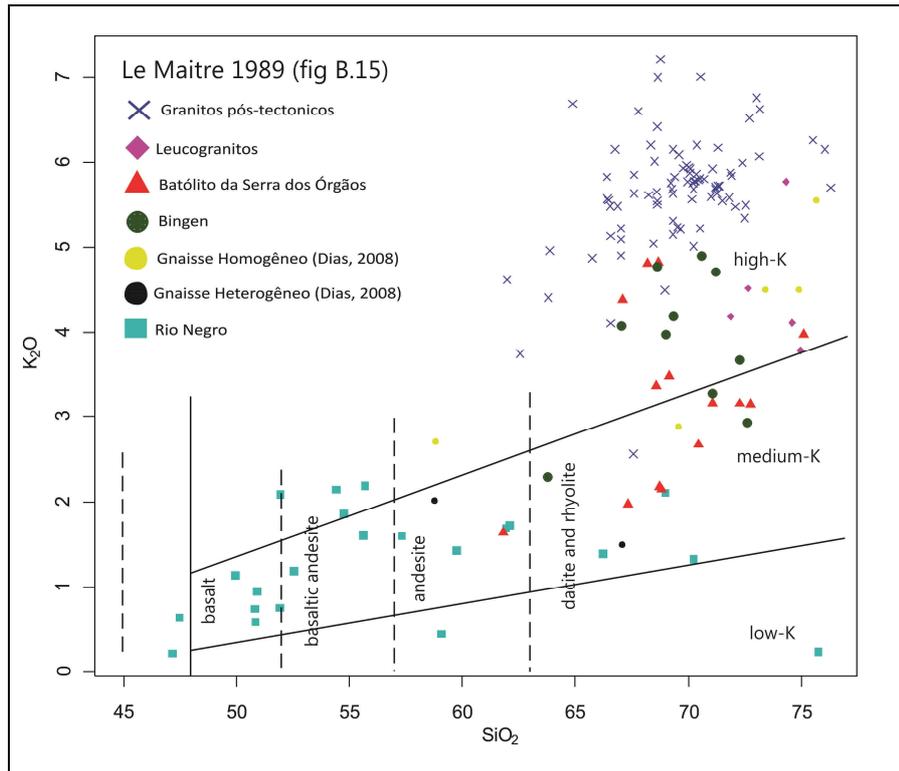
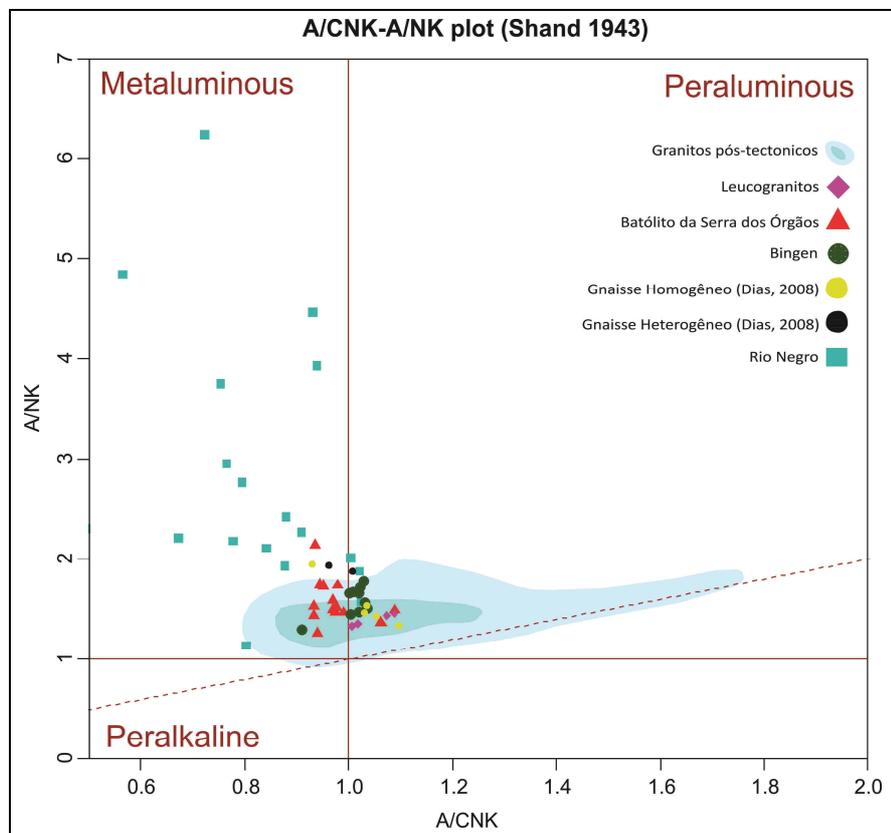


Figura 30 – Diagramas  $K_2O$  vs  $SiO_2$  de LeMaitre, (1989)



Fonte: O autor, 2011.

Figura 31 – Diagrama classificatório de Shand (1943)



Fonte: O autor, 2011.

Em comparação com os gnaisses de Dias (2008), percebe-se que as Unidade Bingen coincidem satisfatoriamente com os gnaisses homogêneos e bandados, ambos também se tratando de gnaisses subalcalinos de tendência calcioalcalina (fig. 29). Nota-se contudo, que as amostras de ambos, Unidade Bingen e gnaissse homogêneo de Dias (2008), configuram uma série de alto  $K_2O$ , com composições mais similares as do e do leucogranito e Batólito Serra dos Órgãos, enquanto o gnaissse bandado pertence a uma série de médio  $K_2O$ , mais similar as amostras do Rio Negro (fig. 30). As amostras dos granitos pós colisionais, por sua vez, apresentam conteúdo de  $K_2O$  mais elevado, se destacando das outras séries neste diagrama (fig 30).

Nos diagramas de linhagem as demais series magmáticas presentes na região também demonstram composições sub-alcalinas de tendência cálcio-alcalina. Nota-se, contudo no diagrama de Shand (fig. 31), que entre os granitos pós-colisionais (todos plotados sob a mesma legenda neste trabalho) são verificadas amostras mais peraluminosas, indicando contaminação de meta-sedimentos para alguns deles.

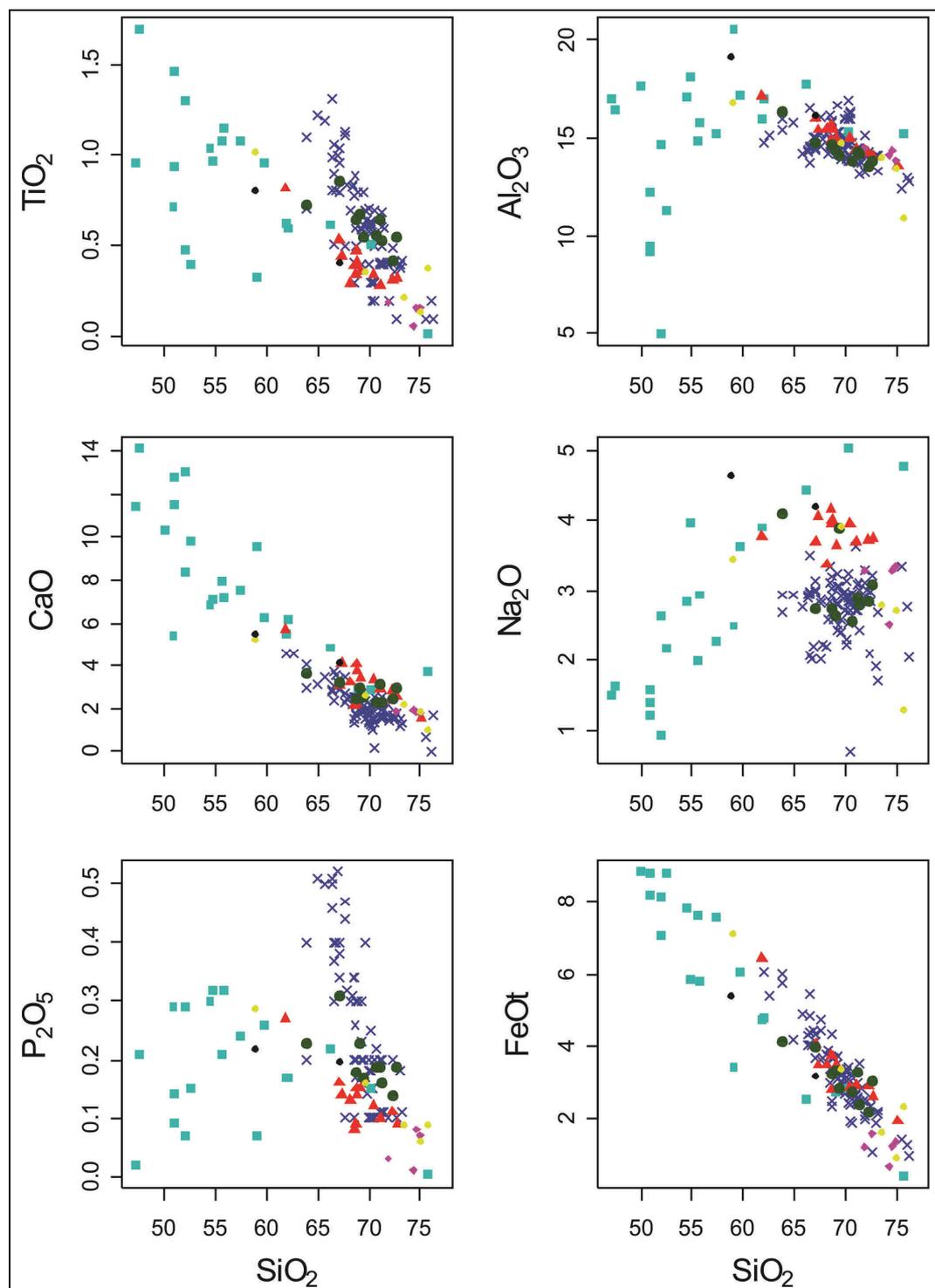
Ainda, na tentativa de melhor compreender o grau de cogeneticidade entre a unidade Bingen e as demais unidades litológicas da região, foram confeccionados diagramas Harker, de variação dos elementos em relação ao teor de  $SiO_2$ . Os diagramas Harker foram confeccionados tanto para os elementos maiores (fig. 32 e 33) e elementos traços selecionados (fig. 33 e 34).

Observa-se entre os elementos maiores (fig. 32), a diferenciação, sobretudo nos diagramas de  $TiO_2$  e  $P_2O_5$ , entre duas series: uma primeira de baixo  $TiO_2$  e  $P_2O_5$  formada pelas amostras do Complexo Rio Negro e uma segunda de alto  $TiO_2$  e  $P_2O_5$ , formada pelos granitos pós-colisionais. Nestes digramas as amostras da Unidade Bingen tendem a se alinhar com a série dos granitos pós-colisionais, enquanto as amostras do gnaissse heterogêneo de Dias (2008), e as amostras do Batólito Serra dos Órgãos, tendem a se alinhar com a série do Complexo Rio Negro. As amostras de leucogranito posicionam-se nas porções finais das séries, onde as mesmas se se sobrepõem, não sendo possível determinar com precisão a que série pertencem.

No diagrama de  $SiO_2$  x  $Na_2O$  também é possível fazer uma distinção interessante entre as famílias magmáticas, com as amostras do Rio Negro e do gnaissse heterogêneo apresentando um conteúdo mais elevado, seguido pelo Batólito da Serra dos Órgãos, mais intermediário, e terminando com as amostras restantes (Bingen, gnaissse homogêneo, leucogranito e granitos pós-colisionais) apresentando baixo conteúdo de  $Na_2O$ . Ao

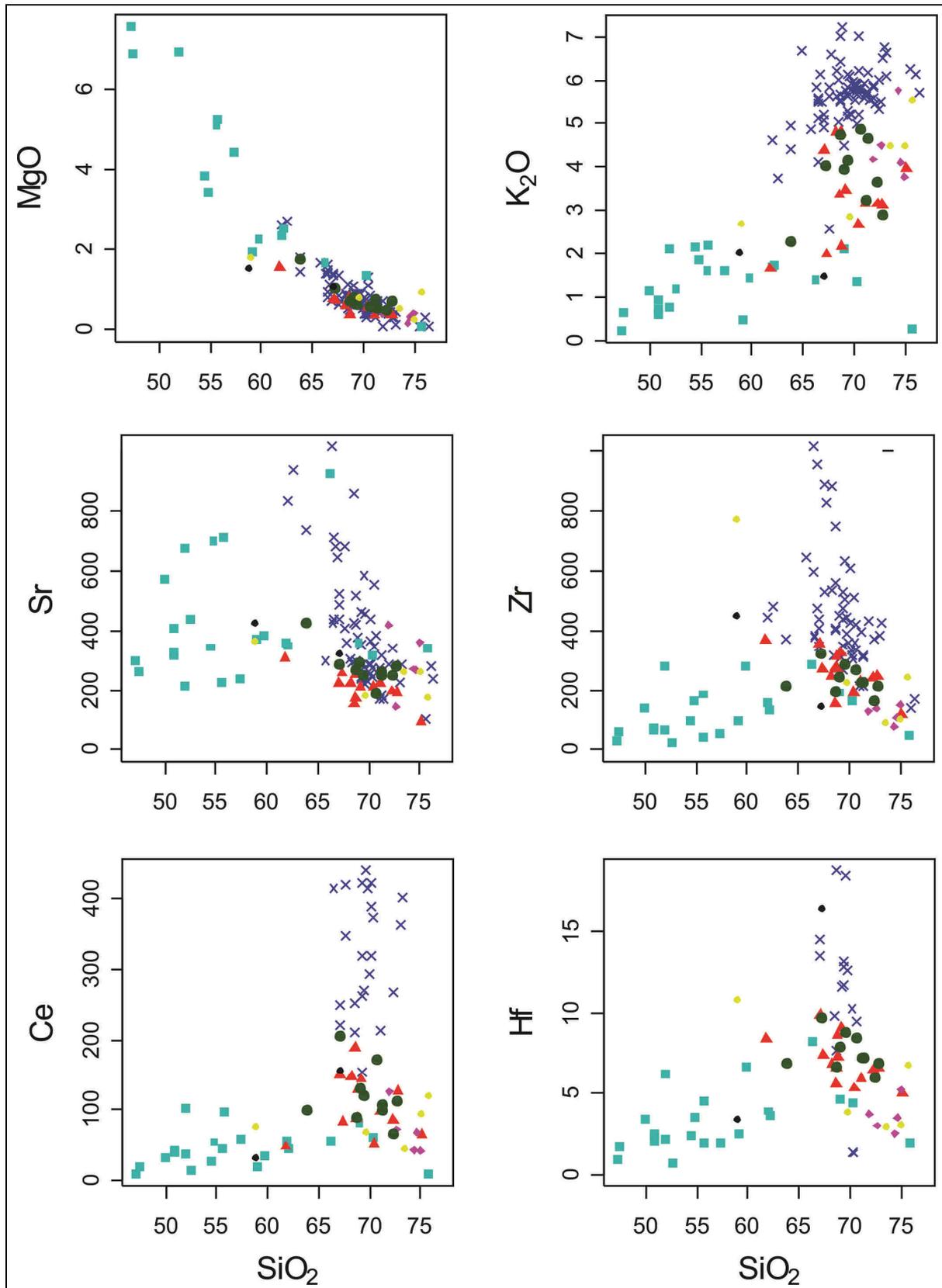
compararmos este diagrama com o diagrama  $\text{SiO}_2 \times \text{K}_2\text{O}$ , notamos uma tendência interessante do Complexo Rio Negro se empobrecer em  $\text{K}_2\text{O}$  (fig. 33) enquanto enriquece em  $\text{Na}_2\text{O}$  (fig. 32), ao passo que na Unidade Bingen e gnaisses homogêneos uma tendência inversa é observada.

Figura 32 – Diagramas Harker das amostras analisadas quimicamente, com base nos elementos maiores.



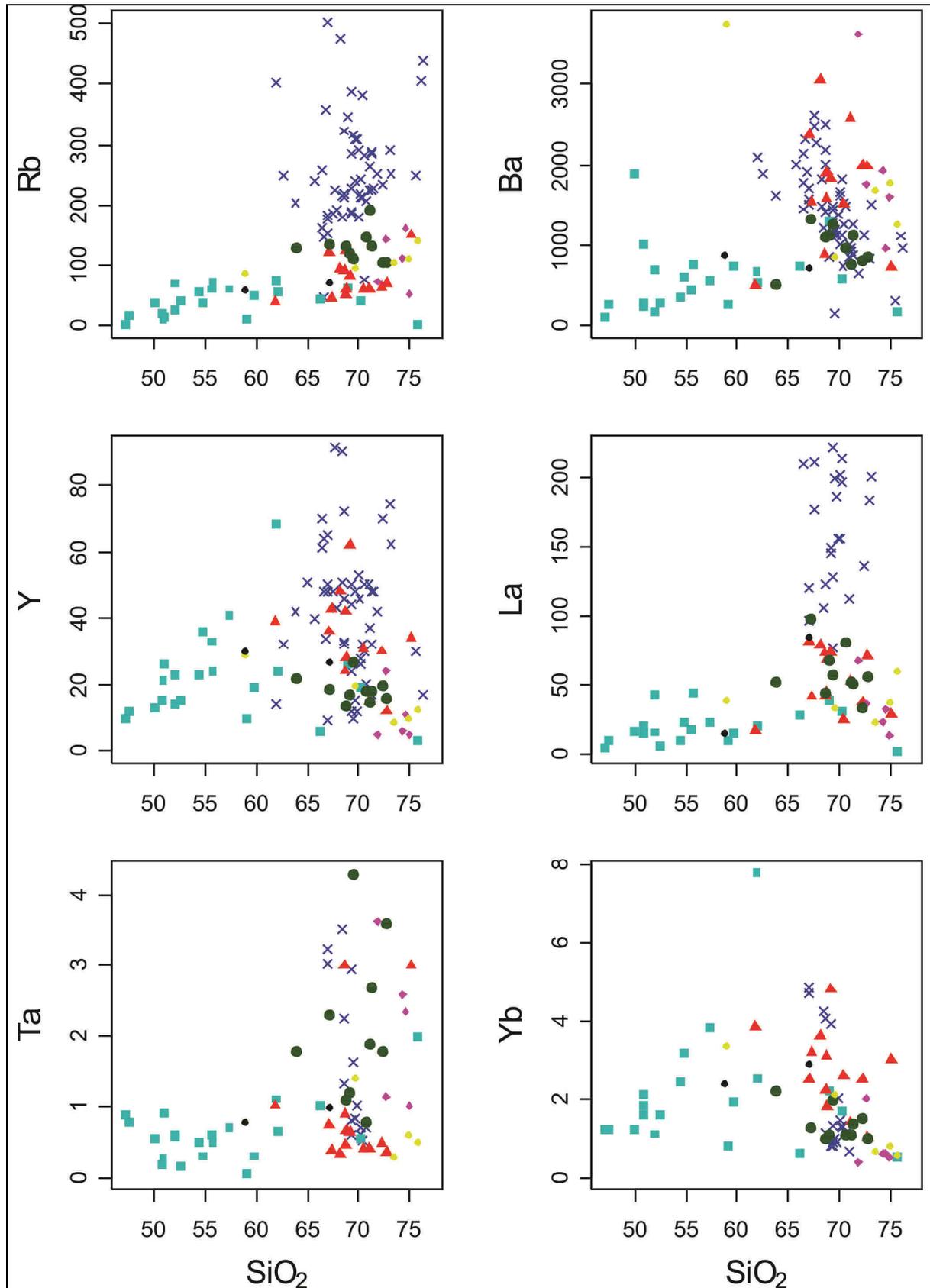
Fonte: O autor, 2011.

Figura 33 – Diagramas Harker das amostras analisadas quimicamente, com base em MgO e K<sub>2</sub>O e em elementos traços.



Fonte: O autor, 2011.

Figura 34 – Diagramas Harker das amostras analisadas quimicamente, com base em elementos traços.



Fonte: O autor, 2011.

Em diversos dos diagramas, tanto de elementos menores, quanto de elementos maiores, podemos observar a formação de trends de enriquecimento seguido de empobrecimento conforme a evolução das rochas do Complexo Rio Negro. Estes trends podem ser bem observados, entre outros, nos diagramas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{P}_2\text{O}_5$  e Zr se formam devido a mudanças na assembléia mineral fracionante no magma de origem dessas rochas, onde após um período de enriquecimento devido a evolução, com o início da cristalização de um determinado mineral (possivelmente apatita no caso de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e zircão no caso de Zircônio) resulta no empobrecimento do magma remanescente nestes elementos.

A análise dos diagramas de Harker de elementos traços (figs. 33 e 34), também demonstra, apesar da maior dispersão dos valores, uma separação entre trends de menor e maior conteúdo de elementos menores formados respectivamente pelas amostras do Complexo Rio Negro e dos granitos pós-tectônicos. Assim como nos diagramas de Harker de elementos maiores, também nestes pode ser observada a tendência das amostras de Bingen em se alinhar com o “trend” dos granitos pós-tectônicos. Esta tendência pode ser notada sobretudo nos diagramas de Harker de Rb, Ba, Ta, La e Ce, e também é notada para as amostras do gnaiss homogêneo, Batólito Serra dos Órgãos e leucogranitos. Esta diferença sugere para a unidade Bingen uma gênese não relacionada a diferenciação do Complexo Rio Negro. As amostras do gnaiss heterogêneo pelo contrário parecem plotar de acordo com o “trend” do Complexo Rio Negro.

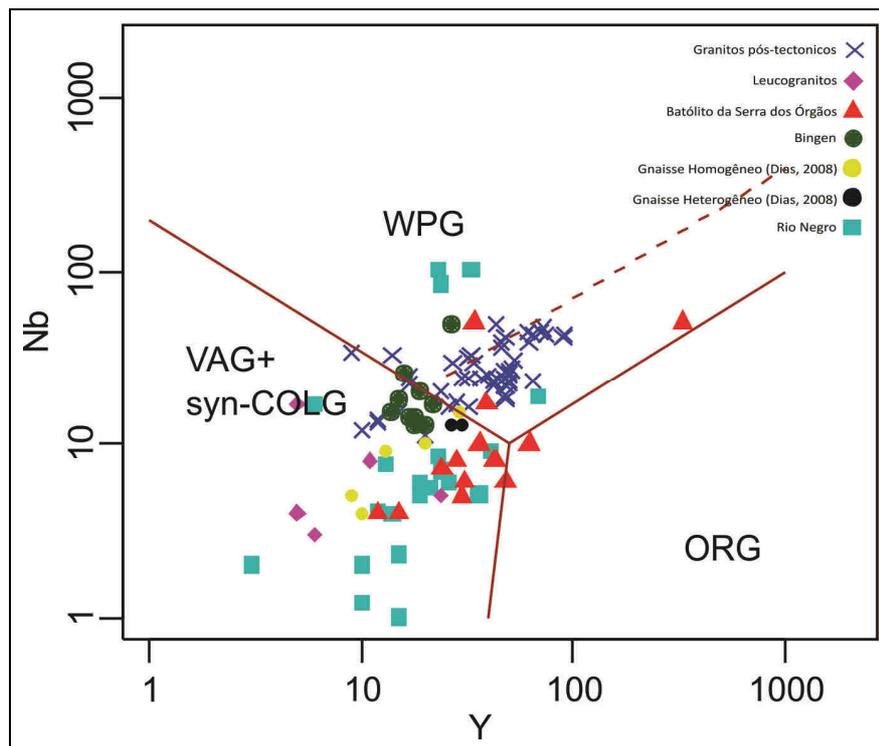
### 6.3.3 Ambientação Geotectônica

Os diagramas de ambientação tectônica de Pearce et al. (1984), baseados em elementos traços exibem resultados interessantes, indicando tanto ambientes convergentes do tipo arco vulcânico, como ambientes sin-colisionais (figs 35 a 38). Nestes diagramas a unidade que mais se assemelha as amostras da Unidade Bingen são os leucogranitos do Complexo Rio Negro, ambas plotando nos mesmos campos em todos os diagramas. De maneira geral a Unidade Bingen também coincide com as amostras de ambos os gnaisses de Dias (2008), do Batólito Serra dos Órgãos e do Complexo Rio Negro, entretanto no diagrama de Ta x Yb (fig. 37), devido a um maior conteúdo de Ta na unidade

Bingen, esta unidade se separa das anteriores plotando no campo dos ambientes tipo sin-colisional, enquanto as demais indicam ambientes francamente do tipo arco-vulcânico.

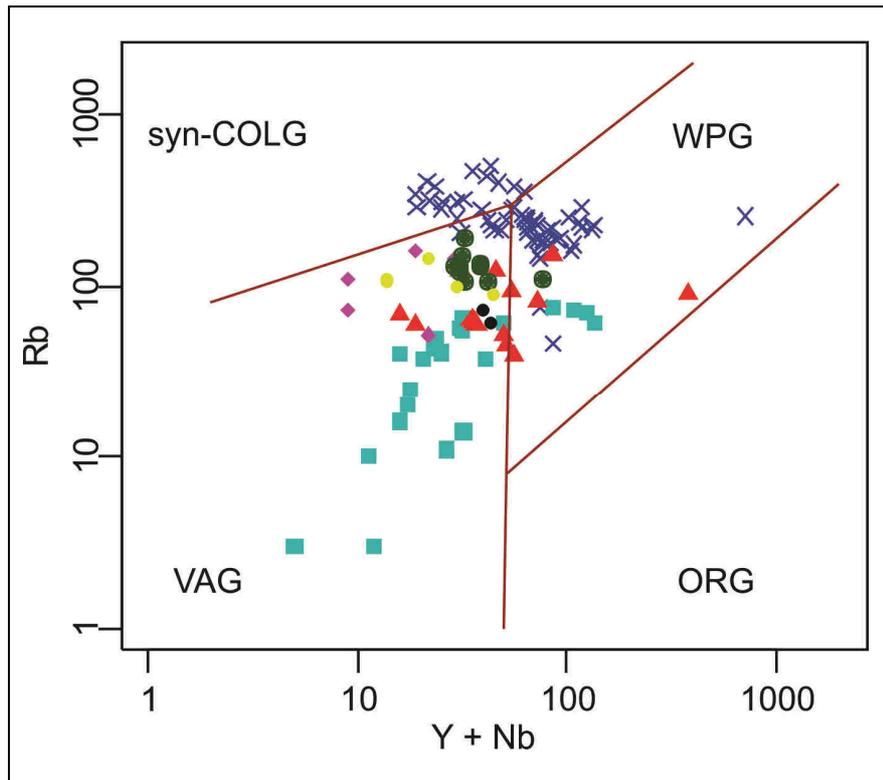
Algumas amostras (BG-49 e 72) da Unidade Bingen ainda apresentam-se fora destes padrões, incidindo no campo dos granitos intra placas. Os granitos tardios no entanto se separam bem das demais unidades, plotando francamente no campo dos granitos intra placa.

Figura 35 – Classificação geotectônica Nb x Y de Pearce et al. (1984)



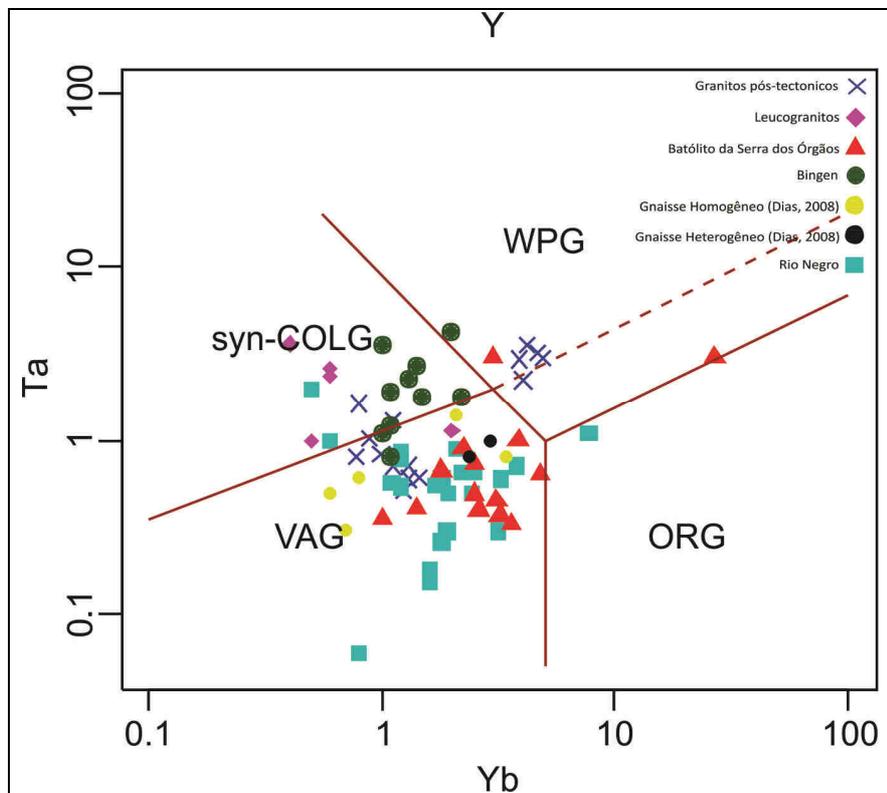
Fonte: O autor, 2011.

Figura 36 – Classificação geotectônica Rb x Nb+Y de Pearce et al. (1984).



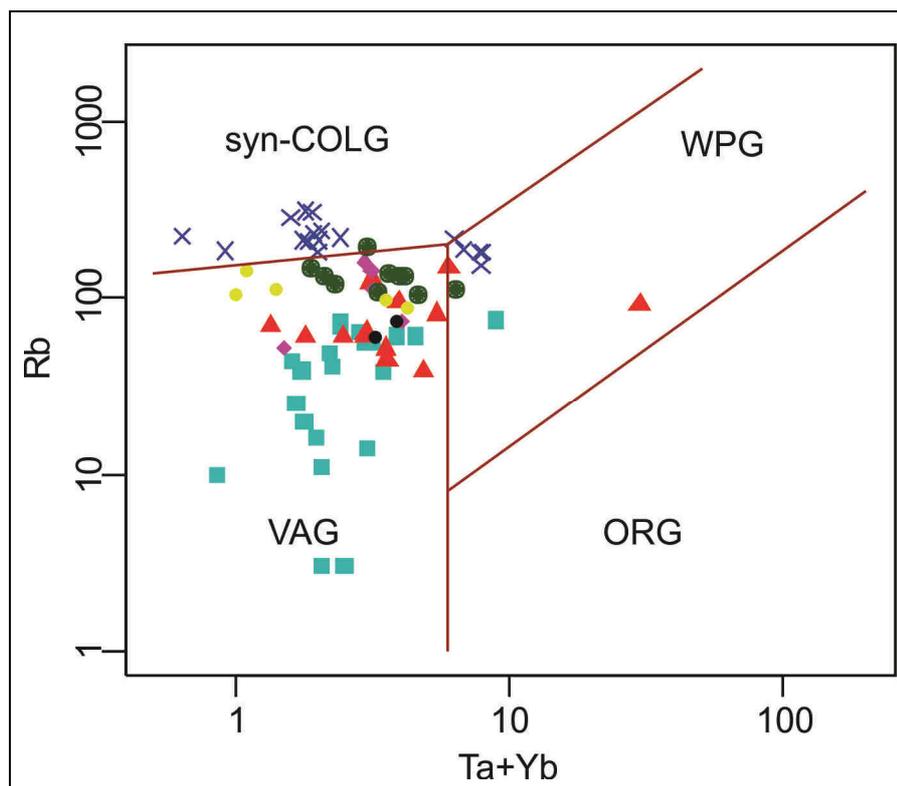
Fonte: O autor, 2011.

Figura 37 – Classificação geotectônica Ta x Yb de Pearce et al. (1984)



Fonte: O autor, 2011.

Figura 38 – Classificação geotectônica Rb x Ta+Yb de Pearce et al. (1984).

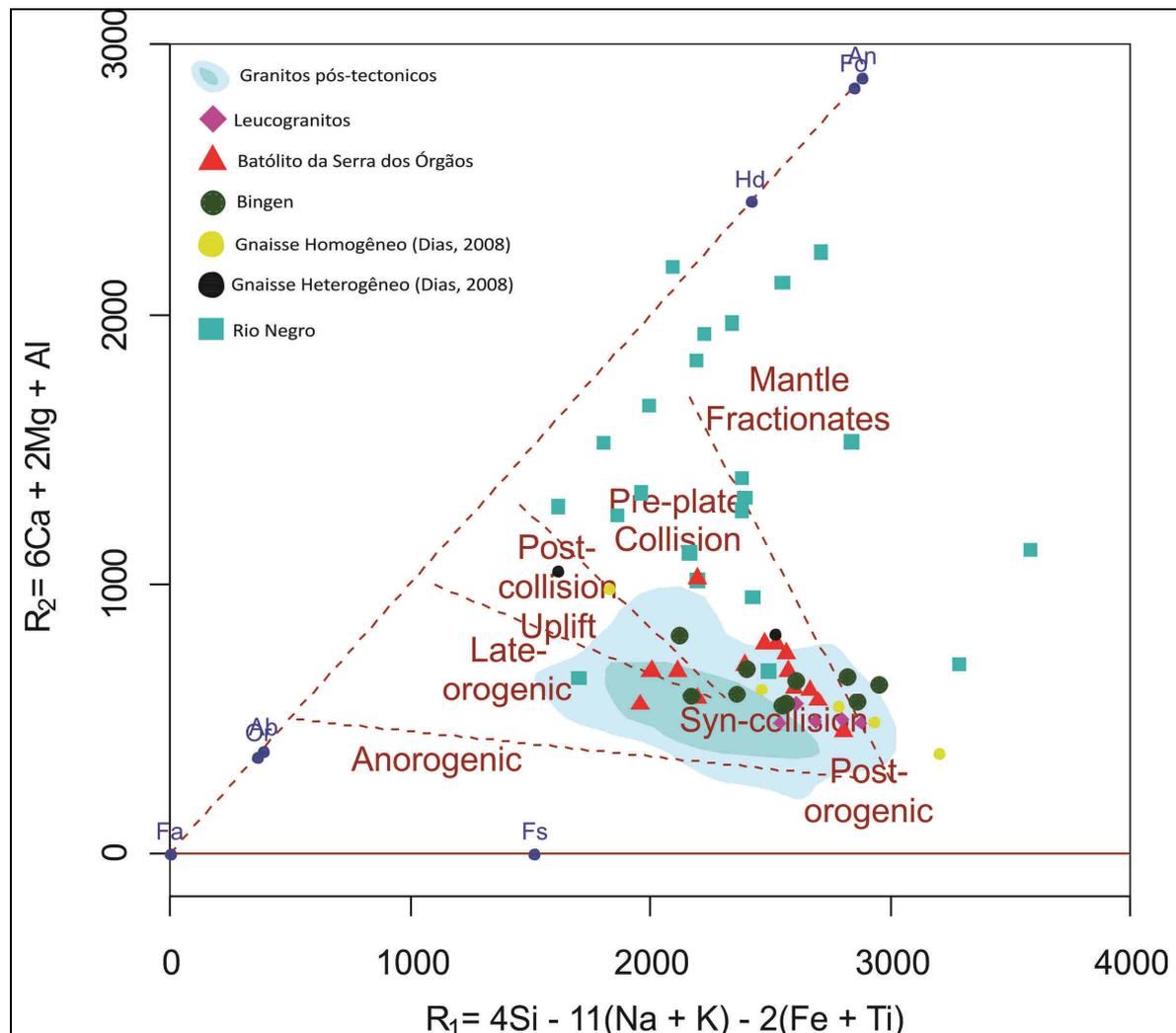


Fonte: O autor, 2011.

Além dos anteriores, foi gerado também o diagrama R1 x R2 de Batchelor & Bowden, (1985), que classifica ambientes tectônicos com base nos elementos maiores (fig. 40). Este diagrama, assim como os anteriores, indica ambientes tectônicos situados entre pré e sin-colisionais, podendo ser observada a formação um “trend” de evolução a partir do campo pré colisional, e apesar de apresentar um pouco mais de dispersão, coincidem bem com o “trend” formado pelas amostras do gnaiss homogêneo de Dias (2008). As amostras do gnaiss bandado, por sua vez, plotam juntamente com as do Complexo Rio Negro francamente no campo das pré-colisionais.

As amostras do Batólito Serra dos Órgãos também formam um “trend” a partir do campo das pré-colisionais, porém tem maior dispersão, chegando aos campos sin-colisional, pós-colisional e tardi-orogênico, enquanto os granitos tardios separam-se bem de todas as demais plotando francamente no campo tardi-orogênico.

Figura 39 – Classificação geotectônica R1 x R2 de Batchelor &amp; Bowden (1985)



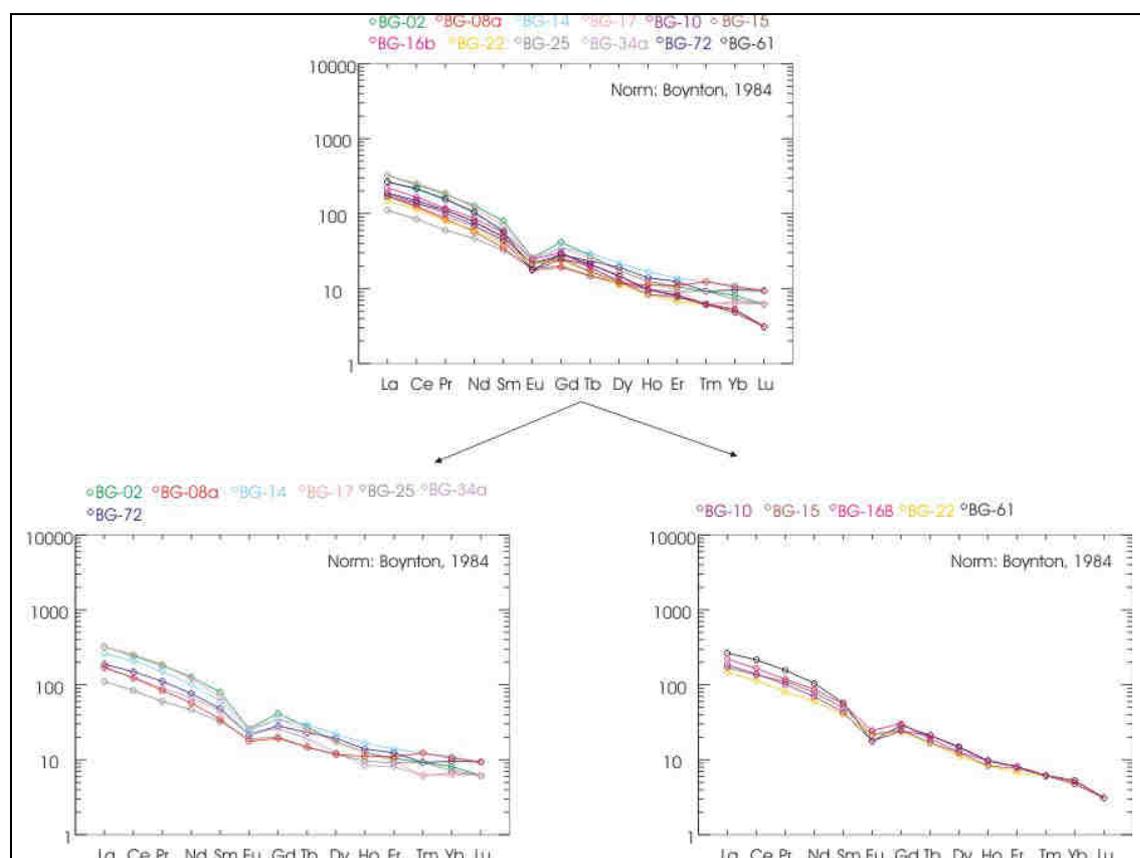
Fonte: O autor, 2011.

#### 6.3.4 Padrão de distribuição dos elementos terras raras

Como parte do estudo geoquímico, também foi realizada uma análise do padrão de distribuição dos elementos terras raras (ETR), normalizados pelo condrito (Boynton, 1984), representando o manto primitivo. Esta análise revelou, para as amostras da Unidade Bingen, uma grande homogeneidade nos resultados, que apresentaram razões  $(La/Yb)_N$  relativamente altas (entre 30 e 45) e anomalias de európio negativas (Tabela ). Ainda, analisando-se separadamente os ETR pesados e leves, nota-se respectivamente homogeneidade no fracionamento dos primeiros; razão  $(La/Sm)_N$ ; e uma leve diferenciação

no que tange os últimos; razão Gd/Yb)<sub>N</sub>, formando 2 grupos, um com menor e outro com maior fracionamento dos mesmos (fig. 40).

Figura 40 – Padrão de distribuição dos elementos terras raras para as amostras da Unidade Bingen



Fonte: O autor, 2011.

Tabela 12 - Razões La/Yb, La/Sm e Gd/Yb normalizadas pelo condrito e concentrações em ppm nestes elementos da Unidade Bingen

Amostra	La	Sm	Gd	Yb	La/Yb <sub>N</sub>	La/Sm <sub>N</sub>	Gd/Yb <sub>N</sub>
BG-02	99,9	15,6	10,8	1,7	39,6	4,0	5,1
BG-08A	53,6	6,8	5	2,2	16,4	5,0	1,8
BG-10	57	8,4	6,3	1	38,4	4,3	5,1
BG-14	81,2	11,9	9	2,3	23,8	4,3	3,2
BG-15	52,5	9,6	6,5	1,1	32,2	3,4	4,8
BG-16B	68,8	10,8	7,9	1,1	42,2	4,0	5,8
BG-17	98,5	13,5	9	1,3	51,1	4,6	5,6
BG-22	45,7	7,8	6,1	1	30,8	3,7	4,9
BG-25	34,4	6,3	5,2	1,5	15,5	3,4	2,8
BG-34A	51,7	8,7	6,8	1,4	24,9	3,7	3,9
BG-61	82,3	11,2	7,5	1,1	50,4	4,6	5,5
BG-72	58,5	9,4	7,3	2	19,7	3,9	2,9

Nota: todas as amostras da Unidade Bingen exetuando-se a amostra BG-49.

Fonte: O autor, 2011.

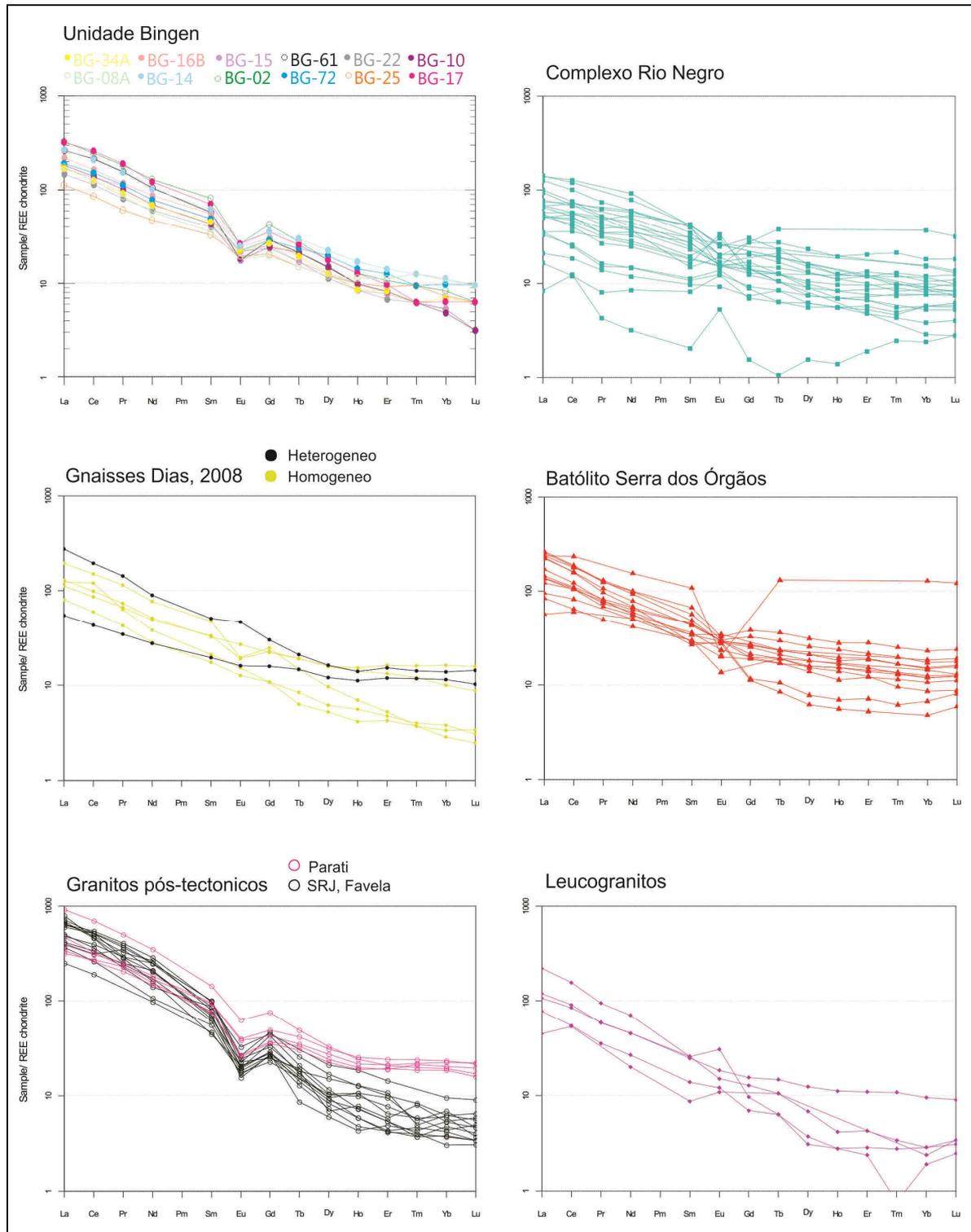
Os valores absolutos e os padrões de fracionamento exibidos pela Unidade Bingen também mostram-se condizentes com o observado para os gnaisses de Dias (2008); fig. 41, embora nestes não seja verificada a anomalia negativa de Európio em todas as amostras. Destas, os gnaisses homogêneos também apresentam variações no fracionamento dos ETRs pesados, enquanto o gnaisse heterogêneo não exibe grande fracionamento.

As amostras do Complexo Rio Negro, por sua vez, apesar de apresentar uma distribuição maior de valores absolutos, não possuem um grande grau de fracionamento entre os ETR pesados e leves, apresentando um padrão mais horizontalizado do tipo gaiivota (fig 40). Apesar do comportamento similar observado nos ETR leves, as amostras do Batólito Serra dos Órgãos também diferem bastante das amostras da Unidade Bingen, por apresentar pouco fracionamento nos ETR pesados (fig. 41).

Com relação aos granitos pós-tectônicos, notamos que estes, apesar do fracionamento bem maior em ETR leves, apresentam padrões de distribuição mais semelhantes ao da Unidade Bingen, com ambos apresentando anomalia negativa de európio em todas as amostras. Ainda com relação aos pós-tectônicos, os ETR dos granitos São Pedro, SJR e Favela se encontram mais fracionados que a Unidade Bingen, enquanto o granito Parati apresenta pouco fracionamento dos ETR pesados em relação a ultima.

Nota-se também que, a despeito da homogeneidade relatada para a Unidade Bingen, uma única amostra desta unidade (BG-49), juntamente com a amostra BG-48, de verificada composição química anômala, apresentaram resultados mais similares às amostras da Unidade Canaã e foram, por isso, plotadas juntamente com as amostras desta unidade.

Figura 41 – Padrão de distribuição dos elementos terras raras para as amostras da Unidade Bingen em comparação as demais unidades geotectônicas da região.



Fonte: O autor, 2011.

Analisando-se a distribuição dos elementos terras raras para as amostras da Unidade Canaã, nota-se que estas, juntamente com as amostras BG-48 e 49, possuem um

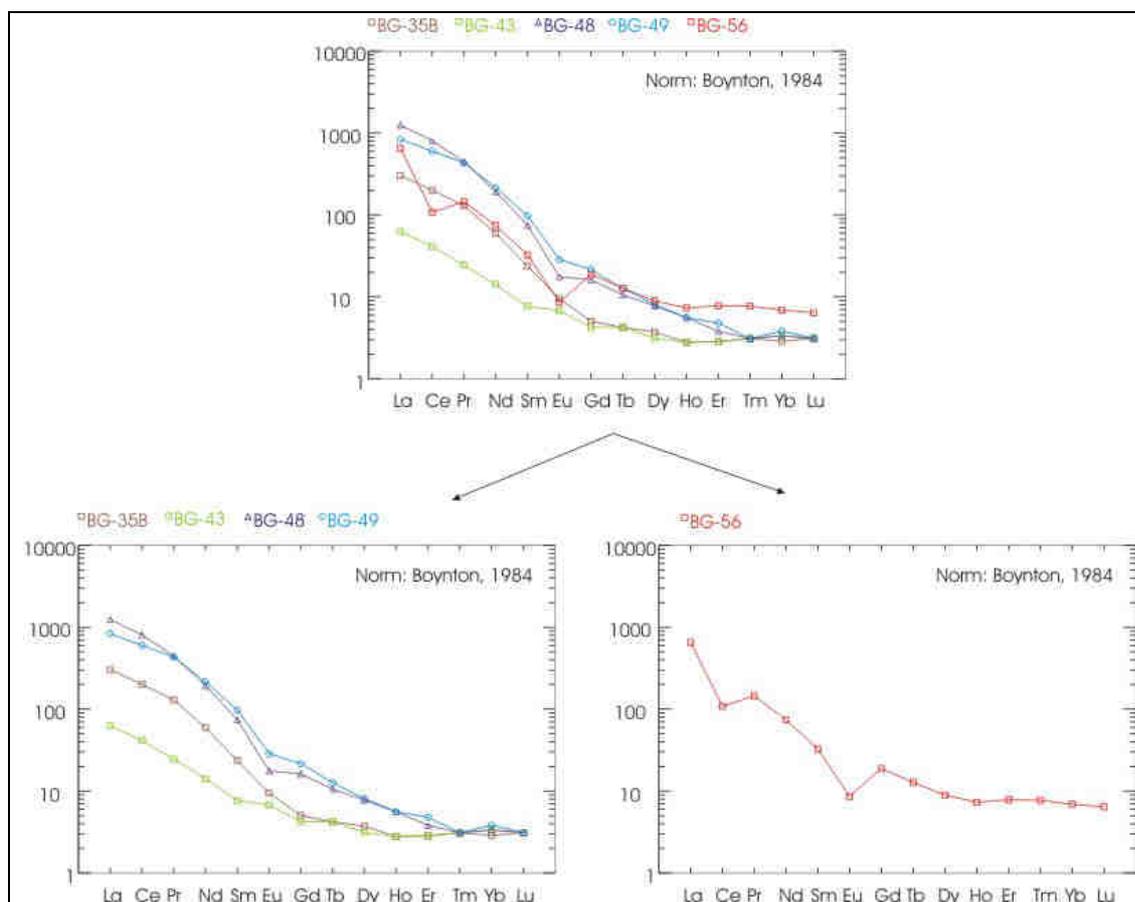
padrão diferente, com acentuadas razões  $(La/Lu)_N$  devido ao maior fracionamento dos ETR pesados (fig. 41 e tabela 13), e fracas a ausentes anomalias negativas de európio, à exceção da amostra BG-56, que apresenta acentuada anomalia negativa de Cério e Európio. No que diz respeito aos terras raras leves, apesar do comportamento similar a respeito dos ETR pesados, as amostras BG-48 e 49 diferem das pertencentes à Unidade Canaã, as primeiras exibindo um forte e maior fracionamento destes elementos (fig. 42).

Tabela 13 - Razões La/Yb, La/Sm e Gd/Yb normalizadas pelo condrito e concentrações em ppm nestes elementos das Unidades Canaã e Santo Aleixo (BG-48), e amostra BG-49 ( Unidade Bingen).

Amostra	La	Sm	Gd	Yb	La/Yb <sub>N</sub>	La/Sm <sub>N</sub>	Gd/Yb <sub>N</sub>
BG-35B	93,8	4,6	1,3	0,6	105,4	12,8	1,7
BG-43	19,4	1,5	1,1	0,7	18,7	8,1	1,3
BG-48	401	26,5	23,4	8,9	30,4	9,5	2,1
BG-49	260	19	5,6	0,8	219,1	8,6	5,6
BG-56	388	14,5	4,2	0,7	373,7	16,8	4,8

Fonte: O autor, 2011.

Figura 42 – Padrão de distribuição dos elementos terras raras para as Unidades Canaã e Santo Aleixo (BG-48), e amostra BG-49 ( Unidade Bingen).



Fonte: O autor, 2011.

## 6.4 Discussões da Análise Geoquímica

Analisando-se comparativamente os dados litogeoquímicos de Dias (2008) com aqueles obtidos nesta dissertação de mestrado, nota-se uma ótima correlação entre os Gnaisses Homogêneos descritos no primeiro trabalho e a Unidade Bingen aqui descrita. Ambos apresentam composições graníticas a granodioríticas em todos os diagramas classificatórios e, em termos de afiliação magmática, se enquadram em uma série de alto potássio, de rochas subalcalinas de tendência cálcio-alcalina, metaluminosas a fracamente peraluminosas a biotita.

Com relação aos diagramas de ambientação geotectônica de Pearce, os grupos de amostras também se revelaram concordantes, ambos indicando majoritariamente ambientes convergentes do tipo arco vulcânico (pré-colisionais), porém chegando próximos do campo sin-colisional, chegando a plotar no mesmo no diagrama Ta x Yb (fig. 38). No diagrama R1 – R2 de La Roche et al., (1980); fig. 26, a unidade Bingen também se distribui no campo sin-colisional, chegando próximo ao pré-colisional, apresentando-se concordante com o Batólito Serra dos Órgãos e gnaisses Homogêneos de Dias (2008), se destacando um pouco das amostras do Complexo Rio Negro (francamente pré-colisional) e dos granitos pós-colisionais (que plotam no campo dos granitos tardios).

Os gnaisses heterogêneos, aqui encarados como Unidade Santo Aleixo, quando comparados à Unidade Bingen, revelaram-se como um conjunto de rochas menos evoluídas, onde, apesar da similar afiliação magmática, predominam as composições tonalíticas a granodioríticas, sendo caracterizados, geotectonicamente, ambientes de formação francamente pré-colisionais do tipo arco magmático. Estas rochas são caracterizadas por uma série de médio potássio, de rochas subalcalinas de tendência cálcio-alcalina, metaluminosas a fracamente peraluminosas a biotita e, menos comumente, hornblenda.

A análise dos diagramas de Harker revela que unidade Bingen, não aparenta ter uma gênese associada aos gnaisses do Complexo Rio Negro, principal unidade geotectônica da área podendo ser observado nos diagramas de Harker, que a primeira pertence a uma serie mais enriquecida, passo que o Complexo Rio Negro apresenta-se disposto sobre um trend menos enriquecido de  $TiO_2$  e  $P_2O_5$  (fig. 32) e vários dos elementos menores. Nestes diagramas a unidade Bingen, juntamente com os gnaisses homogêneos de

Dias, mostra melhor correlação com os granitos pos-tectônicos, plotando sobre o “trend” formado pelo mesmo (figs. 32 a 34), mostrando também boa correlação com as amostras do Batólito Serra dos Órgãos. Os gnaisses heterogêneos por sua vez, apresentam uma correlação bem melhor com o Complexo Rio Negro, sendo menos enriquecido nos elementos citados anteriormente.

Com relação aos padrões de distribuição dos elementos terras raras, nota-se nos aranhogramas, apesar da pouca presença de anomalia negativa de európio nas últimas, uma boa correlação entre a unidade Bingen e os gnaisses de Dias ambas apresentando padrão de fracionamento similar e bastante distinto do padrão pouco fracionado observado para o Complexo Rio Negro e do padrão intermediário exibido pelo Batólito Serra dos Órgãos (fig. 40). Um padrão de fracionamento similar a Unidade Bingen foi também observado para os granitos pós-tectônicos, que apresentam anomalia negativa de európio bem condizente e um padrão de fracionamento um pouco maior tanto nos ETR leves quanto nos pesados (fig. 40).

Salienta-se ainda que o estudo comparativo entre as Unidades Bingen e Santo Aleixo foi realizado exclusivamente com base nos dados de Dias (2008) para os gnaisses bandados, que aqui foram classificados como Unidade Santo Aleixo. Este fato deve-se ao pequeno número de análises químicas para amostras da Unidade Santo Aleixo realizadas neste trabalho, em vista do mesmo possuir um maior enfoque no estudo da Unidade Bingen. Alia-se a isto o fato de a única amostra representante desta unidade (BG-48), analisada quimicamente neste trabalho, ter revelado-se claramente anômala ante as demais, mostrando um enriquecimento em Ca e Mg (inclusive formando clinopiroxênio), Na, e em diversos elementos menores. Interpreta-se este enriquecimento como devido a uma contaminação por parte dos feldspatoide-gnaisses sieníticos da Unidade Canaã.

Na tabela abaixo são sumarizadas as principais características geoquímicas da Unidade Bingen em relação as demais unidades litoestratigraficas presentes na área de estudo.

Tabela 14 - Principais características geoquímicas da unidade Bingen em relação as demais unidades litoestratigráficas presentes na área de estudos.

	<b>Complexo Rio Negro</b>	<b>Leucogranitos</b>	<b>Unidade Bingen</b>	<b>Batólito Serra dos Órgãos</b>	<b>Granitos pos-tectonicos</b>
<b>Índice de Shand</b>	metaluminoso	Fracamente peraluminoso	Fracamente peraluminoso	metaluminoso	Meta a peraluminoso
<b>Calcicalinidade</b>	Baixo, Médio e Alto K	Alto K	Alto K	Médio a alto K	Alto K
<b>Ambiência Tectônica</b>	Pre-Colisional	Sin-Colisional	Pre a Sin-Colisional	Pre a Sin-Colisional	Tardi a Pos-orogenico
<b>Classificação</b>	TTG	Monzogranitos	Monzogranitos a Granodioritos	Monzogranitos a Granodioritos	Granitos

Fonte: O autor, 2011.