

ASPECTOS HIDROGEOQUÍMICOS DA ALTERAÇÃO INTEMPÉRICA DE BASALTOS DA BACIA DO PARANÁ: BACIA HIDROGRÁFICA DO JACUTINGA (PR)

ANDRÉ VIRMOND LIMA BITTENCOURT*

ABSTRACT The evaluation of some geochemical and mass transport characteristic of surface waters of Serra Geral basaltic formation, in the Paraná State (South Brazil), was the aim of this study. Hydrochemical, hydraulic and sedimentologic data in the hydrographic basin of Jacutinga stream, were evaluated. To complement and to improve the discussion of those data, informations from other hydrographic basins, of the basaltic region, were used. The main process of alteration that was observed in this region was the monossialitization and relative mobility of the major ions, including silica, was $K^+ Na^+ Ca^{2+} Mg^{2+} SiO_2$. It was determined the materials in suspension ($46 t/km^2 \cdot year$) from these basalts, and also the specific chemical outflow for each of the major cations an silica. The mean rates of the basaltic alterations ($1.9 \times 10^{-5} m/year$) and mechanical erosion rates ($5.6 \times 10^{-5} m/year$) were evaluated in the Jacutinga basin.

INTRODUÇÃO A região basáltica do Estado do Paraná vem sendo submetida a uma intensa e nem sempre bem orientada ocupação do terreno, o que tem acarretado sérios problemas de rompimento do equilíbrio ecológico, principalmente devido à perda das camadas férteis do solo por erosão.

A avaliação da geoquímica do sistema e o balanço do movimento de matéria hidrotransportada possibilitam o conhecimento da dinâmica da alteração e da erosão médias em uma bacia hidrográfica, conhecimento este fundamental para qualquer estudo de ocupação racional do solo.

No Brasil, são raros ou praticamente inexistentes estudos de balanço de sólidos hidrotransportados em bacias hidrográficas envolvendo o material movimentado dissolvido, para o conhecimento de taxas de denudação.

Em âmbito internacional, são notáveis os trabalhos de Livingstone (1963) e Gibbs (1972), que montaram um quadro de denudações químicas médias sofridas pelos continentes, sendo que o segundo obteve dados sobre a bacia ao Amazonas. Mais recentemente, Gac (1979) apresentou um balanço hidrogeoquímico sistemático da bacia endorréica do Lago Chade, na África, calculando taxas de erosão química e mecânica nos tributários daquele lago.

Este trabalho, baseado na análise pormenorizada da bacia do Jacutinga, tem por escopo fornecer subsídios para um melhor conhecimento da denudação sofrida pela região basáltica paranaense, do transporte de sólidos pelos cursos de água que a drenam e da geoquímica do sistema.

A bacia do Jacutinga foi tomada como área piloto pois representa de maneira satisfatória o quadro físico apresentado pela zona basáltica no Estado do Paraná, ou mais precisamente na bacia do Ivaí.

A ÁREA ESTUDADA — A Bacia do Jacutinga *Litologia* A bacia hidrográfica do córrego Jacutinga situa-se sobre a Formação Serra Geral, que aflora em cerca de 53% do território paranaense (Fig. 1). As rochas dessa Formação são fundamentalmente representadas por derrames sucessivos de basalts toleíticos cortados por diques e sills de diabásios. O citado córrego, em quase toda sua extensão, possui seu leito diretamente sobre lajes basálticas.

A bacia estudada encontra-se na área que foi caracterizada por Ruegg (1975) como “subprovincia Central”, que abrange o noroeste e oeste paranaense, e onde os dados químicos sugerem uma série de diferenciações de origem toleítica evoluindo para andesitos.

Os basalts aflorantes na área têm nos feldspatos do tipo andesina e nas pigeonitas, os minerais essenciais, além dos feldspatos potássicos que são abundantes na matriz microcristalina, que também comporta cloritas, serpentinas e quartzo, além de outros minerais em pequenas quantidades. Dentre os opacos predomina a magnetita, também ocorrendo ilmenita.

Clima Situado no extremo setentrional da Região Sul, o noroeste do Paraná, onde se situa a bacia do Jacutinga, e também o oeste, se situa na região de interfácies entre o clima temperado e o clima tropical, onde as maiores precipitações ocorrem no verão e as menores, no inverno.

As precipitações médias anuais da região situam-se entre 1.200 e 2.000 mm (OEA, 1975). Na estação pluviométrica representativa da bacia do Jacutinga, nos anos de 1975, 1976 e 1977, foi obtida uma média de cerca de 1.500 mm.

As médias térmicas anuais situam-se normalmente entre 18°C e 22°C.

* Superintendência dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Rua Engenheiro Rebouças, 1206, CEP 80000-Curitiba-Paraná-Brasil

A vegetação natural, atualmente, é inexistente na bacia do Jacutinga que é o retrato de praticamente todo o oeste e norte paranaense.

Os dados sobre a hidroquímica e correlatos sobre regiões cobertas por florestas naturais, foram levantados no Paraguai, na bacia do Itabó, que tem mais de 80% da área de sua bacia coberta por uma exuberante floresta pluvial tropical.

A terra roxa estruturada eutrófica é o tipo de solo que predomina na bacia do Jacutinga sendo anotadas profundidades de mais de 3 m de espessura tendendo a zero próximo ao talvegue do córrego. Nas partes altas da paisagem ocorre o Latossolo roxo eutrófico apresentando profundidades superiores a 5 m.

APORTES FLUVIAIS NA BACIA DO CÓRREGO JACUTINGA *Balanco hidráulico-sedimentológico*

Para uma avaliação do comportamento hidrológico da região basáltica representada pela bacia do córrego Jacutinga, conta-se com dados fluviométricos de 36 meses, ou seja, 77 medições diretas de vazão e anotações limnimétricas diárias levantadas na estação do Sítio Ouro Verde. Assim, os valores obtidos devem ser considerados com precauções quando extrapolados para épocas que não os anos de 1975, 1976 e 1977, cobertos pelas medições.

Os dados de chuva aqui empregados foram coletados, diariamente, em pluviômetro tipo Ville de Paris instalado próximo à estação de medidas flúvio-sedimentométricas da bacia do Jacutinga.

Não foram levantados valores da evaporação real na bacia do córrego Jacutinga. No entanto, com os dados obtidos em estações da região (OEA, 1969), pode-se estimar em cerca de 900 mm a evaporação média anual na área de interesse, o que corresponde a 60% da precipitação pluvial.

Os sólidos transportados em suspensão foram coletados diariamente, havendo algumas interrupções que não chegaram a afetar a representatividade das medidas. Periodicamente, intercaladas com as amostragens diárias, foram feitas coletas pormenorizadas por ocasião das medições diretas de vazão. As amostras tiveram

sua concentração em sólidos suspensos analisada pelo método de filtração em cadinhos de Gooch, nos laboratórios da Superintendência dos Recursos Hídricos e Meio Ambiente (Surehma), em Curitiba.

A obtenção dos dados flúvio, plúvio e sedimentométricos foi feita, em sua essência, seguindo as Normas e Recomendações Hidrológicas do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica do Ministério das Minas e Energia (1967).

A Tab. 1 contém os dados mensais de chuva, vazão líquida, concentração e vazão específica de sólidos transportados em suspensão.

A concentração de sólidos suspensos (C) apresenta uma nítida correlação com a vazão líquida (Q), como pode ser observado na Fig. 3, apesar da dispersão de pontos. A correlação é melhor para o ano de 1975, po-

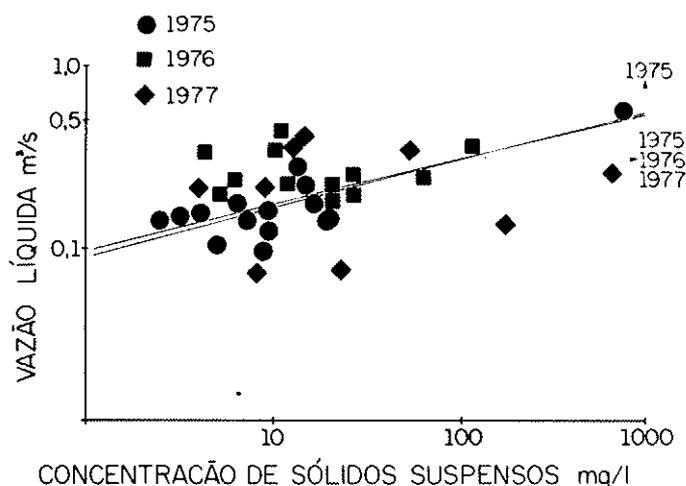


Figura 3 — Correlação de médias mensais da vazão líquida com a concentração de sólidos dissolvidos no córrego Jacutinga, nos anos de 1975, 1976 e 1977. Os dados correspondentes ao último trimestre de 1977 não foram considerados nos cálculos das retas, apesar de constarem da figura (ver o texto)

Tabela 1 — Vazão líquida, concentração de sólidos em suspensão, vazão específica de sólidos em suspensão e precipitação para os anos de 1975, 1976 e 1977 na bacia do córrego Jacutinga (8,46 km²)

Meses	1975				1976				1977			
	V. líq. (m³/s)	Conc. sól. suspensão (mg/l)	V. sólida (t/km²·ano)	Pluvios. (mm)	V. líq. (m³/s)	Conc. sól. suspensão (mg/l)	V. sólida (t/km²·ano)	Pluvios. (mm)	V. líq. (m³/s)	Conc. sól. suspensão (mg/l)	V. sólida (t/km²·ano)	Pluvios. (mm)
Janeiro	0,263	13,15	12,89	101,9	0,427	11,29	17,97	169,6	0,336	54,14	67,81	342,1
Fevereiro	0,222	14,53	12,02	160,1	0,337	10,57	13,28	169,7	0,390	14,31	20,80	59,0
Março	0,1717	5,54	3,53	191,2	0,323	4,36	5,25	21,2	0,336	13,23	16,57	181,4
Abril	0,143	4,00	2,13	106,4	0,229	6,03	5,14	129,2	0,205	4,41	3,37	55,5
Mai	0,142	2,67	1,41	35,6	0,208	5,73	4,44	108,5	0,190	9,78	6,93	16,6
Junho	0,149	3,09	1,72	82,0	0,221	12,64	10,41	137,7	0,189	18,82	13,26	112,3
Julho	0,104	4,91	1,90	77,7	0,189	20,73	14,60	52,1	0,161	19,34	11,61	25,4
Agosto	0,115	9,62	4,12	39,4	0,237	26,30	23,23	164,2	0,155	19,67	11,37	12,6
Setembro	0,100	9,16	3,41	92,7	0,213	20,71	16,44	118,0	0,072	8,40	2,26	65,5
Outubro	0,148	7,01	3,87	196,9	0,244	63,02	57,32	225,8	0,067	22,89	5,72	66,8
Novembro	0,165	9,20	5,66	165,0	0,200	26,15	19,50	74,6	0,127	166,02	78,60	284,7
Dezembro	0,519	793,30	1.534,76	214,2	0,337	118,76	149,19	206,6	0,249	678,01	629,32	258,1
Ano	0,1868	73,02	50,85	1.463,1	0,2638	27,19	26,74	1.577,2	0,2064	85,75	65,97	1.480,0

Média do triênio: Vazão líquida: 0,2190 m³/s; concentração de sólidos em suspensão: 61,99 mg/l; vazão sólida: 50,60 t/ano · km²; e pluviosidade média: 1.506,8 mm

dendo ser representada pela equação $\log Q \text{ (m}^3\text{/s)} = 0,260 \log C \text{ (mg/l)} - 1,050$, com um coeficiente de correlação $r = 0,8296$. Esta equação difere pouco da obtida com a inclusão de valores dos anos de 1976 e 1977, $\log Q = 0,246 \log C - 1,019$ com $r = 0,7230$. A partir dessa segunda correlação, que ignora os meses de fevereiro e março de 1976 e o primeiro trimestre de 1977, foram estimados os valores de vazão líquida para o último trimestre de 1977 (Tab. 1) já que os dados diretos de vazão foram inutilizados por alteração na escala limnimétrica.

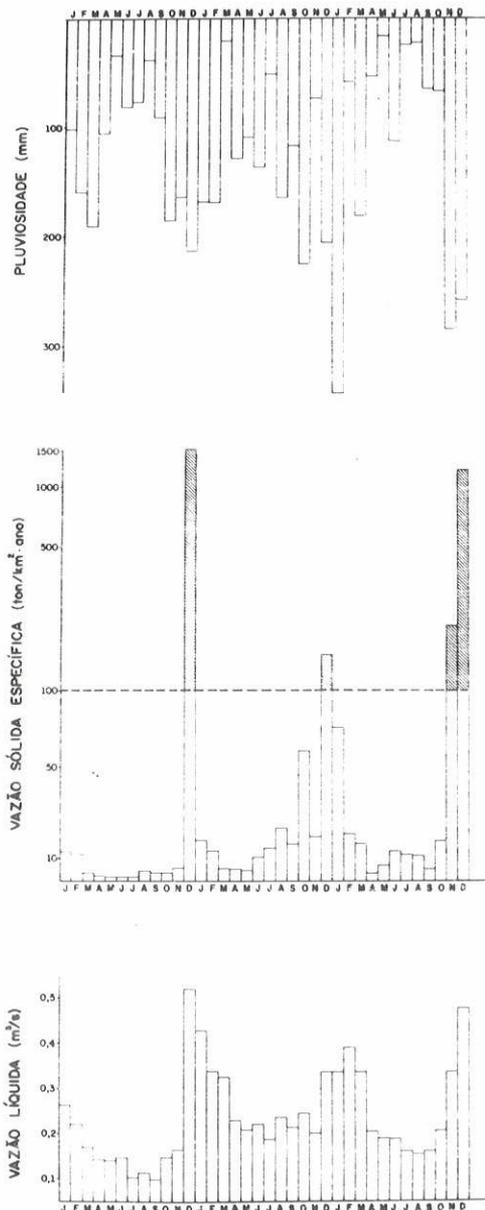


Figura 4 — Representação dos totais ou médias mensais da precipitação pluvial, vazão líquida e vazão de sólidos transportados em suspensão na bacia do córrego Jacutinga nos anos de 1975, 1976 e 1977

A dispersão de pontos no gráfico $Q \times C$ é compreensível uma vez que a vazão não é o único condicionante da concentração de sólidos em suspensão. A distribuição das chuvas no tempo tem uma sensível influência que não pode ser convenientemente avaliada apenas com dados integrados diários como ocorre no caso em questão. Outro fator de grande influência é o tipo de uso e cobertura do solo, que varia muito durante o ano na região, pois lá predominam as culturas sazonais.

A Fig. 4 permite visualizar as variações mensais da vazão líquida, vazão sólida específica e pluviosidade. Percebe-se claramente que a parte mais significativa do transporte de sólidos ocorre no mês de dezembro, quando coincidem chuvas torrenciais com a época de preparo do solo para receber culturas de verão, notadamente a soja, ou seu início de crescimento.

Convém notar que na bacia hidrográfica do Rio Itabó, situada sobre terrenos basálticos coberta, em 80% de sua superfície, por floresta natural (Fig. 1), as vazões sólidas específicas mensais apresentaram no período estudado valores máximos próximos a $60 \text{ t/km}^2 \cdot \text{ano}$ (Fig. 5a).

Nos três anos de observação, notar que valores superiores a $70 \text{ t/km}^2 \cdot \text{ano}$ foram anotados apenas nos meses de dezembro e em novembro de 1977, sendo que 83% dos meses apresentaram médias inferiores a $25 \text{ t/km}^2 \cdot \text{ano}$.

Na bacia do Rio Arroio Guaçu, também situada sobre substrato basáltico (Fig. 1), porém totalmente utilizada para fins agropecuários e sem cobertura florestal, as cargas significativas em sólidos em suspensão, superiores a $60 \text{ t/km}^2 \cdot \text{ano}$, ocorrem também nos meses de novembro e dezembro (Fig. 5b).

Levando-se em consideração o quadro apresentado, percebe-se que a maior vigilância e ações contra a erosão mecânica na região basáltica estudada, da bacia do Paraná, devem ser concentradas no período de verão quando ocorrem as vazões sólidas realmente significativas.

Material transportado em solução As avaliações do material hidrot transportado sob a forma solúvel tiveram por base 27 coletas e análises de amostras de água (Tab. 2) efetuadas paralelamente às determinações de vazões líquidas, no córrego Jacutinga.

A amostragem foi feita com frascos de 5l a 10 cm da superfície da água no centro da estação de medidas flúvio-sedimentométricas.

O tempo decorrido entre as coletas e a entrada das amostras no laboratório foi de um dia, em média.

Durante algum tempo foram tomadas amostras duplas, sendo uma delas acidificada com HCl. Os resultados obtidos para os cátions nas duas amostras não variou significativamente, motivo pelo qual se passou a adotar uma amostragem simples, sem qualquer preservativo. Por motivos técnicos, as determinações de pH foram feitas apenas no laboratório.

No laboratório da Surehna, as espécies dissolvidas foram analisadas segundo métodos analíticos recomendados e pormenorizados no "Standard Methods" (1975).

Nas determinações espectrofotométricas foram empregados espectrofotômetro modelo Varian AA6 e es-

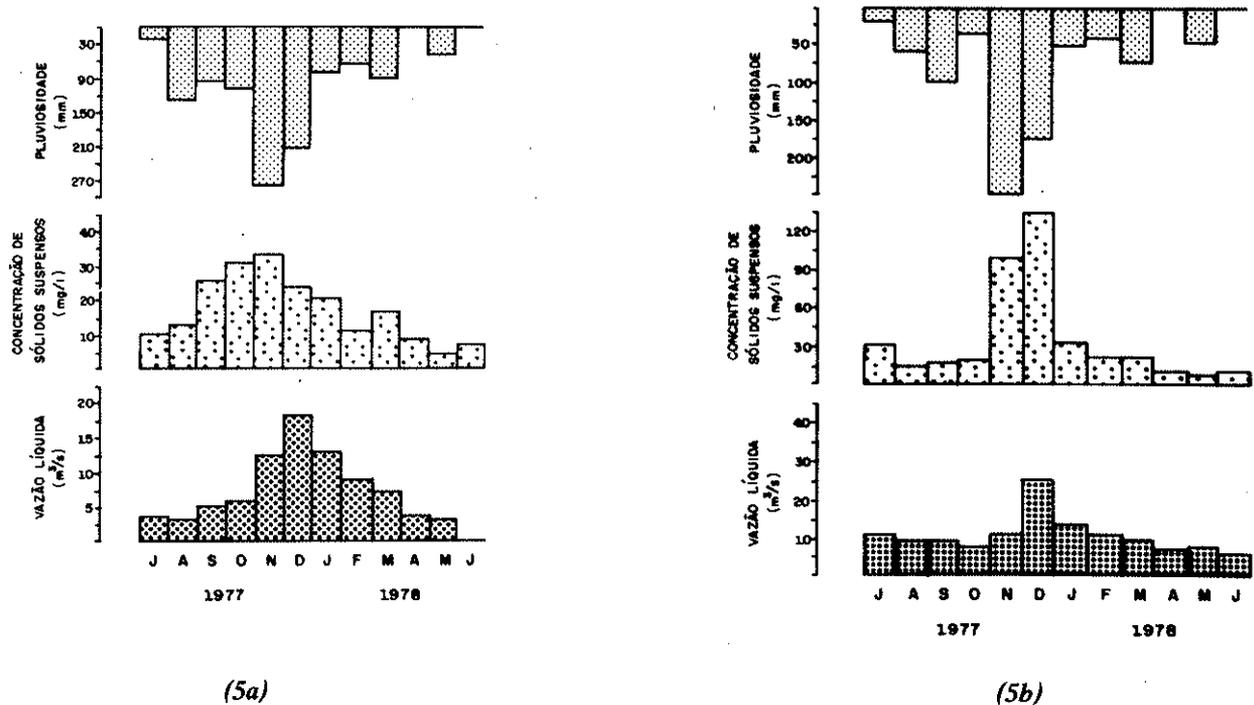


Figura 5 — Representação dos totais ou médias mensais de precipitação pluvial, vazão líquida e vazão de sólidos transportados em suspensão nas bacias do Rio Itabó (5a) e Arroio Guaçu (5b), em 1977 e 1978.

Tabela 2 — Análises químicas de águas do córrego Jacutinga, coletadas em 1974, 1975, 1976 e 1977, no Sítio Ouro Verde. As espécies dissolvidas são apresentadas em mg/l

Nº	Data	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SiO ₂	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	pH	T
1	21.11.74	1,7	1,0	9,41	1,04	28	34,16	1,70	1,05	6,8	22
2	18.1.75	1,6	0,7	9,44	0,14	30	36,60	2,0	0,00	7,0	21
3	8.2.75	1,6	0,6	9,00	1,43	24	37,82	2,0	tr	6,8	—
4	21.2.75	1,6	0,5	5,93	3,26	35	35,38	2,2	tr	7,2	—
5	5.3.75	1,6	0,7	8,84	0,77	30	37,82	1,8	tr	6,9	—
6	31.5.75	1,4	0,2	5,66	2,24	35	34,16	2,5	0,0	6,9	—
7	24.6.75	1,2	0,3	5,17	3,84	35	35,38	2,7	tr	6,8	—
8	7.7.75	1,3	0,5	6,16	1,33	40	34,16	0,5	1,33	6,9	16
9	24.7.75	1,4	0,7	4,88	2,40	22	32,34	2,5	0,62	7,3	18
10	16.9.75	1,7	1,0	5,69	1,87	30	32,24	2,0	0,29	6,6	21
11	23.10.75	0,4	—	5,60	2,09	40	32,46	0,0	9,49	6,8	—
12	21.11.75	1,0	0,5	6,88	1,96	20	37,82	1,5	0,53	7,1	—
13	26.2.76	1,6	1,0	6,08	2,40	16	39,00	0,5	0,93	6,9	—
14	16.3.76	1,6	0,7	5,28	2,48	20	34,16	1,0	tr	6,9	—
15	9.4.76	1,7	0,5	5,08	2,11	26	31,70	1,0	tr	6,7	18
16	16.5.76	1,6	0,6	4,88	2,11	25	31,72	0,5	1,30	6,8	—
17	13.6.76	1,6	0,9	4,84	2,16	20	30,50	1,0	0,97	6,6	—
18	18.7.76	1,5	0,9	5,28	1,84	30	32,33	0,5	tr	7,1	19
19	13.8.76	1,8	2,3	6,41	1,95	—	32,20	1,5	0,66	6,9	21
20	9.9.76	1,5	0,5	6,08	1,94	18	34,20	1,0	0,71	7,1	18
21	20.10.76	1,8	1,0	5,84	3,50	22	37,84	1,0	0,40	7,0	20
22	28.1.77	1,7	1,5	7,48	1,99	25	39,04	0,0	1,46	7,1	23
23	3.5.77	1,6	0,9	5,48	2,35	30	31,72	1,0	0,35	6,9	21
24	29.5.77	1,6	0,6	5,04	1,65	20	29,28	0,0	0,18	7,1	19
25	27.6.77	1,4	0,8	5,00	2,70	20	32,94	0,0	0,00	7,4	17
26	25.7.77	1,9	0,7	5,04	2,36	27	34,16	0,5	1,01	7,1	19
27	30.8.77	1,6	0,6	5,33	2,75	20	31,11	1,0	0,64	7,1	—

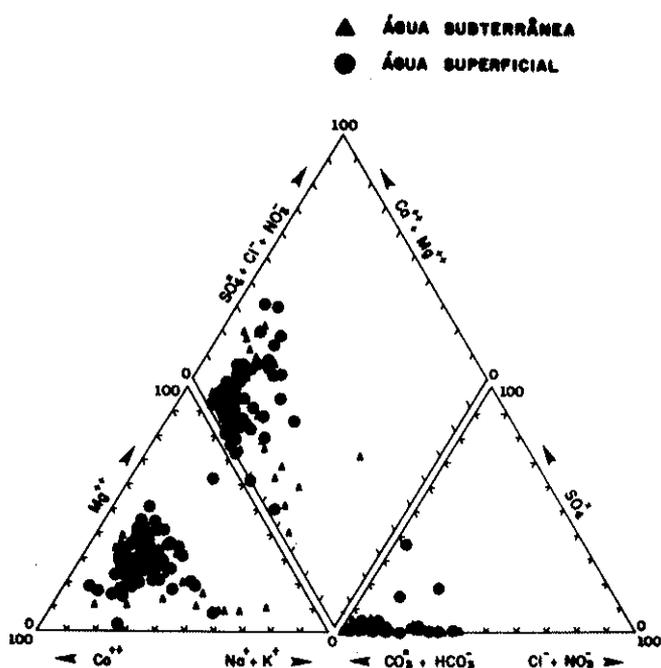


Figura 6 — Diagrama de Piper de amostras de águas superficiais e subterrâneas coletadas em terrenos basálticos do Estado do Paraná e República do Paraguai (Bittencourt, 1978). Os dados são apresentados em porcentagem de miliequivalentes por litro de solução

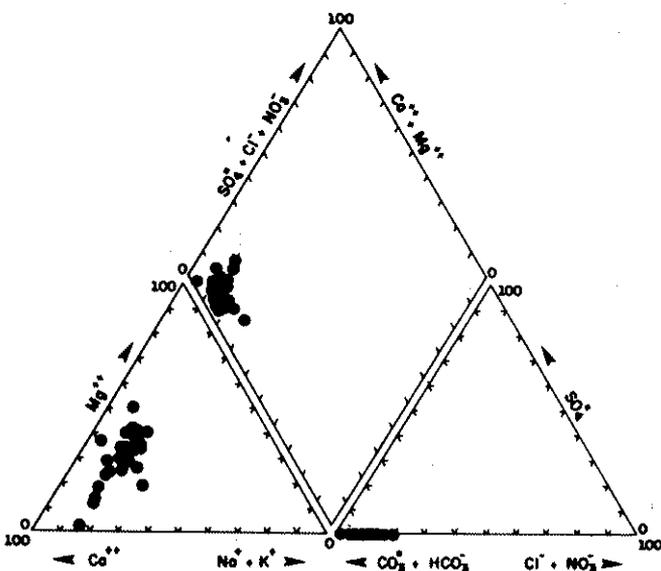


Figura 7 — Diagrama de Piper de amostras de águas do córrego Jacutinga coletadas em 1974 e 1977. Os dados são apresentados em porcentagem de miliequivalentes por litro de solução

pectrofotômetro Coleman, modelo 6A.

Neste trabalho não foram consideradas algumas análises que apresentaram um balanço iônico com diferença superior a 10%.

Além das análises de água do córrego Jacutinga utilizaram-se 110 outras análises de águas de terrenos basálticos, selecionadas dos arquivos da Surehma, coleta-

das com diferentes propósitos, no período compreendido entre abril de 1976 e julho de 1977 (Bittencourt, 1978), com o objetivo de caracterizar quimicamente as águas das regiões basálticas. Essas análises acham-se representadas no diagrama de Piper da Fig. 6.

Nas Figs. 6 e 7, os teores das espécies dissolvidas estão expressas em miliequivalente/l e caracterizam águas bicarbonatadas cálcicas. Observa-se que o diagrama de águas do córrego Jacutinga apresenta seus pontos localizados na mesma região de maior densidade de pontos do diagrama das águas basálticas da Bacia do Paraná. Isso, de certo modo, corrobora a consideração das águas deste córrego como representativas da maioria das águas superficiais sobre basaltos da Formação Serra Geral.

1) *Variações Sazonais* — A densidade de análises químicas efetuadas no Jacutinga possibilitou uma estimativa da composição média das águas, nos quatro trimestres de um ano médio, com base em 1975, 1976 e 1977. Esses valores constam da Tab. 3 e da Fig. 8, onde é também ilustrada a variação na vazão líquida.

A região é relativamente quente ($t_m = 20^{\circ}\text{C}$) com pequena amplitude térmica e a pluviosidade relativamente alta, irregularmente distribuída e insuficiente para provocar a lixiviação total de espécies dissolvidas liberadas dos basaltos. Esses aspectos conferem aos solos da região uma espécie de supersaturação em materiais solúveis durante a época das vazões baixas, ou seja; no segundo e terceiro trimestres. Nas águas altas, do início e do final do ano, mais espécies solúveis são incorporadas pelas águas, sendo neutralizado o efeito diluidor do maior volume do escoamento superficial. Desse modo, a maioria das espécies solúveis tem uma variação mais ou menos proporcional às vazões líquidas.

O comportamento do Ca^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , sólidos totais dissolvidos e, de certo modo o K^+ , poderia ser explicado por um mecanismo como o supramencionado.

A sílica tem, aparentemente, seus teores, grosso modo, inversamente proporcionais à vazão, apresentando comportamento sensível ao caráter diluidor do maior volume de água.

O Na^+ e o Mg^{2+} , além do NO_3^- , variam muito pouco e irregularmente no decorrer do ano. No caso do Na^+ e Mg^{2+} , cátions, provindos fundamentalmente da rocha, devem haver menores barreiras quanto a sua liberação uma vez que eles não participam sensivelmente de neogêneses minerais.

A erosão química específica (descartado o HCO_3^-) dos basaltos, obtida no Jacutinga, é de $30,8 \text{ t/km}^2 \cdot \text{ano}$ e no Itabó, tomado por comparação devido a diferenças de cobertura vegetal, de $6,2 \text{ t/km}^2 \cdot \text{ano}$.

Em bacias hidrográficas dispostas predominantemente sobre solos ferralíticos e savanas pertencentes ao sistema endorréico do Lago Chade, Gac (1979) obteve valores de $8,1 \text{ t/km}^2 \cdot \text{ano}$ para o Logone e $5,8 \text{ t/km}^2 \cdot \text{ano}$ para o Bahr Sara. Esses valores situam-se sensivelmente aquém dos obtidos no Jacutinga e para isso deve exercer grande influência a litologia daquelas bacias que é composta principalmente por granitos pré-cambrianos e arenitos terciários, sendo portanto fontes menos possantes de elementos em solução.

Tabela 3 — Composições químicas trimestrais e anual das águas do córrego Jacutinga a partir de 27 análises de amostras coletadas em 1974, 1975, 1976 e 1977 (Bittencourt, 1978). Aportes específicos de espécies dissolvidas

Espécies dissolvidas	Teores médios (mg/l)					Aportes disc. espec. (t/km ² · ano)
	1º trim.	2º trim.	3º trim.	4º trim.	Ano	
	Jan./fev./mar.	Ab./ma./jun.	Jul./ago./set.	Out./nov./dez.		
Na ⁺	1,61	1,51	1,59	1,51	1,56	1,274
K ⁺	0,81	0,60	0,90	1,01	0,84	0,686
Ca ⁺⁺	7,44	5,14	5,61	7,40	6,41	5,233
Mg ⁺⁺	1,78	2,41	2,06	2,20	2,13	1,739
SiO ₂	25,71	26,38	26,71	23,36	25,58	20,882
HCO ₃ ⁻	37,12	32,17	33,08	36,60	34,74	28,360
Cl ⁻	1,36	1,09	1,19	1,32	1,26	1,029
NO ₃ ⁻	0,34	0,35	0,66	0,81	0,55	0,449
pH	6,97	6,77	7,01	6,97	6,93	
Total	76,17	69,65	71,80	74,21	73,07	59,651

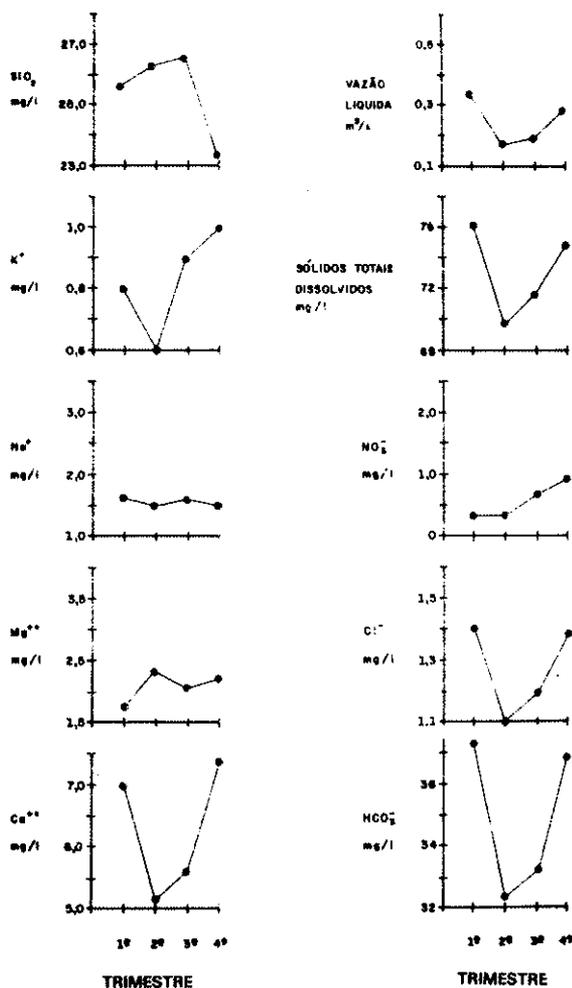


Figura 8 — Variações trimestrais médias de teores em espécies dissolvidas e vazões líquidas observadas durante o ano no córrego Jacutinga

Tabela 4 — Composição química média anual do Rio Itabó baseada em análises de amostras coletadas em 1977, 1978 e 1979. Aportes específicos de espécies dissolvidas

Espécies dissolvidas	Teores médios (mg/l)	Aportes específicos (t/km ² · ano)
Na ⁺	1,25	0,323
K ⁺	1,15	0,298
Ca ⁺⁺	3,90	1,009
Mg ⁺⁺	1,27	0,329
SiO ₂	16,50	4,269
HCO ₃ ⁻	22,57	5,839
Cl ⁻	0,00	—
NO ₃ ⁻	0,22	0,057
Total	46,86	12,124

2) *Influência das chuvas e de fontes de poluição* — A região estudada está afastada do oceano mais de 400 km, interpondo-se entre ela e o Atlântico duas formações orográficas. Esses aspectos, tendo influência marcante sobre a pluviosidade, contribuem para que os sais cíclicos, principalmente o NaCl, de origem atmosférica, tenham pequena influência na composição das águas superficiais da área.

A origem do Na⁺ encontrado nas águas superficiais, descartado o possível quinhão atmosférico, seria, então, apenas o basalto. Para o Cl⁻, torna-se mais complexo encontrar uma origem alternativa uma vez que os basaltos normalmente contêm apenas cerca de 160 ppm de Cl (Johns e Hung, 1967).

Tardy (1969), estudando águas das Vosges, notou que, se a correlação entre Na⁺ e Cl⁻ é boa, entre Na⁺ e SiO₂ é melhor, significando que talvez o Na⁺ trazido pelas chuvas seria assimilado pela vegetação e só o Cl⁻ iria juntar-se ao Na⁺ liberado pela hidrólise dos silicatos.

No caso particular das águas da região, o baixo teor de Na⁺ relacionado ao Cl⁻ sugere um consumo ou retenção de Na⁺ antes da incorporação das águas pluviais pelo aquífero e pelos cursos de água superficial.

Nas águas estudadas, não é, a nosso ver, conveniente uma correção pura e simples do Na⁺ pela eliminação da parte correspondente à quantidade de Cl⁻ uma vez que o primeiro aparenta provir predominantemente dos basaltos.

A larga utilização da região basáltica do Paraná para atividades agrícolas e agropastoris pode exercer uma certa influência no sentido de um aumento na concentração de algumas espécies dissolvidas, como o NO₃⁻ e o K⁺.

Para as culturas predominantes na região, são muito utilizados adubos do tipo NPK, em que o potássio e o nitrato exercem papel fundamental.

Nas águas genéricas sobre basaltos (Bittencourt, 1978) e nas águas do Jacutinga, o teor de NO₃⁻ oscila entre 0,0 e 12,4 mg/l, sendo sugerida a presença de fontes eventuais e descontínuas deste íon. A presença de currais de gado e criações de suínos perto de pequenos cursos de água, como é o caso do Jacutinga, pode contribuir com algum do nitrato encontrado dissolvido.

MECANISMOS DA EROÇÃO E DA ALTERAÇÃO
Equilíbrios geoquímicos

As espécies dissolvidas liberadas das estruturas dos minerais em vias de alteração permanecem nas águas que percolam os perfis, reagem entre si para formar novos compostos, incorporam-se em estruturas de espécies em transformação ou entram em algum ciclo orgânico. A composição química das águas, assim estabelecida, é regida pelo tempo de contato entre a rocha e a água, a natureza da rocha, a pluviosidade e a temperatura.

O sistema tende a um equilíbrio envolvendo minerais primários, a solução e minerais secundários.

A rocha primária, o basalto, é no caso constituída predominantemente por feldspatos cálcicos e piroxênios cálcio-magnesianos e ferruginosos. Já entre os minerais secundários, mais comum nas alterações de basaltos, destacam-se caulinita, gibsitita, óxido de ferro e, secundariamente, esmectitas.

Os valores das constantes K de reações envolvendo as diferentes montmorilonitas e os outros minerais foram determinados a partir da constante de equilíbrio calculada por Tardy *et al.* (1974), Deist e Talibudeen (1967), Laudelot *et al.* (1968), Truesdell e Christ (1968), e Helgeson (1969).

Nos diagramas de equilíbrio da Fig. 9, onde são fixados os domínios de estabilidade dos eventuais minerais neoformados durante o curso da alteração em função dos teores em cátions, pH e concentrações em sílica. Para estabelecimento do campo da montmorilonita foram considerados teores de Mg²⁺ e de H⁺ correspondentes à média das águas do córrego Jacutinga, ou seja: $\log (Mg^{2+})/(H^+)^2 = 2,549$.

As águas do córrego Jacutinga situam-se durante todo o ciclo anual dentro do campo de estabilidade da caulinita (Fig. 9) e se mostram supersaturadas em relação à sílica (quartzo). No caso das relações (Mg²⁺)/(H⁺), (Na⁺)/(H⁺) e (K⁺)/(H⁺) os pontos correspondentes aos quatro trimestres situam-se bastante próximos devido à

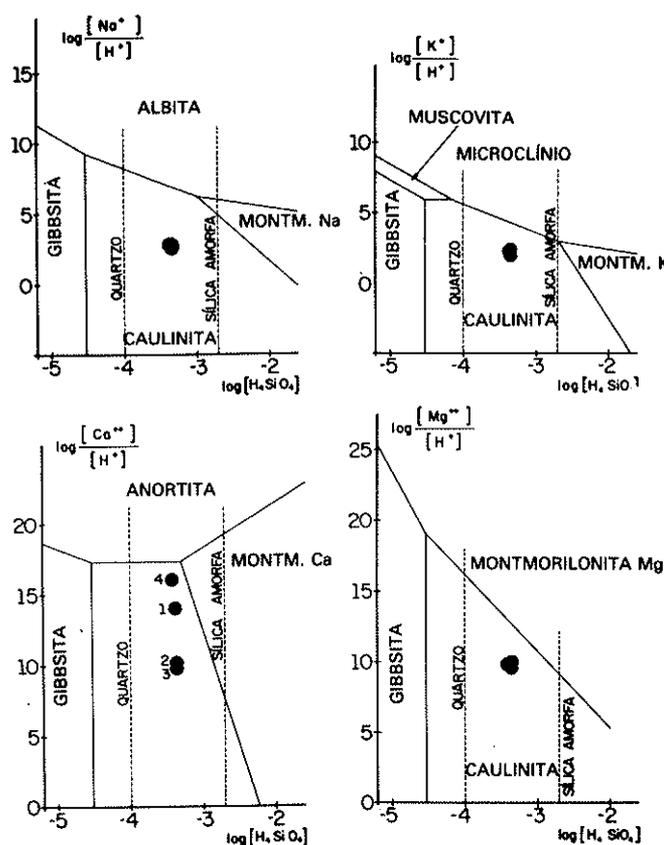


Figura 9 — Domínio de estabilidade de minerais neoformados durante o curso de uma alteração, em função dos teores em cátions, pH e concentração em sílica. Para o estabelecimento dos campos de estabilidade das montmorilonitas Na, K e Ca foi considerado um valor 2,549 para a relação $\log (Mg^{2+})/(H^+)$ correspondente à média das águas do Jacutinga. Os dados são apresentados em termos de milimoles/l e são confundidas concentrações com atividades. Os pontos negros representam as médias trimestrais das águas do Jacutinga

pequena variação das relações e da sílica. Já para a relação (Ca²⁺)/(H⁺) a variação é maior, sendo possível a distinção de dois regimes de alteração, um para os primeiro e quarto trimestres e outro para os segundo e terceiro trimestres. Nos períodos mais quentes e pluviosos, que vão de outubro a março, há uma maior tendência aparente à bissialitização. Isso pode ser explicado admitindo-se que as águas percolantes durante os meses de menor precipitação não são suficientes para eliminar todo o cálcio liberado e disponível. Esse fato é totalmente contrário ao que foi anotado por Gac (1979) em águas sobre o cristalino nas bacias do Chari e Logone, no Chade, onde, nas estações secas, os pontos representativos tendem a aproximar-se dos campos de domínio de estabilidade montmorilonitas.

Mobilidade relativa dos elementos A presteza com que cada elemento químico se libera de uma rocha configura um quadro de mobilidades relativas, em que os mais móveis se deslocam mais prontamente. A mobilidade relativa é estabelecida pela abundância relativa de constituintes em uma rocha e a quantidade removida durante um processo de alteração.

Tabela 5 — Porcentagem em peso e proporções moleculares dos óxidos dominantes no basalto do córrego Jacutinga e na composição média de basaltos não-diferenciados da Bacia do Paraná extraída de Cordani e Vandomos (1967)

Óxidos	Córrego Jacutinga		Média de basaltos	
	% em peso	Propor. molecular	% em peso	Propor. molecular
SiO ₂	51,55	85,79	49,65	82,63
Al ₂ O ₃	10,80	10,59	13,60	13,34
Na ₂ O	1,40	2,26	2,41	3,89
K ₂ O	0,36	0,38	1,31	1,39
CaO	10,53	18,78	8,06	14,37
MgO	5,32	13,20	4,53	11,24

Os trabalhos de Melfi e Levi (1971), e Levi e Melfi (1972), sobre a alteração intempérica de rochas básicas da Bacia do Paraná, chegaram a conclusões sobre a mobilidade relativa dos principais elementos, baseados em estudos sobre perfis de alteração desses tipos de rochas. Os valores obtidos vêm confirmar, em linhas gerais, aqueles levantados pela literatura que foram sumarizados por Tardy (1969) sob o seguinte esquema: Ca, Na e às vezes o Mg são sempre bem evacuados; Ma, K, Ba e Si são menos evacuados; Ni, Cu e Mn podem ainda ser parcialmente lixiviados; e Ga e Cr são menos móveis que Fe, Ti e Al, facilmente retidos nas arenas.

Tanto Smith (1913) e Polinov (1937) como Feth *et al.* (1964) chegaram a determinar a mobilidade relativa para os principais componentes das rochas em que: Ca > Na > Mg > Si > K > Fe > Al.

Hypolito (1972), estudando experimentalmente os primeiros estágios da alteração de diabásios, sob a ação de processo de lixiviação carboídrica, chegou a diferentes seqüências de mobilidades relativas, refletindo: diferenças texturais entre as rochas ensaiadas; tempo de contato da solução com a rocha; e pH das soluções percolantes.

Tardy (1969) propôs um método de avaliação da mobilidade relativa dos elementos baseado na relação:

$$\frac{ia \cdot ya}{ir \cdot yr} = \frac{ia \cdot yr}{ir \cdot ya}$$

em que *ia* e *ir* representam os teores em mg/l do elemento *i* nas águas e em 100 g de rochas, e *ya* e *yr* representam, por sua vez, os teores do elemento de referência nas águas e em 100 g de rochas.

Aplicando a relação proposta por Tardy para a avaliação da mobilidade relativa dos principais cátions dissolvidos nas águas do Jacutinga (Tab. 3) e relacionando-se com a análise química de um basalto coletado na própria bacia hidrográfica do Jacutinga (Tab. 5), chegou-se a um quadro em que, tomando-se o Na como referência, teremos as mobilidades relativas assim dispostas:

Espécies K > Na > Ca > Mg > SiO₂
 Mobilidades relativas 1.867 1.000 567 444 333

No caso de águas com a composição média dos rios sobre basaltos (Bittencourt, 1978) e utilizando os dados médios da composição química dos basaltos fornecidas por Cordani e Vandomos (1967) — Tab. 5 —, teremos:

Espécies Na > K > Ca > Mg > SiO₂
 Mobilidades relativas 1.000 975 890 757 285

Estas seqüências de mobilidades apresentadas con- dizem com a realidade, apesar de, à primeira vista, parecer estranha a alta mobilidade de K, que poderia ser explicada lembrando que o K junto com grande parte do Na estão localizados nas fases menos bem cristalizadas dos basaltos e, portanto, mais facilmente liberáveis. Além da facilidade de remoção, o K não tende a ser retido por neofomações em uma alteração do tipo monossialítica, como é o caso.

Tipo geoquímico de alteração De acordo com o comportamento da sílica durante o processo intempérico, podem ser estabelecidos tipos geoquímicos de alteração. A sílica pode alimentar minerais em vias de desenvolvimento; combinar-se com a alumina e outros íons de neofomações; e ser eliminada das estruturas silicáticas sob processo de degradação ou de hidrólise.

Pedro (1966), baseado no comportamento da sílica e das bases, propôs três grandes tipos de alterações: alitização, quando há completa lixiviação da sílica e das bases com formação de gibbsita; monossialitização, quando há uma completa evacuação das bases, permanecendo uma parte da sílica, e o mineral neoformado é a caulinita; e bissialitização, no caso de haver formação de montmorilonita ou de vermiculita (SiO₂/Al₂O₃2). No caso da formação de montmorilonitas ferruginosas e magnesianas, pode ser estabelecida uma relação sílica/alumina semelhante a 2, caindo no campo da monossialitização. Esse fenômeno pode ocorrer no caso de rochas básicas como as da região estudada.

Neste trabalho foi empregado o método de Tardy (1969), que leva em conta as proporções nas quais cada cátion básico é relacionado à sílica.

A partir da composição química do basalto, expressa em proporções moleculares (Tab. 5), calcula-se a proporção dos óxidos distribuídos nos minerais fundamentais (Tab. 6).

Os silicatos ferromagnesianos são representados nesta composição teórica apenas pelo magnésio. Isso se justifica pelo fato de que, na alteração, o Mg desses minerais deve intervir sozinho para explicar a sílica, pois o ferro liberado não é evacuado.

Com os dados da Tab. 6 pode-se calcular o RF, que é definido como sendo a relação entre a sílica fixada e a alumina fixada ou:

$$RF = \frac{SiO_2,fix}{Al_2O_3,fix} = \frac{6K_2O \text{ evac} + 6Na_2O \text{ evac} + 1,42 CaO \text{ evac} + Mg \text{ evac} - SiO_2 \text{ evac}}{K_2O \text{ evac} + Na_2O \text{ evac} + 0,42 CaO \text{ evac}}$$

Tabela 6 — Proporções moleculares dos óxidos distribuídos nos minerais fundamentais, representando uma composição normativa teórica dos basaltos do córrego Jacutinga

Minerais	Proporções moleculares dos óxidos		
Ortoclásio	0,38 de K ₂ O	0,38 de Al ₂ O ₃	2,28 de SiO ₂
Albita	2,26 de Na ₂ O	2,26 de Al ₂ O ₃	13,56 de SiO ₂
Anortita	7,95 de CaO	7,95 de Al ₂ O ₃	15,90 de SiO ₂
Wolastonita	10,83 de CaO	—	10,83 de SiO ₂
Enstatita	13,20 de MgO	—	13,20 de SiO ₂

Aplicando-se à equação as proporções moleculares das espécies dissolvidas (Tab. 3), chega-se a um RF de 1,40.

O tipo geoquímico de alteração das rochas básicas da região é a monossilicização, como indica o valor do RF e também análises mineralógicas por raios X, de fases alteradas dos basaltos, em que predomina largamente a caulinita sobre quaisquer outros tipos de argilo-minerais.

Jogando-se com a composição média dos basaltos (Tab. 5) e a composição média das águas do Jacutinga, obtém-se RF de 1,33, caracterizando, também, uma monossilicização, caracterização esta que é válida para o noroeste do Paraná.

No Jacutinga, pelo fato de as águas correrem diretamente sobre rocha e os solos serem pouco profundos, a bacia hidrográfica é bem representativa para avaliações da alteração de basaltos.

A composição química de médias gerais de rios sobre basaltos não pode, com precisão, ser considerada como resultante de um equilíbrio entre rocha em alteração/água. Na realidade, as águas superficiais correm em sua maior parte sobre solos ferralíticos já profundamente alterados e desenvolvidos.

Velocidade de aprofundamento dos perfis Com base nos dados levantados sobre a alteração química e mecânica, obtidos a partir dos materiais hidrotransportados e com informações sobre a rocha, pode ser montado um balanço do tipo alteração-erosão nos moldes do utilizado por Gac e Pinta (1973) em rochas da República Centro-Africana.

A decomposição química concorre para o aprofundamento dos perfis de alteração dos basaltos, provocando a solubilização de parte da rocha sã e a formação de minerais secundários.

Opondo-se à alteração química, que tende a liberar para transporte apenas materiais dissolvidos, age a erosão mecânica, provocando um arrasamento da parte superficial dos perfis pelo transporte dos materiais residuais e/ou formados durante o intemperismo químico.

A ação relativa desses dois mecanismos pode ser estimada pelo método aqui utilizado.

Considerando-se o basalto da bacia do córrego Jacutinga (Tab. 5), com densidade igual a 3, cada metro cúbico será formado por: 145 kg de sílica livre; 1.390 kg de sílica combinada; 324 kg de alumina; 528 kg de óxido de ferro; e 613 kg de óxidos das bases.

A mineralogia dos sólidos em suspensão e dos materiais é fundamentalmente caulinita, acompanhada por óxidos de ferro. Em um sistema de alteração monossilí-

tica, todos os 324 kg de Al₂O₃ combinam-se com 382 kg de SiO₂ que, associados a 114 kg de H₂O, formam 820 kg de caulinita.

Considerando-se uma dissolução do quartzo na ordem de 15% (Tardy, 1969), serão evacuados 1.030 kg de sílica para cada metro cúbico de rocha alterada.

No córrego Jacutinga, durante um ano, foram escoadas 22,2 t de SiO₂/km², o que corresponde a 17,7 g/m² de caulinita.

Como 1 m³ de rocha produz 820 kg de caulinita, a este valor do argilo-mineral formado teremos o correspondente a 1 m de profundidade de rocha alterada. No caso em questão, a 17,7 g/m² · ano de caulinita corresponde um aprofundamento de perfil na ordem de 2,2 · 10⁻⁵m.

A vazão sólida específica em suspensão do Jacutinga é de 50 g/m² · ano, dos quais 7 g/m² · ano são constituídos por Fe₂O₃. Considerando-se o valor correspondente à caulinita, tem-se uma ablação do solo eliminando uma camada de cerca de 5,3 · 10⁻⁶m.

Contraopondo-se os valores de formação de solo, 2,2 · 10⁻⁶m, e os de perda do solo, 5,3 · 10⁻⁶m, tem-se uma diminuição da camada alterada na ordem de 0,03 mm/ano.

Além das várias fontes potenciais de incorreções para as estimativas feitas em relação ao balanço erosão-alteração, convém mais uma vez salientar que as taxas calculadas para aprofundamento e arrasamento dos perfis de alteração são médias. Assim sendo, e como existem áreas pouco acidentadas e sujeitas a erosão mecânica muito baixa, ocorrem locais sob gradientes topográficos mais acentuados, que são acometidos de taxas de erosão bastante superiores à média.

Caso a alteração houvesse prosseguido sob as taxas atuais aqui estimadas em todo o Quaternário, ter-se-ia para o último milhão de anos a formação de 22 m de rocha alterada.

Existem diversos locais sobre a Formação Serra Geral, no Paraná, em que a camada alterada chega a 20 m. Para isso ocorrer, pode-se especular que o clima regional não se teria alterado fundamentalmente no Quaternário, ou ocorrem ou teriam ocorrido taxas mais elevadas de alteração no decorrer desse período.

Utilizando-se dos dados obtidos no Rio Itabó, no Paraguai (Tab. 4), obtém-se uma alteração evoluindo 0,41 · 10⁻⁶ n/ano que, estendida para o Quaternário, daria um manto de intemperismo de 4,1 m. Com esta taxa de alteração, para a formação de 20 m de alteritos, seriam necessários cerca de 4,8 milhões de anos, ou, o que é mais provável, fenômenos de remobilização de perfis, posteriormente homogeneizados pela pedogênese.

As estimativas feitas com base no Rio Itabó estão, talvez mais próximas da realidade, pois as condições atuais de cobertura vegetal da bacia daquele curso de água representam aceitavelmente as condições pretéritas de grande parte do norte e oeste do Estado do Paraná, outrora cobertos por exuberantes florestas.

CONCLUSÕES GERAIS

- A monossilicização é o tipo geoquímico de alteração predominante, sendo evidenciada pelo balanço de evasuação da sílica em solução, confirmada pela presença

maciça de caulinita nos solos da região.

- Na Bacia do Jacutinga, a mobilidade relativa dos elementos durante a alteração apresenta a seguinte ordem $K > Na > Ca > Mg > SiO_2$. A alta mobilidade do K e também do Na em relação ao Ca pode ser explicada pelo fato de esses elementos estarem associados a formas menos cristalizadas nos vidros vulcânicos de composição silicática potássica e nos feldspatos microcristalinos da matriz, mais facilmente alteráveis que os plagioclásios, que retêm o Ca e parte do Na em cristais mais desenvolvidos.

- De um modo geral, os teores das espécies dissolvidas apresentam uma pequena amplitude de variação sazonal. Espécies como o Ca^{2+} , HCO_3^- , Cl^- e K^+ têm uma variação em geral diretamente proporcional à vazão líquida. O Na^+ , o Mg^{2+} e o NO_3^- variam pouco e irregularmente enquanto o SiO_2 é sensivelmente influenciado pelo efeito diluidor de maior ou menor volume de água.

- A erosão mecânica é maior que a erosão química, sendo que esses dois parâmetros são, respectivamente, multiplicados, em média, por 10 e por 2 quando do desmatamento e ocupação intensiva dos solos basálticos. A tendência atual da evolução geoquímica é favorável a um arrasamento dos solos, caracterizando um período tipicamente resistástico.

- Mantidas as taxas atuais de aprofundamento dos perfis de alteração $2,2 \cdot 10^{-6}$ m/ano e de erosão mecânica de $6,1 \cdot 10^{-5}$ m/ano seriam necessários 25.000 anos para eliminar uma camada de 1 m de solo.

- Consideradas as taxas de aprofundamento dos perfis da bacia florestada do Rio Itabó, na ausência de fenômenos de coluvionamento, seriam necessários 4,8 milhões de anos com clima constante para a formação de espessuras de solo de 20 m/ano, anotadas em diversos pontos da Formação Serra Geral.

- Como seqüência a este estudo, para um balanço de material mais completo, deverão ser avaliados os aportes químicos por meio dos sólidos em suspensão e a certamente pequena contribuição de sais de origem atmosférica.

Agradecimentos O autor agradece ao Dr. Adolpho José Melfi pelas úteis sugestões durante a confecção do presente trabalho e pela revisão e crítica final do texto. Igualmente merecedores de agradecimentos são os colegas da Surehma que, direta ou indiretamente, cooperaram na confecção das análises químicas, desenho, fotografia das ilustrações e datilografia do texto. Finalmente, são consignados agradecimentos ao CNPq pela bolsa oferecida ao autor durante uma parte dos trabalhos.

BIBLIOGRAFIA

- A.P.H.A., A.W.W.A. e W.P.C.F. — 1975 — Standard Methods for the examination of water and wastewater including bottom sediments and sludges. American Public Health Association Inc., Broadway, New York.
- BITTENCOURT, A.V.L. — 1978 — Sólidos hidrotransportados na bacia hidrográfica do Rio Ivaí: Aplicação de balanços hidrogeoquímicos na compreensão da evolução de processos de dinâmica externa. Tese de Doutorado, I.G., USP.
- CORDANI, U.G. e VANDOROS, P. — 1967 — Basaltic Rocks of the Paraná Basin. Problems in Brazilian Gondwana Geology. Curitiba, Brasil, pp. 207-231.
- DEIST, J. e TALIBUDEEN, O. — 1967 — Thermodynamics of K-Ca ion exchange in soils. Journ. Soil Sci. 18: 138-148.
- D.N.A.E.E. — 1967 — Normas e Recomendações Hidrológicas. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, Ministério das Minas e Energia. Anexos I, II e III.
- FETH, J.H., ROBERTSON, C.E. e POLZER, W.L. — 1964 — Sources of mineral constituents in water from granitic rocks, Sierra Nevada, California and Nevada. U.S. Geol. Surv. Water, Supply Paper, 1535-1.
- GAC, J.Y. e PINTA, M. — 1973 — Bilan de l'érosion et de l'alteration entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des alterations et des eaux continentales. Thèse Doct. Ing. Strasbourg et Mém. Sci. Géol. 41: 83-96.
- GAC, J.Y. — 1979 — Géochimie du bassin du lac Tchad: Bilan de l'alteration, de l'érosion et de la sédimentation, Thèse Doct. Sci. Nat. Strasbourg.
- GIBBS, R.J. — 1972 — Water chemistry of the Amazon River. Geoch. cosmoch. Acta 36: 1061-1066.
- HELGESEN, H.C. — 1969 — Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. Am. J. Sci. 267: 724-804.
- HYPOLITO, R. — 1972 — Estudo experimental de alteração intempérica de diabásios. Tese de Doutorado, USP.
- JOHNS, W.D. e HUNG, W.H. — 1967 — Distribution of chlorine in terrestrial rocks. Geoch. Cosmoch. Acta 31 (1): 35-49.
- LAUDELLOT, H.; VAN BLADEL, R., BOLT, G.H. e PAGE, A.L. — 1968 — Thermodynamics of heterovalent cation exchange reactions in a montmorillonite clay. Trans. Faraday Soc. 64: 1477-1488.
- LEVI, F. e MELFI, A.J. — 1972 — Geochemical and mineralogical studies on the first stages of weathering of basic and related rocks. Rev. Bras. Geoc. 2 (1): 1-17.
- MAACK, R. — 1968 — Geografia física do Estado do Paraná. BADEP. Univ. Fed. Paraná.
- LIVINGSTONE, D.A. — 1963 — Chemical composition of rivers and lakes. In Data of Geochemistry, 6ª edição. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 440-G: 1-64.
- MELFI, A.J. e LEVI, F. — 1971 — Contribution à l'étude des "Terras Roxas legítimas" du Brésil. Bull. Assoc. Franc. pour l'étude du sol. 6: 31-39.
- ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS — 1969 — Inventário de dados hidrológicos e climatológicos. Bacia do Rio do Prata: Estudo para sua planificação e desenvolvimento. Secr. Geral O.E.A., Washington, D.C.
- ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS — 1975 — Bacia do Rio da Prata: Estudo para sua planificação e desenvolvimento. Noroeste do Estado do Paraná II. Estudo para o desenvolvimento regional. Secr. Geral O.E.A., Washington, D.C.
- PÉDRO, G. — 1966 — Essai sur la caractérisation géochimique des différents processus zonaux résultant de l'altération des roches superficielle. C.R. Acad. Sci. Paris, 262-D, pp. 1828-1831.
- POLINOV, B.B. — 1937 — Cycle of Weathering. Murphy Publ. Co., Londres, 220 pp.
- RUEGG, N.R. — 1975 — Modelos de variação química na província basáltica do Brasil Meridional. Tese de Livre-Docência, I.G., USP, 308 pp.
- SMITH, C.H., Jr. — 1913 — The relative solubilities of the chemical constituents of rocks. Jour. Geol. 21 (2): 105-120.
- TARDY, Y. — 1969 — Géochimie des alterations. Étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Sci. Strasbourg et Mém. Serv., Carte Géol. Als. Lor. 31: 199 pp.
- TARDY, Y., CHEVERRY, C. e FRIT, B. — 1974 — Néof ormation d'une argile magnésienne dans les dépressions interduaires du lac Tchad. Application aux domaines de stabilité des phyllosilicates alumineux, magnésiens et ferrifères. C.R. Acad. Sc., série D, Paris, 278: 1999-2002.
- TRUESDELL, A.H. e CHRIST, C.L. — 1968 — Cation exchange in clays interpreted by regular solution theory. Am. V. Sci. 266: 402-412.

Recebido em 14 de agosto de 1980.