

# TRANSPORTE DE ESPÉCIES QUÍMICAS DISSOLVIDAS EM ÁGUAS FLUVIAIS DE UMA MICROBACIA COM EUCALIPTOS EM ANGATUBA, SÃO PAULO

Helder de OLIVEIRA, Diego VENDRAMINI, Jefferson MORTATTI

Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA)/Universidade de São Paulo. Avenida Centenário, 303. Caixa Postal 96. Piracicaba, SP. Endereços eletrônicos: helder@cena.usp.br; dvendram@cena.usp.br; jmortatt@cena.usp.br

Introdução  
Área de Estudo  
Protocolo de Amostragem  
Protocolo Analítico  
Equilíbrio Iônico e Concentrações das Principais Espécies Químicas Fluviais  
Quantificação do Transporte Fluvial  
Resultados e Discussão  
Conclusões  
Agradecimentos  
Referências Bibliográficas

**RESUMO** – As concentrações das principais espécies químicas dissolvidas bem como seus transportes fluviais foram quantificadas no córrego Entre Rios, em uma microbacia reflorestada com eucaliptos em Angatuba, SP, durante dois eventos chuvosos, antes e após a colheita da madeira, sendo comparados dois métodos de cálculo, o estocástico e o de integração de áreas. Embora com resultados similares, o método de integração de áreas se mostrou melhor adaptado à situação proposta, evidenciando que  $\text{SiO}_2$  e  $\text{HCO}_3^-$  apresentaram os transportes específicos mais significativos em ambos os períodos de amostragem. Após a colheita de madeira foi possível verificar um aumento na concentração de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  devido aos tratamentos culturais e adubação para o próximo ciclo de plantas. Os baixos transportes observados confirmaram a baixa minerabilidade das águas superficiais, se mostrando altamente dependentes do processo de recarga.

**Palavras-chave:** transporte fluvial, microbacia, espécies químicas, eucaliptos.

**ABSTRACT** – *H. Oliveira, D. Vendramini, J. Mortatti - Transport of chemical species dissolved in fluvial waters of a small catchment forested with eucalyptus in Angatuba, São Paulo.* The fluvial behavior of major chemical dissolved species in a small catchment forested with eucalyptus near Angatuba, São Paulo, Brazil was investigated in terms of specific transport during two rainy events, before and after the wood cutting. The specific transports were calculated according to the stochastic and the partial area integration methods. Although giving similar results, the partial area integration was better adapted for isolated rainy events. Significant specific transports were observed for  $\text{SiO}_2$  and  $\text{HCO}_3^-$  in both rainy events. After the wood cutting a fluvial increase of  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  could be observed mainly related to agricultural practices in the catchment. The low dissolved loads, verified in the Entre Rios stream, confirm the low mineralization degree of the superficial waters showing to be very dependent of the pluvial recharge process in the catchment.

**Keywords:** transport, small catchment, chemical species, eucalyptus.

## INTRODUÇÃO

A qualidade química das águas superficiais em bacias de drenagem vem sendo influenciada nos últimos tempos por atividades antrópicas quer seja doméstica, agrícola ou industrial. A composição química dessas águas depende de vários fatores naturais envolvendo principalmente os aspectos geológicos, topográficos, meteorológicos, hidrológicos e biológicos, podendo variar sazonal e espacialmente dentro da bacia de drenagem. Outros fatores que também contribuem para alteração na composição química das águas fluviais estão relacionados com o tempo de residência da água na bacia hidrográfica, uso do solo, cobertura vegetal, tipo de manejo, exploração florestal, construção de estradas e outros (Scardua, 1994). Segundo Lima (1986), a cobertura florestal influi positivamente sobre

a hidrologia no solo, melhorando os processos de infiltração, percolação e armazenamento da água, além de diminuir o escoamento superficial.

Quando a cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica sofre intervenção, como o corte raso de uma floresta implantada, o ecossistema em questão torna-se passível de alterações tais como: taxas elevadas de nutrientes fluvialmente transportados, erosão, decomposição de húmus e modificações nos processos biológicos (Bormann et al., 1968; Câmara & Lima, 1999; Câmara et al., 2000) refletindo diretamente na qualidade da água.

Importantes estudos sobre a temática do transporte fluvial de espécies químicas, principalmente em grandes bacias de drenagem têm sido realizados, caso

particular da bacia amazônica com cerca de  $6,0 \times 10^6$  km<sup>2</sup> realizadas no canal principal do rio Solimões/ Amazonas (estações Vargem Grande e Óbidos) e principais tributários onde transportes totais anuais mais elevados para HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SiO<sub>2</sub> e Ca<sup>2+</sup> puderam ser quantificados, indicando uma erosão química de 32,2 t km<sup>2</sup> a<sup>-1</sup> (Mortatti, 1995). De acordo com os trabalhos realizados por Deronde & Symoens (1980) na bacia do rio Congo (África), com área de  $3,7 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, os sólidos dissolvidos totais (TDS) transportadas fluvialmente foram da ordem de 9,9 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, cujas concentrações seguindo o modelo de diluição, diminuíram com o aumento das vazões, destacando-se o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e Cl<sup>-</sup> entre os ânions e Ca<sup>2+</sup> e Na<sup>+</sup> entre os cátions principais.

Em estudos de caracterização hidrogeoquímica da bacia de drenagem do rio Piracicaba, SP com 12.400 km<sup>2</sup>, durante o período de 1992 a 1996, Mortatti et al. (2003) observaram que as espécies químicas dissolvidas HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e Na<sup>+</sup> foram as que mais contribuíram no transporte específico no sistema fluvial com valores de 13,97; 6,01 e 4,98 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, respectivamente.

Na identificação dos principais parâmetros envolvidos no processo de alteração de rochas na bacia hidrográfica do rio Corumbataí, SP (1700 km<sup>2</sup>), Bortoletto et al., (2002) calcularam o transporte específico fluvial dos principais íons dissolvidos, sendo os mais significativos HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (16,0 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (9,3 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>), Ca<sup>2+</sup> (3,2 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>) e K<sup>+</sup> (1,3 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>). De acordo com os autores, os elevados transportes observados foram devido aos aportes difusos relacionados com o processo de alteração de rochas da bacia de drenagem e aos aportes pontuais relacionados com a influência antrópica da região.

De uma maneira geral, os estudos hidrogeoquímicos fluviais em microbacias de drenagem são escassos no Brasil, mas importantes e pioneiros trabalhos na área de hidrologia florestal foram desenvolvidos por Lima e colaboradores na década de 70, os

quais visavam estudos de impactos hidrológicos no manejo de florestas plantadas (Lima & Barbin, 1975; Lima & Freire, 1976; Lima & Reichardt, 1977; Lima, 1979).

Em uma microbacia de intensa ocupação agrícola e urbana localizada em Barra Bonita (SP), com área de 29,31 km<sup>2</sup> foi determinado o transporte específico dos íons principais tendo maior contribuição de cátions para o Ca<sup>2+</sup> (12,05 kg km<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e o Na<sup>+</sup> (8,06 kg km<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e para os ânions o HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (53,10 kg km<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) e Cl<sup>-</sup> (12,44 kg km<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). Segundo Bibian (2007), a poluição proveniente do córrego dos Moraes, expressada em termos do transporte de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, foi a principal contribuição destas espécies químicas no período mais seco, enquanto que no período mais chuvoso, o maior carregamento destas espécies químicas esteve associado à lixiviação do material orgânico mineralizado da parte agrícola.

De acordo com Mortatti (1995), a avaliação das possíveis alterações a que estão sujeitos os ecossistemas naturais, sob ocupação industrial e/ou agrícola, pode ser realizada com a utilização de diferentes metodologias, as quais se encontram associadas ao controle físico-químico das águas e ao transporte de material em suspensão em toda a bacia de drenagem. Isto se constitui no monitoramento hidrogeoquímico, que considera os efeitos globais e locais dessas alterações, tanto a níveis quantitativos quanto qualitativos. Dessa forma, parâmetros importantes que configuram e controlam a denudação do solo, erosão mecânica e química, o perfil de alterações das rochas, podem ser mais bem investigados.

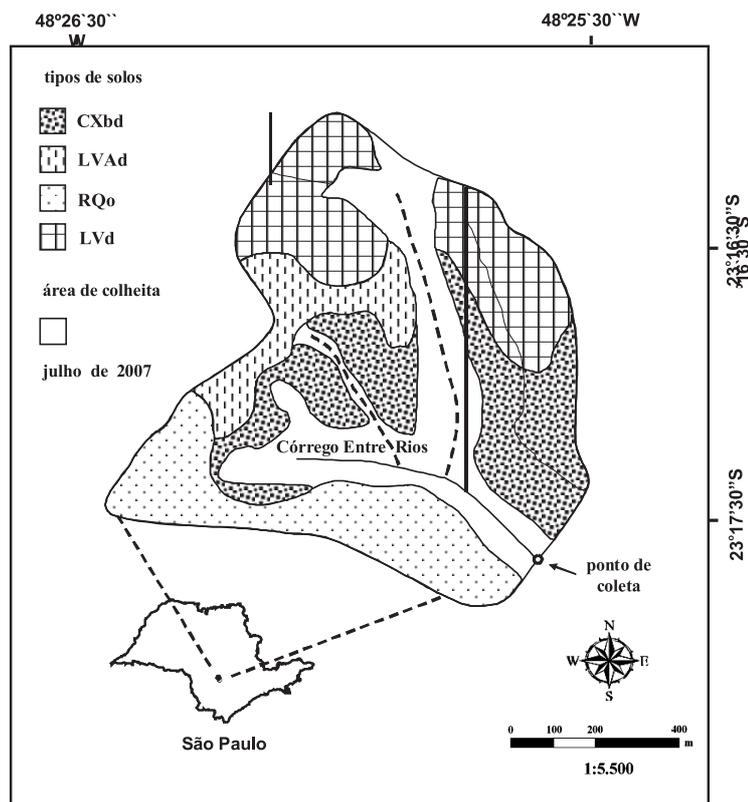
O presente trabalho teve por objetivo identificar e quantificar os transportes fluviais das espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions principais) nas águas fluviais do córrego Entre Rios pertencente à uma microbacia reflorestada com eucaliptos na região de Angatuba (SP), durante dois eventos chuvosos, antes e após a colheita da madeira.

## ÁREA DE ESTUDO

A microbacia do córrego Entre Rios está localizada numa altitude média de 624 m, em uma área de 1,6 km<sup>2</sup>, entre os paralelos 23°16'30" e 23°17'30" S, e os meridianos 48°25'30" e 48°26'30" W (Figura 1). Na área da microbacia hidrográfica existem seis talhões plantados com *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden com idades variando de 3, 5 e 9 anos e ocupam 68,7% da área total da microbacia. A colheita de madeira do tronco de árvores com idade de 9 anos ocorreu em 10,2% da área da microbacia Entre Rios em julho de 2007. A área da microbacia de drenagem apresenta clima tipo Cfa, chuvoso com inverno frio, precipitações

pluviométricas durante o ano todo e verões quentes, segundo a classificação de Köppen, correspondendo ao clima mesotérmico úmido, sem estiagem e para o período de 1995 a 2007 apresentou precipitação anual média de 1499 mm, temperatura mínima e máxima anual de 14,7°C e 28,8°C, respectivamente.

A geologia local está associada preferencialmente ao Grupo São Bento, formação Pirambóia. A formação Pirambóia é composta por depósitos fluviais incluindo arenitos finos a médios, avermelhados, siltico-argilosos, com estratificação cruzada ou plano paralela, com níveis de folhelhos e arenitos argilosos de



**FIGURA 1.** Localização da microbacia de drenagem do córrego Entre Rios, tipos de solos, área de colheita e ponto de coleta no município de Angatuba, São Paulo.

cores variegadas e raras intercalações de natureza arenopargilosa (IPT, 1981).

Os principais solos da área experimental, segundo a classificação da Embrapa (1999), pertencem às classes do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, fase arenosa

(LVAd); Latossolo Vermelho, distrófico, fase argilosa (LVd); Cambissolo Háptico Tb distrófico (CXbd) horizonte B incipiente e Neossolo Quartzarênico órtico (RQo) constituídos essencialmente por material quartzoso não apresentando horizonte B.

### PROTOCOLO DE AMOSTRAGEM

As coletas das águas fluviais foram efetuadas no eixo da corrente fluvial e profundidade média do canal principal do córrego Entre Rios, no município de Angatuba, SP conforme pode ser observado na Figura 1. As coletas intensivas foram realizadas em duas situações, a primeira anterior à colheita de madeira, no período de 17 a 18 de março de 2007 correspondendo a um evento

chuvoso de 28 mm durante 16,17 h e a segunda posterior à colheita de madeira em 05 de dezembro de 2007, com um evento chuvoso de 25 mm durante 13,42 h, totalizando 9 amostragens para cada coleta intensiva. Os volumes amostrados foram de 1 L das amostras brutas e armazenadas em frascos de polietileno, mantidas sob refrigeração à 4 °C até a realização das análises químicas.

### PROTOCOLO ANALÍTICO

As amostras de águas fluviais tiveram seus principais parâmetros físico-químicos condutividade elétrica (CE), pH, temperatura (T) e oxigênio dissolvido (OD) determinados no local, imediatamente após as amostragens utilizando-se de medidores portáteis marca Digimed. Posteriormente ao processo de filtração manual à vácuo com filtro Millipore de acetato de celulose (nitrato 75-

80% e acetato) com poros de 0,45 µm de diâmetro, as amostras foram analisadas quimicamente em termos da alcalinidade total por microtitulação de Gran (Edmond, 1970). Para determinação dos principais ions dissolvidos utilizou-se de um cromatógrafo iônico ICS-90 marca Dionex. Aliquotas em torno 50 mL foram destinadas à análise da sílica dissolvida (SiO<sub>2</sub>) por ICP-OES.

## EQUILÍBRIO IÔNICO E CONCENTRAÇÕES DAS PRINCIPAIS ESPÉCIES QUÍMICAS FLUVIAIS

A qualidade dos resultados químicos das águas fluviais do córrego Entre Rios pode ser verificada em função do equilíbrio iônico das principais espécies químicas dissolvidas de acordo com o procedimento descrito por Probst (1992), Mortatti (1995) e Bortoletto Jr. et al. (2002) em termos do relacionamento entre a soma de cátions ( $\Sigma^+$ ) e de ânions ( $\Sigma^-$ ) em meq L<sup>-1</sup>, sendo o erro analítico expresso em  $\Delta$  (%), conforme a equação 1:

$$\Delta (\%) = \left( \frac{\Sigma^+ - \Sigma^-}{\Sigma^+ + \Sigma^-} \right) \cdot 200 \quad (1)$$

As concentrações médias das principais espécies químicas fluviais foram normalizadas pelas vazões do

córrego Entre Rios em cada período de amostragem relativo aos hidrogramas de cheia, por meio da equação 2 de acordo com Kattan (1989).

$$C_{MNQ} = \frac{\sum_{i=1}^{n=9} (Q_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^{n=9} Q_i} \quad (2)$$

sendo:  $C_{MNQ}$  = concentração média normalizada pela vazão (mg L<sup>-1</sup>);  $Q_i$  = vazão medida em cada amostragem (L s<sup>-1</sup>) e  $C_i$  = concentração das principais espécies químicas dissolvidas determinadas para cada amostragem (mg L<sup>-1</sup>).

### QUANTIFICAÇÃO DO TRANSPORTE FLUVIAL

A quantificação do transporte fluvial das principais espécies químicas dissolvidas foi realizado de acordo com os métodos estocásticos (Messaitfa, 1997) e o de integração de áreas (Meybeck, 1970). O método estocástico envolveu a concentração média normalizada da espécie química dissolvida, a respectiva vazão determinada no dia da amostragem e a média da vazão do período de acordo com a equação 3.

$$T_{EST} = Q \cdot C_{MNQ} \cdot 0,0864 \quad (3)$$

sendo:  $T_{EST}$  = transporte fluvial da espécie química (kg d<sup>-1</sup>);  $Q$  = vazão média ao longo do hidrograma (L s<sup>-1</sup>) e o fator 0,0864 corresponde à conversão de unidades de massa e tempo no cálculo do transporte fluvial.

O método de cálculo do transporte fluvial pela integração de áreas no hidrograma de cheia foi realizado com a determinação do volume de água transportado e as concentrações médias normalizadas pela vazão, para cada intervalo de tempo observado entre vazões medidas, de acordo com as equações 4 e 5, que expressam o transporte parcial para os oito intervalos de tempo entre as vazões sucessivas:

$$T_{i,j} = C_{MNQ_{i,j}} \cdot V_{i,j} \quad (4)$$

$$T_{i,j} = \frac{\sum_{i=j-1}^9 (C_i Q_i + C_j Q_j)}{\sum_{i=j-1}^9 (Q_i + Q_j)} \cdot V_{i,j} \quad (5)$$

sendo:  $T_{i,j}$  = transporte fluvial parcial da espécie química dissolvida (kg) nos intervalos de tempo considerados;  $C_{MNQ_{i,j}}$  = concentração média normalizada pela vazão (mg L<sup>-1</sup>) no intervalo de tempo considerado e  $V_{i,j}$  = volume de água transportado (L) no intervalo de tempo considerado.

Após o cálculo dos respectivos transportes fluviais parciais para todo o hidrograma de cheia foi possível determinar o transporte total fluvial das principais espécies químicas dissolvidas no córrego Entre Rios, no período total de ocorrência do hidrograma de cheia (t em dias) de acordo com a equação 6.

$$T_{IA} = \sum_{\substack{i=j-1 \\ j=2}}^9 T_{i,j} \quad (6)$$

sendo:  $T_{IA}$  = transporte total fluvial das principais espécies químicas dissolvidas (kg d<sup>-1</sup>).

Os transportes fluviais específicos para ambos os métodos ( $T_{EST}$  e  $T_{IA}$ ) foram calculados em função da área da microbacia de drenagem conforme pode ser observado nas equações 7 e 8:

$$T_{EST\ esp} = T_{EST} \cdot A^{-1} \quad (7)$$

$$T_{IA\ esp} = T_{IA} \cdot A^{-1} \quad (8)$$

sendo:  $A$  = área da microbacia de drenagem (km<sup>2</sup>).

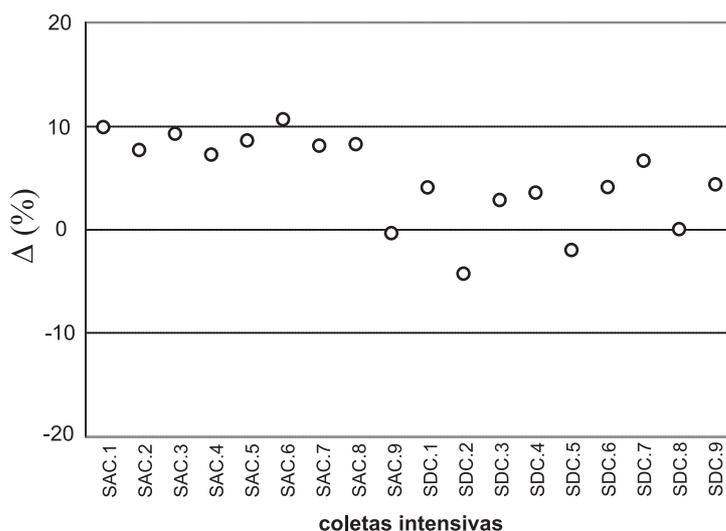
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o proposto, o erro analítico das amostras de águas fluviais do córrego Entre Rios se mostrou inferior a 10% para a maioria dos casos (Figura 2), satisfazendo o critério adotado (equação 1).

Como pode ser observado o erro analítico relativo à primeira coleta intensiva, antes do corte ( $S_{AC,1}$  a  $S_{AC,9}$ ) foi superior à segunda coleta intensiva, depois do corte ( $S_{DC,1}$  a  $S_{DC,9}$ ), principalmente associado com a força iônica da primeira coleta, cujos sólidos dissolvidos totais

(TDS) se mostraram ligeiramente inferior quando comparado com a segunda coleta intensiva.

Os resultados de vazão ( $Q$  em  $L s^{-1}$ ), tempos de coletas ( $t$  em h) e principais parâmetros físico-químicos, condutividade elétrica (CE em  $\mu S cm^{-1}$ ), pH, temperatura ( $T$  em  $^{\circ}C$ ) e oxigênio dissolvido (OD em  $mg L^{-1}$ ) obtidos para os dois períodos de coleta intensiva das águas fluviais do córrego Entre Rios durante o período estudado, podem ser observados na Tabela 1.



**FIGURA 2.** Erro analítico  $\Delta$  (%) relativo ao equilíbrio iônico entre cátions e ânions referente às duas coletas intensivas, antes do corte ( $S_{AC,1}$  a  $S_{AC,9}$ ) e depois do corte ( $S_{DC,1}$  a  $S_{DC,9}$ ) de amostras das águas fluviais do córrego Entre Rios.

**TABELA 1.** Vazão e principais parâmetros físico-químicos determinados nas águas do córrego Entre Rios durante os períodos estudados.

Amostras	t (h)	Q ( $L s^{-1}$ )	pH	CE ( $\mu S cm^{-1}$ )	OD ( $mg L^{-1}$ )	T ( $^{\circ}C$ )
$S_{AC,1}$	0,00	11,0	6,3	24,8	7,4	22,8
$S_{AC,2}$	0,58	14,3	6,4	26,4	6,9	22,7
$S_{AC,3}$	1,10	31,8	6,3	21,3	6,2	22,7
$S_{AC,4}$	1,30	53,0	6,2	20,5	6,4	22,6
$S_{AC,5}$	1,72	62,0	6,2	20,0	6,1	22,7
$S_{AC,6}$	3,13	50,0	6,1	20,0	6,3	22,6
$S_{AC,7}$	5,08	33,6	6,1	19,1	5,6	22,6
$S_{AC,8}$	9,53	19,2	6,2	19,0	5,9	22,8
$S_{AC,9}$	16,17	15,5	6,1	19,9	5,2	25,5
$S_{DC,1}$	0	6,3	6,4	26,3	3,7	25,3
$S_{DC,2}$	0,75	11,2	6,4	23,0	3,6	24,9
$S_{DC,3}$	1,12	17,9	6,3	26,1	3,4	25,1
$S_{DC,4}$	1,55	53,0	6,3	24,5	3,0	25,1
$S_{DC,5}$	2,28	35,5	6,2	24,0	3,5	24,7
$S_{DC,6}$	3,28	23,5	6,2	21,2	3,4	24,9
$S_{DC,7}$	4,90	15,5	6,2	22,3	3,3	25,0
$S_{DC,8}$	6,93	10,0	6,4	20,6	3,8	24,2
$S_{DC,9}$	13,42	8,0	6,5	20,9	3,8	25,0

Foi possível verificar para os dois períodos de amostragem um comportamento similar em relação ao pH, se mostrando sempre abaixo da faixa da neutralidade, o mesmo sendo observado para a condutividade elétrica e temperatura. Por outro lado, as concentrações de OD se mostraram superiores durante o primeiro período de amostragem (intensiva antes do corte), com um valor médio de  $6,2 \mu\text{S cm}^{-1}$ , em comparação ao segundo período (intensiva depois do corte), com um OD médio de  $3,5 \text{ mg L}^{-1}$ . Tal fato pode ser atribuído a colheita de madeira efetuada em 10,2 % da área da microbacia e o solo por estar sem cobertura vegetal possibilitou um maior arraste de material orgânico pelas águas pluviais diminuindo o oxigênio dissolvido nas águas do córrego Entre Rios pela demanda microbiana.

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises químicas das principais espécies químicas dissolvidas nas águas do córrego Entre Rios, referente aos períodos das coletas intensivas antes e depois do corte. Foram calculados os TDS e as concentrações médias de cada espécie química, normalizadas pelas respectivas vazões ( $C_{\text{MNQ}}$ ) de acordo com a equação 2.

Pode ser observado que as espécies químicas dominantes, tanto no período de amostragem da intensiva antes e depois do corte, foram o  $\text{SiO}_2$  e  $\text{HCO}_3^-$  com concentrações médias normalizadas pelas vazões de 8,81 e  $6,46 \text{ mg L}^{-1}$  para a intensiva antes do corte e 7,39 e  $5,99 \text{ mg L}^{-1}$  para a intensiva depois do corte.

A Figura 3 ilustra o comportamento das principais espécies químicas dissolvidas, em porcentagem de ocorrência, em função do TDS. Nesses termos foi possível verificar o estado de mineralização das águas do córrego Entre Rios. Embora a participação de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{HCO}_3^-$  seja dominante, essas águas se encontram pouco mineralizadas, sendo fortemente influenciadas pelo sistema de recarga da microbacia.

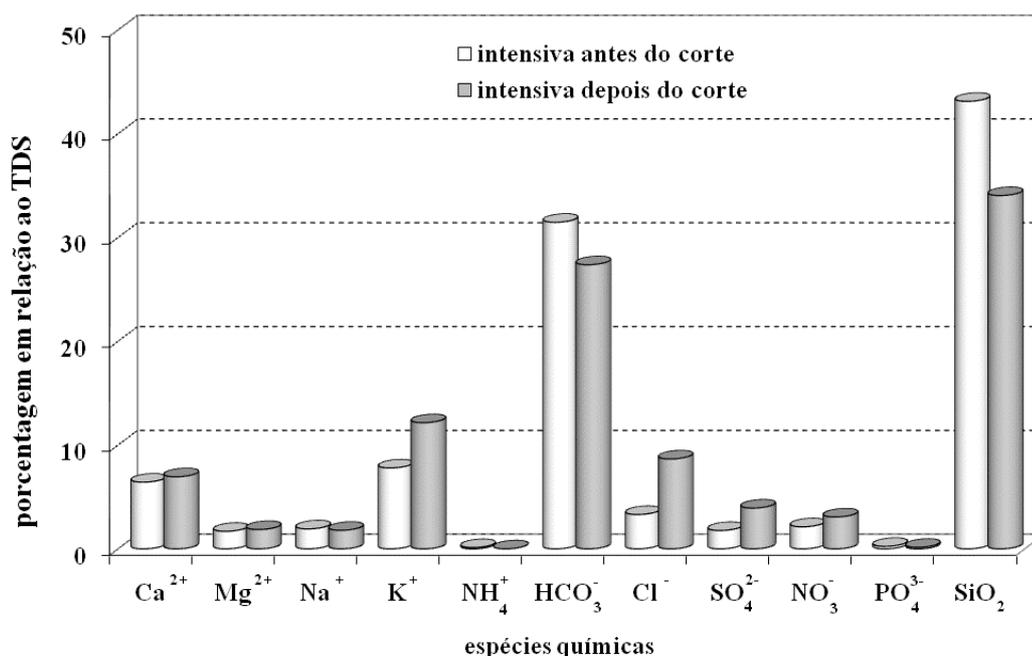
As demais espécies químicas se mostraram pouco representativas, com baixas concentrações, exceto para  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  principalmente no período de amostragem referente à segunda coleta intensiva (depois do corte), com valores de 1,5; 2,60; 1,84 e  $0,86 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente. Tais resultados podem estar associados ao protocolo de adubações na área florestada com eucaliptos em parte da microbacia, realizado duas semanas antes da referida amostragem.

**TABELA 2.** Resultados analíticos das principais espécies químicas dissolvidas, cátions, ânions, sílica dissolvida e TDS em  $\text{mg L}^{-1}$  referente as coletas intensivas antes e depois do corte de águas fluviais do córrego Entre Rios.

Amostras	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{SiO}_2$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4^{3-}$	TDS
	( $\text{mg L}^{-1}$ )											
S <sub>AC.1</sub>	1,68	0,46	0,60	1,71	0,04	10,40	8,20	0,90	0,40	0,42	0,01	24,82
S <sub>AC.2</sub>	1,78	0,45	0,44	1,75	0,05	10,06	8,30	0,90	0,32	0,36	0,15	24,56
S <sub>AC.3</sub>	1,60	0,40	0,40	1,72	0,04	9,11	7,25	0,90	0,45	0,40	0,02	22,29
S <sub>AC.4</sub>	1,20	0,30	0,30	1,50	0,03	8,97	6,20	0,51	0,22	0,35	0,06	19,64
S <sub>AC.5</sub>	1,00	0,30	0,35	1,50	0,02	7,74	5,30	0,64	0,36	0,38	n.d.	17,59
S <sub>AC.6</sub>	1,32	0,25	0,42	1,62	0,02	8,56	5,90	0,65	0,37	0,48	0,08	19,67
S <sub>AC.7</sub>	1,30	0,44	0,43	1,59	0,01	8,70	6,81	0,56	0,40	0,58	0,10	20,92
S <sub>AC.8</sub>	1,50	0,44	0,46	1,55	0,02	9,58	7,10	0,80	0,50	0,56	n.d.	22,51
S <sub>AC.9</sub>	1,67	0,47	0,49	2,00	0,02	9,83	7,60	1,30	0,80	0,50	n.d.	24,68
C <sub>MNQ</sub>	1,32	0,35	0,40	1,61	0,03	8,81	6,46	0,71	0,38	0,44		20,51
% $X_i$	6,4	1,7	1,9	7,8	0,1	43,1	31,5	3,3	1,8	2,1	0,2	
S <sub>DC.1</sub>	1,80	0,42	0,65	1,52	n.d.	8,82	8,20	0,76	0,60	0,34	n.d.	23,11
S <sub>DC.2</sub>	1,41	0,38	0,41	1,94	n.d.	7,97	6,72	1,51	0,43	0,34	0,09	21,20
S <sub>DC.3</sub>	1,90	0,50	0,48	3,68	n.d.	9,83	7,80	2,17	1,02	1,49	0,11	28,98
S <sub>DC.4</sub>	1,30	0,35	0,30	2,65	n.d.	6,96	4,97	1,70	0,91	0,62	n.d.	19,76
S <sub>DC.5</sub>	1,34	0,38	0,35	2,77	n.d.	5,88	5,21	2,46	0,73	0,49	n.d.	19,61
S <sub>DC.6</sub>	1,51	0,43	0,30	2,57	n.d.	7,17	5,50	1,96	0,83	0,56	n.d.	20,83
S <sub>DC.7</sub>	1,86	0,43	0,60	2,83	n.d.	8,31	6,75	1,96	0,99	0,96	0,17	24,86
S <sub>DC.8</sub>	1,73	0,49	0,48	1,34	n.d.	7,45	7,26	0,89	1,08	0,37	n.d.	21,09
S <sub>DC.9</sub>	1,55	0,57	0,70	2,20	n.d.	8,27	7,80	1,20	1,10	0,44	n.d.	23,83
C <sub>MNQ</sub>	1,50	0,41	0,40	2,60		7,39	5,99	1,84	0,86	0,65		21,64
% $X_i$	6,9	1,9	1,8	12,2	n.d.	34,0	27,4	8,7	3,9	3,1	0,2	

$$\% X_i = (C_{\text{MNQ}}/\text{TDS}).100$$

n.d. = não determinado, inferior ao limite de determinação ( $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ )



**FIGURA 3.** Percentagem das principais espécies químicas dissolvidas em relação ao TDS nas águas do córrego Entre Rios, nos períodos de coletas intensivas antes e depois do corte.

Dessa forma, foi possível verificar o efeito residual das adubações, com predominância de KCl.

Esse tipo de mobilidade observada para o K<sup>+</sup> também foi verificada por Ranzini & Lima (2002), estudando a ciclagem geoquímica de nutrientes em uma microbacia (0,072 km<sup>2</sup>) reflorestada com *Eucalyptos saligna*, São Paulo, onde o balanço positivo de K<sup>+</sup> indicou uma saída desse nutriente pelo deflúvio decorrente da facilidade com que este íon foi lixiviado das copas das árvores e da serrapilheira pelas águas da chuva até os cursos de água.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos transportes fluviais totais T<sub>EST</sub> (equação 3) e T<sub>IA</sub> (equações 4, 5 e 6), obtidos pelos métodos estocástico, e de integração de áreas para os períodos de coletas intensivas antes e depois do corte. Os transportes específicos (T<sub>ESTesp</sub> e T<sub>IAesp</sub>) obtidos para cada espécie química e para o TDS foram obtidos com a utilização das equações 7 e 8.

Resultados similares puderam ser observados nos cálculos dos transportes fluviais totais envolvendo os métodos estocástico e o de integração de áreas para cada uma das espécies químicas estudadas. No entanto,

**TABELA 3.** Transportes fluviais totais das principais espécies químicas calculadas pelos métodos estocástico e integração de áreas para os períodos de coletas intensivas antes e depois do corte (T<sub>EST</sub> e T<sub>IA</sub> em kg d<sup>-1</sup>) e respectivos transportes específicos (T<sub>ESTesp</sub> e T<sub>IAesp</sub> em kg km<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), na microbacia do córrego Entre Rios.

Espécie	intensiva antes do corte				intensiva depois do corte			
	T <sub>EST</sub> (kg d <sup>-1</sup> )	T <sub>IA</sub> (kg d <sup>-1</sup> )	T <sub>ESTesp</sub> (kg km <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	T <sub>IAesp</sub> (kg km <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	T <sub>EST</sub> (kg d <sup>-1</sup> )	T <sub>B</sub> (kg d <sup>-1</sup> )	T <sub>ESTesp</sub> (kg km <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	T <sub>IAesp</sub> (kg km <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )
Ca <sup>2+</sup>	3,70	3,27	2,31	2,04	2,61	2,07	1,63	1,29
Mg <sup>2+</sup>	0,97	0,91	0,61	0,57	0,71	0,58	0,44	0,36
Na <sup>+</sup>	1,11	1,02	0,69	0,64	0,70	0,60	0,43	0,37
K <sup>+</sup>	4,48	3,87	2,80	2,42	4,52	3,10	2,83	1,94
SiO <sub>2</sub>	24,58	21,30	15,36	13,31	12,83	9,82	8,02	6,13
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	18,00	15,79	11,25	9,87	10,41	8,39	6,50	5,24
Cl <sup>-</sup>	1,97	1,77	1,23	1,11	3,20	2,19	2,00	1,37
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,07	1,07	0,67	0,67	1,49	1,22	0,93	0,76
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,22	1,20	0,76	0,75	1,14	0,77	0,71	0,48
TDS	57,09	50,20	35,68	31,37	37,59	28,73	23,50	17,96

os transportes calculados pelo método estocástico se mostraram ligeiramente superiores aos calculados pelo método de integração de áreas, devido ao fato de se utilizar nesses cálculos os valores médios de concentrações normalizadas pela vazão (equação 3) que dependem do número de amostras representativas do hidrograma de cheia, podendo superestimar os resultados, como no presente trabalho, ou mesmo subestimar. Já para o método de integração de áreas isso não ocorre devido o cálculo ser efetuado em diferentes fases da hidrógrafa, entre os tempos de amostragem e as respectivas vazões medidas, configurando áreas parciais correspondentes aos volumes parciais escoados nos respectivos intervalos de tempo.

Dentre os sólidos dissolvidos totais transportados pelo córrego Entre Rios, o  $\text{SiO}_2$  e  $\text{HCO}_3^-$  foram os mais significativos em ambos períodos de amostragem, com 42,4 e 31,4 % respectivamente para a intensiva antes do corte e 34,2 e 29,2 % para a intensiva depois do corte, conforme pode ser verificado na Figura 4. Em termos de transporte específico, os valores obtidos para o  $\text{SiO}_2$  e  $\text{HCO}_3^-$  foram de 13,31 e 9,87  $\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$  respectivamente para a intensiva antes do corte e 6,13 e 5,24  $\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$  para a intensiva depois do corte.

Pode ser verificado ainda que os valores de TDS transportados fluvialmente pelo córrego Entre Rios, para os hidrogramas analisados, foram significativamente baixos se comparados com a carga específica de TDS obtida em uma microbacia de 29,30  $\text{km}^2$  com influência agrícola e antrópica de 119,58  $\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$

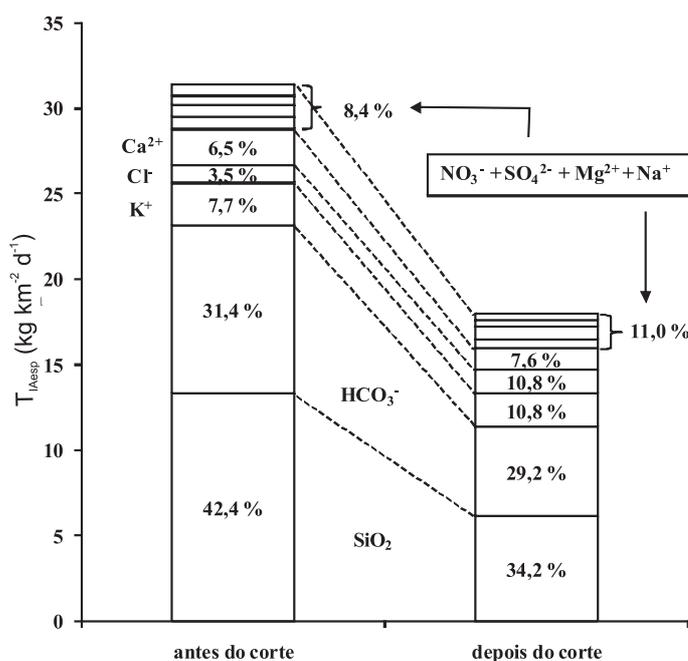
(Bibian, 2007). Considerando-se a especificidade e variabilidade de cada área de estudo, o transporte específico obtido no presente trabalho também pode ser considerado baixo em relação a bacia hidrográfica do rio Corumbataí (1700  $\text{km}^2$ ), da ordem de 124,38  $\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$  (Bortoletto Jr. et al., 2002).

Resultados similares aos obtidos no presente trabalho em termos de TDS foram observados por Meybeck (1986) em duas microbacias graníticas na França com cobertura de floresta de *Pinus* sp (5,65 e 3,91  $\text{km}^2$ ), com transportes específicos de 24 e 57  $\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$ , respectivamente.

A Tabela 4 apresenta os resultados dos transportes parciais,  $T_{IA(TDS)}$ , relativos ao método de integração de áreas para o TDS, transportados pelo córrego Entre Rios. De acordo com o exigido pelas equações 4, 5 e 6, também podem ser observadas as concentrações médias normalizadas e os respectivos volumes de água escoados em cada intervalo de tempo relativo as coletas intensivas antes e depois do corte.

A Figura 5 ilustra o relacionamento entre as vazões medidas em cada intervalo de tempo (identificadas pelas diferentes áreas) e as respectivas taxas de transportes parciais para o TDS obtidos nos períodos de coletas intensiva antes e depois do corte.

Com o método de cálculo de transportes fluviais parciais,  $T_{IA(TDS)}$ , foi possível verificar as taxas de transportes para cada intervalo de tempo, permitindo a identificação dos períodos de maior taxa de transporte relativo aos hidrogramas de cheia (intensiva antes e



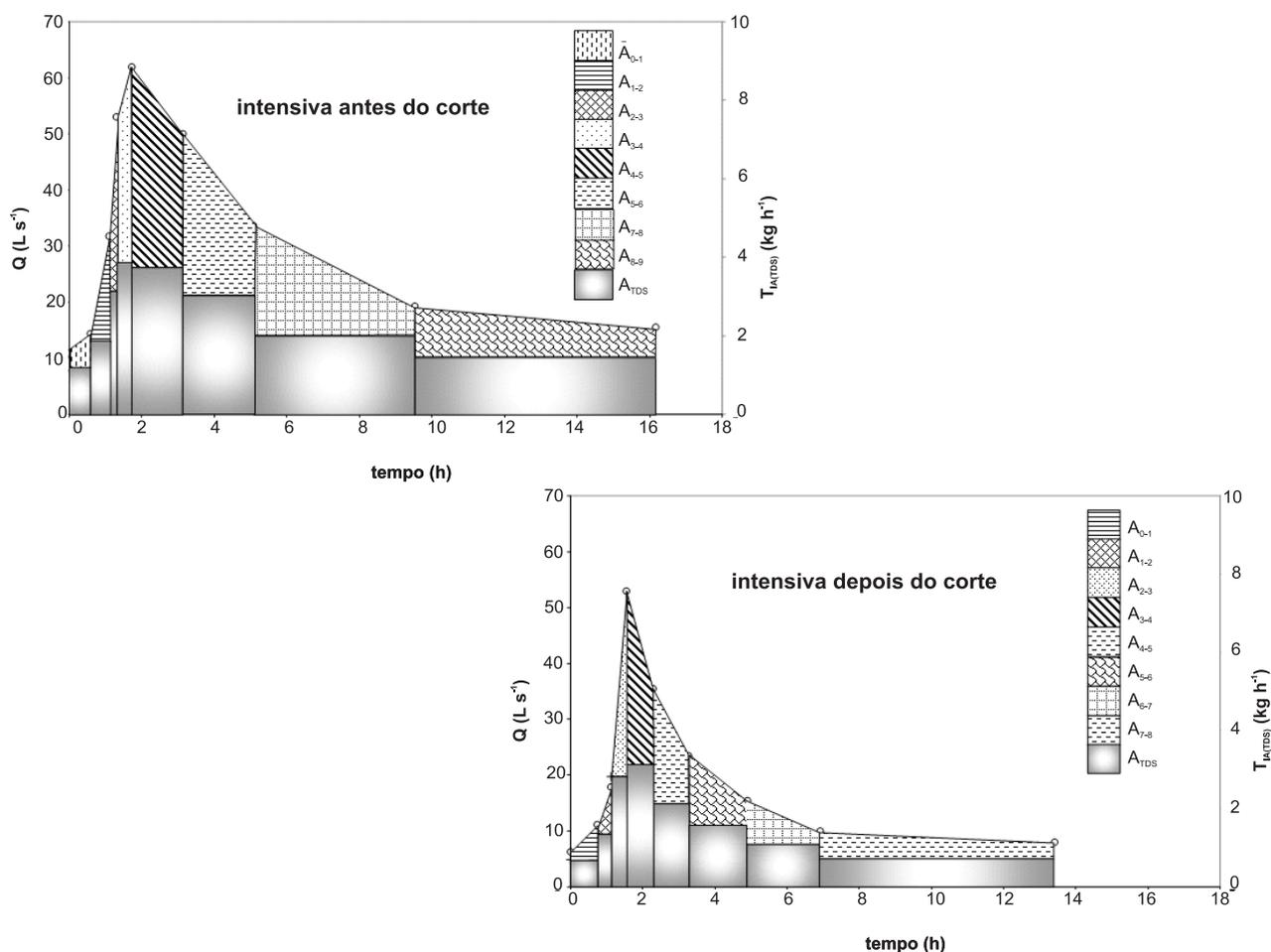
**FIGURA 4.** Partição do transporte fluvial específico ( $T_{IAesp}$ ) das principais espécies químicas dissolvidas nas águas do córrego Entre Rios, nos períodos de coletas intensivas antes e depois do corte.

depois do corte) analisados. Os transportes fluviais que apresentaram taxas mais elevadas de TDS (3,83 e 3,14 kg h<sup>-1</sup>, respectivamente para as intensivas antes e depois do corte) se mostraram junto ao ponto máximo da cheia, no final da subida dos hidrogramas. No entanto, os períodos de recessão foram distintos, com

definição após 10 e 7 horas respectivamente para as intensivas antes e depois do corte. Eventos chuvosos anteriores à amostragem de águas fluviais do córrego Entre Rios da intensiva antes do corte contribuíram para a saturação do solo e alteraram a relação entre o escoamento superficial e subterrâneo.

**TABELA 4.** Transportes parciais de TDS, calculados pelo método de integração de áreas,  $T_{IA(TDS)}$ , concentrações médias normalizadas e volume escoado nos respectivos intervalos de tempo relativos aos períodos de coletas intensivas antes e depois do corte nas águas do córrego Entre Rios.

intensiva antes do corte					intensiva depois do corte				
Área	$t_{acum}$ (h)	V (L)	$C_{MNO_3}$ (mg L <sup>-1</sup> )	$T_{IA(TDS)}$ (kg h <sup>-1</sup> )	Área	$t_{acum}$ (h)	V (L)	$C_{MNO_3}$ (mg L <sup>-1</sup> )	$T_{IA(TDS)}$ (kg h <sup>-1</sup> )
A <sub>0-1</sub>	0,58	26602,8	24,5	1,12	A <sub>0-1</sub>	0,75	23607,8	21,8	0,69
A <sub>1-2</sub>	1,10	42890,0	22,9	1,90	A <sub>1-2</sub>	1,12	19235,3	25,9	1,36
A <sub>2-3</sub>	1,30	30533,1	20,6	3,14	A <sub>2-3</sub>	1,55	55330,0	22,1	2,82
A <sub>3-4</sub>	1,72	86273,9	18,5	3,83	A <sub>3-4</sub>	2,28	116843,7	19,7	3,14
A <sub>4-5</sub>	3,13	285600,0	18,5	3,72	A <sub>4-5</sub>	3,28	106246,6	20,1	2,13
A <sub>5-6</sub>	5,08	293502,6	20,1	3,02	A <sub>5-6</sub>	4,90	113461,8	22,4	1,57
A <sub>6-7</sub>	9,53	423437,3	21,4	2,04	A <sub>6-7</sub>	6,93	93265,5	23,3	1,07
A <sub>7-8</sub>	16,17	414640,4	23,5	1,47	A <sub>7-8</sub>	13,42	210060,0	22,3	0,72



**FIGURA 5.** Relacionamento entre as vazões ( $Q$  em  $L s^{-1}$ ) nos respectivos intervalos de tempo (h) e as respectivas taxas de transportes parciais ( $kg h^{-1}$ ) para o TDS nos períodos de coletas intensiva antes e depois do corte no córrego Entre Rios.

## CONCLUSÕES

A análise hidrogeoquímica dos hidrogramas de cheia realizada para a microbacia do córrego Entre Rios, reflorestada com eucaliptos, permitiu caracterizar as concentrações e os transportes fluviais das principais espécies químicas dissolvidas, identificando as de maior importância durante as ocorrências de dois eventos chuvosos.

Embora as águas do córrego Entre Rios tenham como característica principal a baixa mineralização, sendo fortemente influenciada pelo sistema de recarga da microbacia, as espécies químicas mais importantes, tanto no período de amostragens intensivas antes e depois do corte, foram o  $\text{SiO}_2$  e  $\text{HCO}_3^-$  com concentrações médias normalizadas pelas vazões de 8,81 e 6,46  $\text{mg L}^{-1}$  para a intensiva 1 e 7,39 e 5,99  $\text{mg L}^{-1}$  para a intensiva depois do corte. Foi ainda possível verificar no hidrograma da intensiva depois do corte,

após a retirada de madeira em parte da área reflorestada com eucaliptos, a influência residual das adubações realizadas, com elevação das concentrações de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Os resultados obtidos para o transporte fluvial se mostraram mais coerentes com a aplicação do método de integração de áreas e mais adequados quando o número de amostragens não é elevado, evidenciando os transportes específicos mais significativos para  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ .

No presente estudo, o método de integração de áreas mostrou-se mais vantajoso devido a possibilidade de cálculo do transporte fluvial ser efetuado em diferentes fases da hidrógrafa, entre os tempos de amostragem e as respectivas vazões medidas, configurando áreas parciais correspondentes aos volumes parciais escoados nos respectivos intervalos de tempo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio financeiro (Proc.06/51301-7) e ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa da equipe científica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BIBIAN, J.P.R. **Caracterização hidrogeoquímica da microbacia de drenagem do córrego Barra Bonita**. Piracicaba, 2007. 194 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.
2. BORMANN, F.H.; LIKENS, G.E.; FISCHER, D.W.; PIERCE, R.S. Nutrient loss accelerated by clearcutting of a forest ecosystem. *Science*, v. 159, n. 3817, p. 882-884, 1968.
3. BORTOLETTO JUNIOR, M.J.; MORTATTI, J.; PROBST, J.L. Erosão química na bacia hidrográfica do rio Corumbataí (SP). *Geochimica Brasiliensis*, v. 16, n. 1, p. 99-111, 2002.
4. CÂMARA, C.D. & LIMA, W.P. Corte raso de uma plantação de *Eucalyptus saligna* de 50 anos: impactos sobre o balanço hídrico e a qualidade da água em uma microbacia experimental. *Scientia Forestalis*, v. 56, p. 41-58, 1999.
5. CÂMARA, C.D.; LIMA, W.P.; VIEIRA, S.A. Corte raso de uma plantação de *Eucalyptus saligna* de 50 anos: impactos sobre a ciclagem de nutrientes em uma microbacia experimental. *Scientia Forestalis*, v. 57, p. 99-109, 2000.
6. DERONDE, L. & SYMOENS, J.J. L'exportation des éléments dominants du bassin du fleuve Zaïre: Une réévaluation. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, v. 16, n. 2, p. 183-188, 1980.
7. EDMOND, J.M. High precision determination of titration alkalinity and total carbon dioxide content of seawater by potentiometric titration. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, v. 17, n. 4, p. 737-750, 1970.
8. EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 412 p., 1999.
9. IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 126 p., 1981.
10. KATTAN, Z. **Géochimie et hydrologie des eaux fluviales des bassins de la Moselle et de la Mosig. Transports dissous et particuliers. Cycles biogéochimiques des éléments**. Strasbourg, 1989. 220 p. Tese (PhD) – Centre de Géochimie de la Surface, Université Louis Pasteur.
11. LIMA, W.P. Alteração do pH, da condutividade e das concentrações de Ca, Mg e P na água da chuva em florestas de pinus caribaea em Piracicaba. *IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, v. 18, p. 37-54, 1979.
12. LIMA, W.P. O Papel Hidrológico da Floresta na Proteção dos Recursos Hídricos. I Congresso Florestal Brasileiro, Olinda, *Revista Silvicultura*, v. 41, p. 59-62, 1986.
13. LIMA, W.P. & BARBIN, D. Efeito de plantações de eucalipto e de pinheiros sobre a qualidade da água da chuva. *IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, v. 11, p. 23-35, 1975.
14. LIMA, W.P. & FREIRE, O. Evapotranspiração em povoamentos de eucalipto e de pinheiros e em parcela contendo vegetação herbácea natural. *IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, v. 12, p. 103-117, 1976.
15. LIMA, W.P. & REICHARDT, K. Regime da água do solo sob florestas homogêneas de eucaliptos e de pinheiros. *Boletim Científico do Cena*, v. 43, p. 1-31, 1977.
16. MESSAITFA, A. **Transfert d'eau, des sédiments et de polluants associés sur le bassin de l'III: cas de mercure**. Strasbourg, 1997. 209p. Tese (PhD) – Centre de Géochimie de la Surface, Université Louis Pasteur.
17. MEYBECK, M. **Bilan hydrochimique et géochimique du Lac Léman, Paris, 1970**. Tese (3ème cycle) – Université des Sciences Paris.
18. MEYBECK, M. Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. *Science. Geology, Bulletin*, v. 39, n. 1, p. 3-77, 1986.

19. MORTATTI, J. **Erosão na Amazônia: processos, modelos e balanço**. Piracicaba, 1995. 155 p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
20. MORTATTI, J.; BORTOLETTO, J.R.; PROBST, J.L. Piracicaba river basin: mechanical and chemical erosions. **Geociências**, v. 22, n. 1, p. 177-196, 2003.
21. PROBST, J.L. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale: méchanisms, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. **Science Géologiques Bulletin**, v. 94, p. 1-161, 1992.
22. RANZINI, M. & LIMA, W.P. Comportamento hidrológico, balanço de nutrientes e perdas em duas microbacias reflorestadas com Eucalyptus, no Vale do Paraíba, SP. **Scientia Forestalis**, v. 61, p. 144-59, 2002.
23. SCARDUA, F.P. **Caracterização hidrológica de uma microbacia hidrográfica da estação experimental de ciências florestais de Itatinga, ESALQ/USP**. Piracicaba, 1994, 94 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

*Manuscrito Recebido em: 30 de março de 2009  
Revisado e Aceito em: 30 de junho de 2009*

