



## EROSÃO QUÍMICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CORUMBATAÍ (SP)

M.J. Bortoletto Jr.<sup>1</sup>, J. Mortatti<sup>1</sup>, J.L. Probst<sup>2</sup>

1. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Caixa Postal 96, CEP 13416-970, Piracicaba, SP, Brasil.
2. Laboratoire de Mécanismes de Transferts en Géologie, CNRS/Université Paul Sabatier, 38, rue des 36 ponts, 31078 Toulouse Cedex, France.

Recebido em 04/02; aprovado para publicação em 01/03

### ABSTRACT

*The hydrochemical characterization of the Corumbataí river is used to evaluate the chemical erosion processes and the balance of silicate and carbonate rocks weathering in the drainage basin. The geochemical model used in this paper was based on the dissolution stoichiometry and hydrolysis of different minerals. The contribution of the CO<sub>2</sub> atmospheric/soil consumed by the rock weathering in the basin was 89%, which represents a specific flux of about 235 x 10<sup>3</sup> moles/km<sup>2</sup>.a. For the silicate weathering, the value observed was 208 x 10<sup>3</sup> moles/km<sup>2</sup>.a, whereas, for the carbonate, the result was around 27 x 10<sup>3</sup> moles/km<sup>2</sup>.a. The specific chemical erosion, in global terms, estimated as TDS for the Corumbataí River basin, was approximately 22 t/km<sup>2</sup>.a after being corrected for atmospheric inputs (ions and CO<sub>2</sub>); this value represents about 60% of the total dissolved load transported in the river. The weathering rate of silicates, estimated for the total silicated area (96 % of the basin), was 7.4 m/Myr, while, for carbonates, it was 16.3 m/Myr in only 4% of the basin.*

### RESUMO

*A partir da caracterização hidroquímica fluvial da bacia de drenagem do rio Corumbataí, foi possível avaliar os processos erosivos químicos e o balanço de alteração de rochas, silicatos e carbonatos, predominantes nessa área de estudo. O modelo geoquímico utilizado foi baseado na estequiometria das dissoluções e hidrólise dos diferentes minerais e permitiu estimar a contribuição de CO<sub>2</sub> atmosférico/solo durante o processo de alteração de rochas na bacia de drenagem, como sendo de 89%, representando um consumo específico de 235 x 10<sup>3</sup> moles/km<sup>2</sup>.a. O CO<sub>2</sub> consumido devido somente às alterações dos silicatos foi de 208 x 10<sup>3</sup> moles/km<sup>2</sup>.a, enquanto, para os carbonatos, o valor observado foi de 27 x 10<sup>3</sup> moles/km<sup>2</sup>.a. A erosão química global específica, estimada em termos de TDS para a bacia de drenagem do rio Corumbataí, corrigida dos aportes atmosféricos (íons e CO<sub>2</sub>), foi da ordem de 22 t/km<sup>2</sup>.a, representando cerca de 60% do total dissolvido transportado fluvialmente. A taxa de alteração dos silicatos foi calculada como sendo da ordem de 7,4 m/Ma para toda a área silicatada (96% da bacia de drenagem), enquanto que, para os carbonatos, obteve-se um valor de 16,3 m/Ma, correspondendo somente a 4 % da superfície total da bacia.*

## INTRODUÇÃO

O rio Corumbataí passou, nos últimos anos, a ter uma grande importância para as cidades da região de sua bacia, devido à boa qualidade das águas. Por causa da degradação de outras fontes fluviais existentes nesta região, ele passou a ser a principal fonte de abastecimento para consumo urbano. Um exemplo é a cidade de Piracicaba, de grande porte, que se abastece em 100% das águas do rio Corumbataí. Pode-se, também, citar Rio Claro, cidade de médio porte, com abastecimento integral usando as águas do rio Corumbataí. O manancial anteriormente usado para consumo urbano era o Ribeirão Claro, hoje, totalmente inutilizado para esse fim.

Dessa forma, passa a ser de suma importância para essas cidades, a preservação desse manancial, além de serem necessárias providências no sentido de se obter uma melhor utilização de seus recursos (Salati, 1996).

O intemperismo e a sedimentação são processos geoquímicos de máxima importância para o homem, pois o recurso econômico básico, o solo, é originado a partir desses mecanismos. A cultura e a civilização demonstram estar intimamente relacionadas com o padrão de fertilidade do solo. Ela pode ser atribuída diretamente aos processos geoquímicos que são responsáveis pela formação do solo, que ocorrem através dos materiais rochosos dos quais derivou (Mason, 1966).

Segundo Mortatti (1995), ecossistemas naturais que estão sob diversos tipos de ocupação intensiva, industrial ou agrícola, podem ser avaliados por meio de diferentes metodologias, que utilizam as bacias de drenagem como unidade de estudo. Isto é feito através do controle físico-químico das águas fluviais e do transporte de material dissolvido e particulado de suspensão. Assim, parâmetros importantes que configuram e controlam os processos erosivos, químicos e mecânicos, também podem ser melhor investigados.

O objetivo principal do presente trabalho é caracterizar os processos erosivos químicos, predominantes na bacia hidrográfica do rio Corumbataí, através de um estudo hidrogeoquímico detalhado e modelado da dinâmica do material dissolvido, transportado fluvialmente. Também são considerados os aportes atmosféricos, que possibilitam, dessa forma, a partir da caracterização química da carga dissolvida, reconstituir todo o processo de alteração de rochas que ocorre na bacia de drenagem, envol-

vendo, principalmente, o consumo de CO<sub>2</sub> atmosférico/solo durante o intemperismo, procurando estimar as taxas de erosão e degradação química dos seus principais tipos de rochas.

## ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Corumbataí, localizada entre a porção ocidental da Depressão Periférica Paulista e o Planalto Ocidental, é uma das quatro sub-bacias da bacia do rio Piracicaba, com uma população de aproximadamente 200.000 habitantes.

De acordo com Koffler (1994), ocupa uma área de drenagem de 1700 km<sup>2</sup>, localizada entre os paralelos 22°05' e 22°30' de latitude sul e os meridianos 47°30' e 47°50' a oeste de Greenwich, sendo distante 170 km de São Paulo.

O rio Corumbataí possui um desnível de 320 m em seus 120 km, ou seja, uma média de 2,7 m de desnível por km (Silva, 1994). Sua bacia é formada pelo próprio rio Corumbataí e pelos seus principais tributários: Passa Cinco, Ribeirão da Cabeça e Ribeirão Claro. Este rio tem origem na Serra de Santana a 750 m de altitude e desemboca no rio Piracicaba, do qual é o principal afluente.

Segundo o DAEE (1987), a vazão média anual do rio Corumbataí é de 23 m<sup>3</sup>/s, observada para um período de recorrência de 10 anos, o que representa uma descarga específica de 0,0135 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>.s. A vazão mínima foi estimada em 3,8 m<sup>3</sup>/s.

Com relação ao clima da região, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cwa, subtropical, seco no inverno e chuvoso no verão, com temperatura média superior a 22°C. As temperaturas mais altas ocorrem no período de dezembro a março, as mais baixas no bimestre junho e julho, com 17°C de temperatura média (Salati, 1996).

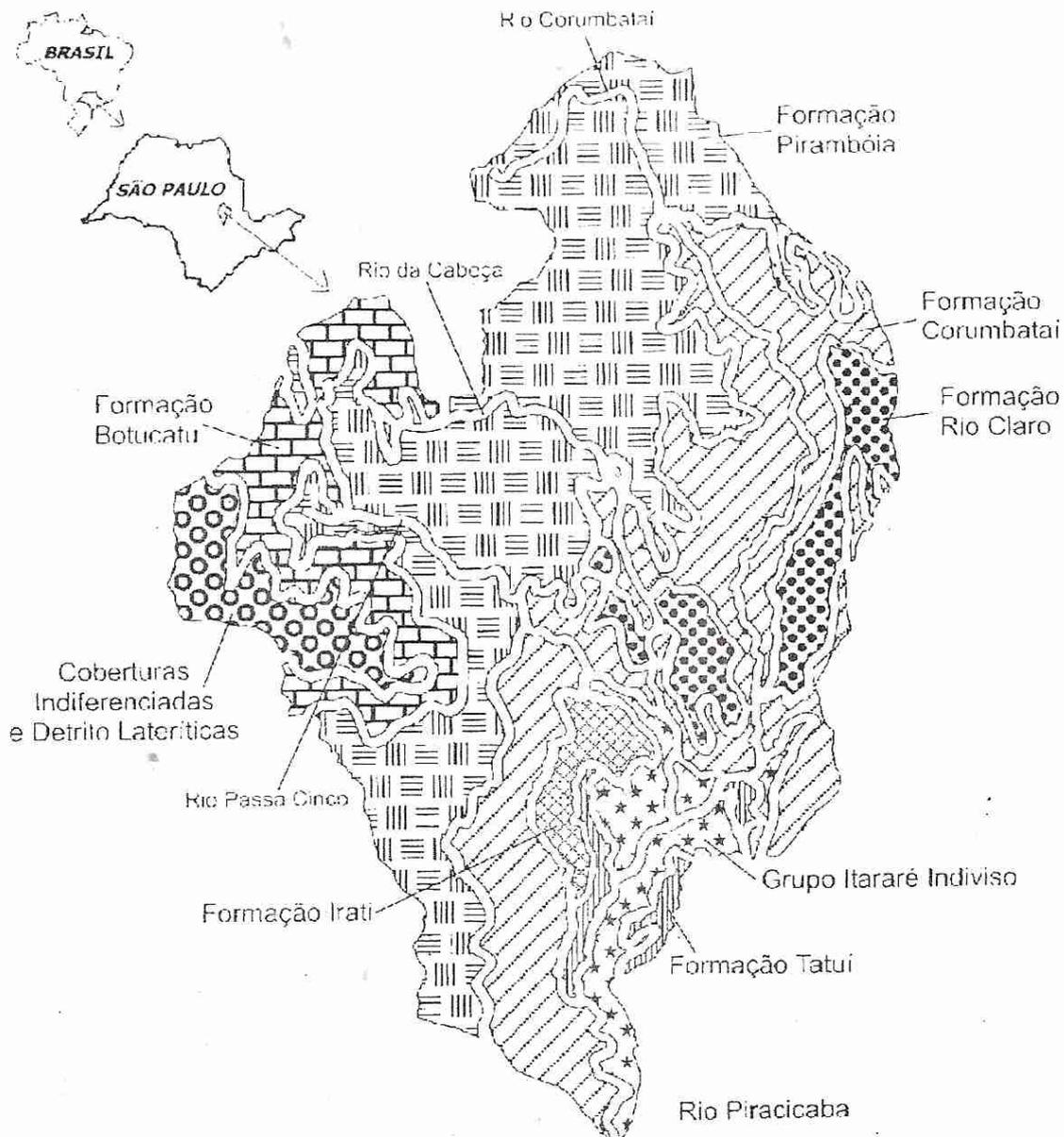
De acordo com Silva (1994), há uma grande uniformidade na distribuição anual das precipitações: Analândia - 1.272,7 mm, Corumbataí - 1.256,4 mm, Rio Claro - 1.286,3 mm, Piracicaba - 1.227,8 mm. A média anual para a área da bacia, para um período de recorrência de 10 anos, corresponde a 1.280 mm, que estão distribuídos em 70/80 dias do ano.

Em termos geológicos, a Depressão Periférica Paulista pode ser dividida em três zonas distintas: a do médio Tietê, do Paranapanema e do Mogi-Guaçu, estando, a bacia do rio Corumbataí, na primeira zona, a qual apresenta

características morfológicas típicas da mesma, ou seja, suavemente ondulado, com altitudes oscilando entre 550 m e 650 m (Almeida, 1974).

Conforme pode ser observado na Figura 1, a bacia do Corumbataí apresenta cinco formações geológicas mais significativas, que de acordo com BRASIL (1983), têm as seguintes características:

- Formação Rio Claro (Quaternário: arenitos);
- Formação Pirambóia (Triássico: argilitos);
- Formação Tatuí (Permiano Médio: calcários e siltitos);
- Formação Corumbataí (Permiano Superior: argilitos e folhelhos com intersecção de bancos calcíferos);
- Formação Irati (Permiano Superior: folhelhos, siltitos e calcários).



**Figura 1** – Principais formações geológicas da bacia do rio Corumbataí (SP). Formação do Rio Claro: arenitos; Formação Pirambóia: argilitos; Formação Tatuí: calcários e siltitos; Formação Corumbataí: argilitos, folhelhos e bancos calcíferos; Formação Irati: folhelhos, siltitos e níveis de calcários.

De acordo com o estimado por Bortoletto Jr. (1999), as áreas referentes às distintas regiões geológicas da bacia ocupadas por silicatos é de 1.624 km<sup>2</sup> (96 % da área total) e a ocupada pelos carbonatos é de 76 km<sup>2</sup> (4 % da área total).

Segundo os levantamentos realizados por Prado et al. (1981), citados por Koffler (1994), dois grandes grupos principais de solos ocorrem na bacia de drenagem do rio Corumbataí: os argissolos vermelho-amarelos e os latossolos vermelho-amarelos.

### AMOSTRAGEM E METODOLOGIA ANALÍTICA

O desenvolvimento metodológico proposto para o presente trabalho foi embasado no programa de amostragens do projeto temático Piracena/FAPESP: "Dinâmica do Carbono e Elementos Relacionados na Bacia do Rio Piracicaba" (Processo 94/20599).

As amostragens das águas fluviais superficiais foram realizadas na estação 4D021 (código DAEE), situada no distrito de Recreio (Piracicaba), próxima à foz do rio Corumbataí, sendo utilizados um mostrador pontual e garrafas de Niskin, coletadas no eixo da corrente.

As amostras, destinadas à análise das espécies químicas, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub>, foram filtradas a vácuo com filtro Millipore 0,45 µm e preservadas com HNO<sub>3</sub> ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, na razão de 1 mL do ácido concentrado por litro de amostra, conforme as espécies a serem determinadas.

As análises químicas foram realizadas pelo Laboratório de Química Analítica do CENA. Os cátions maiores (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) e o SiO<sub>2</sub> foram determinados por espectrometria de emissão, com plasma induzido em Argônio, e por espectrofotometria, acoplada a sistema de injeção em fluxo, enquanto as concentrações de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> foram determinadas por cromatografia líquida. Uma alíquota de 25 mL da amostra filtrada foi destinada para determinação da alcalinidade (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Esta medida foi feita por meio do método de titulação de Gran, utilizando-se o medidor de pH e o HCl de título conhecido. Os valores de vazão foram obtidos junto ao DAEE (relativo ao período de junho-95 a julho-97), e os de precipitação foram medidos no CENA/USP, localizado próximo à área estudada.

### HIDROQUÍMICA FLUVIAL

As concentrações médias das principais espécies químicas fluviais foram normalizadas em termos das vazões do rio Corumbataí em cada período de amostragem, por meio da equação 1:

$$C_r = \frac{\sum Q_i \cdot C_i}{\sum Q_i} \quad (1)$$

onde, C<sub>r</sub> é a concentração média das espécies químicas fluviais, normalizada pela vazão; Q<sub>i</sub> é a vazão medida no dia da amostragem; C<sub>i</sub> é a concentração medida para o dia de amostragem, e  $\sum Q_i$  é a somatória das vazões dos dias de amostragem. As concentrações foram expressas em µM e as vazões em m<sup>3</sup>/s.

A Tabela 1 apresenta os valores das concentrações das principais espécies químicas obtidas durante o período de amostragem realizada no rio Corumbataí, na estação de Recreio. Todas as espécies químicas foram expressas em µM, com exceção do total de sólidos dissolvidos (TDS), cujos valores são apresentados em mg/L. Os valores médios observados foram normalizados com respeito à vazão. Pode ser observado que o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> possui uma concentração superior a das outras espécies e, em termos médios, mais que o dobro da concentração de SiO<sub>2</sub>, que é a segunda espécie química de maior importância fluvial. Tanto o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> como o SiO<sub>2</sub> são produtos da alteração de rochas da região e geram importantes contribuições inorgânicas ao rio.

A Figura 2 apresenta o relacionamento vazão/concentração para as espécies químicas HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e SiO<sub>2</sub>, destacando-se o comportamento individual de cada uma com respeito à curva de diluição teórica.

Pode ser observado que tanto o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> como o SiO<sub>2</sub> não seguem as curvas de diluição teórica, ou seja, ocorrem constantes aportes dessas espécies químicas nas águas fluviais, sendo provenientes do processo de alteração de rochas nas bacias de drenagem, uma vez corrigidos os aportes atmosféricos e possíveis fontes de poluição. Dessa forma, esses aportes difusos são independentes das variações da vazão, não apresentando um padrão de sazonalidade definido.

Na Figura 3, são apresentados dois diagramas ternários: um para os cátions Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, e outro para os ânions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

**Tabela 1** – Concentrações das principais espécies químicas medidas no rio Corumbataí, em Recreio (período: junho 95 – julho 97).

| Dias           | Q (m <sup>3</sup> /s) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (µM) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (µM) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (µM) | Cl <sup>-</sup> (µM) | Ca <sup>2+</sup> (µM) | Mg <sup>2+</sup> (µM) | Na <sup>+</sup> (µM) | K <sup>+</sup> (µM) | SiO <sub>2</sub> (µM) | TDS (mg/L) |
|----------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|------------|
| 28/06/95       | 16.8                  | 757                                | 11                                | 112                                | 118                  | 140                   | 144                   | 261                  | 54                  | 214                   | 92         |
| 19/07/95       | 13.7                  | 492                                | 27                                | 222                                | 124                  | 147                   | 148                   | 461                  | 59                  | 189                   | 91         |
| 09/08/95       | 11.2                  | 554                                | 48                                | 137                                | 158                  | 145                   | 136                   | 400                  | 56                  | 217                   | 89         |
| 01/09/95       | 8.4                   | 651                                | 48                                | 149                                | 164                  | 132                   | 123                   | 461                  | 51                  | 214                   | 96         |
| 22/09/95       | 10.0                  | 489                                | 50                                | 225                                | 161                  | 128                   | 119                   | 444                  | 56                  | 213                   | 93         |
| 11/10/95       | 7.0                   | 544                                | 52                                | 136                                | 195                  | 142                   | 123                   | 391                  | 56                  | 210                   | 89         |
| 01/11/95       | 13.7                  | 412                                | 48                                | 225                                | 138                  | 137                   | 160                   | 326                  | 64                  | 189                   | 85         |
| 23/11/95       | 8.0                   | 579                                | 55                                | 350                                | 192                  | 182                   | 234                   | 596                  | 59                  | 224                   | 122        |
| 13/12/95       | 40.5                  | 393                                | 26                                | 216                                | 112                  | 142                   | 156                   | 274                  | 59                  | 196                   | 80         |
| 05/01/96       | 133.6                 | 459                                | 19                                | 126                                | 54                   | 110                   | 132                   | 126                  | 74                  | 249                   | 72         |
| 31/01/96       | 29.5                  | 647                                | 40                                | 239                                | 120                  | 187                   | 230                   | 370                  | 54                  | 235                   | 107        |
| 14/02/96       | 25.5                  | 605                                | 36                                | 163                                | 101                  | 167                   | 197                   | 278                  | 54                  | 217                   | 91         |
| 06/03/96       | 54.0                  | 505                                | 21                                | 132                                | 75                   | 147                   | 160                   | 217                  | 59                  | 210                   | 77         |
| 27/03/96       | 34.9                  | 639                                | 37                                | 32                                 | 95                   | 175                   | 206                   | 209                  | 43                  | 217                   | 79         |
| 17/04/96       | 34.4                  | 398                                | 24                                | 105                                | 81                   | 112                   | 123                   | 161                  | 59                  | 178                   | 63         |
| 05/08/96       | 15.5                  | 486                                | 46                                | 39                                 | 106                  | 145                   | 156                   | 231                  | 41                  | 228                   | 70         |
| 29/05/96       | 15.0                  | 512                                | 50                                | 109                                | 108                  | 152                   | 156                   | 261                  | 43                  | 210                   | 79         |
| 18/06/96       | 13.3                  | 480                                | 54                                | 83                                 | 153                  | 140                   | 136                   | 252                  | 41                  | 207                   | 75         |
| 17/07/96       | 10.4                  | 505                                | 53                                | 108                                | 143                  | 135                   | 128                   | 309                  | 43                  | 221                   | 80         |
| 02/08/96       | 8.0                   | 382                                | 57                                | 161                                | 184                  | 127                   | 115                   | 500                  | 54                  | 207                   | 83         |
| 21/08/96       | 8.2                   | 536                                | 50                                | 27                                 | 171                  | 132                   | 123                   | 352                  | 56                  | 199                   | 75         |
| 18/09/96       | 26.2                  | 520                                | 40                                | 188                                | 136                  | 162                   | 193                   | 270                  | 72                  | 189                   | 89         |
| 02/10/96       | 9.8                   | 558                                | 50                                | 179                                | 127                  | 165                   | 193                   | 326                  | 51                  | 210                   | 92         |
| 23/10/96       | 14.2                  | 620                                | 52                                | 262                                | 159                  | 202                   | 259                   | 383                  | 82                  | 231                   | 112        |
| 13/11/96       | 11.0                  | 634                                | 44                                | 350                                | 120                  | 242                   | 440                   | 435                  | 51                  | 221                   | 125        |
| 04/12/96       | 15.9                  | 634                                | 7                                 | 227                                | 121                  | 190                   | 280                   | 344                  | 51                  | 221                   | 103        |
| 07/01/97       | 15.7                  | 607                                | 52                                | 180                                | 270                  | 180                   | 107                   | 544                  | 90                  | 210                   | 106        |
| 29/01/97       | 143.9                 | 344                                | 16                                | 197                                | 83                   | 132                   | 165                   | 157                  | 59                  | 182                   | 70         |
| 19/02/97       | 57.5                  | 478                                | 28                                | 223                                | 128                  | 165                   | 218                   | 257                  | 59                  | 210                   | 90         |
| 12/03/97       | 18.4                  | 555                                | 38                                | 460                                | 142                  | 182                   | 251                   | 339                  | 54                  | 221                   | 122        |
| 02/04/97       | 19.3                  | 396                                | 55                                | 255                                | 156                  | 147                   | 169                   | 322                  | 54                  | 207                   | 89         |
| 23/04/97       | 11.6                  | 433                                | 48                                | 140                                | 126                  | 145                   | 169                   | 217                  | 54                  | 214                   | 77         |
| 14/05/97       | 7.7                   | 511                                | 57                                | 185                                | 154                  | 145                   | 148                   | 318                  | 41                  | 221                   | 89         |
| 04/06/97       | 100.1                 | 380                                | 41                                | 205                                | 80                   | 145                   | 160                   | 160                  | 51                  | 221                   | 77         |
| 16/07/97       | 10.4                  | 590                                | 8                                 | 157                                | 55                   | 162                   | 189                   | 265                  | 56                  | 214                   | 86         |
| C <sub>f</sub> |                       | 475                                | 31                                | 176                                | 105                  | 145                   | 170                   | 242                  | 59                  | 212                   | 82         |

C<sub>f</sub>: concentração média normalizada pela vazão.

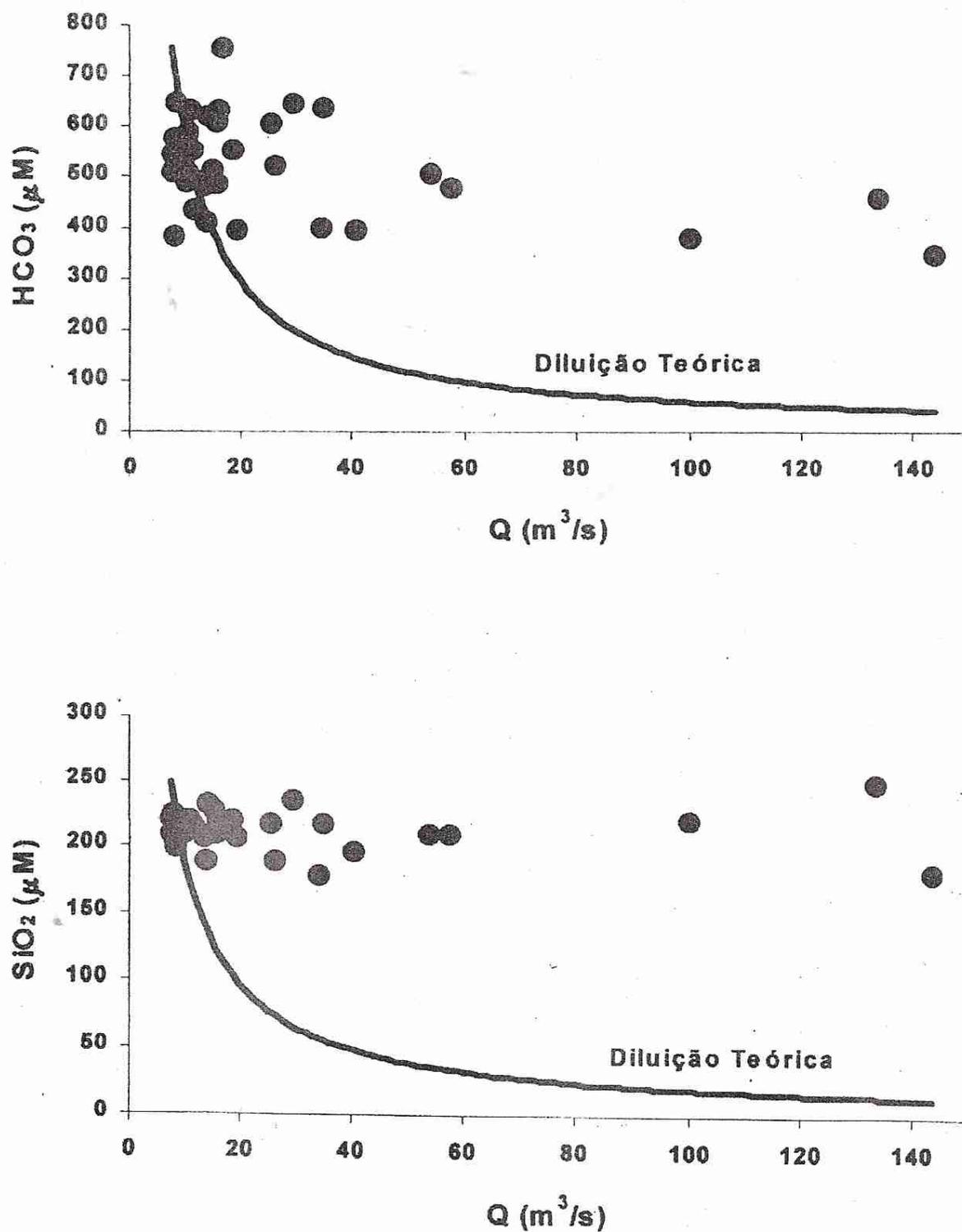


Figura 2 – Relações concentração/vazão para as espécies químicas HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e SiO<sub>2</sub> dissolvidas no rio Corumbataí, comparadas com a diluição teórica (período: junho 95 - julho 97).

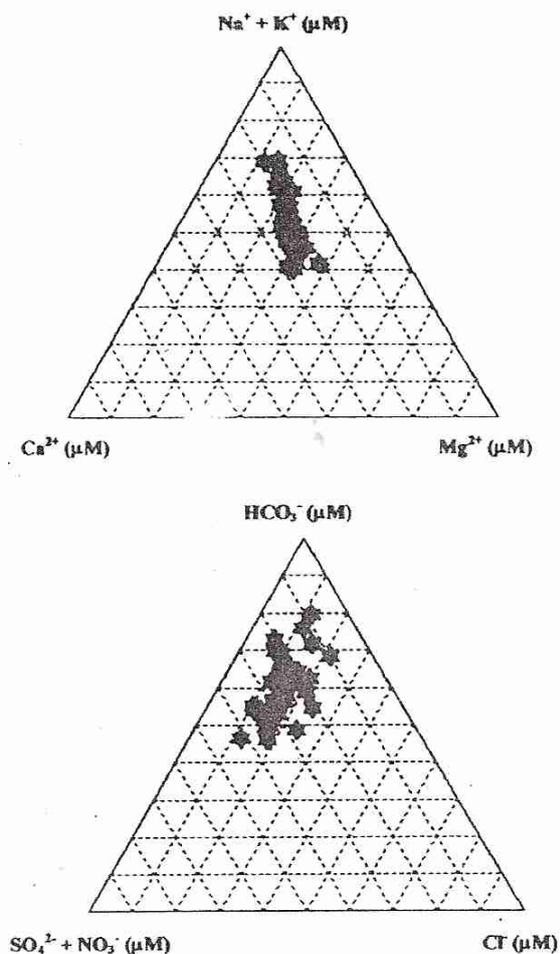


Figura 3 – Diagramas ternários relativos aos íons (cátions e ânions) nas águas do rio Corumbataí, em Recreio (período: junho 95 - julho 97).

Para os cátions, pode ser verificada uma tendência para o vértice  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ , caracterizando essa água como sódico-potássica. Para os ânions, o que se confirma é o total predomínio do íon  $\text{HCO}_3^-$ . O  $\text{Cl}^-$  não aparece significativamente nessas águas, com relação aos outros ânions. Dessa forma, as águas do rio Corumbataí apresentam-se com uma característica sódico-potássica e bicarbonatada. Tal evidência é confirmada pela característica geológica da região, com erosão química predominante de silicatos.

## TRANSPORTE FLUVIAL

O transporte fluvial das principais espécies químicas dissolvidas nas águas do rio Corumbataí foi avaliado segundo a metodologia estocástica, sugerida por Messaitfa (1997), de acordo com a equação 2:

$$T_r = C_r \cdot Q \cdot M \cdot 0,031536 \quad (2)$$

onde  $T_r$  é o transporte fluvial da espécie química dissolvida, expresso em t/a;  $C_r$  é a concentração média da espécie química, em  $\mu\text{M}$ , calculada de acordo com equação 1;  $Q$  é a vazão média diária para o período junho 95 - julho 97 ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), e  $M$  é o mol da espécie química (g). O fator 0,031536 corresponde à correção da massa e do tempo no cálculo do transporte fluvial.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos transportes totais e específicos obtidos para cada espécie química de interesse, como também para o total de sólidos dissolvidos, TDS, que representa a soma de todos os transportes relativos às espécies iônicas envolvidas.

Tabela 2 – Transporte total ( $T_r$ , t/a) e transportes específicos ( $TE_r$ , t/km<sup>2</sup>.a) das principais espécies químicas dissolvidas no rio Corumbataí (período: junho 95 - julho 97).

| Espécie            | $T_r$ (t/a) | $TE_r$ (t/km <sup>2</sup> .a) |
|--------------------|-------------|-------------------------------|
| $\text{HCO}_3^-$   | 27139       | 16.0                          |
| $\text{NO}_3^-$    | 1800        | 1.1                           |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | 15825       | 9.3                           |
| $\text{Cl}^-$      | 3486        | 2.1                           |
| $\text{Ca}^{2+}$   | 5432        | 3.2                           |
| $\text{Mg}^{2+}$   | 3869        | 2.3                           |
| $\text{Na}^+$      | 5213        | 3.1                           |
| $\text{K}^+$       | 2161        | 1.3                           |
| $\text{SiO}_2$     | 11914       | 7.0                           |
| TDS                | 76839       | 45.4                          |

No período estudado, elevados transportes foram observados para  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{SiO}_2$ , de 27139 t/a, 15825 t/a e 11914 t/a, respectivamente. Tais resultados podem ser justificados devido à formação geológica da bacia de drenagem, com presença de carbonatos e silicatos e, em termos de  $\text{SO}_4^{2-}$ , principalmente pelos aportes de origem terrígena (queimadas) e atmosférica (emissão gasosa) na região. O transporte do

TDS foi de 76839 t/a, o que representou um valor específico de 45,4 t/km<sup>2</sup>.a. Isto mostrou que a carga dissolvida no rio Corumbataí, para o período estudado, foi significativamente superior, quando comparada com a carga de TDS obtida para a bacia do rio Congo, da ordem de 6,5 t/km<sup>2</sup>.a (Nkounkou & Probst, 1987).

De acordo com Meybeck (1976), o transporte específico fluvial mundial, expresso em termos de TDS, apresenta um valor de 37,7 t/km<sup>2</sup>.a, enquanto, para a bacia amazônica, o valor obtido por Mortatti (1995) foi de 42,4 t/km<sup>2</sup>.a.

### CORREÇÃO DOS APORTES ATMOSFÉRICOS TOTAIS

Para o cálculo da erosão química, foi necessário o conhecimento da contribuição dos aportes atmosféricos totais na carga fluvial transportada, referentes às principais espécies químicas. As concentrações médias dessas espécies químicas na chuva foram calculadas de maneira semelhante à carga fluvial (equação 1), sendo estas ponderadas pela precipitação total, conforme pode ser observado na Tabela 3.

**Tabela 3** – Concentrações médias obtidas para as diversas espécies químicas analisadas na precipitação, normalizadas em função da altura pluviométrica, no posto de amostragem CENA/USP (período: junho 95 - julho 97).

| Espécie                       | C <sub>p</sub> (μM) |
|-------------------------------|---------------------|
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 5                   |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 43                  |
| Cl <sup>-</sup>               | 6                   |
| Ca <sup>2+</sup>              | 23                  |
| Mg <sup>2+</sup>              | 8                   |
| Na <sup>+</sup>               | 4                   |
| K <sup>+</sup>                | 5                   |
| SiO <sub>2</sub>              | 3                   |

C<sub>p</sub>: concentração das espécies na chuva

As águas pluviais apresentaram como característica principal entre as espécies químicas analisadas, um domínio do Ca<sup>2+</sup> para os cátions (23 μM) e o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (43 μM) para os ânions, sendo, ainda, relativamente importantes K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, com, respectivamente, 5, 6 e 5 μM. Observando-se os valores da tabela, pode-se perceber que o SiO<sub>2</sub> é a espécie que apresenta o menor dos valores de concentração e o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> o

maior deles. Entre os cátions, o Ca<sup>2+</sup> é o que possui um valor mais representativo, sendo o Na<sup>+</sup> o que mostra ter a menor das concentrações. Entre os ânions, o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> é o que apresenta a menor das concentrações. O HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> também foi dosado na chuva, mostrando-se em concentrações muito baixas, sendo desprezível nesse caso.

Os aportes pluviais (totais e específicos) para as principais espécies químicas podem ser observados na Tabela 4.

**Tabela 4** – Transportes pluviais (totais e específicos) para as principais espécies químicas (período: junho 95 - julho 97).

| Espécie                       | T <sub>p</sub> (t/a) | TE <sub>p</sub> (t/km <sup>2</sup> .a) |
|-------------------------------|----------------------|--|
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 675                  | 0.4                                    |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 8983                 | 5.3                                    |
| Cl <sup>-</sup>               | 463                  | 0.3                                    |
| Ca <sup>2+</sup>              | 2002                 | 1.2                                    |
| Mg <sup>2+</sup>              | 423                  | 0.2                                    |
| Na <sup>+</sup>               | 200                  | 0.1                                    |
| K <sup>+</sup>                | 425                  | 0.3                                    |
| SiO <sub>2</sub>              | 362                  | 0.2                                    |
| TDS                           | 13533                | 8.0                                    |

T<sub>p</sub>: Transporte total; TE<sub>p</sub>: transporte específico

Os aportes pluviais foram calculados de acordo com a equação 3, expressa como se segue:

$$T_p = P \cdot C_p \cdot M \cdot A \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

onde P é a precipitação total média anual (mm/a); C<sub>p</sub> é a concentração média de cada espécie química, normalizada pela precipitação; M é o mol (g) e A é área da bacia de drenagem (km<sup>2</sup>).

As espécies químicas mais significativas nos aportes pluviais foram o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e o Ca<sup>2+</sup>, com 8.983 t/a e 2.002 t/a, respectivamente, o que indicou um transporte específico de 5,3 t/km<sup>2</sup>.a para o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e 1,2 t/km<sup>2</sup>.a para o Ca<sup>2+</sup>. O total das espécies dissolvidas precipitadas com a chuva (TDS) foi da ordem de 13.533 t/a, com um transporte específico de 8,0 t/km<sup>2</sup>.a.

### CONSUMO DE CO<sub>2</sub> ATMOSFÉRICO/SOLO

A partir das correções dos aportes atmosféricos totais sobre o transporte fluvial das principais espécies dissolvidas, foi aplicado um modelo geoquímico de estimativa de consumo de



$$\%CO_2 = \frac{[HCO_3^-]_{\text{silicato}} + [Ca + Mg]_{\text{carbonato}}}{[HCO_3^-]} \cdot 100 \quad (6)$$

onde:

$$[HCO_3^-]_{\text{silicato}} = [HCO_3^-]_{\text{rio}} - [HCO_3^-]_{\text{carbonato}} \quad (7)$$

$$[HCO_3^-]_{\text{carbonato}} = [Ca+Mg]_{\text{carbonato}} \cdot 2 \quad (8)$$

$$[Ca+Mg]_{\text{carbonato}} = [Ca+Mg]_{\text{rio}} - [Ca+Mg]_{\text{silicato}} - Ca_{CaSO_4} \quad (9)$$

$$[Ca + Mg]_{\text{silicato}} = \frac{[Na + K]_{\text{silicato}}}{1,37} \quad (10)$$

$$[Na+K]_{\text{silicato}} = [Na]_{\text{silicato}} + [K]_{\text{silicato}} \quad (11)$$

$$[Na]_{\text{silicato}} = [Na]_{\text{rio}} - [Na]_{NaCl} \quad (12)$$

$$[Na]_{NaCl} = \frac{[Cl]_{\text{rio}}}{1,54} \quad (13)$$

$$[K]_{\text{silicato}} = [K]_{\text{rio}} \quad (14)$$

O cálculo relativo ao  $HCO_3^-$ , provindo do  $CO_2$  atmosférico/solo, mostrou que esta contribuição foi de 89,7 % do  $HCO_3^-$  total fluvial, sendo os restantes 10,3 %, provindos da própria dissolução dos carbonatos da bacia de drenagem.

O consumo específico de  $CO_2$  atmosférico/solo, expresso em termos de  $HCO_3^-$ , foi de  $235 \times 10^3$  moles/ $km^2.a$ . Tal valor pode ser comparado com os obtidos para a bacia amazônica, da ordem de  $331 \times 10^3$  moles/ $km^2.a$  (Mortatti, 1995) e  $271 \cdot 10^3$  moles/ $km^2.a$  (Amiotte-Suchet e Probst, 1995) e de  $261 \times 10^3$  moles/ $km^2.a$  para a bacia do rio Piracicaba (Rodrigues Jr., 1998 e Mortatti *et al.*, 1999).

O resultado obtido para a bacia do rio Corumbataí é ligeiramente superior à média global da erosão continental estimada por Meybeck (1987), da ordem de  $161 \times 10^3$  moles/ $km^2.a$ .

Esse cenário mostra a importância do consumo de  $CO_2$  atmosférico/solo no processo de alteração de silicatos e carbonatos em bacias de drenagem, sendo ele de 68% para a amazônica, 100% para a do rio Piracicaba (considerando somente a parte média superior da bacia de drenagem) e em torno de 90% para a do rio Corumbataí.

## EROSÃO QUÍMICA TOTAL

O cálculo da erosão química total foi realizado em função do transporte fluvial de mate-

rial sólido dissolvido total (TDS), associado às correções relacionadas aos aportes atmosféricos (íons e  $CO_2$ ), por meio da equação 15, como se segue:

$$EQ = T_{TDS\text{rio}} - T_{TDS\text{chuva}} - (k \cdot T_{HCO_3^-}) \quad (15)$$

onde EQ representa a erosão química total, expressa em  $t/km^2.a$ ;  $T_{TDS\text{rio}}$  é o transporte de material dissolvido;  $T_{TDS\text{chuva}}$  é o transporte de entradas atmosféricas; k é a porcentagem que corresponde à dissolução de carbonatos consumidos durante o intemperismo;  $T_{HCO_3^-}$  é o transporte de  $HCO_3^-$  fluvial.

A erosão química total para a bacia de drenagem do rio Corumbataí foi calculada como sendo da ordem de 37.740 t/a, enquanto a erosão química específica foi de 22,2  $t/km^2.a$ , o que representa cerca de 60% da carga total dissolvida transportada fluvialmente. Tais valores podem ser comparados com os observados para a bacia do rio Piracicaba, obtidos por Rodrigues Jr. (1998), o qual apresenta uma erosão química total de 240.000 t/a, com um transporte específico de 27,1  $t/km^2.a$ .

Embora o transporte total seja superior para o rio Piracicaba, em termos de erosão química específica, os valores observados são similares, sendo ligeiramente inferiores na bacia do Corumbataí.

Outras bacias de drenagem também podem ser comparadas, tais como a do Girou (França), que possui uma erosão química no valor de 58 t/km<sup>2</sup>.a, o que representa cerca de 61% do material dissolvido transportado fluvialmente (Probst, 1986). A bacia do rio Congo, na África, possui um valor bem menor de erosão química (6,5 t/km<sup>2</sup>.a), porém, apresenta praticamente a mesma contribuição ao total dissolvido que a bacia do Girou (62%), conforme é mostrado em Nkounkou & Probst (1987).

Em Probst & Bazerbachí (1986), o valor obtido para a erosão química na bacia do rio Garonne foi de 70 t/km<sup>2</sup>.a. Este valor representa 58% do total de material dissolvido transportado pelo rio Garonne. Em Peray (1998), a erosão química para a bacia do rio Ill (França) apresentou o valor de 98 t/km<sup>2</sup>.a (69% do total dissolvido em águas fluviais).

## TAXAS DE ALTERAÇÃO DE SILICATOS E CARBONATOS

A taxa de alteração dos carbonatos na bacia de drenagem do rio Corumbataí pode ser expressa de acordo com Mortatti *et al.* (1997), por meio da equação 16, como se segue:

$$WR_{\text{carb}} = \frac{T_{\text{Ca,Mg}}}{d} \quad (16)$$

onde  $WR_{\text{carb}}$  é a taxa de alteração de carbonatos de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> (m/Ma);  $T_{\text{Ca,Mg}}$  são os transportes específicos de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> (t/km<sup>2</sup>.a), oriundos da alteração dos carbonatos, e  $d$  é a densidade média dos solos da bacia de drenagem (t/m<sup>3</sup>).

Os transportes específicos calculados para o Ca<sup>2+</sup> e para o Mg<sup>2+</sup> dos carbonatos, de 0,65 e 0,26 t/km<sup>2</sup>.a, respectivamente, foram estimados a partir das equações relativas às alterações dos carbonatos, de acordo com o modelo proposto. Para uma densidade média dos solos da região de 1,4 t/m<sup>3</sup>, a taxa de alteração dos carbonatos foi calculada como sendo de 16,3 m/Ma, já corrigida em função da área de ocorrência dos carbonatos em relação à bacia como um todo.

A taxa de alteração dos silicatos, conhecida também como degradação química do perfil rochoso, pode ser calculada a partir do transporte fluvial de sílica dissolvida ( $T_{\text{SiO}_2}$ ), conhecendo-se previamente os conteúdos percentuais de SiO<sub>2</sub> da rocha matriz ( $S_o$ ) e do saprolito ( $S_s$ ),

rocha degradada com neoformação de caulinita e quartzo residual, segundo a equação 17, de acordo com Boeglin & Probst (1998):

$$WR_{\text{chsil}} = \frac{T_{\text{SiO}_2}}{(S_o - S_s)} \quad (17)$$

onde  $WR_{\text{chsil}}$  é a taxa de alteração dos silicatos (m/Ma),  $T_{\text{SiO}_2}$  é o transporte fluvial específico de SiO<sub>2</sub> dissolvido (t/km<sup>2</sup>.a),  $S_o$  é o conteúdo de SiO<sub>2</sub> da rocha matriz (t/m<sup>3</sup>) e  $S_s$  é o conteúdo de SiO<sub>2</sub> do saprolito (t/m<sup>3</sup>).

A velocidade de alteração dos silicatos foi calculada utilizando-se a ocorrência de SiO<sub>2</sub> nas rochas ( $S_o$ ) da ordem de 70% (densidade de 2,65 t/m<sup>3</sup>), enquanto que o SiO<sub>2</sub> do saprolito ( $S_s$ ) foi de 64% (densidade de 1,65 t/m<sup>3</sup>), sendo esses dados oriundos das análises das rochas matrizes e solos da região (BRASIL, 1983). A massa volumica de SiO<sub>2</sub>, calculada para o  $S_o$ , foi de 1,86 t/m<sup>3</sup> e para o  $S_s$  da ordem de 1,06 t/m<sup>3</sup>, enquanto que a sílica, evacuada em solução, foi de 6,8 t/km<sup>2</sup>.a.

A velocidade de alteração do perfil rochoso silicatado, obtida pela equação 17, foi de 7,4 m/Ma. Tal valor é inferior ao obtido por Mortatti & Probst (1999) para a região amazônica, de 14,8 m/Ma, em que os escudos cristalinos são predominantes. No entanto, o valor obtido para a bacia do rio Corumbataí é superior ao obtido para o rio Niger (África), de 4,1 m/Ma, usando a mesma metodologia (Boeglin & Probst, 1998).

## CONCLUSÕES

Os processos erosivos químicos ocorrentes na bacia do rio Corumbataí puderam ser avaliados por meio de estudos da dinâmica de transporte das principais espécies químicas dissolvidas, baseados nas características hidrogeoquímicas das águas fluviais, na estação de amostragem em Recreio, no período de junho 95 - julho 97. Os principais resultados obtidos nesse estudo enfatizam que o modelo geoquímico utilizado, baseado na estequiometria das dissoluções e hidrólise dos diferentes minerais, analisados de acordo com o comportamento hidroquímico fluvial das diferentes espécies químicas dissolvidas, permitiu estimar a contribuição de CO<sub>2</sub> atmosférico/solo durante o processo de alteração de rochas e as taxas de alteração dos silicatos e carbonatos na bacia de drenagem do rio Corumbataí.

Procurou-se evidenciar a importância do estudo da erosão química em bacias de drenagem, e trabalhos futuros permitirão investigar melhor as correções atmosféricas totais e a influência da sazonalidade nos fluxos de CO<sub>2</sub> consumidos durante o processo de alteração, uma vez que o mesmo desenvolvimento metodológico pode ser aplicado em qualquer bacia hidrográfica, independente da área de drenagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. (1974) Fundamentos geológicos do relevo paulista. IG/USP, Série Teses e Monografias, **14**:126p.
- AMIOTTE-SUCHET, P. (1995) Cycle du carbone, érosion chimique des continents et transferts vers les océans. Tese de Doutorado. Centre de Géochimie de la Surface, Université Louis Pasteur, 156p.
- BOEGLIN, J.I. & PROBST, J.L. (1998) Physical and chemical weathering rates and CO<sub>2</sub> consumption in a tropical lateritic environment: the upper Niger basin. *Chemical Geology*, **148**:137-156.
- BORTOLETTO JÚNIOR, M.J. (1999) Balanço de alteração e erosão química na bacia hidrográfica do rio Corumbataí (SP). Dissertação de Mestrado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 95p.
- BRASIL (1983) Ministério da Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL. Folhas 23/24, Rio de Janeiro, **32**:27-247.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA/DAEE (1987) Dados básicos da bacia do rio Corumbataí, 92p.
- KOFFLER, N.F. (1994) Carta de declividade da bacia do rio Corumbataí para análise digital (SIG). *Geografia*, **19** (2):167-182.
- MASON, B.H. (1966) Princípios de geoquímica. Ed. Polígono, 381p.
- MESSAITFA, A. (1997) Transfert d'eau, des sédiments et de polluants associés sur le bassin de l'Ill: cas de mercure. Tese de Doutorado. Centre de Géochimie de la Surface, Université Louis Pasteur, 209p.
- MEYBECK, M. (1976) Total mineral dissolved transport by world major rivers. *Science Hydrologique Bulletin*, **21**:265-284.
- MEYBECK, M. (1987) Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, **287**:401-428.
- MORTATTI, J. (1995) Erosão na Amazônia: processos, modelos e balanço. Tese de Livre-docência. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 155p.
- MORTATTI, J. & PROBST, J.L. (1999) Chemical erosion of silicates in the Amazon basin. In: Intern. Symp. Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins, Manaus. Proceedings Manaus 99, Anais, p.121.
- MORTATTI, J.; VITORIA, R.L.; TARDY Y. (1997) Balanço de alteração e erosão química na bacia amazônica. *Geochimica Brasilienses*, **11** (1):2-13.
- MORTATTI, J.; PROBST, J.L.; RODRIGUES JÚNIOR, J.C.; MILDE, L.C.E.; FERRAZ, F.F.B.; BORTOLETTO JÚNIOR, M.J. (1999) Erosion balance of the Piracicaba river basin. In: Intern. Symp. Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins, Manaus. Proceedings Manaus 99, Anais, p.122.
- NKOUNKOU, R.R. & PROBST, J.L. (1987) Hydrology and geochemistry of the Congo river system. Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg, SCOPE/UNEP. Sonderband, **64**:483-508.
- PERAY, N. (1998) Composition chimique des eaux de l'Ill à Strasbourg: variations saisonnières des flux de matières et bilan de l'érosion chimique. Centre de Géochimie de la Surface, Université Louis Pasteur, 24p.
- PROBST, J.L. (1986) Dissolved and suspended matter transported by the Girou river (France): mechanical and chemical erosion rates in a calcareous molasse basin. *Journal des Sciences Hydrologiques*, **31**:61-79.
- PROBST, J.L. & BAZERBACHI, A. (1986) Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. *Science Géologiques Bulletin*, **1**:79-98.

- PROBST, J.L.; MORTATTI, J.; TARDY, Y. (1994) Carbon river fluxes and global weathering CO<sub>2</sub> consumption in the Congo and Amazon river basins. *Applied Geochemistry*, **9**:1-13.
- RODRIGUES JUNIOR, J.C. (1998) Balanço da erosão na bacia do rio Piracicaba. Dissertação de Mestrado. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 58p.
- SALATI, E. (1996) Diagnóstico ambiental sintético e qualidade da água como subsídio para o planejamento regional integrado da bacia hidrográfica do Rio Corumbataí (SP). Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 95p.
- SILVA, G.M.P. (1994) Diagnóstico ambiental da bacia do rio Corumbataí: um estudo analítico. CEA/UNESP, 87p.
- STALLARD, R.F. & EDMOND, J.M. (1983) Geochemistry of the Amazon basin. The influence of the geology and weathering environment on the dissolved load. *Journal of Geophysical Research*, **88** (2):9671-9688.