

A VARIAÇÃO DE ELEMENTOS TRAÇOS NAS ROCHAS BASÁLTICAS DA BACIA DO PARANÁ ESTUDADA POR MEIO DA ANÁLISE FATORIAL

ARLEI B. MACEDO*, N. R. RÜEGG*

ABSTRACT

Factor analysis is employed in the determinations of statistical factors which describes the variability of some trace elements in 101 samples of basaltic rocks collected throughout the magmatic province of the Paraná Basin. The analyses reduced to percentual factor coefficients are represented by means of diagrams which are parts of a tetrahedron where the corners are occupied by the mentioned factors.

The results are compared with equivalent statistical analysis found in the literature for others basaltic provinces.

RESUMO

A técnica da análise fatorial pelo método de componentes principais é empregada na determinação dos fatores estatísticos que descrevem a variabilidade de teores em alguns elementos traços, dosados em 101 amostras de rochas basálticas coletadas por toda a província magmática da Bacia do Paraná. As análises químicas reduzidas a coeficientes fatoriais percentuais são representadas por meio de partes de diagrama tetraédrico cujos vértices são ocupados pelos referidos fatores.

Os resultados são comparados com análises estatísticas equivalentes, relatadas na literatura para outras províncias basálticas.

INTRODUÇÃO

A variação de conteúdo de elementos traços dosados em rochas basálticas da Bacia do Paraná foi estudada recentemente por Rüegg (1969) e Rüegg e Dutra (1970), por meio de pequeno número de amostras, porém, representativas de vários estágios de diferenciação em que se apresentam essas rochas na província. Nessa ocasião foi focalizado o comportamento de 17 diferentes elementos químicos. Rüegg e Berenholc (1971), com base em amostragem muito maior, obtida a partir de dados analíticos dosados em exemplares coletados ao longo de toda a área de ocorrência, relataram algumas características estatísticas de distribuição de teores de 7 dos mais importantes destes elementos. Gomes e Berenholc (1973) estudaram a variação de teor em alguns elementos traços em um dique do litoral norte do Estado de São Paulo.

Nos estudos mencionados cada um dos elementos foi tratado isoladamente, na forma de uma variável independente, e sua distribuição e variação avaliada em relação a trabalhos de referência do mesmo gênero existentes na literatura. No presente estudo a variação dos elementos traços será tratada em bloco, constituindo o *conjunto* dos elementos dosados em um exemplar de rocha uma *observação multivariável*. Este procedimento permite levantar interrelações existentes entre amostras, consideradas como um todo, interrelações estas que podem não aparecer quando cada elemento é tratado isoladamente.

Com esse objetivo, foi utilizada a técnica estatística da análise fatorial, cujas generalidades e características de aplicação, em grandes séries de dados analíticos deste tipo, foram revis-

tas em estudo paralelo, por Macedo e Rüegg (1974), que trata da variação de elementos principais nas mesmas rochas. Nessa oportunidade foi salientado que um dos propósitos a que se destina a análise fatorial é por meio de técnicas matemáticas representar uma observação multivariável (como é por exemplo, a análise química de elementos traços de uma rocha) por número restrito, porém, significativo, de fatores que retratem a maior parte de variação global e interrelações existentes entre várias amostras, que de outra forma poderiam permanecer mascaradas na massa de dados. A técnica pode servir também para verificar hipóteses levantadas com base em parâmetros empíricos idealizados pelo pesquisador.

Os referidos fatores são determinados segundo andamento matemático relativamente complexo cujos pormenores de aplicação no estudo de grandes séries de análises químicas de rochas são descritos por Manson (1967), onde ampla bibliografia sobre o assunto pode ser encontrada. Serão aqui revistos apenas os passos fundamentais do andamento matemático necessário à determinação dos fatores, a partir de observações multivariáveis.

REDUÇÃO DE OBSERVAÇÕES MULTIVARIÁVEIS A COEFICIENTES FATORIAIS. APLICAÇÃO AO ESTUDO DA VARIABILIDADE DE ELEMENTOS TRAÇOS EM ROCHAS BASÁLTICAS

Para reduzir os dados de observações multivariáveis a fatores é necessário resolver a equação abaixo, aplicada por Manson (*op. cit.*), no estudo minucioso de 1996 análises químicas de elementos principais em rochas basálticas de distribuição mundial.

A referida equação é expressa por:

$$X(N, n) = A(N, m) \cdot F(m, n) + E(N, n)$$

onde:

N = número de observações (análises químicas).

n = número de variáveis (em nosso caso, teores dos diversos elementos traços determinados em cada análise).

$X(N, n)$ = matriz inicial de dados, com os teores de n elementos em cada uma das N amostras.

m = número mínimo de fatores capaz de exprimir a variabilidade dos dados. A sua escolha é determinada por dois requisitos:

- a) os fatores devem exprimir a percentagem máxima da variabilidade dos dados;
- b) o número de fatores deve ser o menor possível.

Estes dois requisitos atuam de maneira oposta um ao outro, pois quanto menor o número de fatores, maior a variabilidade que restará inexplicada.

$A(N, m)$ = matriz de *coeficientes fatoriais*, que descrevem as N análises como proporções de m membros finais (fatores).

$F(m, n)$ = matriz de *pesos fatoriais*, que descrevem a composição de cada um dos m fatores como combinação das n variáveis.

$E(N, n)$ = matriz da variabilidade não representada por A e F .

Uma boa solução matemática deve fazer com que esta matriz tenha o valor mais próximo possível de zero. Geralmente não chega a ser igual a zero, porque quando reduzimos o número de fatores em relação às variáveis, perdemos em precisão parte do que ganhamos em simplicidade. Além disso, os erros de medida também contribuirão para formar a matriz E .

A resolução dessa equação pode seguir caminhos variados. Manson (*op. cit.*), utiliza o processo dos componentes principais. Resulta desse cálculo o número mínimo de fatores que representam a maior parte da variabilidade existente na amostra e a composição de cada um dos fatores, em termos de coeficientes fatoriais relativos ao peso com que participa cada elemento nessa composição.

Prinz (1967), aplicou esta técnica no estudo da variação global de elementos traços em amostra estatística constituída por 267 análises de 13 elementos químicos dosados em rochas basálticas de distribuição mundial. O estudo de Prinz (*op. cit.*), é complementar ao trabalho de Manson (*op. cit.*), e visou traçar o comportamento geoquímico em bloco de elementos traços de rochas basál-

ticas dos mais diversos tipos e que ocorrem em diferentes ambientes geológicos nos vários oceanos e continentes, com excessão da América do Sul. Restringe o estudo, porém, da mesma forma como faz Manson (*op. cit.*), exclusivamente a rochas basálticas que exibem caracteres de origem. Os dados analíticos, para isso, foram submetidos a mecanismos poderosos de seleção, idealizados por Poldervaart e Manson (Manson, *op. cit.*), com o objetivo de eliminar amostras com atributos de rocha diferenciada. Os resultados obtidos, se admite, refletem características geoquímicas de rochas basálticas não diferenciadas, constituindo-se dessa forma importante trabalho de referência.

Na amostra de dados reunida nessas condições foi aplicada a técnica da análise fatorial. Por meio deste instrumento, Prinz (*op. cit.*), concluiu que 90% da variabilidade existente entre os dados, constituídos por análises de 13 elementos traços, podia ser explicada por meio de apenas quatro fatores cuja composição, em termos de coeficientes fatoriais dos vários elementos estudados, encontram-se listados na Tabela 1. Da simples inspeção dessa tabela, verifica-se que os quatro fatores, em termos de composição, são denominados por número restrito de elementos -os que exibem maiores pesos positivos ou negativos- a saber:

- Fator 1 - dominado decisivamente pelo Sr;
- Fator 2 - pelo Cr, e subsidiariamente pelo Ni;
- Fator 3 - pelo Ba, e secundariamente pelo V e Zr;
- Fator 4 - pelo V e subsidiariamente pelo Ba e Zr.

TABELA 1
Composição dos Fatores em Termos de Pesos Fatoriais que
Expressam a Proporção da Contribuição de Cada
Elemento na Composição de Cada Fator.

	Fator			
	1	2	3	4
Ba	-.011	.019	-.870	.431
Co	-.021	.073	.022	-.085
Cu	-.072	.044	.041	-.089
Cr	-.033	.950	.046	.148
Ga	-.003	.020	-.037	-.046
Li	-.002	.004	-.022	-.020
Ni	.101	.274	.080	-.126
Rb	-.021	-.009	-.108	.045
Sc	-.039	.042	-.068	-.077
Sr	.988	.007	-.040	-.003
V	-.051	.116	-.384	-.837
Y	-.008	-.003	-.062	-.047
Zr	.040	.007	-.245	-.217

Todas as análises reunidas por Prinz (*op. cit.*), foram recalculadas em função desses fatores e os resultados obtidos representados graficamente, por meio de duas faces triangulares de um tetraedro desmembrado, no qual os fatores se situam nos 4 vértices. Essa ilustração, na qual cada ponto representa uma análise, de 13 elementos traços, está reproduzida na Figura 1.

Na Figura 1 os pontos se dispersam consideravelmente. Prinz (*op. cit.*), enfatiza contudo que o espalhamento observado não significa a inexistência de diferenças significativas na composição em bloco de elementos traços para os vários tipos de rochas basálticas, do gênero, por exemplo, de tholeiitos e basaltos alcalinos. Os resultados sugerem que, de fato, essas composições se superpõem e são gradacionais. Assim concluiu pelas evidências levantadas no estudo pormenorizado de resultados obtidos para grande número de províncias isoladas. Esses resultados ocupam no diagrama escolhido posições definidas, posições essas que praticamente não se repetem de província para província. Descrição minuciosa dos atributos de distribuição de elementos traços em

vinte e uma províncias basálticas diferentes, pode ser encontrada no trabalho de Prinz (*op. cit.*).

APLICAÇÃO AOS DADOS REFERENTES ÀS ROCHAS BASÁLTICAS DA BACIA DO PARANÁ

Dados da mesma natureza referentes às rochas basálticas da Bacia do Paraná foram submetidos a tratamento equivalente ao aplicado por Prinz (*op. cit.*). Os dados referidos consistem num conjunto de 101 análises de 9 dos mais importantes elementos traços (Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Rb, Sr, V, Zr) dosados em rochas basálticas do Brasil Meridional. As 101 análises mencionadas foram selecionadas de amostragem maior cujas características de distribuição estatística, expressas por meio de histograma de distribuição, foram estudadas por Rüegg e Berenholc (*op. cit.*)*.

As amostras analisadas representam os mais variados tipos de basaltos e diabásios que ocorrem na província e foram coletados ao longo de toda a área de ocorrência. Suas principais características petrográficas foram descritas, entre outros, por Schneider (1964), Cordani e Vandroos (1967) e Rüegg (1969). Embora por razões de processamento o conjunto de dados reunidos para o

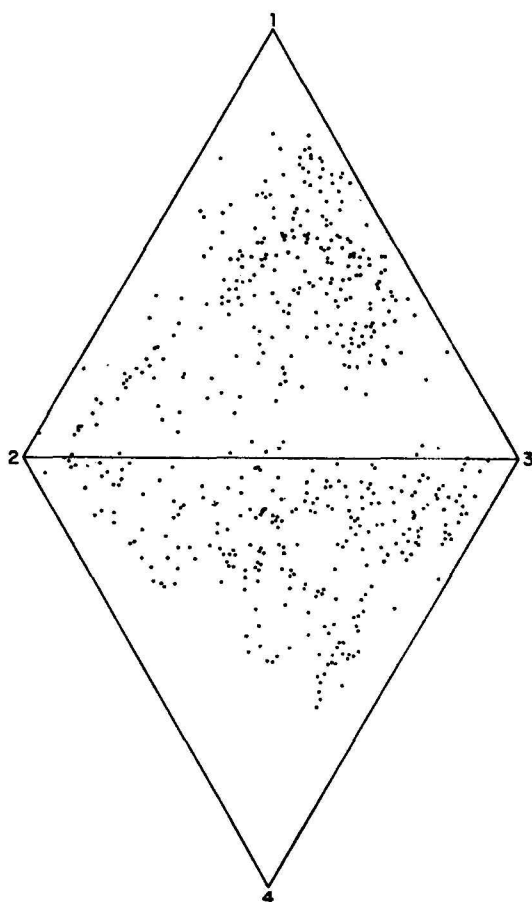


Fig. 1 - Projeção em dois diagramas triangulares, que representam duas faces de tetraedro cujos vértices são ocupados pelos quatro fatores determinados e que descrevem a variabilidade de 13 elementos traços em 267 amostras de rochas basálticas de distribuição mundial, segundo Prinz, 1967.

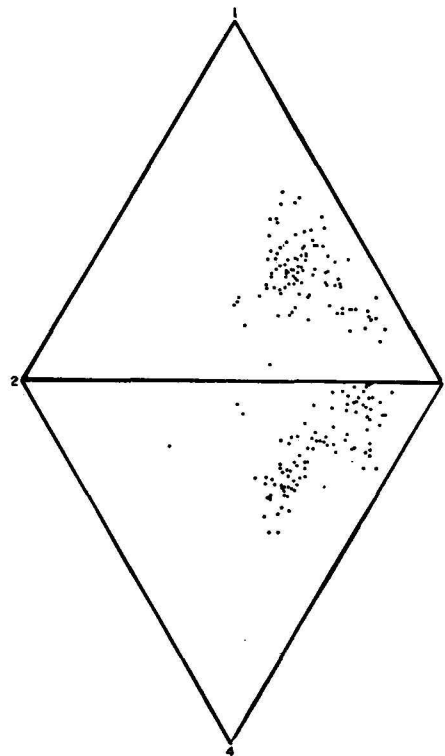


Fig. 2 - Projeção equivalente à Figura 1 para rochas basálticas da Bacia do Paraná.

* Com exceção do Co, Cr e V, aqui incluídos e não focalizados no trabalho referido, no qual, entretanto, podem ser encontrados dados referentes à distribuição de Zn, não utilizado no presente estudo.

presente estudo seja constituído por número menor de análises que o manipulado por Rüegg e Berenholc, *op. cit.* (126 análises), ele é igualmente representativo e reflete as principais características de distribuição relativas a esses elementos entre as rochas da província.

Comparados com os dados reunidos por Prinz (1967), para as diferentes províncias isoladamente, os dados relativos às rochas basálticas da Bacia do Paraná constituem numericamente amostragem muito maior que qualquer uma delas. As amostras, entretanto, não sofreram qualquer tipo de seleção. Mantendo-se claro este ponto em mente, comparações com os dados de referência foram elaboradas.

Para isso, os dados disponíveis foram reduzidos a fatores, aplicando-se a técnica de acordo com o procedimento recomendado por Prinz (*op. cit.*). As análises foram recalculadas em termos de quatro fatores utilizando-se os coeficientes fatoriais listados na Tabela 1. As operações de cálculo foram conduzidas por meio de pequeno programa de computador, denominado COEFAT e idealizado para esta finalidade.

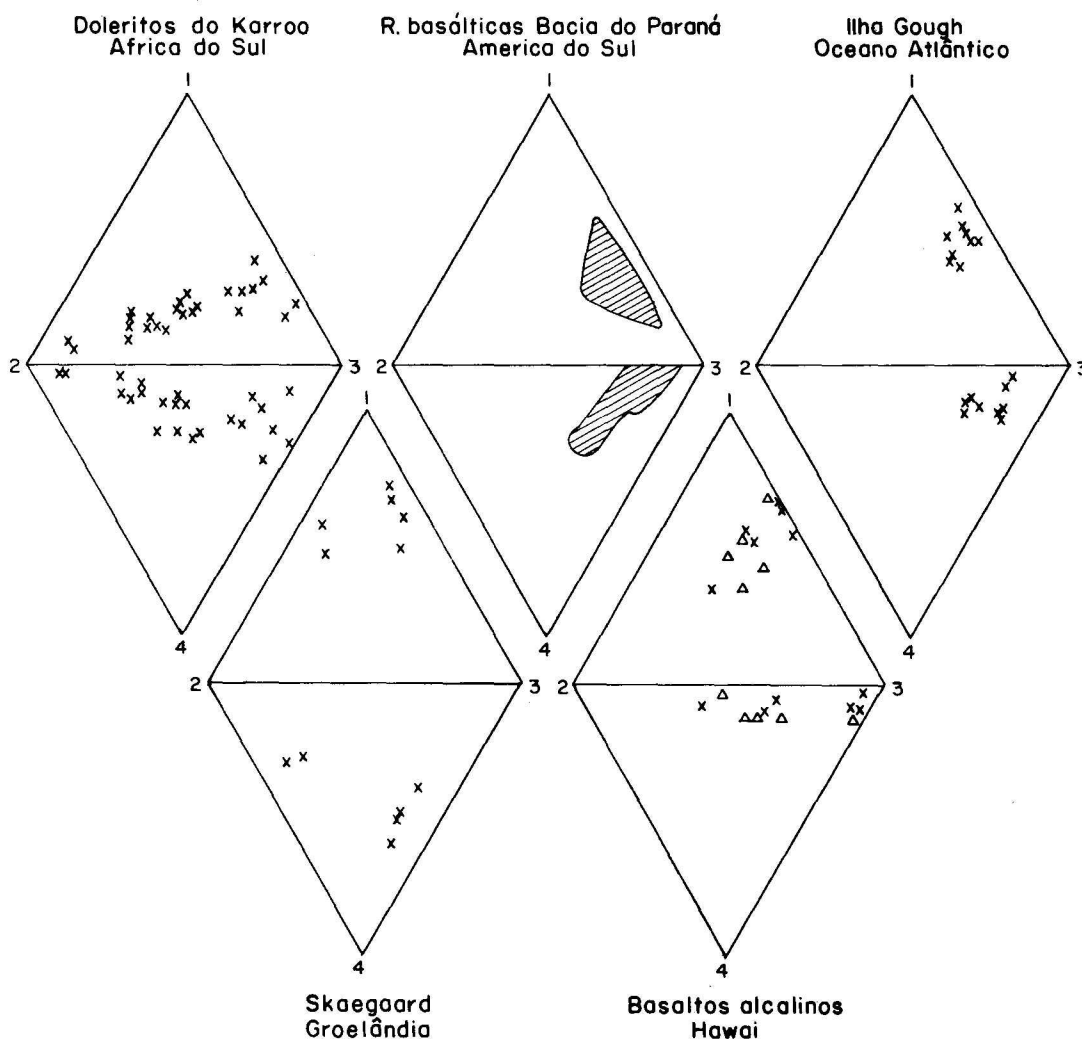


Fig. 3 – Posição ocupada nos diagramas triangulares pelas rochas basálticas da Bacia do Paraná comparadas com várias províncias basálticas bem conhecidas, estudadas por Prinz, (1967).

Os resultados obtidos são apresentados graficamente nas Figuras 2 e 3, na mesma forma proposta por Prinz (1967) e, deste modo, diretamente comparáveis aos dados de referência.

Comparando-se os dados da Figura 1 com os da Figura 2, verifica-se que os pontos

referentes às rochas basálticas da Bacia do Paraná não exibem grande dispersão. Eles na realidade concentram-se no diagrama em posição bem definida o que indica para essas rochas características de teor relativamente homogêneas. Essa observação torna-se importante ao lembrarmos que, os dados a ela relacionados, não sofreram qualquer seleção prévia. Por isso, a homogeneidade observada deve ser atendida como uma característica regional.

A concentração dos dados em posição bem definida no diagrama não configura tendências, como as observadas entre os dados do Karoo, focalizados na Figura 3, embora, como sublinha Prinz (*op. cit.*), esse tipo de diagrama seja apropriado para enfatizar tendências que refletem processos de diferenciação ou outros.

A posição ocupada pelos dados relativos às rochas da Bacia do Paraná não mostram semelhança pronunciada de distribuição com quase todas as províncias isoladas estudadas por Prinz (*op. cit.*). Assim, comportam-se de modo diferente de rochas tholeiíticas supostamente equivalentes, como é o caso da província de Skaergaard, na Groelândia, ilustrada na Figura 3, ou dos basaltos tholeiíticos do Hawaii. Afastam-se também dos dados relativos aos basaltos do Rio Cúmbia, Monte Hood e Rio Snake, nos Estados Unidos. Não mostram semelhanças pronunciadas com províncias caracterizadas por basaltos alcalinos, como é o caso do complexo Messum, na África do Sudoeste e dos basaltos da série alcalina do Hawaii, focalizado na Figura 3. Exibe, porém, semelhança considerável com os dados levantados para a província alcalina da Ilha de Gough, no Atlântico Sul, reproduzidos na Figura 3. Essa semelhança leva-nos às seguintes considerações finais:

A posição ocupada pela distribuição dos dados referentes às rochas da Bacia do Paraná nos dois diagramas triangulares escolhidos é determinada sobretudo pelo fator 3, dominado, como foi visto (Tab. 1) sobretudo pelo Ba. A seguir influem, em cada um dos diagramas, os fatores 1 e 4, dominados respectivamente pelo Sr. e V. Uma vez que o fator 2, dominado decididamente pelo Cr e Ni pouco influencia as distribuições focalizadas, é válido admitir com base nessas observações, que as rochas basálticas da Bacia do Paraná encontram-se generalizadamente em condições evoluídas de diferenciação. Do contrário, papel bem mais importante seria desempenhado pelo Cr e Ni no controle do todo ou parte dessas distribuições, como se verifica para as províncias estudadas por Prinz (*op. cit.*). Essas observações vêm de encontro às conclusões de Leterrier, de la Roche e Rüegg (1972), e explicam várias superposições já observadas entre características geoquímicas de séries alcalinas com características geoquímicas de séries tholeiíticas. Estas coincidências entretanto ocorrem no nível de caracteres de origem das primeiras, ilustradas pelos dados de Prinz (*op. cit.*), referentes à Ilha de Gough, com características de evolução das últimas, ilustradas pelas rochas basálticas da Bacia do Paraná, ora estudadas.

TABELA 2
Matriz Fatorial Obtida por Análise Fatorial de Modo Q, dos
Teores de Elementos Traços das Rochas
Basálticas da Bacia do Paraná.

	FATOR			
	1	2	3	4
Ba	0.074	-2.641	-0.200	0.003
Co	0.505	0.369	0.672	-0.622
Cr	0.328	0.264	0.197	-0.055
Cu	0.640	0.097	-0.108	-0.272
Ni	0.473	0.380	0.667	-0.641
Rb	0.355	0.366	0.753	-0.516
Sr	-2.601	0.198	0.435	-0.065
V	-0.081	0.587	-2.499	-0.414
Zr	0.305	0.375	0.081	2.584

ANÁLISE FATORIAL INDEPENDENTE DAS ROCHAS DA BACIA DO PARANÁ

Além da comparação dos dados relacionados às rochas basálticas da Bacia do Paraná com os esquemas de referência fornecidos por Prinz (*op. cit.*), derivados de rochas basálticas de distribuição mundial, e de províncias isoladas, foram efetuadas análises fatoriais independentes, atuando sobre dados não reduzidos (teores de elementos traços derivados de análise química). Esse trabalho foi realizado utilizando-se os programas *BMDX72* e *FACTOR*, comentados em Macedo e Rüegg (1974). Apenas duas das matrizes obtidas são ora apresentadas, por terem sido consideradas as mais representativas dos resultados alcançados. Outros pormenores poderão ser obtidos diretamente dos autores.

A Tabela 2 reúne os resultados da análise fatorial de modo Q (procurando inicialmente relações entre as amostras). Os 4 fatores apresentados explicam 95% da variabilidade das amostras.

A Tabela 3 reúne os resultados da análise fatorial de modo R (procurando inicialmente relações entre as variáveis). Os 4 fatores apresentados explicam 98% da variabilidade das variáveis.

TABELA 3
Matriz Fatorial Obtida por Análise Fatorial de Modo R, dos
Teores de Elementos Traços das Rochas
Basálticas da Bacia do Paraná.

	FATOR			
	1	2	3	4
Ba	-5.638	1.754	-1.555	1.996
Co	-0.207	0.359	-0.075	0.155
Cr	-0.636	1.009	-0.614	0.528
Cu	-0.505	0.847	-0.259	1.650
Ni	-0.158	0.377	-0.101	0.222
Rb	-0.510	0.229	-0.055	0.135
Sr	-3.052	2.249	-3.081	1.128
V	-1.386	3.109	-0.678	1.222
Zr	-1.992	1.531	-0.837	0.255

De um modo geral, os resultados da análise fatorial independente concordam com os propostos por Prinz (1967). Os desvios encontrados em relação à matriz fatorial apresentada por esse autor concordam com aqueles mostrados pelos coeficientes fatoriais na Figura 2, reforçando, por caminho diferente, as interpretações realizadas no capítulo precedente.

BIBLIOGRAFIA

- CORDANI, U. G. & VANDOROS, P. - 1967 - "Basaltic rocks of the Parana Basin". In: BIGARELLA, J. J. et alii - *Problems in Brazilian Gondwana Geology*. Curitiba. p.207-29.
- GOMES, C. B. & BERENHOLC, M. - 1973 - "Some geochemical features of the Toninhas dike, Ubatuba, State of São Paulo, Brazil". In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE GEOLOGIA, 2ª, Caracas.
- LETERRIER, J.; DE LA ROCHE, H.; RUEGG, N. R. - 1972 - Composition chimique et parenté tholéitique des roches basaltiques du Bassin du Paraná. *Compte Rendu de la Academie des Sciences de Paris, Paris*, 274:1772-5.
- MACEDO, A. B. & RUEGG, N. R. - 1974 - "Aplicação da análise fatorial ao estudo de elementos principais nas rochas basálticas da Bacia do Paraná". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28ª, Porto Alegre. *Anais*. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia.
- MANSON, V. - 1967 - Geochemistry of basaltic rocks: major elements. In: HESS, H. H. - *Basalts, the poldervaart treatise on rocks of basaltic composition*. New York, Interscience. v.1.p.215-60.

- PRINZ, M. - 1967 - Geochemistry of basaltic rocks: trace elements . In: HESS, H. H. - *Basalts, the poidevaart treatise on rocks of basaltic composition*. New York, Interscience. v.1, p.271-323.
- RÜEGG, N. R. - 1969 - Aspectos geoquímicos, mineralógicos e petrográficos das rochas basálticas da Bacia do Paraná. 178p.
[Tese (Dout.) - Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da USP, São Paulo]
- & DUTRA, C. V. - 1970 - Variation in the content of some trace elements in basaltic rocks from the Parana Basin. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24ª, Brasília. Anais. Brasília, Sociedade Brasileira de Geologia. p.219-26.
- & BERENHOLD, M. - 1971 - Distribuição de alguns elementos traços em rochas basálticas da Bacia do Paraná, America do Sul. In: CONGRESSO HISPANO-AMERICANO DE GEOLOGIA ECONOMICA, 1ª, Madrid. Anais. p.389-97. (Secção G).
- SCHNEIDER, A. W. - 1964 - Contribuição à petrologia dos derrames basálticos da Bacia do Paraná. *Avulso da Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre*, 1:1-76.