

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

MURILO BASSO NOLASCO

**Transporte de material dissolvido e particulado na bacia do rio
Sorocaba – São Paulo: aspectos dinâmicos da hidroquímica
fluvial e modelos de distribuição**

Piracicaba

2011

MURILO BASSO NOLASCO

**Transporte de material dissolvido e particulado na bacia do rio
Sorocaba - São Paulo: aspectos dinâmicos da hidroquímica
fluvial e modelos de distribuição**

Dissertação apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Mortatti

PIRACICABA

2011

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Nolasco, Murilo Basso

Transporte de material dissolvido e particulado na bacia do rio Sorocaba – São Paulo: aspectos dinâmicos da hidroquímica fluvial e modelos de distribuição / Murilo Basso Nolasco; orientador Jefferson Mortatti. - - Piracicaba, 2011.

128 f.: il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Bacia hidrográfica 2. Erosão fluvial 3. Hidrogeoquímica
4. Precipitação 5. Química aquática 6. Sedimentologia fluvial I. Título

CDU 556.51:551.3.053

*A meus pais Antonio José Nolasco
e Marcia Marisa Basso Nolasco,
pelo seu infinito amor, carinho e
incentivo*

Dedico

*A Daiane Raquel Neves, pela
sua compreensão, amor e
parceira em todos os
momentos desta caminhada*

Ofereço

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jefferson Mortatti orientador, professor e amigo, pela confiança depositada na realização deste trabalho e sua dedicação e ensinamentos para minha formação.

Aos pesquisadores Prof. Dr. José Albertino Bendassolli, Helder de Oliveira e Paulo César Ocheuze Trivelin, pelo apoio e ótimas condições de trabalho.

À equipe de Laboratório Isótopos Estáveis: José Aurélio Bonassi (Pingin), Miguel Luiz Baldessin, Hugo Henrique Battagello, Magda Mello G. Bartolomei, Bento Moçambique M. Neto, Clélber V. Prestes, Glauco A. Tavares, pelo auxílio constante, prazeroso convívio e companheirismo do dia a dia.

Aos amigos do Laboratório de Hidrogeoquímica: João Paulo Rambelli Bibian, Renato Alessandro Lopes, Graziela Meneguel de Moraes, Alexandre Martins Fernandes e Diego Vendramini pelos momentos compartilhados, ótima convivência e pela ajuda de todos os dias.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da Universidade de São Paulo (CENA-USP), que possibilitou a realização do curso de mestrado e a todo corpo docente do CPG/CENA, pelos ensinamentos nesta minha formação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, PROCESSO Nº 2008/57104-4) pelo apoio financeiro.

À Marília Ribeiro Garcia Henyei, pela ajuda na normatização das referências bibliográficas.

A Companhia Brasileira de Alumínio – CBA e também ao DAEE/CTH, pelo fornecimento dos dados de precipitação e vazão.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

NOLASCO, M. B. **Transporte de material dissolvido e particulado na bacia do rio Sorocaba – São Paulo**: aspectos dinâmicos da hidroquímica fluvial e modelos de distribuição. 2011. 128f. Dissertação (Mestrado em Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

O presente estudo objetivou a caracterização hidrogeoquímica ao longo da bacia de drenagem do rio Sorocaba – São Paulo, em cinco estações de amostragens, localizadas desde a região de nascentes, estação S5- Ibiúna, passando por áreas com maior influência urbana e agrícola (S4 – Votarántim, S3 – Itavuvu e S2 – Tatuí), até a foz da bacia em estudo, S1 – Laranjal Paulista, utilizando-se modelos de transporte de materiais nas fases dissolvidas e particuladas. Para tal, foram realizadas coletas ao longo de 18 meses, de amostras de águas fluviais, pluviais, sedimento fino em suspensão (FSS) e dos principais tipos solos integrantes da bacia. Importantes parâmetros físico-químicos e a caracterização das cargas dissolvida e particulada foram determinados. As características hidroquímicas das águas fluviais mostraram que as espécies químicas SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- e TDS indicaram possíveis aportes difusos e as espécies Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NH_4^+ e NO_3^- indicaram origens pontuais. O elemento químico dissolvido que mais contribuiu no transporte específico fluvial junto à foz do rio Sorocaba (S1- Laranjal Paulista), foi o Na^+ para os cátions ($24,25 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e para os ânions foi o HCO_3^- com $53,97 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Já no transporte pluvial o Ca^{2+} foi a espécie química que apresentou maior contribuição na carga do rio com 54,89 %. Com relação ao material particulado, representada pelo FSS, o transporte específico variou de 22,68 a $55,70 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, desde a região das nascentes até a foz, respectivamente. O rio Sorocaba foi classificado como médio transportador de sedimento fino em suspensão e a erosão mecânica foi de $37,88 \text{ m.Ma}^{-1}$.

Palavras-chave: Hidroquímica. Mecanismos de transporte. Erosão mecânica.

ABSTRACT

NOLASCO, M. B. Transport of dissolved and particulate matter in the Sorocaba river basin – São Paulo: dynamic aspects of fluvial hydrogeochemistry and distribution models 2011. 128f. Dissertação (Mestrado em Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

This study aimed to characterize the hydrogeochemical along the Sorocaba river basin (SP), in five sampling stations, located from the headwaters region, S5-Ibiúna station, passing through areas with higher urban and agricultural influences (S4 - Votorantim, S3 – Itavuvu and S2 and Tatuí, to the mouth of the basin under study, S1 - Laranjal Paulista, using models of transport on dissolved and particulate phases. Samples of river water, pluvial, fine suspended sediment (FSS) and the main soils types were collected over 18 months. Important physico-chemical characterization of dissolved and particulate loads were determined. The hydrochemical features of the river water showed that the chemical species SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- and TDS indicated possible diffuse contributions and species Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NH_4^+ and NO_3^- indicated origin contributions. The dissolved chemical element who more contributed in transport dissolved specific in S1-Laranjal Paulista), was Na^+ for cations, with $24,25 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and for anions was HCO_3^- with $53.97 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$. In the rain Ca^{2+} was the chemical species with the highest contribution to the river load with 54.89%. The suspended particulate matter, represented by the FSS, the specific transport ranged from 22.68 to $55.70 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, from the region of the headwaters to the mouth, respectively. The river was classified as medium transporting fine sediment in suspension and the mechanical erosion was the $37.88 \text{ m} \cdot \text{Ma}^{-1}$.

Keywords: Hydrochemistry, transport mechanism, mechanical erosion

LISTA DE FIGURAS

Figura	Legenda	Pg.
1	Localização da bacia do rio Sorocaba; sua rede de drenagem; as estações de amostragem fluvial: S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna; pluvial: P1 – Sorocaba; e as estações Laranjal Paulista, Iperó e Itupararanga (Modificado a partir de Perrota et al., 2005).....	28
2	Mapa Geológico da bacia do rio Sorocaba com suas unidades litoestratigráficas; sua rede de drenagem; as estações de amostragem fluvial: S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna (Modificado a partir de Perrota et al., 2005).....	30
3	Mapa de solos da bacia do rio Sorocaba; sua rede de drenagem; as estações de amostragem fluvial: S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna; e pluvial: P1 – Sorocaba (Modificado a partir de Perrota et al., 2005; Oliveira et al. 1999).....	32
4	Identificação de rota e georreferenciamento de uma das estações de amostragem utilizando GPS INFOSPACE.....	34
5	Estação de amostragem S1- Laranjal Paulista: o rio Sorocaba nos períodos de estiagem (A) e cheia (B e C); o rio Sorocaba sob a Rodovia Marechal Rondon, na zona rural de Laranjal Paulista e a ponte utilizada na amostragem (D e E).....	35
6	Estação de amostragem S2 – Tatuí: rio Sorocaba no bairro de Americana Velha, em Tatuí (A), ponte utilizada na amostragem (B), régua limnimétrica (C) e limnígrafo do DAEE/CTH (D), e o rio Sorocaba nos períodos de cheia (E) e estiagem (F).....	36
7	Estação de amostragem S3 - Itavuvú: rio Sorocaba em Itavuvú (A), ponte utilizada na amostragem (B) e batimetria da seção transversal do canal (C) e o rio Sorocaba nos períodos de cheia (E) e estiagem (F).....	37
8	Estação de amostragem S4 - Votorantim: rio Sorocaba na cidade de Votorantim (A), ponte utilizada na amostragem e batimetria da seção transversal do canal (B), e o rio Sorocaba nos períodos de cheia e estiagem (C e D).....	38
9	Estação de amostragem S5 – Ibiúna: rio Sorocaba na zona rural de Ibiúna no período de estiagem (A), ponte utilizada na amostragem (B), e o período de cheia do rio Sorocaba (C, D e E), nas regiões de cabeceiras.....	39

10	Estação de amostragem de água pluviais instalado na parte média da bacia do rio Sorocaba.....	40
11	Esquema do coletor utilizado, desenvolvido por Mortatti, 1995.....	41
12	Coleta de amostra de águas fluviais: lançamento do amostrador (A), coleta da amostra (B), transferência para frasco de armazenagem (C).....	44
13	Gravimetria: estufa (A), pré-pesagem do filtro (B), filtro + amostra secos (C e D).....	46
14	Coleta de 30 L de amostra bruta de águas fluviais: Coleta da amostra (A) e transferência para a bombona (B).....	46
15	Molinete utilizado para medição das velocidades médias do fluxo de água nas estações de amostragem.....	49
16	Medição dos parâmetros físico-químicos em campo (A, B e C).....	52
17	Seção transversal do canal considerada para a estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009. Margem esquerda (ME) e margem direita (MD).....	62
18	Resultado obtido com o software WinXPRO 3.0, com destaque para a área da seção transversal do canal para a estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009.....	62
19	Seção transversal do canal considerada para a estação de amostragem S2 – Tatuí, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009. Margem esquerda (ME) e margem direita (MD).....	62
20	Resultado obtido com o software WinXPRO 3.0, com destaque para a área da seção transversal do canal para a estação de amostragem S2 – Tatuí, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009.....	63
21	Seção transversal do canal considerada para a estação de amostragem S3 – Itavuvú, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009. Margem esquerda (ME) e margem direita (MD).....	63
22	Resultado obtido com o software WinXPRO 3.0, com destaque para a área da seção transversal do canal para a estação de amostragem S3 – Itavuvú, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009.....	63
23	Seção transversal do canal considerada para a estação de amostragem S4 – Votorantim, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009. Margem esquerda (ME) e margem direita (MD).....	64

24	Resultado obtido com o software WinXPRO 3.0, com destaque para a área da seção transversal do canal para a estação de amostragem S4 – Votorantim, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009.....	64
25	Seção transversal do canal considerada para a estação de amostragem S5 – Ibiúna, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009. Margem esquerda (ME) e margem direita (MD).....	65
26	Resultado obtido com o software WinXPRO 3.0, com destaque para a área da seção transversal do canal para a estação de amostragem S5 – Ibiúna, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009.....	65
27	Relacionamento precipitação x vazão na bacia do rio Sorocaba – SP para o período de 1984 a 2008.....	65
28	Separação do hidrograma do rio Sorocaba nos compartimentos escoamento superficial rápido (Qr) e subterrâneo (Qn) e índice de precipitação anual (P), no período de 1984 a 2008.....	67
29	Equilíbrio iônico entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-), para a estação S1 – Laranjal Paulista, (dados em $\mu\text{eq L}^{-1}$).....	77
30	Equilíbrio iônico entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-), para a estação S2 – Tatuí, (dados em $\mu\text{eq L}^{-1}$).....	77
31	Equilíbrio iônico entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-), para a estação S3 – Itavuvú, (dados em $\mu\text{eq L}^{-1}$).....	78
32	Equilíbrio iônico entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-), para a estação S4 – Votorantim, (dados em $\mu\text{eq L}^{-1}$).....	78
33	Equilíbrio iônico entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-), para a estação S5 – Ibiúna, (dados em $\mu\text{eq L}^{-1}$).....	78
34	Distribuição percentual do SiO_2 , ânions e cátions majoritários presentes nas amostras de águas fluviais, para as estações de amostragem S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna.....	79
35	Distribuição temporal da vazão (Q), em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, para as estações de amostragem S1 – Laranjal Paulista, S2- Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, considerando os volumes observados nos dias de coleta de amostras de águas fluviais para o período de estudo.....	80
36	Distribuição temporal de vazão (Q), cátions, ânions, SiO_2 e TDS presentes nas amostras de águas do rio Sorocaba em S1 – Laranjal Paulista.....	81

37	Distribuição temporal de vazão (Q), cátions, ânions, SiO ₂ e TDS presentes nas amostras de águas do rio Sorocaba em S2 – Tatuí...	82
38	Distribuição temporal de vazão (Q), cátions, ânions, SiO ₂ e TDS presentes nas amostras de água do rio Sorocaba em S3 - Itavuvú...	83
39	Distribuição temporal de vazão (Q), cátions, ânions, SiO ₂ e TDS presentes nas amostras de água do rio Sorocaba em S4 - Votorantim.....	83
40	Distribuição temporal de vazão (Q), cátions, ânions, SiO ₂ e TDS presentes nas amostras de águas do rio Sorocaba em S5 – Ibiúna..	84
41	Distribuição espacial da concentração média normalizada pela vazão (C _{MNQ}), com respectivo desvio padrão, para ânions, cátions, SiO ₂ , TDS, em função das médias das vazões (Q _M), presentes nas águas do rio Sorocaba, para as estações de amostragem S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, durante o período estudado.....	85
42	Relação concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S1 – Laranjal Paulista, junto à foz, com as respectivas regressões de potência e curvas de diluição teórica (DT), durante o período estudado.....	87
43	Relação concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S2 – Tatuí, com as respectivas regressões de potência e curvas de diluição teórica (DT), durante o período estudado.....	88
44	Relação concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S3 – Itavuvú, com as respectivas regressões de potência e curvas de diluição teórica (DT), durante o período estudado.....	89
45	Relação concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S4 – Votorantim, com as respectivas regressões de potência e curvas de diluição teórica (DT), durante o período estudado.....	90
46	Relação concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S5 – Ibiúna, próximo às nascentes, com as respectivas regressões de potência e curvas de diluição teórica (DT), durante o período estudado.....	91
47	Diagramas ternários de cátions e ânions para as cargas dissolvidas na nascente (S5 - Ibiúna) e foz (S1 – Laranjal Paulista) do rio Sorocaba, para o período estudado.....	97

48	Comparação entre os transportes fluviais totais calculados de acordo com os métodos estocástico (T_S) e determinístico (T_D) para as principais espécies químicas dissolvidas junto à foz (S1 – Laranjal Paulista) e região de nascentes (S5 – Ibiúna), do rio Sorocaba para o período estudado.....	99
49	Distribuição espacial do transporte fluvial total (T), transporte fluvial específico (T_E) e transporte fluvial específico parcial para SiO_2 , cátions, ânions e TDS presentes nas amostras fluviais do rio Sorocaba, calculados para as estações de amostragem S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, durante o período estudado.....	101
50	Distribuição percentual das principais espécies químicas presentes nas amostras de águas pluviais, para a bacia do rio Sorocaba, durante o período estudado.....	104
51	Razão molar entre os íons Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} e SO_4^{2-} e o Cl^- presentes nas águas pluviais, para a bacia do rio Sorocaba, durante o período estudado, e as respectivas curvas de referência para a chuva marinha.....	106
52	Variabilidade temporal dos sedimentos finos em suspensão (FSS, $mg L^{-1}$) na bacia do rio Sorocaba, nas estações amostradas, e respectivas vazões (Q , $m^3 s^{-1}$), desde a nascente (S5 – Ibiúna) até a foz (S1 – Laranjal Paulista), durante o período estudado.....	109
53	Correlação bilogarítmica entre as concentrações dos sedimentos finos em suspensão (FSS, $mg L^{-1}$) e respectivas vazões (Q , $m^3 s^{-1}$) para as estações de amostragem ao longo do rio Sorocaba: S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, para o período estudado.....	110
54	Distribuição espacial da erosão mecânica, em termos do transporte médio específico anual de sedimentos finos em suspensão, e da vazão média (Q_M) ao longo da bacia do rio Sorocaba, para as estações de amostragem S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, para o período de estudo.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela	Legenda	Pg.
1	Distribuição percentual das unidades litoestratigráfica presentes na bacia do rio Sorocaba e respectiva área de ocorrência.....	31
2	Distribuição percentual das classes de solos presentes na bacia do rio Sorocaba e respectiva área.....	32
3	Dados de campo: Batimetria e velocidade do fluxo de água (margem esquerda – V1, eixo central do canal – V2 e margem direita – V3) e resultados de área da seção, velocidade média e vazão para a estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, para as excursões de 10/03/2009 a 17/06/2009.....	61
4	Dados de campo: Batimetria e velocidade do fluxo de água (margem esquerda – V1, eixo central do canal – V2 e margem direita – V3) e resultados de área da seção, velocidade média e vazão para a estação de amostragem S2 – Tatuí, para as excursões de 10/03/2009 a 17/06/2009.....	62
5	Dados de campo: Batimetria e velocidade do fluxo de água (margem esquerda – V1, eixo central do canal – V2 e margem direita – V3) e resultados de área da seção, velocidade média e vazão para a estação de amostragem S3 – Itavuvú, para as excursões de 10/03/2009 a 17/06/2009.....	63
6	Dados de campo: Batimetria e velocidade do fluxo de água (margem esquerda – V1, eixo central do canal – V2 e margem direita – V3) e resultados de área da seção, velocidade média e vazão para a estação de amostragem S4 – Votorantim, para as excursões de 10/03/2009 a 17/06/2009.....	64
7	Dados de campo: Batimetria e velocidade do fluxo de água (margem esquerda – V1, eixo central do canal – V2 e margem direita – V3) e resultados de área da seção, velocidade média e vazão para a estação de amostragem S5 – Ibiúna, para as excursões de 10/03/2009 a 17/06/2009.....	64
8	Resultados hidrológicos para a bacia do rio Sorocaba obtidos com a aplicação do modelo de separação de hidrogramas com filtros numéricos para o período de 1984 a 2008.....	66
9	Parâmetros físico-químicos da estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista.....	68
10	Parâmetros físico-químicos da estação de amostragem S2 – Tatuí.....	69

11	Parâmetros físico-químicos da estação de amostragem S3 – Itavuvú.....	70
12	Parâmetros físico-químicos da estação de amostragem S4 – Votorantim.....	71
13	Parâmetros físico-químicos da estação de amostragem S5 – Ibiúna.....	72
14	Resultados analíticos das concentrações das principais espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions), sílica (SiO ₂), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q _t), médias e desvios padrão nas águas do rio Sorocaba, para a estação de amostragem Laranjal Paulista – S1, foz da bacia de drenagem.....	73
15	Resultados analíticos das concentrações das principais espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions), sílica (SiO ₂), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q _t), médias e desvios padrão nas águas do rio Sorocaba, para a estação de amostragem Tatuí – S2.....	74
16	Resultados analíticos das concentrações das principais espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions), sílica (SiO ₂), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q _t), médias e desvios padrão nas águas do rio Sorocaba, para a estação de amostragem Itavuvu – S3.....	75
17	Resultados analíticos das concentrações das principais espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions), sílica (SiO ₂), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q _t), médias e desvios padrão nas águas do rio Sorocaba, para a estação de amostragem Votorantim – S4.....	76
18	Resultados analíticos das concentrações das principais espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions), sílica (SiO ₂), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q _t), médias e desvios padrão nas águas do rio Sorocaba, para a estação de amostragem Ibiúna – S5, região de nascente.....	77
19	Matriz dos coeficientes de correlação entre as principais espécies químicas dissolvidas junto à foz do rio Sorocaba, estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, durante o período estudado.....	92
20	Matriz dos coeficientes de correlação entre as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, estação de amostragem S2 – Tatuí, durante o período estudado.....	93
21	Matriz dos coeficientes de correlação entre as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, estação de amostragem S3 – Itavuvú, durante o período estudado.....	94

22	Matriz dos coeficientes de correlação entre as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, estação de amostragem S4 – Votorantim, durante o período estudado.....	95
23	Matriz dos coeficientes de correlação entre as principais espécies químicas dissolvidas próximo às nascentes do rio Sorocaba, estação de amostragem S5 – Ibiúna, durante o período estudado.....	96
24	Transporte Fluvial Total (T_S , em kg d^{-1}) e Específico (T_{SE} , em $\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$) para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, nas respectivas estações de amostragem, obtido pelo método estocástico, para o período estudado.....	98
25	Transporte Fluvial Total (T_D , em kg d^{-1}) e Específico (T_{DE} , em $\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$) para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, nas respectivas estações de amostragem, obtido pelo método determinístico, para o período estudado.....	98
26	Resultados de precipitação pH, TDS e concentração de cátions e ânions das amostras de água de chuva ocorridas na bacia de drenagem no período de 15/05/2009 a 01/09/2010.....	103
27	Aportes atmosféricos totais (kg a^{-1}) e específicos ($\text{kg km}^{-2} \text{a}^{-1}$) para as principais espécies químicas dissolvidas nas águas pluviais da bacia do rio Sorocaba durante o período estudado.....	105
28	Contribuição dos aportes atmosféricos totais na carga fluvial dissolvida do rio Sorocaba (%) para o período estudado.....	107
29	Resultados das concentrações dos sedimentos finos em suspensão (FSS, mg L^{-1}) na bacia do rio Sorocaba, nas estações amostradas, e respectivas vazões (Q , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), desde a nascente (S5 – Ibiúna) até a foz (S1 – Laranjal Paulista), durante o período estudado.....	108
30	Resultados químicos totais das principais espécies presentes no sedimentos em suspensão junto à foz do rio Sorocaba, estação S1 – Laranjal Paulista, durante o período estudado, com suas respectivas médias e desvios padrão.....	112
31	Composição química dos óxidos principais e matéria orgânica nos sedimentos finos em suspensão junto à foz do rio Sorocaba, na estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, durante o período estudado.....	113
32	Transporte médio anual de sedimentos finos em suspensão (FSS), total (T) e específico (T_E), por estações de amostragem ao longo do rio Sorocaba, para o período de estudo.....	115

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
3	ÁREA DE ESTUDO	28
3.1.	Caracterização geral da área de estudo	28
3.1.1	Geomorfologia	30
3.1.2.	Solos	31
3.1.3.	Vegetação	33
3.1.4.	Aspectos climáticos	34
3.1.5.	Identificação e escolha dos pontos de amostragens fluvial e pluvial	34
3.2.	Caracterização dos pontos de amostragem fluvial	35
3.2.1.	S1 – Laranjal Paulista	35
3.2.2.	S2 – Tatuí	35
3.2.3.	S3 – Itavuvu	37
3.2.4.	S4 – Votorantim	38
3.2.5.	S5 - Ibiúna	39
3.3.	Caracterização do ponto de amostragem pluvial	40
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1.	Materiais e equipamentos utilizados	42
4.2.	Protocolo de amostragem e analítico	44
4.2.1.	Águas fluviais e DBO _{5,20}	44
4.2.2	Sedimento fino em suspensão (FSS)	45
4.2.3	Águas pluviais	46
4.2.4.	Solos	47
5.	CHARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA	48

5.1.	Fluviometria: Batimetria, medida da velocidade da água e vazão	48
5.2.	Relacionamento vazão x precipitação	49
5.3.	Separação do hidrograma de cheia	49
6.	CARACTERIZAÇÃO CARGA DISSOLVIDA FLUVIAL	52
6.1	Parâmetros físico-químicos	52
6.2.	Concentrações das espécies químicas fluviais e equilíbrio iônico	52
6.3.	Variabilidade temporal e espacial das vazões e concentrações	53
6.4.	Relacionamento concentração-vazão	53
6.5.	Matriz de correlação	54
6.6.	Diagramas ternários aplicados a águas fluviais	55
6.7	Transporte fluvial das espécies químicas dissolvidas	55
6.7.1.	Método estocástico e determinístico	55
7.	APORTES ATMOSFÉRICOS TOTAIS	57
8.	CARACTERIZAÇÃO CARGA PARTICULADA FLUVIAL	58
8.1	Dinâmica do sedimento fino em suspensão	58
8.1.1.	Variabilidade temporal das concentrações de FSS	59
8.1.2.	Relacionamento concentração- vazão FSS	59
8.1.3.	Composição química e mineralógica do FSS	59
8.1.4.	Degradação física da bacia do rio Sorocaba	60
8.1.5	Transporte fluvial de FSS	60
9.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
9.1.	Caracterização Hidrológica	61
9.1.1.	Fluviometria: batimetria e medida da velocidade da água e vazão	61
9.1.2.	Vazão e precipitação	65
9.1.3.	Separação do hidrograma de cheia	66

9.2.	Caracterização Carga Dissolvida Fluvial	67
9.2.1.	Parâmetros físico-químicos	67
9.2.2.	Concentrações das espécies químicas fluviais e equilíbrio iônico	73
9.2.3.	Variabilidade temporal e espacial das vazões e concentrações	80
9.2.4.	Relacionamento concentração-vazão	86
9.2.5.	Matriz de correlação	91
9.2.6.	Diagramas ternários aplicados a águas fluviais	96
9.3.	Transporte fluvial	97
9.3.1.	Método estocástico e determinístico	97
9.4.	Aportes atmosféricos totais	102
9.5.	Caracterização Carga Particulada Fluvial	107
9.5.1.	Dinâmica do sedimento fino em suspensão	107
9.5.2.	Variabilidade temporal das concentrações de FSS	109
9.5.3.	Relacionamento concentração- vazão FSS	110
9.5.4.	Composição química e mineralógica do FSS	111
9.5.5.	Degradação Física Específica	114
9.5.6.	Transporte fluvial de FSS	115
10.	CONCLUSÕES	118
	REFERÊNCIAS	120

1. INTRODUÇÃO

Dentre todos os recursos naturais disponíveis para a vida humana, a água é o que apresenta maior destaque no cenário global, pois é necessária para manutenção da vida na Terra. Do total de água existente apenas 2,5% são consideradas água doce e neste contexto o Brasil pode ser considerado um país privilegiado, pois apresenta as maiores reservas mundiais de água doce (14%), seguido pela China (9%) e Canadá (8%) (FIETZ, 2006).

Apesar de o Brasil ter essa grande disponibilidade hídrica, a distribuição da água não é homogênea nas regiões do país, resultando numa disparidade entre volume e disponibilidade trazendo inúmeros problemas econômicos e sociais (LIMA, 1999; TUNDISI, 2008).

Particularmente, a situação dos recursos hídricos na região sudeste é grave e as perspectivas para o futuro são ainda mais preocupantes, levando-se em consideração o modelo de desenvolvimento econômico vigente, os índices de crescimento populacional e a ocupação desordenada que vem ocorrendo as margens dos corpos d'água (GARCEZ, 1967; SILVA, 1994; TUNDISI, 2005).

Devido ao uso indiscriminado deste recurso frente à demanda populacional e industrial nos últimos anos, este tema tem sido alvo de discussões nos comitês gestores de bacias hidrográficas com o objetivo de avaliar a melhor forma de se utilizar este bem natural de maneira sustentável, visto que o abastecimento de água da população ocorre por meio da captação nos corpos hídricos superficiais, os quais vêm sofrendo influência humana na qualidade e quantidade das águas limitando seu potencial de uso (PORTO, 1991; MEYBECK et al., 1996).

Uma forma de se avaliar os impactos ambientais que vêm ocorrendo nos corpos hídricos é a utilização de estudos hidrogeoquímicos em bacias de drenagem. Nesses estudos, a avaliação das possíveis alterações a que estão sujeitos as bacias de drenagem, 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, refletindo diretamente na qualidade da água do rio (MORTATTI, 1995).

A qualidade da água dos rios de uma bacia hidrográfica pode ser definida como o resultado da interação entre clima, geologia, vegetação, uso e ocupação dos solos, refletindo diretamente nos processos erosivos mecânicos e químicos (SOPPER, 1975; CARVALHO et al., 2000).

Em virtude desses processos erosivos que ocorrem nos corpos fluviais, muitos estudos hidrogequímicos têm sido realizados para verificar a influência antrópica nestes ecossistemas naturais (MEYBECK, 1976; PROBST, 1983; PERAY, 1998; BORTOLETTO JUNIOR, 2004; VENDRAMINI, 2009), proporcionando uma investigação mais profunda nos aspectos relacionados ao transporte fluvial de material particulado e carga dissolvida (RICHEY et al., 1990; MORTATTI et al., 1997).

De acordo com Carvalho e Cunha (1997) os rios são os grandes receptores e transportadores de sedimentos em suspensão enquanto que os oceanos são os grandes receptores finais. Segundo Milliman (1991) e Syvitsky (1992), os rios contribuem com aproximadamente 70% do aporte total de sedimentos para os oceanos, gerando uma carga particulada transportada fluvialmente da ordem de $18 \times 10^9 \text{ t a}^{-1}$. Tal contribuição engloba os principais rios do mundo e não considera os aportes de rios de médio e pequeno porte, devido à escassez de informações (CHAKRAPANI, 2005).

A bacia do rio Sorocaba está localizada na região sudeste do estado de São Paulo e foi ocupada sem planejamento, passando por transformações ambientais devido à intensa atividade agrícola e industrial, principalmente após a implantação da política de descentralização industrial da cidade de São Paulo na década de 1970 (IPT, 2006).

O rio Sorocaba é considerado o principal afluente da margem esquerda do trecho médio do rio Tietê e caracteriza-se como um importante manancial para a captação e abastecimento de água aos municípios presentes em sua bacia. Além do abastecimento público, as águas do rio Sorocaba e de seus afluentes são utilizadas para irrigação, resfriamento de caldeiras, matéria-prima para diferentes processos e como diluidor de despejos domésticos e industriais (SMITH et al., 2005).

Segundo o relatório da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 10 (UGRHi, 2008), a bacia do rio Sorocaba é composto por 18 municípios que lançam seus efluentes domésticos no rio, sendo que 90% deste total não apresentam

sistemas de tratamento de esgoto, resultando em uma emissão *in natura* com uma carga poluidora de 31 kg DBO_{5,20} . d⁻¹.

As UGRHs foram criadas no ano de 1994, quando a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), com o intuito de estabelecer uma melhor gestão dos recursos hídricos do estado de São Paulo, substituiu a antiga divisão de zonas hidrográficas pelas 22 UGRHs existentes hoje.

Muitos estudos têm sido realizados para verificar a influência da erosão mecânica e química dos solos em bacias de drenagem (BIBIAN, 2007; VENDRAMINI, 2009), a qual ocorre por ação de fenômenos da natureza, podendo ser influenciada por ações antrópicas, aumentando os prejuízos sociais e econômicos.

Mediante o exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar os principais mecanismos de transporte de material dissolvido e particulado na bacia do rio Sorocaba, considerando os aspectos dinâmicos da hidroquímica fluvial e a utilização de modelos de distribuição para as principais espécies químicas estudadas ao longo da bacia de drenagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A bacia hidrográfica pode ser entendida como a interação dos atributos físicos, químicos e biológicos de um determinado ecossistema terrestre, topograficamente limitado pelas curvas de nível do terreno e drenadas para um canal principal (MATOS, 1975).

Segundo Odum (1988), as bacias hidrográficas são unidades de extrema importância em estudos de análises ambientais, pois seus cursos d'água refletem toda a dinâmica dos processos erosivos mecânicos e químicos, sendo possível avaliar os impactos causados pela ocupação urbana e industrial (PETERS; RODHE, 1994).

As bacias hidrográficas começaram a ser melhor investigadas no início do século XX, e mais recentemente devido ao grande interesse ambiental dos órgãos de gerenciamento dos recursos hídricos. Os primeiros estudos realizados em bacias hidrográficas objetivaram relacionar o efeito da cobertura florestal, sobre a qualidade da água e sobre a ciclagem de nutrientes em ambientes naturais ou com pouca influência antrópica, como por exemplo os desenvolvidos por Hoyt e Troxell (1932) e LIKENS et al. (1977).

O transporte fluvial de material particulado em bacias de drenagem, normalmente representado pelo sedimento fino em suspensão (FSS), representa o produto final do intemperismo físico de solos desagregados durante os processos erosivos mecânicos, podendo ser considerado como uma mistura de compostos orgânicos e inorgânicos, que são de fundamental importância para a manutenção da vida aquática, pois estão diretamente relacionados com o meio (DROPPO, 2002; EDWARDS, 2007).

Em bacias de drenagem altamente impactadas os solos estão mais susceptíveis a erosão, podendo contribuir significativamente para o aumento do FSS no sistema fluvial, tendo como principal consequência deste impacto o assoreamento dos corpos d'água (CARVALHO et al., 2000).

Da mesma forma, Siviero e Coiado (1999) afirmaram que os processos de produção de sedimentos em bacias de drenagem são fenômenos naturais que têm seus efeitos potencializados pela ação do homem, como o manejo inadequado de

solos agrícolas e obras de engenharia, entre outros, podendo elevar em até 100 vezes o potencial erosivo natural (ARAUJO et al., 2003).

Um estudo de caracterização física do canal principal do rio Piracicaba (11430 km²), com o objetivo de determinar as taxas de degradação física total e específica foi realizado por Mortatti et al. (1996). Os valores encontrados pelos autores foram respectivamente de $0,41 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$ e $48 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, o que indicou uma velocidade média de redução de espessura do solo de 24 m Ma^{-1} .

Estudos realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (2000) e também por Booth (2002), com o objetivo de avaliarem as cargas de sedimentos em suspensão produzidas em várias classes de uso de solo, demonstraram que o aumento dos sedimentos gerados na construção de ambientes urbanos é altamente significativo principalmente no período de intensas precipitações. Segundo Julien (1995) e Tucci (2003), este aumento na carga particulada ocorre devido à retirada da vegetação, limpeza de terrenos, terraplanagem e loteamentos, podendo gerar um transporte de sedimento em suspensão de até $300 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$.

Os estudos de produção de sedimentos são importantes para o planejamento de processos de manejo de culturas e de solos, a fim de evitarem a perda de sedimento para os rios que pode ocorrer pela erosão hídrica, a qual desagrega o solo em partículas menores, reduzindo a capacidade de infiltração da água (BRUIJNZEEL, 1990; SILVA et al., 1995; GOMES et al., 2006; SINGH et al., 2008).

Conseqüentemente, o material particulado transportado pela erosão hídrica possui uma relação direta com a intensidade de chuva e tipo de cobertura vegetal na área de estudo, influenciando na taxa de sedimentação e na qualidade da água do rio (PRUSKI et al., 2003). Tal fato foi observado por Brown e Krygier (1971), Miller (1984), O'Loughlin et al. (1984); Molina et al. (2007), onde verificaram que a grande quantidade de sedimento fino em suspensão transportados para o leito de um córrego durante eventos chuvosos de alta intensidade, foram às principais causas da redução da qualidade da água.

O escoamento total de um rio pode ser dividido em escoamento superficial direto e o escoamento de base ou subterrâneo (MORTATTI; PROST, 1998). O primeiro resulta da parcela da precipitação que excede a capacidade de infiltração do solo e escoam sobre sua superfície. Já o segundo é aquele produzido pela drenagem do aquífero subterrâneo, importante do ponto de vista ambiental, uma vez que refletirá a produção de água na bacia durante as estações secas (TUCCI, 2001).

Uma forma de se verificar a influência do escoamento superficial nos processos erosivos mecânicos que ocorrem nas bacias de drenagem é através da separação do hidrograma de cheia. Mortatti, Probst e Ferreira (1992), investigaram as características hidrológicas e geoquímicas das bacias dos rios Jamari (30430 km²) e Jiparaná (60350 km²) no estado de Rondônia, utilizando a análise espectral de Fourier para a separação do hidrograma de cheia. Os autores observaram que o coeficiente anual médio do escoamento superficial foi de 36% para a bacia do rio Jiparaná e 32% para a do rio Jamari.

Mortatti et al. (2004), ao estudarem a influência do escoamento superficial rápido nos processos erosivos mecânicos que ocorrem nas bacias dos rios Tietê e Piracicaba, aplicaram a técnica de separação de hidrógrafas proposta por Hino e Hasebe (1984), para um período de 20 anos. Detectaram variações nos coeficientes de escoamentos superficial rápido, sendo de 0,304 para o Tietê e de 0,274 para o Piracicaba, indicando que aproximadamente 30% do escoamento total dos rios apresentaram origem superficial, associados as entradas de chuvas nas bacias de drenagem, e 70% ao escoamento subterrâneo.

Os efeitos prejudiciais sobre o meio ambiente estão associados ao uso e ocupação dos solos e começam a surgir quando 15% da área da bacia hidrográfica está impermeabilizada, podendo alterar a vazão dos rios e a carga de sedimento transportada (KLEIN, 1979; KONRAD, 2003).

Estudos realizados por Kunkle (1974), Sopper (1975), Magette et al. (1989), Loughlin (1994) e Nearing (2007), afirmam que a maioria dos problemas causados pelos sedimentos em suspensão nos rios poderiam ser amenizados com a presença de cobertura vegetal, representada pela mata ciliar, atenuando o desequilíbrio causado pelos processos erosivos mecânicos.

O transporte fluvial de FSS na bacia Amazônica (7×10^6 km²) foi estudado ao longo de um ano hidrológico, nas cidades de Óbidos e Vargem Grande, por Mortatti et al. (1994), que observaram um transporte total da ordem de 1024,98 e 516,86 $\times 10^6$ t a⁻¹, respectivamente. Os autores concluíram que tais valores estavam associados às áreas de várzea ou alagamento, que exercem papel importante no controle hidrogeoquímico da erosão. Outro estudo desenvolvido também na região amazônica (MEADE et al., 1985), durante um período de cheia, indicou um fluxo de FSS da ordem de $1,2 \times 10^9$ t a⁻¹.

Souza e Knoppers (2003) quantificaram o transporte de sedimento em suspensão de 30 rios da costa leste brasileira desde a bacia do rio São Francisco, 634.000 km², até a bacia do atlântico leste, 545.000 km², e observaram uma variação de 0,4 a 220 t km⁻² a⁻¹. Os baixos valores de transporte foram associados à presença de reservatórios, que de acordo com Vorosmarty et al. (1997) podem reter até 30% da carga particulada transportada fluvialmente.

As bacias dos rios Tietê e Piracicaba apresentam uma parcela significativa de suas áreas de drenagem ocupadas pela cultura de cana-de-açúcar sob varias formas de uso e conservação dos solos, favorecendo intensificação dos processos erosivos mecânicos. Com base nisso, Bortoletto Júnior (2004) quantificou o transporte de sedimentos fluviais nesses dois rios, que foram da ordem de 59,6 e 55,5 t km⁻² a⁻¹, respectivamente, e associados às fortes pressões agrícolas e à falta de preservação e conservação das matas ciliares destes corpos hídricos.

Lima et al. (2005) estudaram o fluxo específico de sedimento fino em suspensão transportado pela bacia do rio Paranapanema (100.800 km²) e verificaram que a variação espacial foi da ordem de 13 a 77 t km⁻² a⁻¹. O resultado foi considerado baixo em virtude da área de drenagem apresentar solos susceptíveis a erosão, mas vale ressaltar que em seu percurso o rio apresenta reservatórios que contribuem na retenção deste sedimento transportado.

Já na bacia do rio Barigui (1416 Km²), localizado na região metropolitana de Curitiba, Chella et al. (2005) avaliaram o transporte de sedimentos em suspensão desde as nascentes até a foz, no período de fevereiro a outubro de 2004, e observaram uma variação de 20 a 350 t d⁻¹ entre as regiões de cabeceiras e sua foz. Segundo os autores tais valores foram associados à baixa presença de cobertura vegetal na área de drenagem, visto que é uma bacia essencialmente urbana.

Outro fator importante que influencia os processos erosivos é o relevo, com destaque para as regiões montanhosas. Singh et al. (2007) verificaram uma alta concentração de sedimentos na bacia de Nagwan, Índia, correspondendo a um transporte anual de 729 x 10⁶ t. Essa carga foi associada à declividade da bacia bem como à susceptibilidade erosiva das rochas.

Liquete et al. (2009) estudaram o transporte de sedimento fino em suspensão dos nove rios que compõem a bacia da Catalônia, Espanha, que apresentam áreas de drenagem variando de 319 a 5045 km². Os fluxos específicos variaram de 94 a 621 t km a⁻¹ e foram relacionados à forte presença antrópica na região.

Cavalcante et al. (2010) avaliaram a produção de sedimento fino em suspensão na porção média do rio Capibaribe – PE, com uma área de drenagem de 7454 Km², durante um ano hidrológico. Sua várzea foi onde primeiro se consolidou a cultura da cana-de-açúcar na região nordeste do Brasil. O estudo foi realizado em 2009, ano em que a precipitação foi cerca de cinco vezes menor que a média histórica observada para a região, o que levou os autores a concluir que o transporte específico verificado, 16,22 t km⁻² a⁻¹, não foi representativo para retratar a produção de sedimentos da bacia de drenagem.

No contexto da bacia de drenagem do rio Sorocaba, estudos recentes da carga de material particulado em suspensão podem ser encontrados na literatura, com destaque para Fávero (2007); Pedrazzi et al. (2007); Marco da Silva (2008); Fernandes et al. (2010) e Mechi e Sanches (2010).

Outro importante ponto a ser considerado está relacionado a carga dissolvida presente nos corpos hídricos. A origem da composição química da carga fluvial pode estar relacionada a três fontes principais: intemperismo de rochas, aportes atmosféricos e ações antrópicas (PROBST et al., 1994; MORTATTI et al., 1997).

Em estudos hidrogeoquímicos, a contribuição atmosférica é um importante parâmetro quando se fazem necessárias as correções nas cargas dissolvidas transportadas fluvialmente. A literatura contempla vários estudos sobre a carga dissolvida em águas pluviais, principalmente em grandes e médias bacias de drenagem, como por exemplo, a amazônica (STALLARD; EDMOND, 1981; MORTATTI, 1995) e a do rio Congo na África (NKOUNKOU; PROBST, 1987).

Estudos envolvendo a carga fluvial dissolvida são amplamente encontrados na literatura, envolvendo bacias de diversas magnitudes e objetivos que vão desde a caracterização química e modelos de transporte fluvial até modelos hidrogeoquímicos mais complexos, como por exemplo os que avaliam a erosão química.

Probst (1986) avaliou as taxas de erosão mecânica e química na bacia do rio Girou (520 km²), França, a partir do transporte da carga dissolvida e do material particulado em suspensão. Em relação às espécies químicas dissolvidas, foi

observado que o NO_3^- e PO_4^{3-} apresentaram uma maior concentração e foram associadas ao possível acúmulo de fertilizantes no solo. Já Mg^{2+} , Ca^{2+} e HCO_3^- apresentaram menor concentração e foram associados à dissolução de carbonatos. Cabe destacar que o transporte específico da carga dissolvida foi da ordem de $95 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$.

Ainda na França, Peray (1998) estudou o transporte da carga dissolvida na bacia hidrográfica do rio Ill, em Strasburgo, com uma área de $4760,5 \text{ km}^2$. As espécies que mais contribuíram foram o HCO_3^- e o Cl^- com um transporte de 268500 e 110170 t a^{-1} , respectivamente, estando estes elementos associados à precipitação atmosférica e também ao intemperismo químico das rochas e efluentes domésticos.

Ao estudar a bacia do rio Congo ($3,7 \times 10^6 \text{ km}^2$), na África, Moukolo et al. (1993) verificaram que as principais espécies químicas dissolvidas transportadas foram HCO_3^- , o SiO_2 e o Ca^{2+} , oriundas das mineralização das águas.

Já no Brasil, Martinelli et al. (1989) quantificaram o transporte total da carga dissolvida pelo rio Amazonas como sendo de $270 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$. De acordo com os autores, este rio foi considerado como o maior transportador de elementos dissolvidos do mundo.

Mortatti (1995) também realizou estudos na bacia Amazônica, onde avaliou as principais espécies químicas dissolvidas transportadas fluvialmente. Verificou que o HCO_3^- , o SiO_2 e o Ca^{2+} foram as espécies que mais contribuíram no transporte da carga dissolvida com $131,5 \times 10^6$; $31,8 \times 10^6$ e $33,9 \times 10^6 \text{ t a}^{-1}$, respectivamente, associando tais elementos aos processos de alteração de rochas na bacia de drenagem.

No estado do Rio Grande do Norte – RN, Melo Junior et al. (2003) estudaram a carga dissolvida na porção média do rio Açu e seus afluentes, durante o período de três anos, e verificaram que os íons predominantes na calha principal da bacia de drenagem foram o HCO_3^- , K^+ e Na^+ , e nos afluentes o Na^+ , K^+ e Cl^- . Tais espécies químicas tiveram suas origens associadas às rochas cristalinas, argilominerais, atividades urbanas, agrícolas e industriais Horbe et al. (2005) desenvolveram um trabalho semelhante quando investigaram a hidroquímica fluvial do rio Puraquera, em Manaus – AM, onde houve o predomínio dos íons SiO_2 , Cl^- , Na^+ e NH_4^+ . Estas espécies químicas foram associadas ao intemperismo das rochas sedimentares.

Oliveira et al. (2009) estudaram o transporte das principais espécies químicas dissolvidas na microbacia de drenagem do córrego Entre Rios, em Angatuba, SP, com uma área de drenagem de 1,6 km². Verificaram que as espécies que mais contribuíram para a carga dissolvida, em termos de transporte fluvial específico, foram o SiO₂ (15,36 kg km⁻² d⁻¹) e o HCO₃⁻ (11,25 kg km⁻² d⁻¹), os quais foram associados ao intemperismo químico e à recarga pela precipitação, respectivamente.

Bortoletto Junior et al. (2002) estudaram a composição química da carga dissolvida transportada pelo rio Corumbataí - SP, em uma área de drenagem de 1700 km² com forte pressão antrópica. As espécies que mais contribuíram na carga fluvial transportada foram o SiO₂, SO₄²⁻ e HCO₃⁻, com valores da ordem de 16,0; 9,3 e 7,0 t km⁻² a⁻¹, respectivamente. Tais espécies foram associadas não só à alteração de rochas, como também as ações antrópicas como adubação das culturas agrícolas e emissão de esgoto doméstico sem tratamento prévio.

A qualidade da água fluvial foi estudada na bacia do Alto rio Sorocaba (929 km²), com aproximadamente 110 mil habitantes e uma precipitação mensal em torno de 1400 mm. Os resultados indicaram uma redução na qualidade das águas dos rios em função da baixa eficiência das estações de tratamento de efluentes domésticos bem como das intensas atividades agrícolas, aumentando os processos de eutrofização no reservatório de Itupararanga (SARDINHA et al., 2008).

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1 Caracterização geral da área de estudo

O rio Sorocaba nasce no lado oeste da Serra do Mar, no planalto de Ibiúna, a aproximadamente 900 m de altitude. Formado pelos rios Sorocabuçu e Sorocamirim, cujas cabeceiras se encontram nos municípios de Ibiúna e Vargem Grande Paulista, tem como principais afluentes os rios Ipanema, Sarapuí e Tatuí e o ribeirão Guarapó, pela margem esquerda, e o rio Pirajibú e o ribeirão do Cerquilha Velho, pela margem direita. Em seu curso destaca-se a presença do reservatório de Itupararanga, no município de Votorantim, importante manancial da região. Considerado o afluente mais importante da margem esquerda do Médio Tietê, o rio Sorocaba percorre 227 km, considerando seu leito principal em seu trajeto natural, antes de desembocar no rio Tietê, no município de Laranjal Paulista (REDES DAS ÁGUAS, 2000). A Figura 1 apresenta a localização da bacia do rio Sorocaba, com sua rede de drenagem e as estações de amostragem fluviais, pluviais e sedimentos em suspensão.

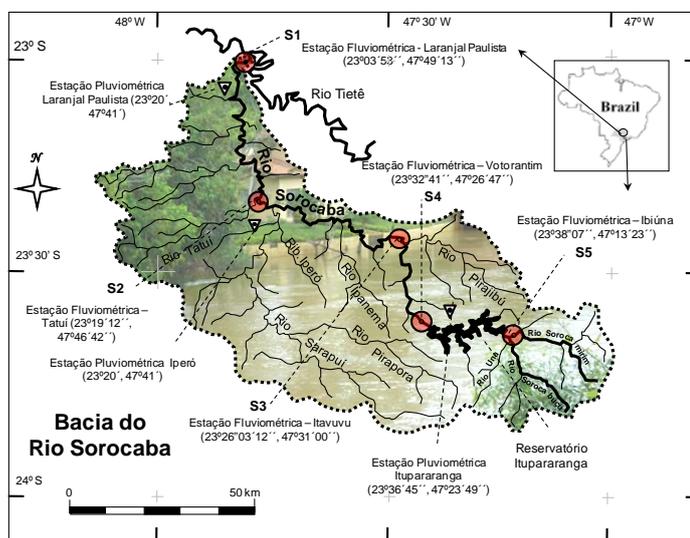


Figura 1 - Localização da bacia do rio Sorocaba; sua rede de drenagem; as estações de amostragem fluvial: S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna; pluvial: P1 – Sorocaba; e, as estações pluviométricas Laranjal Paulista, Iperó e Itupararanga (Modificado a partir de Perrota et al., 2005)

Localizado na UGRHI-10, a bacia do rio Sorocaba ocupa uma área de drenagem de 5.269 km² e abrange 18 municípios, com uma população total de 1.212.376 habitantes, sendo 112.117 habitantes nos dois municípios da sub-bacia do Alto Sorocaba(Ibiúna e Vargem Grande Paulista), 789.283 habitantes nos seis municípios da sub-bacia do Médio Sorocaba (Alumínio, Araçoiaba da Serra, Iperó, Mairinque, Sorocaba e Votorantim) e 310.976 habitantes nos dez municípios da sub-bacia do Baixo Sorocaba (Alambari, Capela do Alto, Cerquilha, Cesário Lange, Laranjal Paulista, Piedade, Quadra, Salto de Pirapora, Sarapuí e Tatuí), de acordo com a Contagem da População 2010 e Estimativa da População 2010 (IBGE, 2010).

Segundo Ross e Moroz (1997), a bacia do rio Sorocaba apresenta seu trecho superior no Planalto Atlântico, na unidade morfológica denominada Planalto de Ibiúna/São Roque, e o restante na Depressão Periférica, na unidade denominada Depressão do Médio Tietê, com altitudes variando de 1200 a 500 m, desde as terras mais altas nas cabeceiras até a foz no rio Tietê, respectivamente.

No Planalto de Ibiúna/São Roque ocorre o predomínio de morros altos com topos aguçados e topos convexos, com altimetrias entre 800 e 1000 m e declividades acentuadas, acima de 20%, onde a litologia é representada por migmatitos e granitos, sendo os solos dominantes os de tipo argissolo vermelho-amarelo e latossolos vermelho-amarelo. A drenagem apresenta um padrão dendrítico e por essas características, morros altos com vales entalhados e densidade de drenagem elevada, apresentando um nível de fragilidade potencial de médio a alto, estando sujeitam a fortes atividades erosivas.

Já na Depressão do Médio Tietê, as formas de relevo se constituem basicamente por colinas de topos amplos tabulares e convexos, com altimetrias predominantes entre 500 e 650 m e declividades variando entre 5 e 10%, sendo a litologia basicamente constituída por diabásios e arenitos. A rede de drenagem apresenta-se bem organizada, com padrão dendrítico, onde se destacam o rio Tietê e seus dois principais afluentes, os rios Piracicaba e Sorocaba.

3.1.1. Geomorfologia

A bacia do rio Sorocaba, de acordo com Perrota et al. (2005), é composta por diversas estruturas geológicas, com períodos de formação no Mesoproterozóico (Grupo Votuverava), Neoproterozóico (Formação Iporanga, Grupo São Roque e Magmatismo relacionado ao Orógeno Socorro-Guaxupé), Paleozóico (Grupo Itararé, Grupo Guatá e Grupo Passa Dois) e Holoceno do Cenozóico (Depósitos Aluvionares), conforme representado na Figura 2.

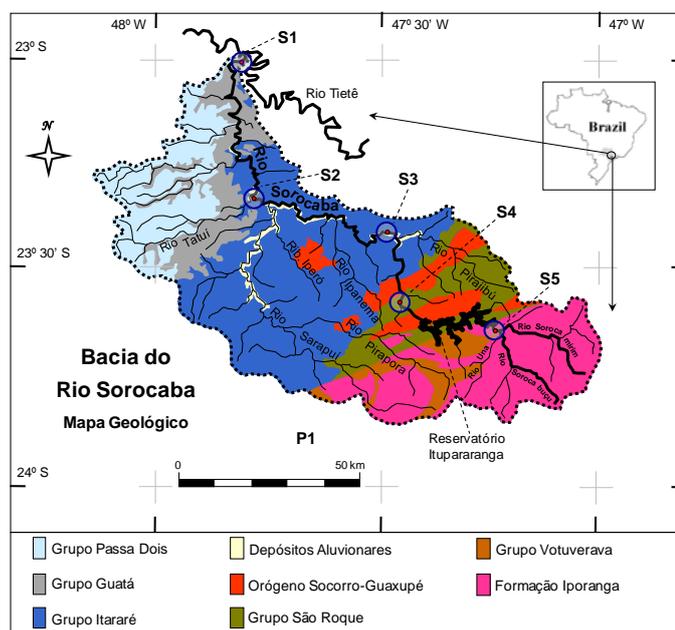


Figura 2 - Mapa Geológico da bacia do rio Sorocaba com suas unidades litoestratigráficas; sua rede de drenagem; as estações de amostragem fluvial: S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, (Modificado a partir de Perrota et al., 2005)

A bacia do rio Sorocaba foi dividida em três partes para melhor descrever as unidades estratigráficas principais presentes e sua distribuição percentual, em termos de área. Foram elas: oeste, central e leste; sendo a primeira e a segunda situadas na Província do Paraná e a terceira nas Províncias do Tocantins e Mantiqueira. Na porção oeste, Província do Paraná, encontram-se os Grupos Passa Dois, que representaram 13,13% da área da bacia, com as Formações Teresina (argilito, siltito e arenito), Serra Alta e Irati (ambos com folhelho, siltito e argilito); e o Grupo Guatá, com a Formação Tatuí (siltito e arenito). A parte central, ainda na Província do Paraná, encontra-se o Grupo Itararé (arenito, tilito, siltito e folhelho),

que representa 36,23% da área da bacia, uma pequena porção do Magmatismo relacionado ao Orógeno Socorro-Guaxupé (granito calcialcalino) e os Depósitos Aluvionares (areia, areia quartzosa, cascalheira, silte e argila), que apesar de representarem apenas 1,68% da área da bacia, merecem atenção por se encontrarem dispostos sob as calhas dos rios Sorocaba, Pirajibú e Sarapuí. Na parte leste encontram-se as Províncias Tocantins, com o Magmatismo relacionado ao Orógeno Socorro-Guaxupé (granito calcialcalino); e Mantiqueira, com os Grupos São Roque (metarenito, metassiltito e metargilito) e Votuverava (metarenito, metassiltito, metargilito e quartzo), representando 10,15% e 7,31% da área da bacia, respectivamente; e, a Formação Iporanga (granitos foliados), representando 16,28% da área da bacia, conforme Tabela 1 (PERROTA et al., 2005).

Tabela 1 - Distribuição percentual das unidades litoestratigráfica presentes na bacia do rio Sorocaba e respectiva área de ocorrência

Distribuição das unidades litoestratigráficas da bacia do rio Sorocaba		
Unidade Litoestratigráfica	%	km²
Grupo Passa Dois	13,13	691,98
Grupo Guatá	8,63	454,72
Grupo Itararé	36,23	1.908,96
Depositos Aluvionares	1,68	88,52
Magmatismo Orógeno Socorro-Guaxupé	6,58	346,78
Grupo São Roque	10,15	534,73
Grupo Votuverava	7,31	385,34
Formação Iporanga	16,28	857,98
TOTAL	100,00	5.269,00

3.1.2. Solos

A bacia do rio Sorocaba apresenta seis classes de solo (PERROTA et al., 2005; OLIVEIRA et al., 1999), com o predomínio de Argissolo Vermelho (47,91%) e Latossolo Vermelho (33,63%). Cabe destacar a presença de Latossolo Vermelho-Amarelo (10,67%) a leste da bacia, na região mais à montante onde estão os formadores do rio Sorocaba (Figura 3). Estas três classes de solos representam 92,21% da área total da bacia (Tabela 2).

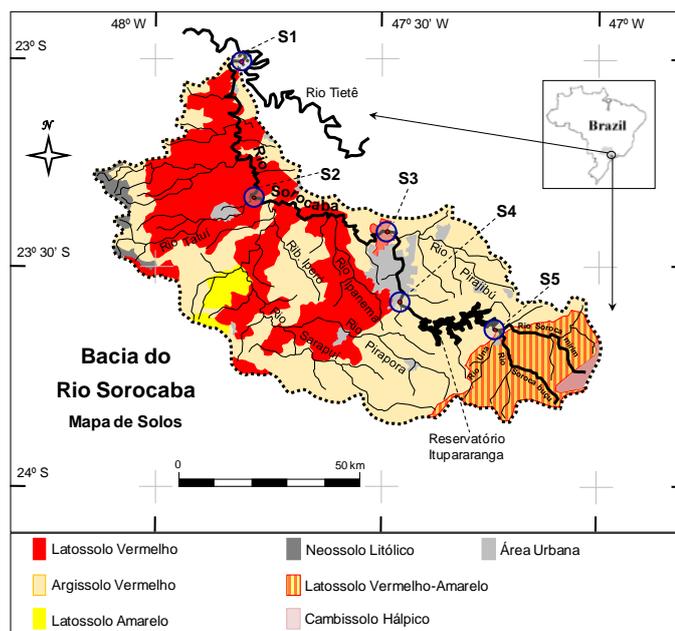


Figura 3 - Mapa de solos da bacia do rio Sorocaba; sua rede de drenagem; as estações de amostragem fluvial: S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna (Modificado a partir de Perrota et al., 2005; Oliveira et al. 1999)

Tabela 2 - Distribuição percentual das classes de solos presentes na bacia do rio Sorocaba e respectiva área

Distribuição das classes de solos na bacia do rio Sorocaba		
Classes de solos	%	Km ²
Argissolo vermelho	47,91	2.524,54
Latossolo vermelho	33,63	1.771,75
Latossolo vermelho-amarelo	10,67	562,15
Latossolo amarelo	1,89	99,69
Nessolo litólico	1,30	68,34
Cambissolo hálpico	0,79	41,62
Área urbana	3,81	200,91
TOTAL	100,00	5.269,00

A classe dos Argissolos compreende solos constituídos por material mineral com argila de atividade baixa e horizonte B textural (Bt) imediatamente abaixo do horizonte A ou E. (OLIVEIRA, 1999). Grande parte dos solos desta classe apresenta um evidente incremento no teor de argila do horizonte superficial para o horizonte B; apresentam profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados e de cores avermelhadas ou amareladas (EMBRAPA, 2006). A cor vermelha está

relacionada, especialmente nos solos de textura argilosa, à presença de solos originados de rochas básicas ou ricas em minerais ferromagnesianos, apresentando por isso, em geral, teores mais elevados em cátions trocáveis e em micronutrientes (OLIVEIRA, 1999).

Já a classe dos Latossolos compreende solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresenta mais de 150 cm de espessura (OLIVEIRA, 1999). Este horizonte B subsuperficial é característico, cujos constituintes evidenciam avançado estágio de intemperização, explícita pela alteração quase completa dos minerais primários menos resistentes ao intemperismo e/ou de minerais de argila 2:1, seguida de intensa dessilicificação, lixiviação de bases e concentração de sesquióxidos, argila do tipo 1:1 e minerais primários resistentes ao intemperismo. Em geral é constituído por quantidades variáveis de óxidos de ferro e de alumínio, minerais de argila 1:1, quartzo e outros minerais mais resistentes ao intemperismo (EMBRAPA, 2006). São solos com boa drenagem interna, mesmo nos de textura argilosa. O Latossolo Vermelho apresenta solos com matiz 2,5YR ou mais vermelho na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B e o Latossolo Vermelho Amarelo apresenta solos com matiz 5YR ou mais vermelhos e mais amarelos que 2,5YR na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (OLIVEIRA, 1999).

3.1.3. Vegetação

A vegetação original da bacia se mostra representada por matas, capoeiras, campos e cerrados, além da vegetação de várzea. A maior parte das formações originais foi retirada, tanto pela ocupação agrícola na Depressão Periférica quanto pelos processos de urbanização ao longo do território. Já no Planalto Atlântico é possível encontrar alguns municípios com percentuais expressivos de cobertura original de matas e capoeiras, como ocorre em Ibiúna (47,5%), Piedade (31,9%) (IPT, 2005).

3.1.4. Aspectos climáticos

De acordo com a classificação de Köppen, o clima é Cwa na área da Depressão Periférica e, Cwb nas áreas mais elevadas, isto é, com ocorrência de predomínio de chuvas de verão e estiagem de inverno. Para o período de 1958 a 2008 apresentou uma precipitação média anual de 1496 mm, com temperatura mínima e máxima de 10 a 33 °C, respectivamente, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (modificado de INMET, 2010).

3.1.5. Identificação e escolha dos pontos de amostragens fluviais pluvial

As estações de amostragem foram estabelecidas de acordo com sua representatividade hídrica e com base em estudo cartográfico da bacia do rio Sorocaba, conforme representado na Figura 1. Procurou-se identificar estradas e pontes para facilitar tanto o acesso quanto a coleta das amostras. A partir desta definição, as estações foram identificadas em campo e georreferenciadas com a utilização de um navegador GPS INFOSPACE (Figura 4).



Figura 4 - Identificação de rota e georreferenciamento de uma das estações de amostragem fluvial utilizando GPS INFOSPACE

Foram estabelecidas cinco estações de amostragem em pontes que cruzam o rio Sorocaba, em locais onde o canal do rio se apresentou retilíneo por pelo menos 100 metros, tanto a montante quanto a jusante da ponte, e bem encaixado em seu leito, facilitando a coleta de amostras bem como a obtenção de parâmetros para determinação das vazões pontuais.

Para a amostragem de águas pluviais foi escolhido um ponto representativo próximo a porção média da bacia sendo este no município de Sorocaba – SP, que fosse de fácil acesso e apresentasse uma estrutura adequada para a instalação, coleta e armazenamento das amostras.

3.2. Caracterização dos pontos de amostragem fluvial

3.2.1. S1 – Laranjal Paulista

A estação de amostragem S1- Laranjal Paulista está a aproximadamente 4 km da foz e corresponde ao exutório final da bacia do rio Sorocaba, localizada no km 172 da Rodovia Marechal Rondon (SP 300), no município de Laranjal Paulista (Lat. 23°03'53"S, Long. 47°49'13"O), integraliza o escoamento total de uma área de drenagem de 5.269 km² (DAEE/CTH, 2009).

De acordo com o Departamento de defesa agropecuária do estado de São Paulo (2007), a estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, sofre forte influência das atividades agrícolas, pois existe uma grande variedade produtiva com diferentes formas de manejo. As culturas que mais contribuem nessa área são as de milho, laranja e cana-de-açúcar, com 21 %, 16 % e 14 %, respectivamente.

A Figura 5 ilustra o rio Sorocaba na estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, no período de estiagem (A) e cheia (B e C).



Figura 5 - Estação de amostragem S1- Laranjal Paulista: o rio Sorocaba nos períodos de estiagem (A) e cheia (B e C); o rio Sorocaba sob a Rodovia Marechal Rondon, na zona rural de Laranjal Paulista

3.2.2. S2 – Tatuí

A estação de amostragem S2 - Tatuí localiza-se a aproximadamente 500 metros a montante da confluência com o rio Tatuí, próximo ao nº 589 da Rua Laurindo Marques, continuação da Estrada do Bairro de Americana, no município de Tatuí (Lat. 23°19'09"S, Long. 47°46'44"O). Esta estação abrange uma área de drenagem de 3.942 km² (DAEE/CTH, 2009), representando 74,8 % da área total da bacia do rio Sorocaba e integra os principais afluentes da margem esquerda do rio Sorocaba, com as sub-bacias dos rios Sarapuí e Ipanema (Figura 1).

O Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE/CTH monitora a vazão do rio Sorocaba neste ponto, com dados diários desde 1940, através de régua limnimétrica e, mais recentemente, com um limnígrafo instalado à margem esquerda do rio Sorocaba. Além das informações de vazão diária fornecidas pelo DAEE/CTH, a partir dos dados do limnígrafo, a leitura da régua limnimétrica e posterior cálculo com a curva chave (DAEE/CTH, 2009), têm servido para comparação e validação dos cálculos de vazão feitos para a estação de amostragem a partir dos dados de velocidade e área da seção medidos a cada excursão. A Figura 6 ilustra o rio Sorocaba na estação de amostragem S2 – Tatuí (A), a ponte utilizada para a coleta de amostras (B), a régua limnimétrica (C) e o limnígrafo (D), instalados pelo DAEE/CTH, e o rio Sorocaba nos períodos de cheia (E) e estiagem (F).



Figura 6 - Estação de amostragem S2 – Tatuí: rio Sorocaba no bairro de Americana Velha, em Tatuí (A), ponte utilizada na amostragem (B), régua limnimétrica (C) e limnígrafo do DAEE/CTH (D), e o rio Sorocaba nos períodos de cheia (E) e estiagem (F)

De acordo com o DEPRN/SMA (1990), este ponto de coleta apresenta 6 % de cobertura vegetal, e caracteriza-se por ser uma área com grande influencia de áreas agricultáveis tendo como principal afluente o rio Tatuí.

3.2.3. S3 – Itavuvú

A estação de amostragem S3 – Itavuvú localiza-se no km 2 da Rodovia Emerenciano Prestes de Barros (SP - 097), no município de Sorocaba (Lat. 23°26'03"S, Long. 47°31'00"O), apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 1607 km², calculada a partir de levantamento cartográfico, e representa 30,5% da área total da bacia do rio Sorocaba.

Esta estação localiza-se a jusante da confluência do rio Pirajibú, principal sub-bacia da margem direita do rio Sorocaba, e das zonas urbanas dos municípios de Sorocaba e Votorantim, que apresentam juntas uma população de 659.058 habitantes (IBGE, 2010), que corresponde a 56,7 % do total da população da bacia em estudo. Esta estação integra, a princípio, a influência antrópica urbana mais representativa da bacia do rio Sorocaba. A Figura 7 ilustra o rio Sorocaba na estação de amostragem S3 - Itavuvú (A), a ponte utilizada para a coleta de amostras (B) e a realização da batimetria da seção transversal do canal (C), e os períodos de cheia (D) e estiagem (E), no respectivo ponto de coleta.



Figura 7 - Estação de amostragem S3 - Itavuvú: rio Sorocaba em Itavuvú (A), ponte utilizada na amostragem (B) e batimetria da seção transversal do canal (C) e o rio Sorocaba nos períodos de cheia (D) e estiagem (E)

De acordo com o DEPRN/SMA, (1990) este ponto de coleta apresenta-se com uma cobertura vegetal em torno de 14%, ou seja, uma área com ações antrópicas, mas com fragmentos de matas ainda consideráveis.

3.2.4. S4 – Votorantim

A estação de amostragem S4 – Votorantim localiza-se na altura do nº 35 da Rua Ovídio Godinho, em Votorantim (Lat. 23°32'41"S, Long. 47°26'47"O), apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 1.040 km² (DAEE/CTH, 2009) representando 19,7% da área total da bacia do rio Sorocaba.

Esta estação localiza-se a jusante do reservatório de Itupararanga e a montante da mancha urbana de Votorantim e Sorocaba. A Figura 8 ilustra o rio Sorocaba na estação de amostragem S4 – Votorantim, a ponte utilizada para a coleta de amostras (A) e a realização da batimetria da seção transversal do canal (B), e o rio Sorocaba nos períodos de cheia e estiagem (C e D).



Figura 8 - Estação de amostragem S4 - Votorantim: rio Sorocaba na cidade de Votorantim (A), ponte utilizada na amostragem e batimetria da seção transversal do canal (B), e o rio Sorocaba nos períodos de cheia e estiagem (C e D)

De acordo com o DEPRN/SMA, 1990, este ponto de coleta apresenta-se com uma cobertura vegetal em torno de 13,5%. De todos os municípios presentes na bacia de drenagem, 87% não apresentam sistemas de tratamento de esgoto, comprometendo muito a qualidade da água da bacia do rio Sorocaba.

3.2.5. S5 – Ibiúna

A estação de amostragem S5 – Ibiúna localiza-se no km 10,5 da Estrada Municipal para Mairinque, em Ibiúna (Lat. 23°38'07"S, Long. 47°13'23"O), apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 680 km², calculada a partir de levantamento cartográfico, e representa 12,9% da área total da bacia do rio Sorocaba.

Esta estação localiza-se a montante do reservatório de Itupararanga e integra os rios Sorocamirim e Sorocabuçu, formadores do rio Sorocaba. É o ponto mais próximo às nascentes e aos contrafortes ocidentais da Serra do Mar, representando a região mais preservada da bacia em estudo. De acordo com o DEPRN/SMA (1990), este ponto de coleta apresenta-se com uma cobertura vegetal em torno de 60%, caracterizando-se por ser uma área ainda bastante preservada e com moderada influencia antrópica. A Figura 9 ilustra o rio Sorocaba na estação de amostragem S5 - Ibiúna (A) no período de estiagem e a ponte utilizada para a coleta de amostras (B), bem como a rio Sorocaba no período de cheia (C,D e E).



Figura 9 - Estação de amostragem S5 – Ibiúna: rio Sorocaba na zona rural de Ibiúna no período de estiagem (A), ponte utilizada na amostragem (B), e o período de cheia do rio Sorocaba (C, D e E), na região das cabeceiras

3.3. Caracterização do ponto de amostragem pluvial

A estação de amostragem de águas pluviais foi instalada próxima à zona urbana de Sorocaba, nos fundos de uma chácara situada na Rua Santa Alves de Almeida nº 29 (Lat. 23°26'48"S, Long. 47°29'44"O) (Figura 10). Este local foi escolhido tendo em vista a presença diária de uma pessoa para a coleta e armazenamento das amostras e por estar na parte central da bacia de drenagem, que se mostrou adequado e representativo para a bacia de drenagem, de acordo com estudos preliminares de séries históricas de precipitação dos últimos 25 anos.



Figura 10 - Estação de amostragem de água pluviais instalado na parte média da bacia do rio Sorocaba

Foi instalado para tal, um modelo de pluviômetro (Figura 11) desenvolvido por Mortatti (1995) composto por um funil de plástico de 20 cm de diâmetro interno, protegido por tela de plástico. Para a sua fixação utilizou uma haste de ferro a 1,27m. Este tipo de coletor também foi utilizado por Fernandes (2008) e Vendramini (2009).



Figura 11 - Esquema do coletor utilizado, desenvolvido por Mortatti (1995)

Nas proximidades do local escolhido para instalar o pluviômetro, existe uma estação pluviométrica (Lat. 23°25'27"S, Long. 47°24'27"O) monitorada diariamente pelo DAEE/CTH, denominada de Éden E4-128. Os dados diários de chuva para o período de estudo foram fornecidos pelo DAEE/CTH (2011).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais e equipamentos utilizados

- Amostrador pontual de águas fluviais e sedimentos em suspensão de estágio simples
- Cromatógrafo iônico ICS-90 – Dionex
- Espectrômetro de Emissão Atômica Acoplado Indutivamente ICP-OES, Optima 3000
- Estufa de Secagem com Circulação de Ar
- Freezer para conservação das amostras
- Medidor de Oxigênio Dissolvido Digital Portátil
- Medidor de pH Digital Portátil
- Medidor Digital de Condutividade e Temperatura Portátil
- Microcomputador e impressora
- Medidor digital de fluxo do tipo Micromolinete Global Water FP101
- Vidraria convencional de laboratório
- Frascos de vidro (100 ml) para armazenamento de amostras $DBO_{5,20}$
- N_2 , gás inerte Air Liquide
- Sais para preparo de soluções e padrões para cromatografia iônica:

Nitrato de amônio (NH_4NO_3), p.a.;

Cloreto de Cálcio ($CaCl_2$), p.a.;

Cloreto de Lítio (LiCl), p.a.;

Fluoreto de Sódio (NaF), p.a.;

Nitrito de Sódio ($NaNO_2$), p.a.;

Brometo de Sódio (NaBr), p.a.;

Fosfato de Sódio (NaH_2PO_4), p.a.;

Sulfato de Sódio (Na_2SO_4), p.a.;

Cloreto de Sódio (NaCl), p.a.;

Cloreto de Potássio (KCl), p.a.;

Bicarbonato de Sódio (NaHCO₃), p.a.;

Carbonato de Sódio (Na₂CO₃), p.a.;

Cloreto de Magnésio (MgCl₂), p.a.;

Acetato de Sódio (NaCH₃COO), p.a.

Ácido Sulfúrico (H₂SO₄), p.a.;

Ácido metanossulfônico (CH₄O₃S), p.a.;

Tetrabutílhidróxidoamônio TBAOH, p.a.

- Sacos plásticos para acondicionamento de amostras de solos
- Frascos de polietileno para acondicionamento das amostras (100, 500, 1000 mL)
- Sistemas de filtração manual à vácuo
- Filtros de membrana celulose 0,45 µm (47mm)
- Pinças metálicas
- Microbureta (2 mL) para micro titulação de Gran
- Barraca (acessório das coletas em dias de chuva)
- Tesoura
- GPS (Garmin ETREX)
- Facão
- Galão de água deionizada (5L)
- Picetas
- Tesoura
- Trena (20m)
- Cronômetro
- Flutuador para medida da vazão
- Mapas da estrada e da bacia com rotas dos pontos de coleta

4.2. Protocolo de Amostragem e Analítico

No presente estudo foram realizadas amostragens de sedimento fino em suspensão (FSS), águas superficiais e as medidas de vazões durante o período de março a dezembro de 2009 e de janeiro a setembro de 2010. Já as amostragens de águas pluviais foram realizadas no período de maio de 2009 a setembro de 2010 e as de solos foi efetuada na 13ª excursão realizada na bacia do rio Sorocaba, SP, no dia 30/03/2010 em três pontos representativos para cada tipo diferente de solo escolhidos aleatoriamente.

4.2.1. Águas fluviais e $DBO_{5,20}$

As amostragens de águas fluviais foram realizadas nas 5 estações de amostragens e coletadas nas margens esquerda e direita e no eixo principal da corrente do rio, a 1,5 m de profundidade, utilizando um amostrador pontual de estágio simples, adaptado por Mortatti (1995) para rios de médio porte, sendo compostas posteriormente para maior representatividade da estação amostrada (Figura 12).

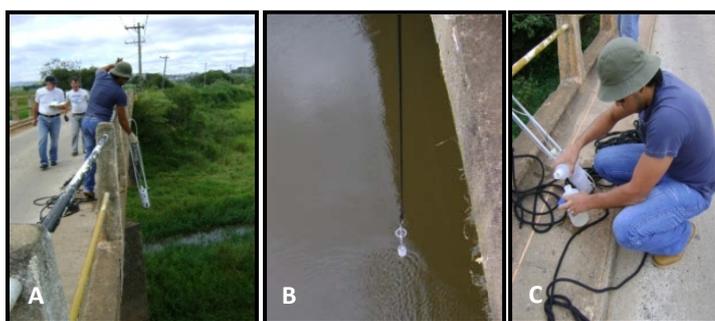


Figura 12 - Coleta de amostra de águas fluviais: lançamento do amostrador (A), coleta da amostra (B), transferência para frasco de armazenagem (C)

Em cada estação de amostragem foram coletados dois frascos de polietileno de 500 mL de amostra bruta e um frasco de polietileno de 1 L de amostra preservada (1 mL de H_2SO_4 concentrado por litro de amostra), devidamente identificados e mantidos sob refrigeração a 4° C até serem processadas as

respectivas análises químicas no laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP).

As amostras foram filtradas em membranas de celulose 0,45 μm (47 mm de diâmetro) e conduzidas para determinação do HCO_3^- representado pela alcalinidade total, aplicando o método de micro titulação de Gran (EDMOND, 1970). Parte do mesmo filtrado, cerca de 100 mL, foi destinado ao cromatógrafo iônico DIONEX para determinação dos principais íons dissolvidos Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- e NO_2^- .

Também foram coletadas 200 mL de águas fluviais por estação de amostragem, a cada excursão, para a análise da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), conforme proposto por CETESB (2008). A amostragem foi realizada com a introdução de um frasco de vidro de 200 mL no interior de um copo de PVC de 1 L e o conjunto lançado no eixo da corrente. O frasco foi fechado com volume completo, sem bolhas de ar, e armazenados sob refrigeração até serem processadas. A amostra foi conduzida ao laboratório de Isótopos Estáveis e incubadas a 20°C por 5 dias, após medida do O_2 dissolvido inicial. Decorrido o tempo de incubação, novas medidas foram realizadas e a concentração de O_2 foi determinada. A DBO é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável (Maier, 1978).

4.2.2. Sedimentos em suspensão

As concentrações dos sedimentos finos em suspensão foram determinadas por gravimetria, com a utilização de filtragem manual a vácuo das amostras compostas, com filtros de membrana celulose 0,45 μm (47 mm de diâmetro) pré-pesados, após secagem em estufa a 60°C até peso constante (Figura 13).

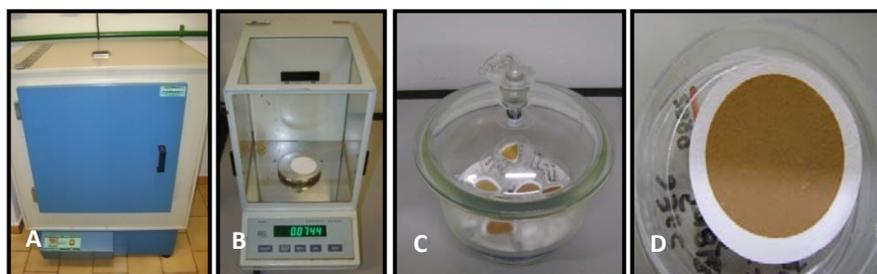


Figura 13 - Gravimetria: estufa (A), pré-pesagem do filtro (B), filtro + amostra secos (C e D)

Para a análise mineralógica do sedimento fino em suspensão foram coletados 30 L de amostra bruta na estação de amostragem em Laranjal Paulista, foz da bacia em estudo, no período da cheia. O galão de 30 L foi preenchido até sua capacidade total com o auxílio de um balde graduado de polietileno com capacidade para 20 L e encaminhado para processamento em laboratório (Figura 14).



Figura 14 - Coleta de 30 L de amostra bruta de águas fluviais: Coleta da amostra (A) e transferência para a bombona (B)

Foi realizada a decantação dos 30 L de amostras fluviais, sifonamento, secagem do sedimento por 24 horas à 60°C, moagem em almofariz de ágata e separação em peneira de nylon 63 μm .

4.2.3. Águas pluviais

As amostragens de águas de chuva foram realizadas no período de 15/05/2009 a 17/07/2010, com um pluviômetro descrito no item 3.3. Todas as amostras foram acondicionadas em frascos de 100 mL devidamente identificadas com a data de coleta e mantidas sob refrigeração a 4°C até o transporte para o laboratório. Para uma melhor representatividade das amostras, foram consideradas somente precipitações superiores a 5 mm, pois estas apresentaram volume suficiente para realização das análises envolvidas, de acordo com Fernandes (2008) e Vendramini (2009). Em laboratório as amostras de águas pluviais foram filtradas em membrana celulose 0,45 μm e parte do filtrado, cerca de 50 mL, foi encaminhado ao cromatógrafo iônico DIONEX para determinação dos principais íons dissolvidos Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- e NO_2^- , e também o HCO_3^- representado pela alcalinidade total, aplicando o método de micro titulação de Gran (EDMOND, 1970).

4.2.4. Solos

A densidade do solo foi determinada de acordo com o método “core” (BLAKE; HARTGE, 1986) para as três principais classes de solos presentes na bacia de drenagem, conforme descrito no item 3.1.2. Para tal determinação foram coletadas amostras indeformadas de solo, em triplicata, sempre a 10 cm de profundidade, utilizando cilindros metálicos com 75 mm de diâmetro e 50 mm de altura, preservando o volume interno dos mesmos. Após determinação do peso das amostras de solo, previamente secas em estufa a 105 °C até peso constante foi calculada a densidade em função do volume interno do cilindro. Foram coletadas amostras nas regiões de cabeceiras, no ponto médio da bacia e na foz, representado respectivamente pelos latossolo vermelho-amarelo, argissolo vermelho e latossolo vermelho.

5. CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA

5.1. Fluviometria: batimetria, medida da velocidade da água e vazão

A área úmida da seção transversal (batimetria) foi determinada com o auxílio do software WinXPRO 3.0, que simula a morfologia do leito do canal e fornece a área da seção, alimentado com dados tipo ordenadas, largura do canal e profundidade. Esses dados foram obtidos com o auxílio de uma trena e uma corda com lastro; após medir a largura do canal sobre a ponte onde se localiza a estação de amostragem, e as distâncias pré-determinadas para cada estação foi feita a medida da altura da lamina d'água. A velocidade média do fluxo de água foi estabelecida a partir da média dos valores observados a 20% e 60% da altura da lâmina d'água, medidos nas margens esquerda e direita e no eixo da corrente com a utilização de um molinete digital da Global Water FP 101 (Figura 15).



Figura 15 - Molinete utilizado para medição das velocidades médias do fluxo de água nas estações de amostragem

Já as vazões para as estações de amostragem, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, medidas a cada excursão, foram obtidas a partir do produto entre a área úmida da seção transversal do canal (m^2) e a velocidade média do fluxo de água que passa por essa seção (m s^{-1}).

Adicionalmente, para a estação S2 – Tatuí, a cada excursão foi realizada a leitura da régua limnimétrica e posterior cálculo da vazão com a utilização da curva-chave estabelecida pelo DAEE/CTH (2008).

5.2. Relacionamento vazão x precipitação

Os regimes pluviométrico e fluviométrico da bacia do rio Sorocaba no período de 1990 a 2008 foram caracterizados a partir de dados diários fornecidos pelo Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos, DAEE/CTH (2011), para as estações Iperó (23°20'S, 47°41'O) e Laranjal Paulista (23°01'S, 47°48'O), respectivamente.

A escolha dessas estações levou em consideração a disponibilidade de dados confiáveis para o período de estudo e a sua representatividade na bacia de drenagem, estando à primeira localizada na porção média e a segunda próxima à foz do rio Sorocaba, entendida como integradora de todos os processos que ocorrem na bacia de drenagem.

5.3. Separação do hidrograma de cheia

A caracterização hidrológica da bacia do rio Sorocaba foi avaliada mediante os dados de precipitação obtida junto ao banco de dados do DAEE/CTH (2011), para o período de 1984 a 2008.

No presente estudo, a separação do hidrograma de cheia foi realizada de acordo com a metodologia estatística de emprego de filtros numéricos desenvolvida por Hino & Hasebe (1981), e aplicada por Mortatti (1997), Bortoleto Junior (2004), Vendramini (2008) e Fernandes et al. (2009), para uma série de dados diários de vazão.

Esta técnica consiste na análise estatística de uma série temporal de vazões utilizando um filtro numérico de separação de alta frequência, permitindo somente a passagem dos sinais de baixa frequência. O método foi aplicado para um modelo de 2 reservatórios fluviais: o escoamento superficial rápido e o escoamento de base ou subterrâneo (PILGRIM et al., 1979; HOOPER; SHOEMAKER, 1986; ROBSON; NEAL, 1990).

Esse filtro numérico estabelecido para uma série temporal de vazões (Q_t) foi expresso como uma equação de filtro de 1ª ordem, conforme Equação 1:

$$Qn_{(t)} = \alpha \left((B \times Qn_{(t-1)}) + A \times Qt_{(t)} \right) \quad (1)$$

Onde: $Qn_{(t)}$ corresponde à vazão do fluxo de base ou subterrâneo filtrado para o tempo t ; α é o fator de ponderação escolhido de modo a evitar os sinais negativos e que está associado, em termos de sensibilidade de cálculo, ao valor de escoamento superficial rápido mínimo igual a zero; $Qt_{(t)}$ é a vazão total no tempo t ; A e B são constantes expressas de acordo com as Equações 2 e 3:

$$A = \frac{e^{\left(\frac{1}{Tc}\right)}}{Tc} \quad (2)$$

$$B = \frac{\Delta t}{Tc} \quad (3)$$

Onde: Δt o intervalo de tempo (base temporal dos dados da série de vazão) e Tc o período da função de separação que representa a constante de tempo do filtro.

O Tc pode ser calculado estatisticamente, através da análise de séries temporais de Fourier, com determinação da frequência de corte (f_c) da série de vazões após análise de periodograma, de acordo com a Equação 4:

$$Tc = \frac{1}{(2\pi f_c)} \quad (4)$$

Como em um modelo de dois compartimentos, o escoamento total representa a soma dos escoamentos superficial rápido e subterrâneo. O cálculo do escoamento superficial rápido pode ser expresso pela Equação 5:

$$Qr = Qt - Qn \quad (5)$$

De acordo com Mortatti et al. (2004), tal metodologia permite, de forma bastante simples, separar o hidrograma de cheia num modelo de dois reservatórios, identificando as componentes do escoamento total (Q_t): superficial rápido (Q_r) e

subterrâneo (Q_n) e seus coeficientes de escoamento K_r e K_n , expressas de acordo com as Equações 6 e 7, respectivamente.

$$K_r = \frac{Q_r}{Q_t} \quad (6)$$

$$K_n = \frac{Q_n}{Q_t} \quad (7)$$

A variabilidade do escoamento superficial rápido (ΔQ_r), em base anual, pode ser calculado de acordo com a Equação 8:

$$\Delta Q_r = \frac{(Q_{ra} - Q_{ra_{m\u00e9dio}})}{Q_{r_{m\u00e9dio}}} \quad (8)$$

Onde: Q_{ra} é o escoamento rápido superficial médio anual e $Q_{ra_{m\u00e9dio}}$ é o escoamento rápido superficial médio para o intervalo de 25 anos.

6. CARACTERIZAÇÃO CARGA DISSOLVIDA FLUVIAL

6.1. Parâmetros físico-químicos

Os principais parâmetros físico-químicos associados à qualidade da água como pH, condutividade elétrica (CE), oxigênio dissolvido (OD) e temperatura foram avaliados nas águas fluviais dos 5 pontos de amostragem da bacia do rio Sorocaba e analisados em campo, imediatamente após as coletas, utilizando equipamentos portáteis (Figura 16).



Figura 16 - Medição dos parâmetros físico-químicos em campo (A, B e C)

6.2. Concentrações das espécies químicas fluviais e equilíbrio iônico

As concentrações de todas as espécies químicas foram normalizadas pelas vazões obtidas nos dias de amostragem de acordo com a equação 9 (KATTAN, 1989).

$$C_{MNQ} = \frac{\sum(Q_i \cdot C_i)}{\sum(Q_i)} \quad (9)$$

Onde: C_{MNQ} é a concentração média das espécies químicas (mg L^{-1}) normalizadas pela vazão; Q_i é a concentração medida no dia da amostragem ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); C_i é a concentração medida para cada dia de amostragem (mg L^{-1}) e $\sum Q_i$ é a somatório das vazões dos dias de amostragens ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

A partir das análises químicas realizadas foi possível verificar o equilíbrio iônico das águas fluviais, utilizando a razão entre as somas de cátions (Σ^+) e a soma de ânions (Σ^-), expresso de acordo com a equação 10.

$$\frac{\Sigma^+}{\Sigma^-} = 1 \quad (10)$$

Através das razões entre o C_{MNQ} (equação 9) em base molar e sólidos totais dissolvidos (TDS) foi determinada a porcentagem de cada espécie química na bacia do rio Sorocaba, de acordo com Peray (1998) e evidenciado na equação 11.

$$X = \frac{C_{MNQ}}{TDS} \times 100 \quad (11)$$

Onde: X é a abundância relativa da espécie química em %; C_{MNQ} é concentração média normalizada pela vazão e TDS representa a concentração de sólidos totais dissolvidos.

6.3. Variabilidade Temporal e Espacial das Vazões e Concentrações

Um dos parâmetros importantes na caracterização hidroquímica fluvial da bacia de drenagem do rio Sorocaba foi o estudo da evolução temporal das concentrações das diversas espécies químicas dissolvidas em função das vazões medidas, procurando verificar em qual fase da hidrógrafa a concentração é mais pronunciada. A variabilidade espacial das concentrações permitiu verificar qual o comportamento de cada espécie química estudada ao longo das cinco estações de amostragem.

6.4. Relacionamento concentração-vazão

O estudo do relacionamento concentração-vazão permitiu identificar os principais processos dinâmicos de interesse entre as espécies químicas dissolvidas e os aspectos de diluição fluvial. Tal interação foi duplamente modelada, de acordo com a evolução da vazão medida no dia da amostragem, ou seja, os pontos observados foram ajustados através de regressão bi-logarítmica ou de potência,

clássica para os médios e grandes rios e também comparadas com a curva de diluição teórica, calculada para cada espécie.

A curva de diluição teórica, foi expressa por meio da equação 12, de acordo com o procedimento descrito por Probst et al. (1992) e Mortatti (1995). Quanto maiores forem os valores de vazão, menores serão os valores de concentração, devido à diluição da espécie química, e vice-versa.

$$C_i = \frac{C_{\max} \cdot Q_{\min}}{Q_i} \quad (12)$$

Onde: C_i é a concentração de uma espécie química na curva de diluição; C_{\max} é a concentração máxima observada, da espécie química; Q_{\min} é a vazão mínima observada e Q_i é a vazão do dia da amostragem.

A comparação entre os pontos de concentração observados e a curva de diluição teórica permitiu distinguir os aportes de origem pontual daqueles de origem difusa, relacionados principalmente com processos de alteração de rochas na bacia de drenagem e influências antrópicas.

A partir das relações concentração-vazão e seus modelos de potência, obtidos para cada espécie química de interesse por estação de amostragem foi possível estabelecer seus respectivos modelos de transporte fluvial, total (T) e específico (T_E).

6.5. Matriz dos coeficientes de correlação

As principais espécies químicas analisadas nas águas fluviais durante o período de amostragem para a bacia de drenagem do rio Sorocaba, em suas respectivas estações de amostragem, foram correlacionadas entre si, formando uma matriz de correlação, podendo verificar possíveis comportamentos análogos e interdependentes.

6.6. Diagramas ternários aplicados a águas fluviais

Numa análise complementar da caracterização hidroquímica fluvial quanto aos aspectos qualitativos, às concentrações das diversas espécies químicas foram dispostas em diagramas ternários. Tais diagramas são aplicações gráficas que indicam a porcentagem de uma determinada amostra com respeito às espécies químicas situadas nos vértices do triângulo. Quanto mais próxima de um determinado vértice estiver a amostra, maior será a porcentagem de concentração naquele ponto, relativo à espécie química do vértice.

No caso do rio Sorocaba, tais diagramas ternários foram aplicados aos íons majoritários, como os cátions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e os ânions HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} e Cl^- . Desta forma, através da observação das nuvens de pontos obtidas, verificou-se os íons mais significativos existentes nessas águas fluviais fornecendo as principais características minerais das mesmas.

6.7. Transporte fluvial das espécies químicas dissolvidas

6.7.1. Método estocástico e determinístico

Os transportes fluviais das principais espécies químicas dissolvidas na bacia do rio Sorocaba foram avaliados de acordo com os métodos estocástico e determinístico, classicamente utilizados para este fim.

O método estocástico, sugerido por Probst (1992) e utilizado por Mortatti et al. (1997), permite o cálculo do transporte para uma determinada espécie química, envolvendo a concentração normalizada pela vazão e as vazões diárias do período de amostragem, de acordo com a equação 13:

$$T = \left[\frac{\sum(Q_i \cdot C_i)}{\sum Q_i} \right] \cdot Q \cdot 31,536 \quad (13)$$

Onde: T é o transporte fluvial da espécie química, expresso em t a^{-1} ; Q_i é a vazão medida no dia da amostragem; C_i a concentração medida para cada dia de amostragem e $\sum Q_i$ é a somatória das vazões dos dias de amostragem; Q é a vazão

média diária para o período total de amostragem; e o fator 31,536 corresponde à correção da massa e do tempo no cálculo do transporte fluvial em toneladas anuais.

Os transportes fluviais específicos, para cada espécie química, expressos em $t.km^{-2}.a^{-1}$, foram calculados de modo similar (equação 13), ponderando pela área de drenagem a montante da estação de amostragem, conforme pode ser observado na equação 14:

$$T_E = \frac{T}{A} \quad (14)$$

Onde: A representa a área de drenagem a montante da estação de amostragem (km^2).

Este método foi aplicado para calcular as cargas dissolvida e particulada transportadas fluvialmente.

O método determinístico proposto por Kattan et al. (1987) tem por base os modelos gerados pelo relacionamento concentração – vazão para as principais espécies químicas. Tal relacionamento estabelece um modelo de ajuste de curvas do tipo potência ou bi-logarítmico de acordo com a Equação 15:

$$C = a Q^b \quad (15)$$

Onde: C é a concentração de determinada espécie química ($mg L^{-1}$); “a” é uma constante; Q é a vazão da água fluvial para uma determinada concentração da espécie química ($m^3 s^{-1}$) e “b” é o expoente da função.

O cálculo do transporte fluvial da carga dissolvida (T_D , em $g s^{-1}$) de acordo com o método proposto foi realizado a partir da integração da função bilogarítmica (Equação 15), considerando os limites de concentração observados, conforme pode ser verificado na Equação 16:

$$T_D = \left[\int_{Q_{min}}^{Q_{max}} a Q^b dQ - C_{min}(Q_{max} - Q_{min}) \right] f \quad (16)$$

Onde: Q_{max} e Q_{min} representam a maior e a menor vazão observada no período em estudo, respectivamente, C_{min} é a menor concentração observada e f o fator de correção da massa e do tempo no cálculo do transporte fluvial, sendo igual a 86,4 na transformação de $g s^{-1}$ para $kg d^{-1}$.

7. APORTES ATMOSFÉRICOS TOTAIS

A influência dos aportes atmosféricos totais na carga dissolvida da bacia do rio Sorocaba foi estimada através das análises das espécies químicas principais nas águas pluviais. As amostras de chuvas foram coletadas conforme descrito no item 4.2.2. No presente estudo as concentrações médias das espécies químicas (C_{MNP}) foram normalizadas em função da quantidade de precipitação no dia da amostragem por meio da equação 17 (BORTOLETTO JUNIOR, 1999).

$$C_{MNP} = \left[\frac{\sum P_i \cdot C_i}{\sum P_i} \right] \quad (17)$$

Sendo: C_{MNP} a concentração médias das espécies químicas normalizadas pela vazão (mg L^{-1}); P_i é a precipitação no dia da amostragem (mm); C_i a concentração medida para cada dia de amostragem (mg L^{-1}) e $\sum P_i$ é o somatório das precipitações nos dias de amostragem.

Os cálculos do transporte total (T_P) e específico (T_{PE}) foram realizados de acordo com o método estocástico, conforme as equações 18 e 19:

$$T_P = C_{MNP} \cdot P \cdot A \quad (18)$$

$$T_{PE} = \frac{T_P}{A} \quad (19)$$

Sendo: T_P o transporte pluvial total de cada espécie química (t a^{-1}); C_{MNP} é a concentração média de cada espécie química normalizada pela precipitação (mg L^{-1}); P é a precipitação média anual (mm a^{-1}) e A é a área da bacia de drenagem em estudo (km^2); T_{PE} o transporte específico de cada espécie química ($\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$).

As influências dos aportes atmosféricos totais nas cargas dissolvidas da bacia de drenagem do rio Sorocaba foram obtidas em função do relacionamento entre os transportes pluvial e fluvial, e expresso em porcentagem, de acordo com a equação 20 (BORTOLETTO JUNIOR, 2004).

$$Aporte = \frac{T_{pluvial}}{T_{fluvial}} \cdot 100 \quad (20)$$

Onde: $T_{pluvial}$ é o transporte pluvial total em t a^{-1} ; $T_{fluvial}$ é o transporte total em t a^{-1} , calculado para o período em estudo.

8. CARACTERIZAÇÃO CARGA PARTICULADA FLUVIAL

8.1. Dinâmica do sedimento fino em suspensão (FSS)

A quantificação do sedimento fino em suspensão (FSS) foi realizada para o período de março de 2009 a setembro de 2010, individualizado por excursão e estação de amostragem, utilizando o método gravimétrico, de acordo com a Equação 21:

$$C_{FSS} = \frac{m_f - m_i}{V_L} \quad (21)$$

Onde: C_{FSS} é a concentração de FSS (mg L^{-1}); m_f a massa final do filtro (mg); m_i a massa inicial filtro (mg) e V_L o volume filtrado (L).

Calculou-se também a concentração média do FSS, obtida com a normalização dos valores de cada concentração pela respectiva vazão e divisão pela soma total das vazões (Equação 22), de acordo com o procedimento estabelecido por Probst (1992), e o respectivo desvio padrão da média normalizada pela vazão (Equação 23).

$$C_{MNQ} = \frac{\sum(Q_i \times C_i)}{\sum Q_i} \quad (22)$$

Onde: C_{MNQ} é a concentração média de FSS normalizado pela vazão (mg L^{-1}); Q_i a vazão medida no dia de amostragem ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); C_i a concentração de FSS para o dia de amostragem e $\sum Q_i$ o somatório das vazões medidas nos dias de amostragens ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

$$DP_{MNQ} = \sqrt{\frac{\sum(C_i - C_{MNQ})^2 \times Q_i}{\sum Q_i - 1}} \quad (23)$$

Onde: DP_{MNQ} é o desvio padrão da C_{MNQ} (mg L^{-1}).

8.1.1. Variabilidade temporal das concentrações de FSS

A caracterização da carga particulada fluvial da bacia de drenagem do rio Sorocaba foi realizada através do estudo da variabilidade temporal das concentrações de FSS em função das vazões medidas.

8.1.2. Relacionamento concentração - vazão de FSS

O relacionamento foi realizado entre as concentrações de FSS e as vazões medidas para cada dia de amostragem, sendo utilizado o modelo bi-logarítmico que melhor se ajustou ao comportamento dos dados obtidos. Para tal procedimento, utilizou-se o FSS obtido das coletas de amostras de águas fluviais na bacia de drenagem durante o período estudado.

8.1.3. Composição química e mineralógica do FSS

No presente estudo, o procedimento adotado para perda ao fogo, representado pela matéria orgânica (MO), foi realizado pesando-se cerca de 100 mg de solo moído (<63 μm) em cadinho de platina dopado em ouro, pré-pesado, e conduzindo-os a calcinação a 1000°C por 60 min.

Para a realização da extração total pelo método da fusão alcalina (SAMUEL et al., 1985), as amostras provenientes da calcinação foram homogeneizadas juntamente com 200 mg de LiBO_2 (metaborato de lítio) e 400 mg de LiB_4O_7 (tetraborato de lítio) e fundidas a 1000°C por 30 min. Após o resfriamento, o material fundido foi solubilizado com 20 mL de HCl 1 M, a uma temperatura de 40°C. Após a dissolução do material fundido, completou-se o volume para 100 mL com água deionizada, armazenando as amostras em frascos de polietileno a uma temperatura de 4°C até análise no ICP- OES.

Para controle da qualidade analítica e do processo de extração foi utilizado o material de referência internacional Soil-7 (IAEA), sendo obtidos os seguintes percentuais médios de recuperação para extração e análise em triplicata: Si (91,7%), Al (90,1%), Fe (107,3%), Mn (101,2%), Cu (94,1%), Co (95,3%), Cr (92,3%),

Zn (103,0%), Ni (97,4%), Pb (107,1%), Sr (105,4%), Sc (98,2%), Ca (92,3%), Mg (89,7%), Na (89,2%) e K (91,0%).

A determinação da composição mineralógica das frações finas dos sedimentos em suspensão, na foz do rio Sorocaba, foi obtida por difração de raios-X com a utilização do equipamento Philips PW 1877, junto ao NUPEGEL/ESALQ/USP.

8.1.4. Degradação física da bacia do rio Sorocaba

O grau de degradação física da bacia de drenagem do rio Sorocaba foi expresso em função do transporte específico dos sedimentos em suspensão e da densidade média dos solos predominantes na bacia, conforme descrito por Mortatti et al. (1997) e Boeglin e Probst (1998), expressa pela equação 24:

$$EM = \frac{F_{FSS}}{d} \quad (24)$$

onde, EM é erosão mecânica (em m/Ma); F_{FSS} é o fluxo do sedimento fino em suspensão ($t.km^{-2} a^{-1}$) e d é a densidade média dos solos ($t m^{-3}$) da bacia de drenagem.

8.1.5. Transporte FSS

O transporte de sedimento fino em suspensão para a bacia do rio Sorocaba, em suas respectivas estações de amostragem foi calculado de acordo com o método estocástico, já descrito item 6.7.1.

9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados referem-se às 18 excursões de amostragem de águas fluviais realizadas durante o período de amostragem de 10/03/2009 a 01/09/2010, considerando-se as 112 análises de águas pluviais durante o período de 15/05/2009 a 17/09/2010, bem como as amostragens de solo do dia 30/03/2010.

9.1. Caracterização hidrológica

9.1.1 Fluviometria: Batimetria, medida da velocidade da água e vazão

As Tabelas 3 a 8 e Figuras 17 a 26 exemplificam a fluviometria para cada ponto de amostragem, sendo que as tabelas apresentam os dados de batimetria (largura e profundidade do canal) e velocidade média do fluxo de água (margem esquerda V1, eixo da corrente – V2 e margem direita – V3) obtidos em campo e os resultados de área da seção, velocidade média e vazão, para as excursões realizadas nos dias 10/03/2009, 07/04/2009, 12/05/2009 e 17/06/2009; e as figuras ilustram o procedimento para obtenção da área úmida da seção transversal do canal a título de exemplo, para a excursão realizada no dia 10/03/2009, com a utilização do software WinXPRO 3.0.

Tabela 3 - Dados de campo: Batimetria e velocidade do fluxo de água (margem esquerda – V1, eixo central do canal – V2 e margem direita – V3) e resultados de área da seção, velocidade média e vazão para a estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, para as excursões de 10/03/2009 a 17/06/2009

Estação S1 - Laranjal Paulista														
Data	Largura do canal (m)	ME 0m	Batimetria					MD 34m	Área da seção (m ²)	Velocidade				Vazão Q (m ³ s ⁻¹)
			2m	5m	15m	26m	31m			V1 (m s ⁻¹)	V2 (m s ⁻¹)	V3 (m s ⁻¹)	V média (m s ⁻¹)	
			Profundidade											
10/03/2009	34,00	0,00	-1,45	-1,80	-1,70	-1,92	-1,66	0,00	55,17	0,92	0,99	0,89	0,93	51,50
07/04/2009	34,00	0,00	-1,34	-1,60	-1,60	-1,83	-1,79	0,00	52,35	1,11	1,23	1,06	1,13	59,30
12/05/2009	34,00	0,00	-1,37	-1,68	-1,66	-1,91	-1,65	0,00	53,65	0,87	0,92	0,83	0,87	46,83
17/06/2009	34,00	0,00	-1,33	-1,61	-1,61	-1,84	-1,62	0,00	51,89	0,72	0,75	0,70	0,72	37,47

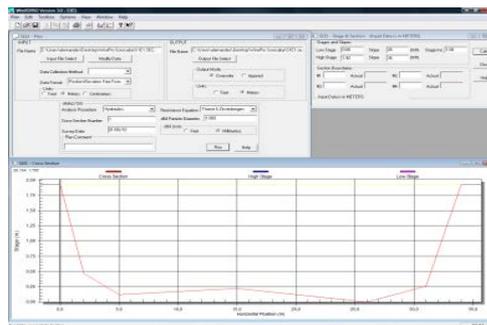


Figura 17- Seção transversal do canal considerada para a estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009. Margem esquerda (ME) e margem direita (MD)

```

C:\Users\aferrandes\Desktop\winXPRO - Sorocaba\S1E1.out
Input File: C:\Users\aferrandes\Desktop\winXPRO - Sorocaba\S1E1.SEC
Run Date: 05/22/09
Analysis Procedure: HYDRAULICS
Cross Section Number: 1
Survey date: 05/20/09

Subsections/dividing positions
A / 10.36/
Resistance Method: Thorne and Zevenbergen
糙率: 1.000 mm

Unadjusted horizontal distances used

STAGE #SEC AREA PERIM WIDTH R DRYD SLOPE n WAVG Q SHEAR
1.00 T 359.80 103.00 31.07 0.80 0.83 30.1867 0.016 297.86 7509.81 23756.08
1.92 T 2244.44 103.99 31.00 1.58 1.62 31.0000 0.017 480.60 26519.86 50444.56

STAGE ALPHA FROUSE
1.00 1.000000 105.416112
1.92 1.000000 105.313472

```

Figura 18 - Resultado obtido com o software WinXPRO 3.0, com destaque para a área da seção transversal do canal para a estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009

Tabela 4. Dados de campo: Batimetria e velocidade do fluxo de água (margem esquerda – V1, eixo central do canal – V2 e margem direita – V3) e resultados de área da seção, velocidade média e vazão para a estação de amostragem S2 – Tatuí, para as excursões de 10/03/2009 a 17/06/2009.

Data	Largura do canal (m)	ME 0m	Estação S2 - Tatuí							Área da seção (m ²)	Velocidade			Vazão Q (m ³ s ⁻¹)
			Batimetria								V1 (m s ⁻¹)	V2 (m s ⁻¹)	V3 (m s ⁻¹)	
			4m	10m	17m	26m	29m	MD 33m	V média (m s ⁻¹)					
Profundidade														
10/03/2009	33,00	0,00	-1,30	-1,98	-2,26	-2,18	-1,74	0,00	56,62	0,65	0,71	0,62	0,66	37,38
07/04/2009	33,00	0,00	-1,02	-1,90	-2,35	-2,11	-2,00	0,00	55,91	0,75	0,79	0,72	0,75	42,16
12/05/2009	33,00	0,00	-0,74	-1,71	-2,08	-1,98	-1,65	0,00	49,11	0,69	0,76	0,66	0,70	34,51
17/06/2009	33,00	0,00	-0,49	-1,55	-1,90	-1,85	-1,54	0,00	44,21	0,61	0,69	0,65	0,65	28,77

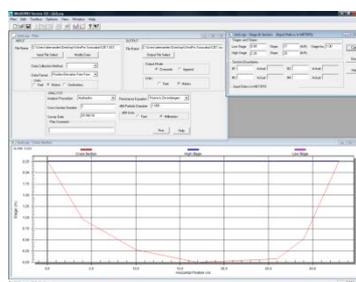


Figura 19. Seção transversal do canal considerada para a estação de amostragem S2 – Tatuí, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009. Margem esquerda (ME) e margem direita (MD).

```

C:\Users\afernandes\Desktop\winXPRO Sorocaba\S2E1.out
Input File: C:\Users\afernandes\Desktop\winXPRO Sorocaba\S2E1.SEC
Run Date: 05/22/09
Analysis Procedure: hydraulics
Cross Section Number: 1
Survey Date: 05/20/09

Subsections/Dividing positions
A / 10.06

Resistance Method: Thorne and Zevenbergen
DBA: 1.000 mm

Unadjusted horizontal distances used

```

STAGE	#SEC	AREA (sq m)	PERIM (m)	WIDTH (m)	R (m)	DHVD (m)	SLOPE (m/m)	n	WAVG (m/s)	Q (cms)	SHEAR (N/sq m)
1.00	T	19.21	26.41	26.23	0.73	0.74	24.0798	0.016	231.61	4838.91	172356.21
2.00	T	18.11	31.69	1.50	1.33	1.33	31.1593	0.016	487.12	21563.24	43682.69
2.26	T	16.62	31.64	33.00	1.68	1.72	33.0000	0.016	494.09	27978.73	544358.19

```

STAGE ALPHA FROUDE
1.00 1.000000 31.685555
2.00 1.000000 113.425923
2.26 1.000000 120.486933

```

Figura 20 - Resultado obtido com o software WinXPRO 3.0, com destaque para a área da seção transversal do canal para a estação de amostragem S2 – Tatuí, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009

Tabela 5 - Dados de campo: Batimetria e velocidade do fluxo de água (margem esquerda – V1, eixo central do canal – V2 e margem direita – V3) e resultados de área da seção, velocidade média e vazão para a estação de amostragem S3 – Itavuvú, para as excursões de 10/03/2009 a 17/06/2009

Data	Largura do canal (m)	Batimetria							Área da seção (m ²)	Velocidade			Vazão Q (m ³ s ⁻¹)	
		ME	3m	7m	10m	14m	16m	MD		V1	V2	V3		V média
		0m	3m	7m	10m	14m	16m	17m		(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)	(m s ⁻¹)		(m s ⁻¹)
			Profundidade											
10/03/2009	17,00	0,00	-0,97	-2,00	-1,59	-1,39	-1,09	0,00	21,76	1,33	1,35	1,29	1,32	28,80
07/04/2009	17,00	0,00	-1,60	-1,68	-1,12	-0,94	-0,48	0,00	18,94	1,69	1,78	1,63	1,70	32,21
12/05/2009	17,00	0,00	-1,78	-1,83	-1,34	-1,07	-0,71	0,00	21,60	1,24	1,27	1,21	1,24	26,76
17/06/2009	17,00	0,00	-1,60	-1,59	-1,26	-0,97	-0,60	0,00	19,38	1,16	1,22	1,13	1,17	22,67

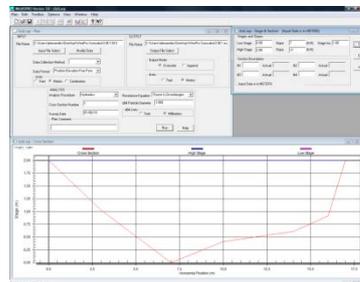


Figura 21 - Seção transversal do canal considerada para a estação de amostragem S3 – Itavuvú, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009. Margem esquerda (ME) e margem direita (MD)

```

C:\Users\afernandes\Desktop\winXPRO Sorocaba\S3E1.out
Input File: C:\Users\afernandes\Desktop\winXPRO Sorocaba\S3E1.SEC
Run Date: 05/22/09
Analysis Procedure: hydraulics
Cross Section Number: 1
Survey Date: 05/20/09

Subsections/Dividing positions
A / 5.18/

Resistance Method: Thorne and Zevenbergen
DBA: 1.000 mm

Unadjusted horizontal distances used

```

STAGE	#SEC	AREA (sq m)	PERIM (m)	WIDTH (m)	R (m)	DHVD (m)	SLOPE (m/m)	n	WAVG (m/s)	Q (cms)	SHEAR (N/sq m)
1.00	T	13.19	12.97	0.51	0.52	0.52	12.0000	0.015	144.26	976.82	60387.82
2.00	T	21.76	17.82	17.00	1.22	1.28	17.0000	0.016	293.14	6380.96	203547.66

```

STAGE ALPHA FROUDE
1.00 1.000000 63.772328
2.00 1.000000 82.759590

```

Figura 22 - Resultado obtido com o software WinXPRO 3.0, com destaque para a área da seção transversal do canal para a estação de amostragem S3 – Itavuvú, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009

Tabela 6 - Dados de campo: Batimetria e velocidade do fluxo de água (margem esquerda – V1, eixo central do canal – V2 e margem direita – V3) e resultados de área da seção, velocidade média e vazão para a estação de amostragem S4 – Votorantim, para as excursões de 10/03/2009 a 17/06/2009

Estação S4 - Votorantim													
Data	Largura do canal (m)	ME 0m	Batimetria					Área da seção (m ²)	Velocidade			Vazão	
			1,4m	4,4m	8,4m	MD 9,4m	V1 (m s ⁻¹)		V2 (m s ⁻¹)	V3 (m s ⁻¹)	V média (m s ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	
			Profundidade										
10/03/2009	9,40	0,00	-0,87	-0,44	-0,36	0,00	4,35	0,89	0,92	0,86	0,89	3,93	
07/04/2009	9,40	0,00	-0,78	-0,61	-0,53	0,00	5,18	0,80	0,83	0,71	0,78	4,05	
12/05/2009	9,40	0,00	-0,86	-0,64	-0,58	0,00	5,58	0,42	0,44	0,38	0,41	2,30	
17/06/2009	9,40	0,00	-0,75	-0,55	-0,47	0,00	4,75	0,35	0,37	0,32	0,35	1,64	

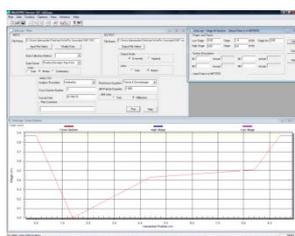


Figura 23 - Seção transversal do canal considerada para a estação de amostragem S4 – Votorantim, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009. Margem esquerda (ME) e margem direita (MD)

```

C:\Users\l.ferrandes\Desktop\winxp30\proj\canal\canal.dat
Date file: C:\Users\l.ferrandes\Desktop\winxp30\proj\canal\canal.dat
Run date: 06/02/09
Analysis procedure: WinXp30
Cross Section Number: 1
Survey date: 03/10/09

Subsections/dividing positions
A / 2.87

Resistance Method: Storm and overbergen
Sf: 0.01

Channel horizontal distances used:

STAGE #SEC AREA FRESH WIDTH R Q/VD SLOPE P WAVG C SHEAR
(CS) (CM) (M) (M)
0.10 T 0.31 0.82 0.84 0.05 0.15 4.1905 0.025 26.53 2.10 2420.14
0.20 T 0.31 0.76 0.77 0.10 0.15 4.1905 0.025 26.53 2.10 2420.14
0.30 T 0.39 2.68 2.54 0.14 0.15 4.8414 0.025 47.30 18.15 9175.12
0.40 T 0.69 5.56 5.43 0.19 0.20 5.7218 0.025 52.21 36.15 20705.66
0.50 T 1.18 7.48 7.20 0.16 0.16 4.8027 0.025 42.73 52.15 7418.65
0.60 T 1.38 8.13 8.23 0.21 0.21 5.8824 0.025 50.34 59.18 8952.14
0.70 T 2.82 8.92 8.61 0.32 0.22 2.9912 0.025 52.96 119.18 9581.98
0.80 T 2.82 8.82 8.49 0.41 0.41 2.9912 0.025 50.44 119.18 7486.19
0.87 T 4.35 7.74 8.49 0.43 0.46 1.4000 0.025 41.13 106.15 6132.77

STAGE AREA PERCENT
0.10 1.000000 14.831734
0.20 1.000000 16.111095
0.30 1.000000 19.176170
0.40 1.000000 36.209104
0.50 1.000000 34.773173
0.60 1.000000 22.798075
0.70 1.000000 29.945122
0.80 1.000000 25.221410
0.87 1.000000 21.846467

```

Figura 24 - Resultado obtido com o software WinXP30 3.0, com destaque para a área da seção transversal do canal para a estação de amostragem S4 – Votorantim, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009

Tabela 7 - Dados de campo: Batimetria e velocidade do fluxo de água (margem esquerda – V1, eixo central do canal – V2 e margem direita – V3) e resultados de área da seção, velocidade média e vazão para a estação de amostragem S5 – Ibiúna, para as excursões de 10/03/2009 a 17/06/2009

Estação S5 - Ibiúna														
Data	Largura do canal (m)	ME 0m	Batimetria					MD 14m	Área da seção (m ²)	Velocidade			Vazão	
			2m	5m	7m	9m	12m			V1 (m s ⁻¹)	V2 (m s ⁻¹)	V3 (m s ⁻¹)	V média (m s ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)
			Profundidade											
10/03/2009	14,00	0,00	-1,63	-1,85	-2,20	-2,40	-2,26	0,00	24,75	0,30	0,32	0,35	0,32	7,98
07/04/2009	14,00	0,00	-2,15	-2,39	-2,61	-2,71	-2,61	0,00	29,87	0,29	0,31	0,33	0,31	9,20
12/05/2009	14,00	0,00	-1,85	-2,07	-2,36	-2,48	-2,47	0,00	26,89	0,24	0,27	0,30	0,27	7,25
17/06/2009	14,00	0,00	-1,38	-1,78	-1,91	-2,28	-2,08	0,00	22,62	0,22	0,26	0,29	0,26	5,79

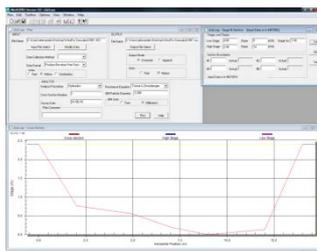


Figura 25 - Seção transversal do canal considerada para a estação de amostragem S5 – Ibiúna, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009. Margem esquerda (ME) e margem direita (MD)

```

C:\Users\aferrandes\Desktop\winpro\Sorocaba\st51.out
Stage file: C:\Users\aferrandes\Desktop\winpro\Sorocaba\st51.ssc
Run Date: 05/22/09
Analysis procedure: hydraulics
Cross Section Number:
Survey Date: 05/20/09

Subsections/dividing positions
A / 3.27

Resistance Method: Thorne and Zverbergen
糙率: 1.000 mm

unadjusted horizontal distances used

```

STAGE	#SEC	AREA	PERDN	WIDTH	S	DRYD	SLOPE	n	WAVG	Q	WEAR
1.00	T	27.29	11.58	11.04	0.62	0.85	11.0833	0.016	135.58	1177.39	67821.71
2.00	T	14.48	13.16	1.33	1.47		13.1667	0.059	373.13	5246.27	127026.83
3.40	T	24.75	3.65	14.00	1.58	1.77	14.0000	0.016	311.12	7701.17	217026.56
STAGE		AREA	PERDN	FRISKE							
1.00		1.000000		63.467935							
2.00		1.000000		71.716462							
3.40		1.000000		74.748888							

Figura 26 - Resultado obtido com o software WinXPRO 3.0, com destaque para a área da seção transversal do canal para a estação de amostragem S5 – Ibiúna, para a excursão de coleta do dia 10/03/2009

9.1.2. Vazão e precipitação

A análise da distribuição mensal da vazão e da precipitação durante o período de 1984 a 2008, de acordo com os dados obtidos junto ao DAEE/CTH, (2011) mostrou a sazonalidade do regime hidrológico da bacia de drenagem da bacia do rio Sorocaba (Figura 27).

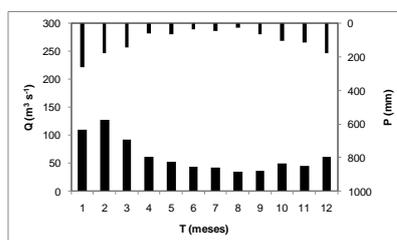


Figura 27 - Vazão e precipitação na bacia do rio Sorocaba – SP para o período de 1984 a 2008

Foi possível observar que os meses mais chuvosos foram janeiro, fevereiro e março, variando de 144,67 a 261,4 mm, e os meses mais secos foram julho, agosto e setembro com precipitações variando de 27,7 a 66,8 mm, que influenciaram o regime fluviométrico do rio Sorocaba.

9.1.3. Separação do hidrograma de cheia

Conforme proposto no item 5.3. foi realizado a separação do hidrograma de cheia no rio Sorocaba, na estação de amostragem S1 - Laranjal Paulista, próximo a foz da bacia de drenagem em estudo para o período de 1984 a 2008 e os resultados podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados hidrológicos para a bacia do rio Sorocaba obtidos com a aplicação do modelo de separação de hidrogramas com filtros numéricos para o período de 1984 a 2008

Tempo (ano)	P (mm)	Qt (m ³ s ⁻¹)	Qr (m ³ s ⁻¹)	Qn (m ³ s ⁻¹)	Kr	Kn	ΔQr
1984	1001,20	50,35	20,79	29,56	0,4128	0,5872	-0,11
1985	883,60	35,43	11,51	23,92	0,3248	0,6752	-0,50
1986	1498,50	40,27	13,60	26,68	0,3376	0,6624	-0,41
1987	1379,40	82,98	32,17	50,81	0,3877	0,6123	0,38
1988	1284,60	70,92	27,27	43,64	0,3846	0,6154	0,17
1989	1489,20	94,77	35,32	59,45	0,3727	0,6273	0,52
1990	1145,10	57,88	19,74	38,14	0,3410	0,6590	-0,15
1991	1868,50	96,89	36,02	60,87	0,3718	0,6282	0,55
1992	1233,20	56,87	18,60	38,26	0,3272	0,6728	-0,20
1993	1335,30	73,81	25,54	48,26	0,3461	0,6539	0,10
1994	952,90	38,51	14,15	24,36	0,3675	0,6325	-0,39
1995	1441,10	83,14	33,02	50,12	0,3972	0,6028	0,42
1996	1465,40	64,72	25,62	39,09	0,3959	0,6041	0,10
1997	1315,30	80,16	33,86	46,30	0,4224	0,5776	0,46
1998	1321,70	81,40	30,80	50,59	0,3784	0,6216	0,33
1999	1008,50	78,24	32,15	46,09	0,4109	0,5891	0,38
2000	1189,50	44,39	18,57	25,82	0,4183	0,5817	-0,20
2001	1264,40	54,30	22,70	31,60	0,4180	0,5820	-0,02
2002	1209,90	60,88	23,24	37,64	0,3817	0,6183	0,00
2003	1149,40	51,46	20,14	31,32	0,3914	0,6086	-0,13
2004	1076,00	52,60	21,50	31,11	0,4087	0,5913	-0,08
2005	1193,70	59,35	22,83	36,51	0,3847	0,6153	-0,02
2006	1199,10	53,18	20,55	32,63	0,3864	0,6136	-0,12
2007	1121,20	58,19	21,66	36,53	0,3722	0,6278	-0,07
2008	1131,70	56,33	20,80	35,53	0,3693	0,6307	-0,10
Média	1246,34	63,08	24,09	38,99	0,3804	0,6196	

Onde: P é a precipitação total anual e Qt é o escoamento total, Qr o escoamento superficial rápido, Qn o escoamento subterrâneo, Kr e Kn os respectivos coeficientes de escoamento e ΔQr a variabilidade do escoamento superficial rápido, todos em termos médios anuais.

Foi possível verificar que o escoamento superficial rápido médio anual foi de $24,09 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com um coeficiente de escoamento superficial médio de 38,04%, considerado próximo aos obtidos por Mortatti et al. (2004) para os rios Tietê (30,4%) e Piracicaba (27,4%) no período de 1976 a 1997, integrantes da mesma bacia de drenagem. Tais valores são típicos de bacias com predomínio agrícola, onde o manejo do solo interfere diretamente nos processos erosivos mecânicos. Cabe destacar que neste mesmo período a contribuição média da água subterrânea foi de 61,96%. O ano de 1985 apresentou os menores valores de precipitação (883,6mm), vazão média total ($35,43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) e de contribuição do escoamento superficial rápido

na vazão total (32,48%), enquanto que os maiores índices foram observados em 1991, com precipitação anual de 1868,5 mm e vazão total média de $96,89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Entretanto, neste ano de maior pluviosidade, a contribuição do escoamento superficial rápido foi de 37,18% e a subterrânea de 62,82%, próximos às médias observadas para os 25 anos estudados. A maior contribuição do escoamento superficial rápido foi em 1997, quando representou 42,24% da vazão total.

A Figura 28 ilustra a separação do hidrograma de cheia do rio Sorocaba, sendo possível observar as contribuições dos escoamentos superficial rápido e subterrâneo. A variação dessas contribuições se mostrou associada ao regime pluviométrico, com maior contribuição do escoamento superficial rápido nos períodos de maior pluviosidade, como pode ser observado no período de 1984 a 2008. A partir de 2000 foi verificada a não ocorrência de grandes variações na precipitação, oscilando entre 1076 e 1264 mm, o que refletiu numa certa estabilidade nos valores de vazão média anual e da contribuição de suas componentes.

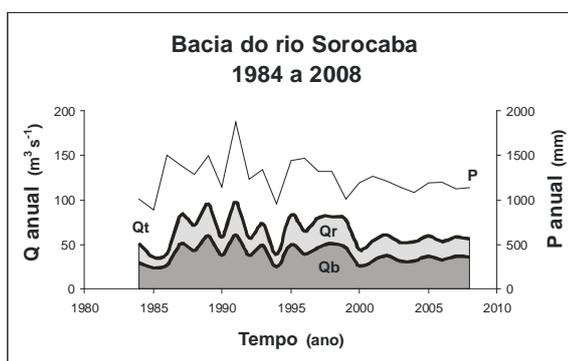


Figura 28 - Separação do hidrograma do rio Sorocaba nos compartimentos escoamento superficial rápido (Qr) e subterrâneo (Qn) e índice de precipitação anual (P), no período de 1984 a 2008

9.2. Caracterização Carga Dissolvida Fluvial

9.2.1. Parâmetros físico-químicos

Nas Tabelas 9, 10, 11, 12 e 13 encontram-se os principais parâmetros físico-químicos determinados para as águas fluviais nos 5 pontos de amostragens da bacia do rio Sorocaba, no período de 10/03/2009 a 01/09/2010, de acordo com o protocolo estabelecido no item 6.1. De um modo geral, foi possível observar uma

variação espacial e temporal dos parâmetros analisados, em decorrência das contribuições que ocorrem ao longo da bacia de drenagem.

Para a foz da bacia do rio Sorocaba, em Laranjal Paulista (Tabela 9), os valores de pH e condutividade elétrica variaram de 6,9 a 7,9 e de 79,7 a 162,2 $\mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente, de acordo com a sazonalidade e efeito de diluição.

Tabela 9 - Parâmetros físico-químicos da estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista

Parâmetros Físico-Químicos - Rio Sorocaba						
Estação S1 - Laranjal Paulista						
Data	Amostra	Qt ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	pH	Cond ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	DBO _{5,20} mg L ⁻¹ O ₂	T (°C)
10/03/2009	S1 E1	51,50	7,4	145,2	ND	26,9
07/04/2009	S1 E2	59,30	7,9	159,5	ND	24,3
12/05/2009	S1 E3	46,83	7,0	162,2	3,3	21,6
17/06/2009	S1 E4	37,47	6,9	143,2	1,3	15,6
21/07/2009	S1 E5	43,71	6,9	123,9	3,0	16,9
25/08/2009	S1 E6	123,23	6,9	109,0	ND	16,9
22/09/2009	S1 E7	99,84	7,1	121,8	ND	20,3
10/11/2009	S1 E8	170,01	6,9	108,1	ND	26,4
12/12/2009	S1 E9	363,35	6,9	76,0	1,6	25,7
15/01/2010	S1 E10	279,15	7,1	91,7	1,8	28,8
20/01/2010	S1 E11	366,47	7,1	79,7	1,8	33,0
23/02/2010	S1 E12	184,04	7,1	99,6	ND	29,0
30/03/2010	S1 E13	151,30	7,3	87,1	3,1	26,8
27/04/2010	S1 E14	107,64	7,1	103,6	0,2	25,7
27/05/2010	S1 E15	70,21	7,1	128,6	1,1	22,2
24/06/2010	S1 E16	42,15	7,3	149,1	2,0	21,1
27/07/2010	S1 E17	54,62	7,0	134,5	1,0	22,4
01/09/2010	S1 E18	26,56	7,4	172,7	2,0	25,1

A DBO_{5,20} não apresentou um consumo excessivo de O₂, pois como este ponto de drenagem representa toda a interação dos processos ocorridos ao longo da bacia de drenagem, onde os processos de autodepuração fazem com que o ambiente fluvial torne-se menos susceptível as cargas dissolvidas despejadas diariamente. O consumo máximo de oxigênio dissolvido para degradação da matéria orgânica pelos microorganismos foi obtido no período de estiagem com uma concentração de 3,3 mg O₂ L⁻¹. Neste trecho, o rio Sorocaba foi classificado como sendo de classe 2 (DBO <5), que de acordo com a resolução CONAMA 357/2005, são águas destinadas ao abastecimento doméstico após tratamento convencional, bem como a proteção das comunidades aquáticas, recreação, irrigação de hortaliças.

Já a temperatura variou de 15,6 a 33,0°C, sendo a menor e maior temperatura registrada nos meses de maio e janeiro, respectivamente.

Para a estação de amostragem Tatuí (Tabela 10), os valores de pH e condutividade elétrica variaram de 6,5 a 7,4 e de 70,9 a 166,5 $\mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente. A $\text{DBO}_{5,20}$ apresentou uma concentração máxima de 5,4 $\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$, o que pode ser justificado devido a presença de um importante tributário a margem esquerda, rio Tatuí, que despeja efluentes urbanos e industriais *in natura*. Já a temperatura variou de 16,5 a 27,6°C, sendo a menor e maior temperaturas registradas nos meses de agosto e março, respectivamente.

Tabela 10 - Parâmetros físico-químicos da estação de amostragem S2 – Tatuí

Parâmetros Físico-Químicos - Rio Sorocaba						
Estação S2 - Tatuí						
Data	Amostra	Qt ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	pH	Cond ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	$\text{DBO}_{5,20}$ $\text{mg L}^{-1} \text{ O}_2$	T (°C)
10/03/2009	S2 E1	37,38	7,2	150,1	ND	27,6
07/04/2009	S2 E2	42,16	7,4	147,6	ND	24,3
12/05/2009	S2 E3	34,51	6,9	139,6	5,4	21,4
17/06/2009	S2 E4	28,77	6,8	136,9	1,5	16,7
21/07/2009	S2 E5	32,60	6,9	141,8	4,2	17,0
25/08/2009	S2 E6	81,35	6,9	108,6	ND	16,5
22/09/2009	S2 E7	67,01	6,9	110,9	ND	19,5
10/11/2009	S2 E8	110,03	6,7	82,2	ND	26,3
12/12/2009	S2 E9	228,58	6,5	70,9	4,1	26,2
15/01/2010	S2 E10	176,95	6,6	92,0	2,1	26,0
20/01/2010	S2 E11	230,49	6,6	73,7	2,0	27,5
23/02/2010	S2 E12	118,64	6,8	98,1	ND	25,0
30/03/2010	S2 E13	98,56	6,8	89,5	0,9	26,8
27/04/2010	S2 E14	71,79	6,9	99,0	1,2	25,5
27/05/2010	S2 E15	48,85	6,8	115,0	2,3	22,0
24/06/2010	S2 E16	31,64	6,9	128,0	1,4	20,3
27/07/2010	S2 E17	39,29	6,8	122,6	4,7	21,9
01/09/2010	S2 E18	22,08	7,1	166,5	2,0	23,5

Para a estação de amostragem S3 – Itavuvú (Tabela 11), os valores de pH variaram de 6,6 a 7,3 e a condutividade elétrica apresentou valores superiores a 106,00 $\mu\text{S cm}^{-1}$ em todos os dias de coleta, com exceção da coleta realizada no dia 30/03/2010 em que a condutividade foi próxima de 90 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Tabela 11 - Parâmetros físico-químicos da estação de amostragem S3 – Itavuvú

Parâmetros Físico-Químicos - Rio Sorocaba						
Estação S3 - Itavuvú						
Data	Amostra	Qt (m ³ s ⁻¹)	pH	Cond (μS cm ⁻¹)	DBO _{5,20} mg L ⁻¹ O ₂	T (°C)
10/03/2009	S3 E1	28,80	7,0	165,7	ND	26,7
07/04/2009	S3 E2	32,21	7,3	177,8	ND	25,0
12/05/2009	S3 E3	26,76	6,9	161,5	ND	22,6
17/06/2009	S3 E4	22,67	6,8	180,6	2,7	17,7
21/07/2009	S3 E5	25,40	6,7	194,4	3,4	19,3
25/08/2009	S3 E6	60,13	6,9	154,6	ND	17,6
22/09/2009	S3 E7	49,92	6,7	134,7	ND	19,3
10/11/2009	S3 E8	80,56	6,5	106,4	ND	25,4
12/12/2009	S3 E9	165,01	6,6	124,7	5,2	26,6
15/01/2010	S3 E10	128,24	6,7	115,5	2,5	27,0
20/01/2010	S3 E11	166,38	6,8	115,5	1,2	28,0
23/02/2010	S3 E12	86,69	6,6	123,6	ND	25,0
30/03/2010	S3 E13	72,39	7,0	98,9	4,0	27,1
27/04/2010	S3 E14	53,32	6,8	127,0	1,7	26,3
27/05/2010	S3 E15	36,98	6,7	132,8	2,5	22,4
24/06/2010	S3 E16	24,72	6,8	169,1	3,3	22,3
27/07/2010	S3 E17	30,16	6,7	137,0	4,0	21,4
01/09/2010	S3 E18	17,91	6,9	169,4	3,5	25,4

Já a DBO 5,20, apresentou um consumo de O₂ da ordem de 5,2 mg O₂. Tais valores podem estar associados à carga orgânica doméstica proveniente dos municípios de Votorantim e Sorocaba, que juntos somam 675.948 habitantes e apresentam baixos índices de tratamento de esgoto de acordo com a CETESB (2008). Pode-se verificar neste trecho, que existe uma transição de rio classe 2 para rio classe 3 (DBO<10), podendo estas águas serem utilizadas somente para irrigação de culturas arbóreas, forrageiras e à dessedentação de animais, de acordo com a resolução CONAMA 357/2005.

Estudos anteriores realizados por Arine (2000) já classificaram o rio Sorocaba como sendo de classe 2 em seu trecho urbano, em Sorocaba; e Smith e Petrere Junior (2000), em seu estudo de caracterização biológica do rio, verificaram também um aumento no consumo O₂ pela atividade microbiana após a mancha urbana das duas cidades.

Os valores de temperatura variaram de 17,7 a 28 °C, sendo a menor e maior temperatura registradas nos meses de julho e janeiro, respectivamente.

Para a estação de amostragem S4 – Votorantim (Tabela 12) os valores de pH mantiveram superiores a 7,0 em todas as excursões de amostragens, variando de 7,3 a 7,9. Isto pode estar relacionados às emissões in natura de efluentes industriais, principalmente bases fortes, responsáveis pela descoloração de têxteis. Os resultados de condutividade elétrica foram os que mais variaram dentre as cinco

estações, de 80,8 a 200 $\mu\text{s cm}^{-1}$ e podem estar relacionados à localização da estação, à jusante da Represa de Itupararanga.

Tabela 12 - Parâmetros físico-químicos da estação de amostragem S4 – Votorantim

Parâmetros Físico-Químicos - Rio Sorocaba						
Estação S4 - Votorantim						
Data	Amostra	Qt ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	pH	Cond ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	DBO _{5,20} mg L ⁻¹ O ₂	T (°C)
10/03/2009	S4 E1	3,93	7,7	121,9	ND	26,8
07/04/2009	S4 E2	4,05	7,9	125,1	ND	25,7
12/05/2009	S4 E3	2,30	7,5	109,6	5,9	22,2
17/06/2009	S4 E4	1,64	7,4	200,0	8,6	17,7
21/07/2009	S4 E5	1,81	7,3	112,2	3,4	18,0
25/08/2009	S4 E6	2,78	7,3	138,3	ND	17,9
22/09/2009	S4 E7	5,00	7,5	89,9	ND	18,9
10/11/2009	S4 E8	5,77	7,7	128,7	ND	25,8
12/12/2009	S4 E9	13,89	7,7	91,4	2,0	25,3
15/01/2010	S4 E10	25,16	7,5	87,1	3,3	25,1
20/01/2010	S4 E11	19,07	7,5	107,1	2,0	27,0
23/02/2010	S4 E12	14,58	7,4	79,0	ND	26,4
30/03/2010	S4 E13	6,19	7,4	81,3	1,3	27,6
27/04/2010	S4 E14	4,60	7,6	80,8	3,0	26,1
27/05/2010	S4 E15	3,16	7,5	129,9	1,6	22,6
24/06/2010	S4 E16	3,10	7,4	151,1	3,0	21,9
27/07/2010	S4 E17	5,47	7,4	83,3	3,6	21,2
01/09/2010	S4 E18	2,89	7,7	165,4	3,0	24,2

Já a DBO_{5,20}, apresentou o maior consumo de O₂ dentre todas as estações de amostragens presentes no estudo, 8,6 mgO₂ L⁻¹. Tal fato pode ser justificado devido este ponto estar situado na porção central do município de Votorantim que despeja mais de 50 % de seu esgoto gerado sem tratamento prévio e também a excursão realizada no período estiagem, classificando o rio como sendo de classe 3 de acordo com a resolução CONAMA 357/2005.

Os valores de temperatura variaram de 17,7 a 27,6°C, sendo a menor e maior temperatura registrada nos meses de junho e março, respectivamente.

A estação S5 – Ibiúna, considerada como região de nascentes, ao contrário das demais estações, apresentou valores de pH menores que 7,0 e variação da condutividade elétrica entre 57,9 a 150,1 $\mu\text{s cm}^{-1}$, conforme Tabela 13. Isto pode estar associado ao fato em que a região ainda se encontra em um maior estado de preservação.

Tabela 13 - Parâmetros físico-químicos da estação de amostragem S5 – Ibiúna

Parâmetros Físico-Químicos - Rio Sorocaba						
Estação S5 - Ibiúna						
Data	Amostra	Qt (m ³ s ⁻¹)	pH	Cond (μS cm ⁻¹)	DBO _{5,20} mg L ⁻¹ O ₂	T (°C)
10/03/2009	S5 E1	7,98	6,6	88,7	ND	22,7
07/04/2009	S5 E2	9,20	6,9	89,3	ND	20,5
12/05/2009	S5 E3	7,25	6,3	84,2	ND	18,1
17/06/2009	S5 E4	5,79	6,5	90,0	0,1	14,3
21/07/2009	S5 E5	6,76	6,7	90,7	2,8	14,2
25/08/2009	S5 E6	19,20	6,5	71,3	ND	14,9
22/09/2009	S5 E7	15,54	6,5	85,0	ND	16,6
10/11/2009	S5 E8	26,51	6,3	71,6	ND	23,2
12/12/2009	S5 E9	56,75	6,4	64,8	3,2	22,8
15/01/2010	S5 E10	43,58	6,6	68,1	1,0	23,2
20/01/2010	S5 E11	57,24	6,5	57,9	1,6	24,3
23/02/2010	S5 E12	28,71	6,4	87,8	ND	22,7
30/03/2010	S5 E13	23,59	6,4	72,0	2,1	24,0
27/04/2010	S5 E14	16,76	6,5	72,9	1,0	22,9
27/05/2010	S5 E15	10,91	6,6	74,9	2,0	19,1
24/06/2010	S5 E16	6,52	6,7	74,8	2,7	17,3
27/07/2010	S5 E17	8,47	6,5	84,7	2,1	19,2
01/09/2010	S5 E18	4,08	6,8	150,1	2,0	20,1

Já a DBO_{5,20}, não apresentou um consumo de O₂ excessivo, estando sua concentração máxima em torno de 3,2 mg O₂ L⁻¹, o que o classifica como sendo de classe 2 (CONAMA 357/2005) e pode estar relacionado a atividades agrícolas em pequenas propriedades e às pequenas manchas urbanas na região, também observado por Sardinha et al. (2008).

A variação da temperatura apresentou um comportamento esperado, com as menores temperaturas nos meses junho a outubro, inverno e começo da primavera, e as maiores temperaturas nos meses mais quentes, março a maio e a partir de novembro. Cabe destacar que a estação S5 - Ibiúna apresentou as menores temperaturas, pois está na região mais a montante, próximo às nascentes, onde se registram as maiores altitudes da bacia de drenagem.

De um modo geral, dos 18 municípios presentes na bacia do rio Sorocaba, apenas 5 municípios (Alumínio, Laranjal Paulista, Mairinque, Sarapuí e Vargem Grande Paulista) não apresentam tratamento de esgoto, sendo estes lançados diretamente nos corpos hídricos. Os demais municípios apresentam de forma ainda precária sistemas de tratamento de esgoto (CETESB, 2008).

Dentro do contexto da bacia de drenagem do rio Tietê, comparou-se os parâmetros físico-químicos (pH e condutividade) observados para o rio Sorocaba com os apresentados por Bortoletto Junior (2004) para o rio Tietê, no município de

Tietê, e rio Piracicaba, no município de Artemis. A variação do pH se mostrou semelhante entre os três rios, Sorocaba (6,3 a 7,9), Tietê (6,9 a 7,5) e Piracicaba (6,8 e 7,4). Já para a condutividade elétrica, o rio Tietê apresentou os maiores valores (254 a 697 $\mu\text{S cm}^{-1}$), o Piracicaba valores intermediários (111 a 455 $\mu\text{S cm}^{-1}$) e o Sorocaba os menores valores (64,80 a 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$).

9.2.2. Concentrações das espécies químicas fluviais e equilíbrio iônico

As concentrações das principais espécies químicas dissolvidas presentes nas amostras fluviais da bacia do rio Sorocaba foram determinadas de acordo com o protocolo estabelecido no item 6.2. As tabelas 14 a 18 apresentam os resultados dos cátions e ânions principais, para cada estação de amostragem, desde a foz até a região de nascente, incluindo a sílica (SiO_2), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q_t) e respectivas médias e desvios padrão.

Pode ser verificado na Tabela 14 a caracterização química das principais espécies dissolvidas na bacia do rio Sorocaba, em S1- Laranjal Paulista, próximo a foz.

Tabela 14 - Resultados analíticos das concentrações das principais espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions), sílica (SiO_2), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q_t), médias e desvios padrão nas águas do rio Sorocaba, para a estação de amostragem S1- Laranjal Paulista, foz da bacia de drenagem

Estação S1 - Laranjal Paulista														
Concentração (mg L^{-1})														
Data	Amostra	Q_t ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	TDS
10/03/2009	S1 E1	51,50	32,00	16,52	1,37	20,58	1,82	0,11	56,86	13,58	7,54	9,46	0,69	160,53
07/04/2009	S1 E2	59,30	30,00	16,15	1,28	21,22	1,79	0,12	53,83	14,92	9,86	11,23	0,46	160,85
12/05/2009	S1 E3	46,83	30,00	15,03	1,17	25,27	1,80	0,10	58,72	15,97	9,50	11,13	0,32	168,99
17/06/2009	S1 E4	37,47	35,90	16,87	1,52	27,18	1,82	0,12	47,52	17,20	9,95	10,55	0,60	169,22
21/07/2009	S1 E5	43,71	31,00	16,36	1,47	23,67	1,70	0,12	42,00	16,30	9,10	8,88	0,47	151,07
25/08/2009	S1 E6	123,23	14,12	11,75	1,08	10,61	1,45	0,06	34,66	8,48	5,05	2,74	0,15	90,15
22/09/2009	S1 E7	99,84	17,50	13,54	1,05	11,16	1,47	0,04	42,30	8,54	5,36	3,26	0,12	104,33
10/11/2009	S1 E8	170,01	11,89	10,80	1,00	10,20	1,40	0,05	34,40	8,19	5,40	2,78	LD	86,11
12/12/2009	S1 E9	363,35	10,43	8,40	0,84	5,70	1,00	0,03	26,73	4,20	4,80	0,93	0,09	63,15
15/01/2010	S1 E10	279,15	11,96	10,30	0,86	8,19	1,05	LD	37,00	5,24	3,16	1,09	0,05	78,90
20/01/2010	S1 E11	366,47	10,44	8,50	0,82	6,03	1,10	0,03	30,95	4,33	3,23	0,96	LD	66,39
23/02/2010	S1 E12	184,04	12,45	10,50	1,20	7,70	1,70	LD	39,20	5,87	3,36	3,96	LD	85,94
30/03/2010	S1 E13	151,30	11,49	11,11	1,25	7,70	1,70	LD	31,94	5,95	4,40	4,50	0,22	80,25
27/04/2010	S1 E14	107,64	12,21	13,35	1,30	9,14	1,80	LD	40,28	7,02	5,04	5,98	0,11	96,23
27/05/2010	S1 E15	70,21	22,00	13,26	1,40	14,92	1,90	LD	41,08	11,27	6,22	8,25	0,33	120,61
24/06/2010	S1 E16	42,15	29,00	13,69	1,90	18,83	2,10	LD	46,34	12,23	10,34	10,14	0,37	144,94
27/07/2010	S1 E17	54,62	35,00	13,50	1,60	16,23	2,35	LD	38,37	12,53	8,40	9,24	0,41	137,63
01/09/2010	S1 E18	26,56	29,00	17,20	2,10	25,65	2,35	LD	58,00	17,98	12,34	14,85	0,69	180,16
	C_{MND}		15,28	11,10	1,07	10,21	1,42	0,03	36,48	7,36	5,08	3,75	0,14	91,91
	DP_{MND}		7,53	2,54	0,27	5,64	0,38	0,03	7,92	3,74	2,14	3,45	0,18	31,88

Durante o período estudado houve um predomínio de Ca^{2+} dentre os cátions principais, com uma concentração média de $11,10 \text{ mg L}^{-1}$. Para os ânions, a máxima concentração média foi do HCO_3^- com $36,48 \text{ mg L}^{-1}$. Os valores médios observados para TDS e SiO_2 foram de $91,51$ e $15,25 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente. Durante o período seco as concentrações de Ca^{2+} foram da ordem de 16 mg L^{-1} , enquanto que o HCO_3^- , nesse período foi da ordem de 50 mg L^{-1} .

Para a estação de amostragem S2 - Tatuí o comportamento foi similar conforme pode ser observado na Tabela 15. Durante o período estudado também houve um predomínio de Ca^{2+} dentre os cátions principais, com uma concentração média de $10,09 \text{ mg L}^{-1}$. Para os ânions, a máxima concentração médio também foi do HCO_3^- com $35,93 \text{ mg L}^{-1}$. Os valores médios observados para TDS e SiO_2 foram de $85,79$ e $14,39 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente. Durante o período seco as concentrações de Ca^{2+} foram da ordem de 15 mg L^{-1} , enquanto que o HCO_3^- , nesse período foi da ordem de 47 mg L^{-1} .

Tabela 15 - Resultados analíticos das concentrações das principais espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions), sílica (SiO_2), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q_t), médias e desvios padrão nas águas do rio Sorocaba, para a estação de amostragem S2 - Tatuí

Estação S2 - Tatuí														
Concentração (mg L^{-1})														
Data	Amostra	Q_t ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	HCO_3^-	Cl	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	TDS
10/03/2009	S2 E1	37,38	22,00	16,25	1,09	17,14	1,92	1,20	33,80	17,00	6,40	3,70	0,34	120,84
07/04/2009	S2 E2	42,16	20,00	14,65	0,96	16,58	1,71	1,12	53,83	14,50	8,35	3,56	0,19	135,44
12/05/2009	S2 E3	34,51	31,51	15,11	1,00	14,75	1,84	1,37	52,55	16,00	7,40	3,44	0,15	145,13
17/06/2009	S2 E4	28,77	34,00	17,92	1,32	19,15	2,26	1,60	51,31	18,90	7,74	4,82	0,13	159,15
21/07/2009	S2 E5	32,60	28,00	16,90	1,02	15,92	1,90	1,41	45,05	15,20	6,56	3,10	0,16	135,22
25/08/2009	S2 E6	81,35	13,72	9,20	0,90	10,59	1,70	0,54	36,03	7,86	4,47	2,06	LD	87,07
22/09/2009	S2 E7	67,01	13,66	10,40	0,97	11,41	1,83	0,33	38,59	8,62	4,82	2,29	0,04	92,96
10/11/2009	S2 E8	110,03	14,00	9,00	0,86	6,38	1,65	0,29	35,21	4,26	4,08	1,53	0,07	77,34
12/12/2009	S2 E9	228,58	9,91	5,69	0,80	5,64	1,47	0,02	25,77	3,63	2,71	0,66	0,02	56,31
15/01/2010	S2 E10	176,95	11,14	9,00	0,85	7,99	1,65	LD	36,77	5,09	2,78	1,13	0,02	76,42
20/01/2010	S2 E11	230,49	9,53	6,80	0,87	5,61	1,70	0,05	30,26	4,40	2,37	0,87	LD	62,47
23/02/2010	S2 E12	118,64	11,70	10,40	0,92	7,22	1,75	LD	38,00	5,48	2,72	1,45	LD	79,64
30/03/2010	S2 E13	98,56	11,58	11,70	1,00	8,03	1,90	LD	36,20	6,28	4,40	3,40	0,16	84,64
27/04/2010	S2 E14	71,79	12,07	13,41	1,10	8,65	2,00	LD	37,99	7,50	5,28	4,00	0,06	92,06
27/05/2010	S2 E15	48,85	16,00	13,08	1,10	10,94	2,10	0,50	39,86	8,64	5,99	5,38	0,19	103,78
24/06/2010	S2 E16	31,64	28,00	15,00	1,40	13,82	2,30	0,81	43,41	10,75	9,25	5,61	0,21	130,55
27/07/2010	S2 E17	39,29	30,00	14,00	1,30	11,68	2,23	0,70	39,20	10,86	6,71	5,01	0,27	121,97
01/09/2010	S2 E18	22,08	32,00	19,00	1,50	17,70	2,17	2,28	54,47	15,24	9,51	4,54	0,50	158,90
	C_{MNO}		14,39	10,09	0,95	8,89	1,76	0,31	35,93	7,06	4,18	2,14	0,07	85,79
	DP_{MNO}		6,69	3,50	0,15	3,71	0,21	0,50	7,11	4,00	1,94	1,50	0,10	27,24

A estação de amostragem Itavuvu – S3 mostrou comportamento não similar em comparação com as duas estações anteriores (Tabela 16). Durante o período estudado houve um predomínio de Na^{2+} dentre os cátions principais, com uma concentração média de $13,07 \text{ mg L}^{-1}$. Tal fato pode ser justificado devido à presença

dos núcleos urbanos Votorantim e Sorocaba que emitem efluentes “in natura” a montante deste ponto de amostragem. Para os ânions, a máxima concentração média foi de HCO_3^- com $43,77 \text{ mg L}^{-1}$. Os valores médios observados para TDS e SiO_2 foram de 104,08 e $11,84 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente. Durante o período seco as concentrações de Na^{2+} foram da ordem de 25 mg L^{-1} , enquanto que o HCO_3^- , nesse período foi da ordem de 61 mg L^{-1} .

Tabela 16 - Resultados analíticos das concentrações das principais espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions), sílica (SiO_2), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q_t), médias e desvios padrão nas águas do rio Sorocaba, para a estação de amostragem S3 - Itavuvu

Estação S3 - Itavuvu														
Concentração (mg L^{-1})														
Data	Amostra	Q_t ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	HCO_3^-	Cl	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	TDS
10/03/2009	S3 E1	28,80	16,00	16,44	0,91	17,96	2,02	1,94	53,78	17,40	11,69	1,91	0,22	140,27
07/04/2009	S3 E2	32,21	19,44	17,00	1,02	23,60	2,08	2,70	58,00	21,38	10,50	1,78	0,24	157,75
12/05/2009	S3 E3	26,76	19,00	15,10	1,00	20,87	2,05	2,58	63,25	19,70	9,78	1,76	0,35	155,45
17/06/2009	S3 E4	22,67	25,00	17,45	1,12	24,86	2,45	3,73	64,08	21,75	11,42	1,62	0,32	173,82
21/07/2009	S3 E5	25,40	20,00	17,93	1,10	27,00	2,58	3,22	68,59	24,76	12,00	1,51	0,33	179,01
25/08/2009	S3 E6	60,13	10,90	13,07	0,97	13,90	2,17	1,28	46,76	13,27	9,03	1,42	0,06	112,82
22/09/2009	S3 E7	49,92	10,43	11,90	0,91	14,55	2,01	0,79	41,44	12,28	7,50	1,20	0,08	103,08
10/11/2009	S3 E8	80,56	9,38	10,26	0,83	11,91	2,00	0,55	37,85	7,60	7,05	0,82	0,09	88,33
12/12/2009	S3 E9	165,01	9,19	8,78	0,80	9,12	1,85	0,27	39,56	8,20	7,00	0,80	LD	85,57
15/01/2010	S3 E10	128,24	9,35	8,80	0,65	11,00	1,60	0,44	38,35	8,62	4,29	1,36	LD	84,46
20/01/2010	S3 E11	166,38	9,48	9,00	0,60	11,00	1,70	0,16	39,77	6,55	6,90	1,30	LD	86,46
23/02/2010	S3 E12	86,69	10,59	11,80	0,80	10,73	1,90	0,20	42,44	9,01	5,37	1,80	LD	94,64
30/03/2010	S3 E13	72,39	7,74	14,90	1,00	9,00	2,30	0,53	38,46	6,69	5,97	1,90	0,22	88,71
27/04/2010	S3 E14	53,32	10,79	14,94	1,10	13,29	2,35	0,69	44,88	12,05	9,17	2,00	0,31	111,57
27/05/2010	S3 E15	36,98	15,26	12,95	1,30	14,47	2,40	0,97	40,63	13,12	6,34	2,29	0,32	110,05
24/06/2010	S3 E16	24,72	22,50	15,21	1,30	22,12	2,40	2,30	58,45	19,20	11,91	2,49	0,29	158,18
27/07/2010	S3 E17	30,16	20,00	14,90	1,25	13,95	2,23	1,59	44,10	13,30	8,19	2,05	0,92	122,46
01/09/2010	S3 E18	17,91	25,00	18,00	1,40	19,06	2,60	3,80	60,46	19,30	12,00	2,10	0,74	164,47
	C_{MNO}		11,84	11,80	0,87	13,07	1,99	0,87	43,77	10,85	7,41	1,46	0,13	104,08
	DP_{MNO}		4,52	3,04	0,21	4,51	0,28	0,95	7,98	4,82	2,12	0,46	0,20	27,10

A estação de amostragem S4 - Votorantim apresentou o mesmo comportamento das estações S1 - Laranjal Paulista e S2 - Tatuí (Tabela 17). Houve um predomínio de Ca^{2+} dentre os cátions principais, com uma concentração média de $10,57 \text{ mg L}^{-1}$. Para os ânions, a máxima concentração média foi de HCO_3^- com $38,06 \text{ mg L}^{-1}$. As concentrações médias observadas de TDS e SiO_2 foram de 82,23 e $7,76 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente. Durante o período seco as concentrações de Ca^{2+} foram da ordem de 14 mg L^{-1} , enquanto que o HCO_3^- , nesse período foi da ordem de 54 mg L^{-1} .

Tabela 17 - Resultados analíticos das concentrações das principais espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions), sílica (SiO_2), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q_t), médias e desvios padrão nas águas do rio Sorocaba, para a estação de amostragem S4 – Votorantim

Estação S4 - Votorantim														
Concentração (mg L^{-1})														
Data	Amostra	Q_t ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	SiO_2	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	TDS
10/03/2009	S4 E1	3,93	7,34	12,09	0,68	14,56	1,57	0,39	50,00	15,41	3,44	0,66	0,18	106,31
07/04/2009	S4 E2	4,05	9,25	12,64	0,72	13,94	1,54	0,25	45,00	15,40	4,03	0,73	0,07	103,57
12/05/2009	S4 E3	2,30	9,29	14,20	0,72	15,60	1,61	0,58	53,00	18,00	5,80	0,89	0,12	119,81
17/06/2009	S4 E4	1,64	11,95	14,45	0,91	22,35	2,30	1,15	66,57	25,00	9,45	1,15	0,25	155,52
21/07/2009	S4 E5	1,81	10,50	14,27	0,88	20,00	1,81	0,75	58,00	19,00	6,60	0,90	0,15	132,85
25/08/2009	S4 E6	2,78	9,61	13,80	0,73	17,00	1,65	1,36	54,00	17,50	5,02	0,66	0,15	121,48
22/09/2009	S4 E7	5,00	7,62	11,17	0,66	8,32	1,60	0,11	40,00	9,27	2,02	0,18	0,06	81,00
10/11/2009	S4 E8	5,77	6,50	11,60	0,71	11,00	1,62	0,30	42,00	13,42	3,10	0,38	0,05	90,68
12/12/2009	S4 E9	13,89	6,64	9,65	0,57	7,60	1,20	0,22	32,71	7,68	2,92	0,20	0,08	69,44
15/01/2010	S4 E10	25,16	7,20	9,00	0,45	7,62	1,35	0,22	33,50	6,94	2,09	0,17	0,02	68,55
20/01/2010	S4 E11	19,07	7,66	9,50	0,55	8,36	1,40	0,33	39,21	7,97	2,09	0,28	0,06	77,41
23/02/2010	S4 E12	14,58	7,99	10,20	0,60	5,16	1,50	LD	32,15	6,94	2,10	0,21	0,07	66,91
30/03/2010	S4 E13	6,19	8,15	13,32	0,70	5,23	1,75	0,15	34,63	10,00	3,31	0,75	0,18	78,17
27/04/2010	S4 E14	4,60	8,07	11,92	0,84	6,02	1,80	0,36	34,99	8,07	2,51	0,37	0,04	74,98
27/05/2010	S4 E15	3,16	8,58	11,58	0,85	16,68	1,80	0,78	41,64	18,90	5,42	0,43	0,22	106,86
24/06/2010	S4 E16	3,10	8,52	11,93	0,90	21,32	1,90	0,68	45,12	23,83	8,41	0,41	0,23	123,26
27/07/2010	S4 E17	5,47	7,94	9,14	0,80	6,11	1,78	0,47	32,71	7,75	2,43	0,14	0,20	69,45
01/09/2010	S4 E18	2,89	8,42	11,01	0,90	25,63	1,87	LD	43,37	26,06	8,97	0,47	0,28	126,98
	C_{MND}		7,76	10,57	0,63	9,51	1,52	0,30	38,06	10,34	3,11	0,34	0,09	82,23
	DF_{MND}		0,94	1,60	0,14	4,85	0,22	0,26	7,03	5,13	1,78	0,23	0,07	20,15

Para a estação de amostragem Ibiúna – S5 o mesmo comportamento foi observado em relação às estações de amostragem S1- Laranjal Paulista, S2 -Tatuí e S4 - Votorantim (Tabela 18). Dentre os cátions principais houve um predomínio de Ca^{2+} , com uma concentração média de $7,64 \text{ mg L}^{-1}$. Já para os ânions, a máxima concentração média foi de HCO_3^- com $28,00 \text{ mg L}^{-1}$. Os valores observados para TDS e SiO_2 foram de $62,39$ e $8,70 \text{ mg L}^{-1}$ respectivamente. Durante o período seco as concentrações de Ca^{2+} na região de nascente foram da ordem de 11 mg L^{-1} , enquanto que o HCO_3^- , nesse período foi da ordem de 43 mg L^{-1} .

Tabela 18 - Resultados analíticos das concentrações das principais espécies químicas dissolvidas (cátions e ânions), sílica (SiO₂), os sólidos totais dissolvidos (TDS), vazão (Q_t), médias e desvios padrão nas águas do rio Sorocaba, para a estação de amostragem S5 - Ibiúna, região de nascente

Estação S5 - Ibiúna														
Concentração (mg L ⁻¹)														
Data	Amostra	Qt (m ³ s ⁻¹)	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	TDS
10/03/2009	S5 E1	7,98	11,00	11,22	0,63	7,90	1,64	0,71	41,00	8,32	1,80	1,54	0,05	85,82
07/04/2009	S5 E2	9,20	11,93	10,50	0,65	9,04	1,97	0,04	40,00	10,70	1,70	2,14	0,05	88,71
12/05/2009	S5 E3	7,25	12,90	11,00	0,60	10,14	1,80	0,86	39,00	11,63	1,76	2,29	0,06	92,04
17/06/2009	S5 E4	5,79	15,00	11,00	0,70	11,55	1,95	0,60	45,00	14,79	2,14	2,59	0,09	105,40
21/07/2009	S5 E5	6,76	12,00	10,00	0,61	10,54	2,09	0,40	38,00	12,17	2,26	1,11	0,04	89,22
25/08/2009	S5 E6	19,20	10,03	7,10	0,40	6,90	1,50	0,02	25,00	8,65	1,62	0,45	0,03	61,69
22/09/2009	S5 E7	15,54	10,54	8,00	0,50	7,32	1,66	0,01	30,00	7,74	1,04	0,80	0,06	67,65
10/11/2009	S5 E8	26,51	8,95	7,00	0,30	6,80	1,53	LD	27,69	7,30	0,89	0,15	0,04	60,64
12/12/2009	S5 E9	56,75	7,23	6,18	0,34	4,80	1,41	0,01	23,40	4,98	0,95	0,07	0,04	49,40
15/01/2010	S5 E10	43,58	7,91	6,80	0,39	6,45	1,60	LD	27,46	6,34	0,81	0,18	0,04	57,97
20/01/2010	S5 E11	57,24	6,70	6,20	0,35	4,06	1,35	0,01	22,50	4,11	0,93	0,10	0,02	46,34
23/02/2010	S5 E12	28,71	9,17	8,20	0,40	6,46	1,70	LD	29,00	8,09	0,75	0,17	0,05	63,99
30/03/2010	S5 E13	23,59	8,08	9,22	0,60	7,16	1,80	LD	25,56	8,37	0,76	0,26	LD	61,81
27/04/2010	S5 E14	16,76	8,63	9,01	0,65	6,69	1,90	LD	23,66	9,75	1,43	1,08	0,05	62,84
27/05/2010	S5 E15	10,91	9,08	8,00	0,75	8,62	2,10	LD	32,00	11,42	0,95	1,89	0,16	74,95
24/06/2010	S5 E16	6,52	10,16	9,10	0,76	8,14	2,07	LD	40,00	10,98	1,32	2,71	0,17	85,41
27/07/2010	S5 E17	8,47	9,94	9,00	0,70	10,09	1,82	LD	38,00	14,43	1,45	2,94	LD	86,37
01/09/2010	S5 E18	4,08	12,00	10,00	0,80	16,00	2,20	LD	45,00	20,00	2,50	4,16	LD	112,66
C _{MNQ}			8,70	7,64	0,46	6,58	1,62	0,06	28,00	7,56	1,09	0,63	0,04	62,39
DP _{MNQ}			1,78	1,51	0,14	2,06	0,23	0,18	5,99	3,00	0,40	0,88	0,03	15,01

As Figuras 29 a 33 apresentam o equilíbrio iônico, representado pelo relacionamento entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-) para cada estação de amostragem.

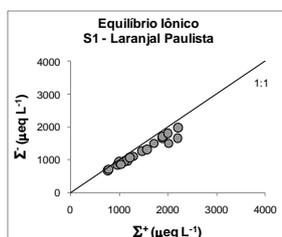


Figura 29 - Equilíbrio iônico entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-), para a estação S1 – Laranjal Paulista, (em $\mu\text{eq L}^{-1}$)

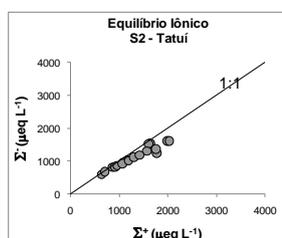


Figura 30 - Equilíbrio iônico entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-), para a estação S2 – Tatuí, (em $\mu\text{eq L}^{-1}$)

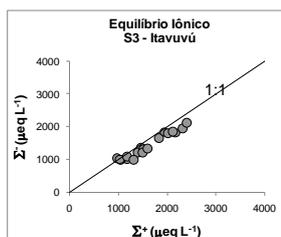


Figura 31 - Equilíbrio iônico entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-), para a estação S3 – Itavuvú, (em $\mu\text{eq L}^{-1}$)

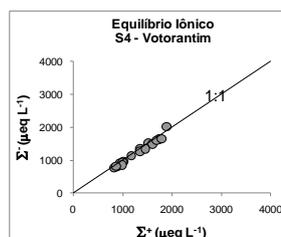


Figura 32 - Equilíbrio iônico entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-), para a estação S4 – Votorantim, (em $\mu\text{eq L}^{-1}$)

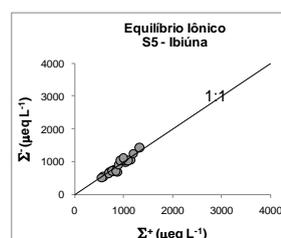


Figura 33 - Equilíbrio iônico entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-), para a estação S5 – Ibiúna, (em $\mu\text{eq L}^{-1}$)

Foi possível observar que houve uma tendência de desequilíbrio, com o predomínio de cátions para a maioria das estações amostradas. Isto pode estar relacionado aos processos hidrogeoquímicos que ocorrem naturalmente na região e ao não envolvimento do carbono orgânico dissolvido na soma de ânions, como também devido à possível influência de efluentes domésticos na carga dissolvida, pois os pontos de amostragem à montante da bacia de drenagem não apresentaram excesso de cátions.

Por meio dos valores médios das concentrações foi possível calcular a partição percentual das principais espécies químicas da carga fluvial dissolvida em relação ao TDS, conforme citado no item 6.2 por estação de amostragem, desde as nascentes até a foz.

De uma forma geral foi possível observar ao longo de toda a bacia de drenagem, um predomínio de HCO_3^- e Na^+ , sendo de 30,22 e 22,43 % respectivamente junto à foz (A) e de 33,26 e 20,73 % na região das nascentes (E). A

ocorrência de HCO_3^- na bacia de drenagem do rio Sorocaba, representada por sua foz, foi inferior ao observado por Bortoletto Junior (2004) para o rio Tietê (40,40 %) e da mesma ordem de grandeza para o rio Piracicaba (30,20 %). No entanto, a ocorrência de Na^+ na bacia do rio Sorocaba foi superior ao observado para os rios Tietê (14,00 %) e Piracicaba (16,10 %). Participações importantes de SiO_2 , Ca^{2+} e Cl^- puderam ser observadas para a foz do rio Sorocaba, com 12,87, 14,03 e 10,49 %, respectivamente, enquanto que para a região das nascentes as participações verificadas foram de 10,51, 13,85 e 15,46 %. Ainda em termos de SiO_2 , a sua ocorrência na foz do rio Sorocaba foi superior às observadas para os rios Tietê (3,80 %) e Piracicaba (7,20 %), o que evidencia um processo de alteração de rochas, principalmente de silicatos, mais acentuado (Figura 34).

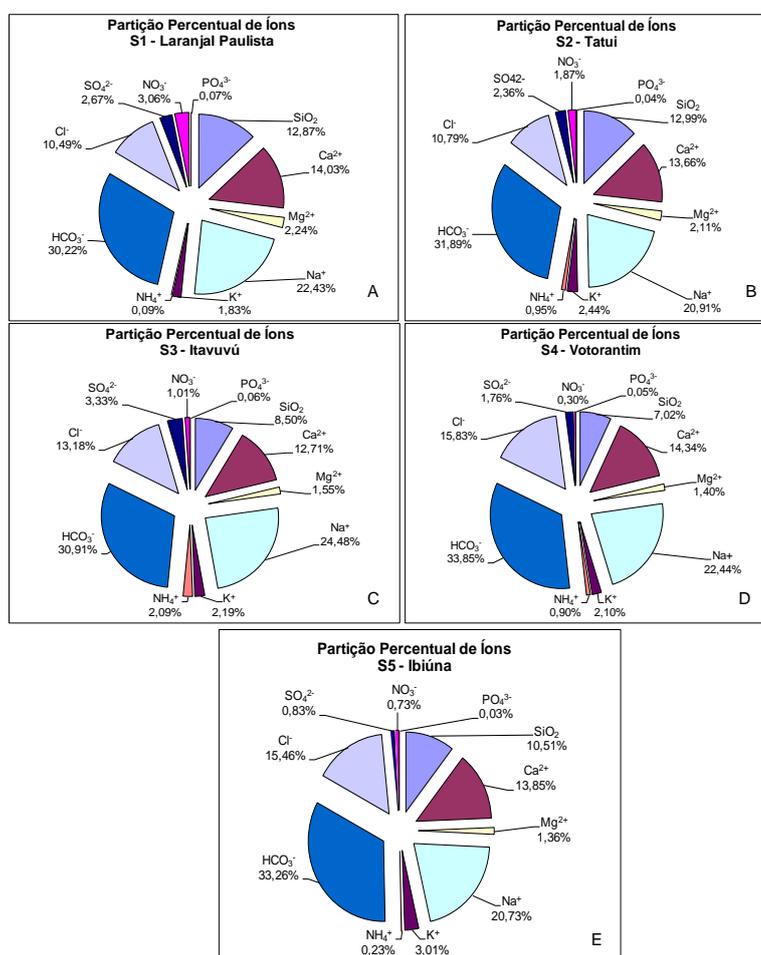


Figura 34 - Distribuição percentual do SiO_2 , ânions e cátions majoritários presentes nas amostras de águas fluviais, para as estações de amostragem S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna

9.2.3 - Variabilidade temporal e espacial das vazões e concentrações

Pode ser observada na Figura 35 a distribuição temporal das vazões por estação de amostragem nas datas de coleta, desde as nascentes até a foz, na bacia do rio Sorocaba.

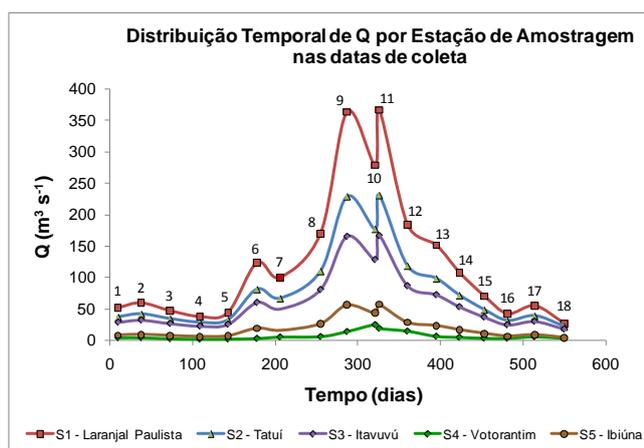


Figura 35 - Distribuição temporal da vazão (Q), em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, para as estações de amostragem S1 – Laranjal Paulista, S2- Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, considerando os volumes observados nos dias de coleta de amostras de águas fluviais para o período de estudo

As amostragens das cinco primeiras excursões (10/03/2009, 07/04/2009, 12/05/2009, 17/06/2009 e 21/07/2009) foram realizadas com vazões abaixo de $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, representando amostras do período de estiagem na bacia de drenagem, e abrangeram os períodos de baixa vazão. As excursões seis a oito caracterizaram o início do período de cheia, com vazões até $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sendo uma coleta no pico de cheia (25/08/2009), uma na descida do rio (22/09/2009) e uma na subida do rio (10/11/2009), as excursões nove, dez e onze, caracterizaram-se por apresentarem as maiores vazões medidas durante o período estudado, com uma vazão máxima de $366 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (excursão 11), na estação S1 – Laranjal Paulista. A partir da excursão doze, os valores de vazão voltaram a diminuir iniciando-se um longo período de estiagem.

As distribuições temporais das concentrações das espécies químicas dissolvidas (cátions, ânions, SiO_2 e TDS), em mg L^{-1} , em função das respectivas vazões, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, por estação de amostragem podem ser observadas nas Figuras 36 a 40.

As análises das variabilidades temporais das concentrações catiônicas principais e SiO_2 , junto à foz do rio Sorocaba, estação S1 – Laranjal Paulista indicaram comportamentos similares para as espécies químicas estudadas, evidenciando a influência dos processos de diluição. O mesmo padrão de distribuição das concentrações e vazões pode ser observado entre os ânions principais e o total de sólidos dissolvidos (TDS) para a mesma estação de amostragem, com concentrações elevadas durante o período de seca e baixas concentrações durante o período de cheia (Figura 36).

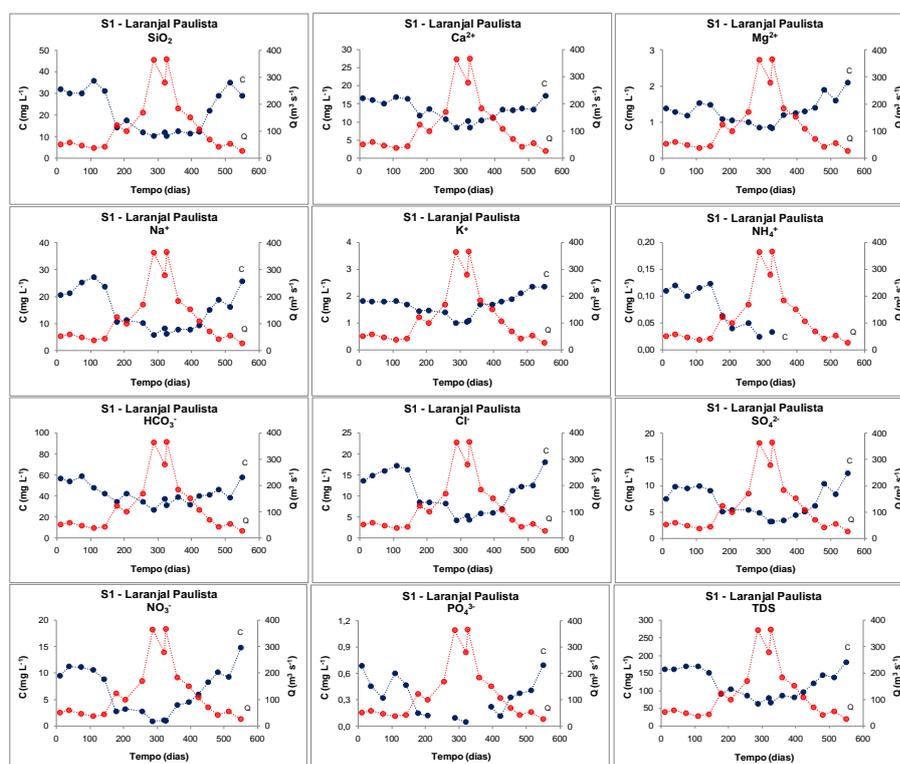


Figura 36 - Distribuição temporal de vazão (Q), cátions, ânions, SiO_2 e TDS presentes nas amostras de águas do rio Sorocaba em S1 – Laranjal Paulista

Para a estação S2 – Tatuí, a variabilidade temporal das concentrações de SiO_2 e cátions principais em função das vazões apresentou o mesmo padrão de distribuição da estação S1, com exceção do K^+ , que mostrou ser pouco variável durante o período amostrado, aparentando fazer parte de um aporte difuso na bacia de drenagem, principalmente relacionado aos processos de alteração de rochas

silicatadas. Em termos de ânions principais e TDS, a distribuição dessas concentrações na estação S2 se mostrou influenciada pelos processos de diluição fluvial, se mostrando mais concentradas durante o período seco (Figura 37).

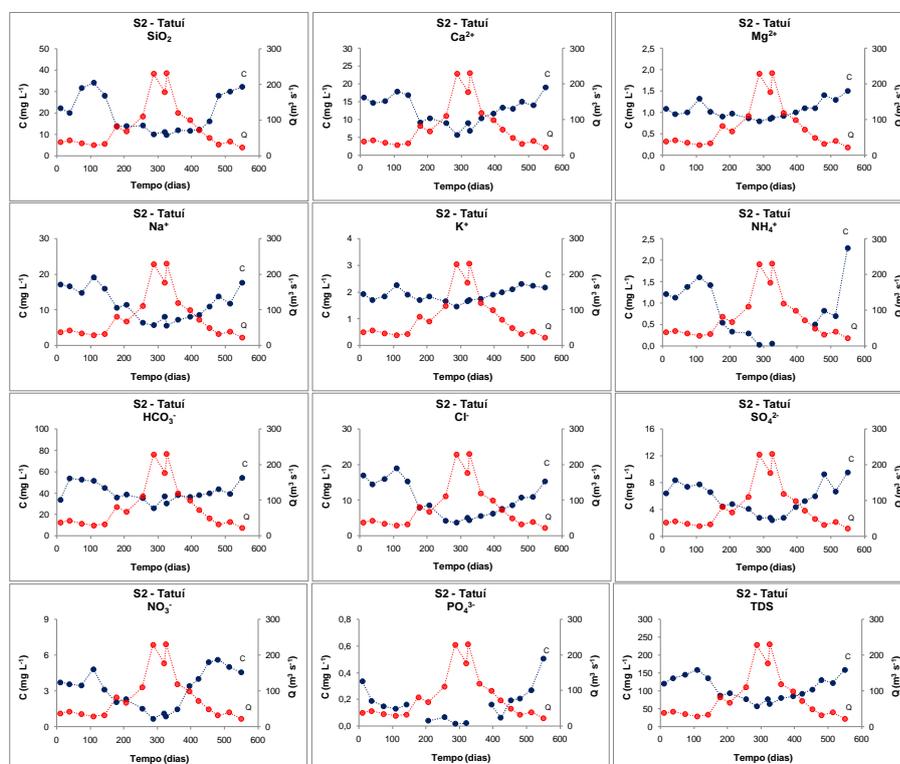


Figura 37 - Distribuição temporal de vazão (Q), cátions, ânions, SiO_2 e TDS presentes nas amostras de águas do rio Sorocaba em S2 – Tatuí

As demais estações de amostragem, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, apresentaram a mesma tendência com respeito à variabilidade temporal das concentrações das espécies químicas estudadas, ilustrando da mesma forma, em direção às nascentes, a pouca variação das concentrações de K^+ durante o período estudado, mostrando fazer parte de um aporte difuso ao longo de toda a bacia de drenagem, mesmo para a estação S4, cujas concentrações foram as mais baixas observadas e com pouca variabilidade ao longo do período estudado (Figuras 38 a 40).

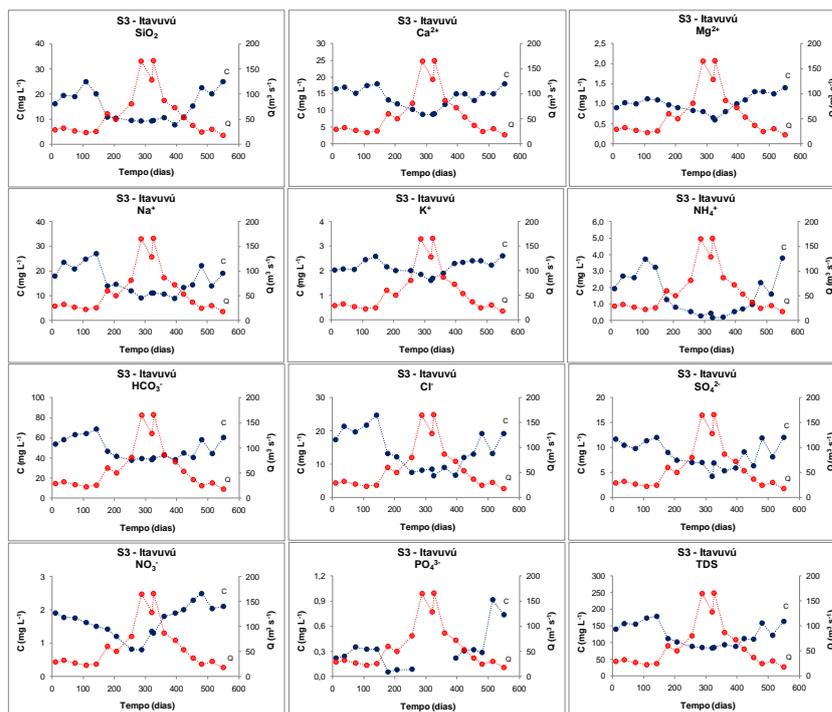


Figura 38 - Distribuição temporal de vazão (Q), cátions, ânions, SiO_2 e TDS presentes nas amostras de água do rio Sorocaba em S3 - Itavuvú

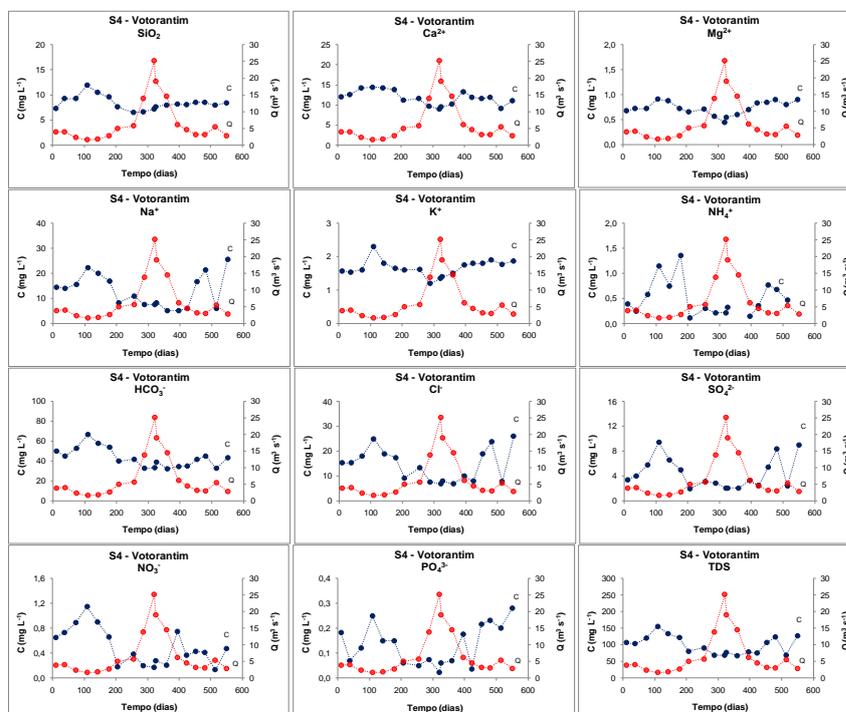


Figura 39 - Distribuição temporal de vazão (Q), cátions, ânions, SiO_2 e TDS presentes nas amostras de água do rio Sorocaba em S4 - Votorantim

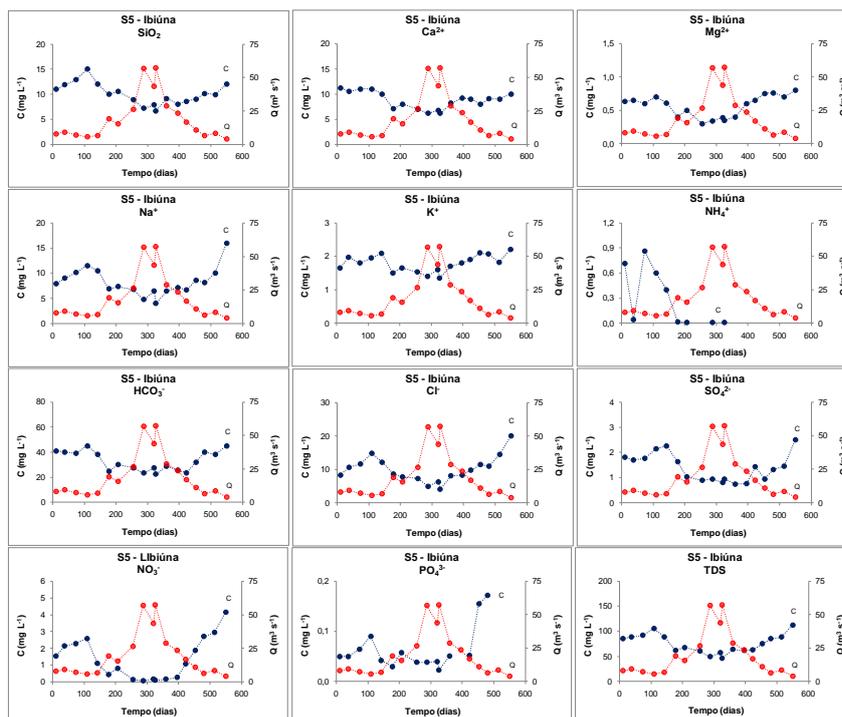


Figura 40 - Distribuição temporal de vazão (Q), cátions, ânions, SiO_2 e TDS presentes nas amostras de águas do rio Sorocaba em S5 – Ibiúna

As distribuições espaciais das concentrações médias das principais espécies químicas dissolvidas e totais de sólidos dissolvidos (TDS) em função das respectivas vazões médias, por estação de amostragem, podem ser observadas na Figura 41.

Numa primeira análise foi possível verificar a evolução crescente das vazões ao longo do rio Sorocaba, desde a nascente até a foz, dentro de um alinhamento entre as estações S5 e S1, não considerando a estação S4 que está sob influência do reservatório de Itupararanga, podendo ser observado juntamente com a evolução espacial do SiO_2 .

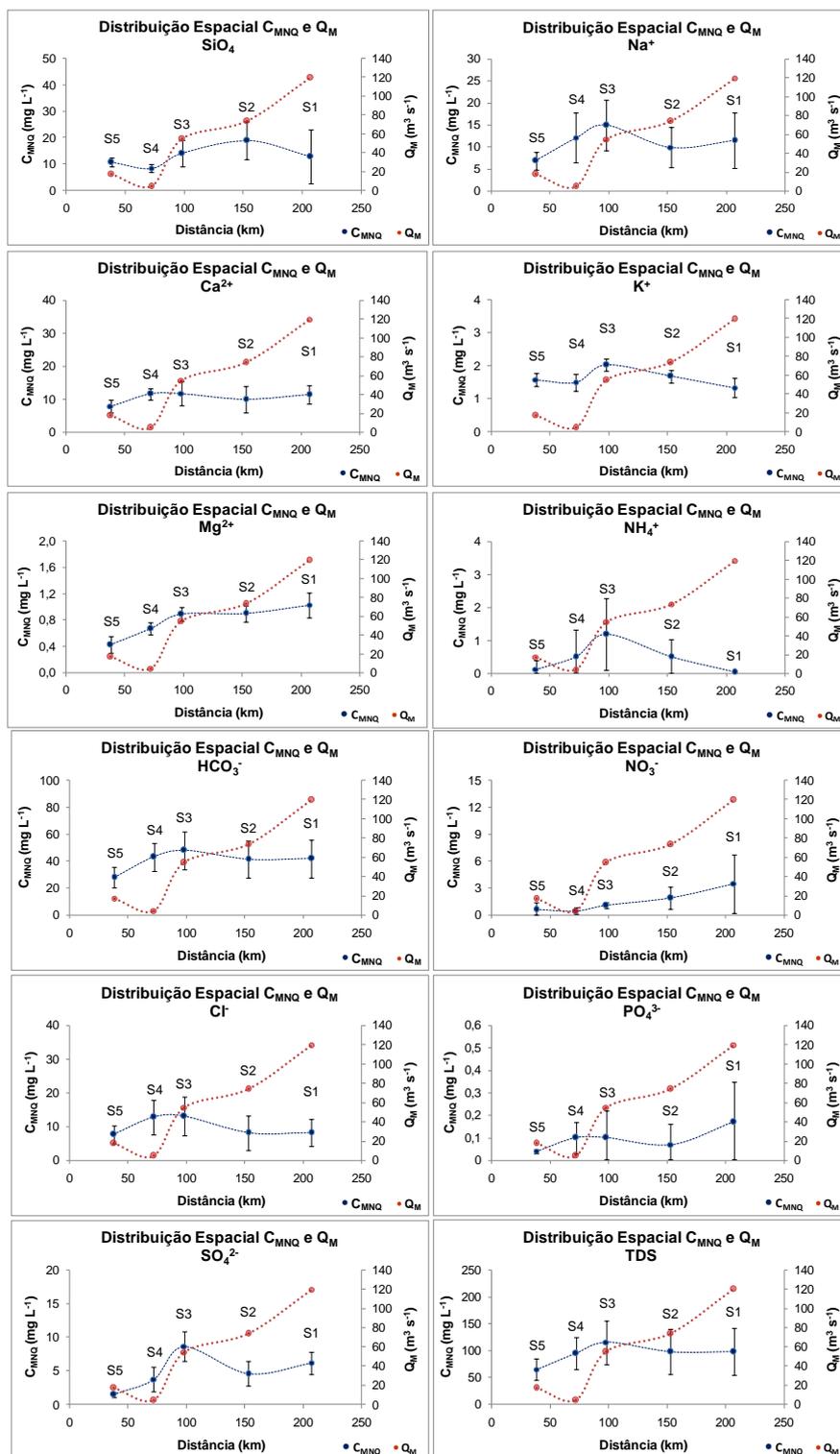


Figura 41 - Distribuição espacial da concentração média normalizada pela vazão (C_{MNQ}), com respectivo desvio padrão, para ânions, cátions, SiO₂, TDS, em função das médias das vazões (Q_M), presentes nas águas do rio Sorocaba, para as estações de amostragem S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, durante o período estudado

As distribuições espaciais das concentrações médias de HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} e PO_4^{3-} , ao longo do rio Sorocaba, indicaram comportamentos similares não variando significativamente em direção à foz, mas com um aumento de concentração na estação S3 – Itavuvú, enquanto que as concentrações de NO_3^- evoluíram positivamente ao longo da bacia de drenagem. A distribuição das concentrações de TDS seguiu a maioria das espécies químicas analisadas, não variando significativamente em direção à foz, mas com um aumento de concentração média na estação S3.

9.2.4. Relacionamento concentração - vazão

O relacionamento concentração – vazão para as principais espécies químicas dissolvidas ao longo do rio Sorocaba foi investigado de acordo com o descrito no item 6.4.

O estudo dessa relação permitiu identificar as possíveis origens dessas espécies químicas e caracterizar certos mecanismos susceptíveis de influenciar ou de controlar o comportamento das espécies dissolvidas nas águas fluviais. A distribuição das concentrações das diferentes espécies químicas determinadas em comparação com as respectivas curvas de diluição teórica, de acordo com Mortatti et al. (2008), permitiram identificar as possíveis origens dos aportes dessas espécies químicas, relacionando principalmente os pontuais e os difusos.

As relações concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas foram determinadas ao longo da bacia do rio Sorocaba, desde a nascente até a foz e podem ser observadas nas Figuras 42 a 45.

De uma maneira geral, para o rio Sorocaba estação S1 – Laranjal Paulista, o qual representa o exutório da bacia de drenagem, as relações concentração - vazão se mostraram decrescentes e influenciadas pela diluição fluvial, sendo altamente significantes os ajustes de potência propostos (Figura 42).

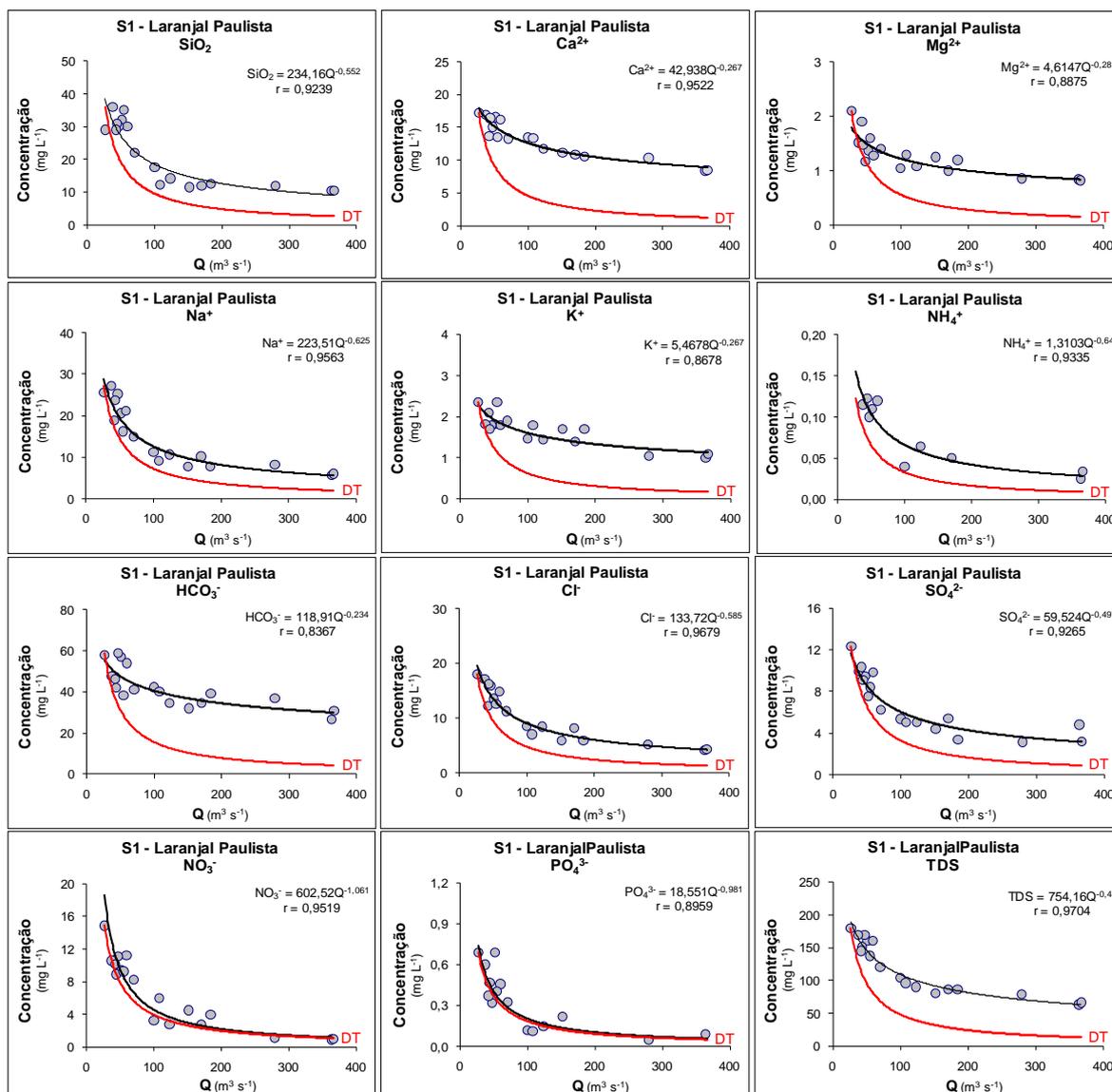


Figura 42 - Relação concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S1 – Laranjal Paulista, junto à foz, com as respectivas regressões de potência e curvas de diluição teórica (DT), durante o período estudado

Foi possível observar que o SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- e TDS apresentaram curvas de distribuição de concentração distantes das respectivas curvas de diluição teórica, indicando possíveis aportes difusos. Para Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} e PO_4^{3-} as curvas de distribuição das concentrações foram muito próximas às curvas de diluição teóricas calculadas, indicando origens possivelmente pontuais, caso particular do PO_4^{3-} cuja origem antrópica é bastante conhecida principalmente nos efluentes domésticos. Para as espécies nitrogenadas NH_4^+ e NO_3^- as distribuições das concentrações indicaram origens pontuais, possivelmente associadas às atividades agrícolas na região.

A Figura 43 ilustra o relacionamento concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S2 – Tatuí. Os resultados obtidos mostraram um comportamento similar em relação à estação S1 quanto às espécies químicas de origem difusa e pontual, evoluindo decrescentemente com respeito aos modelos de potência ajustados.

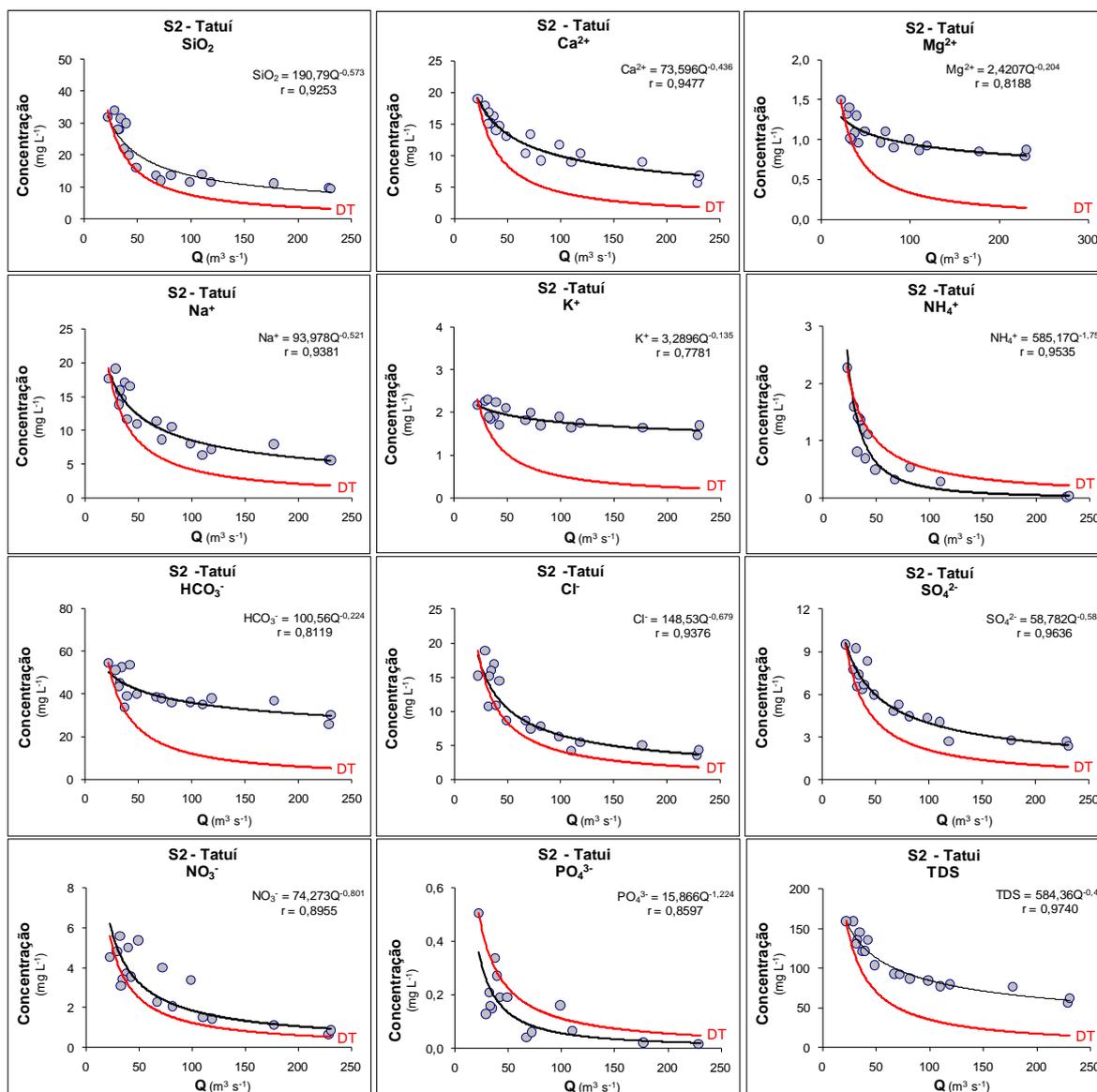


Figura 43 - Relação concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S2 – Tatuí, com as respectivas regressões de potência e curvas de diluição teórica (DT), durante o período estudado

O relacionamento concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S3 – Itavuvú pode ser observado na Figura 44, cujos resultados obtidos apresentaram um comportamento também similar em

relação às estações à jusante, S2 e S1, quanto às espécies químicas de origem difusa e pontual, evoluindo decrescentemente com respeito aos modelos potência ajustados, com exceção do NO_3^- o qual se mostrou bastante variável, no limite da significância do modelo ajustado.

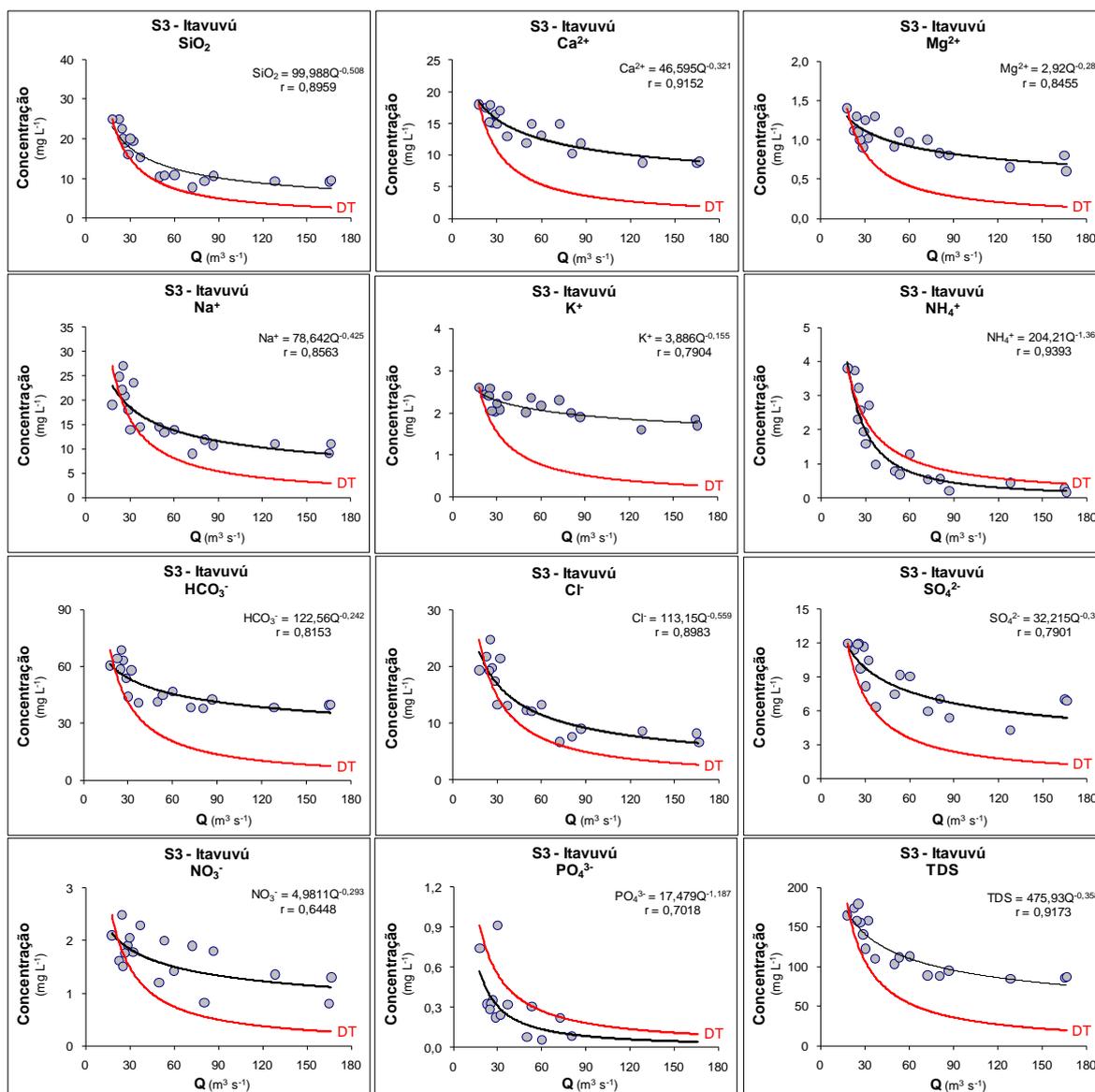


Figura 44 - Relação concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S3 – Itavuvú, com as respectivas regressões de potência e curvas de diluição teórica (DT), durante o período estudado

Conforme pode ser observado na Figura 45, os relacionamentos concentração - vazão para o rio Sorocaba, estação S4 – Votorantim, em termos de SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- e TDS apresentaram curvas de distribuição de concentração separadas das respectivas curvas de diluição teórica, indicando

possíveis aportes difusos, enquanto que para Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} e PO_4^{3-} as curvas de distribuição das concentrações foram muito próximas às curvas de diluição teóricas calculadas, indicando origens pontuais, casos particulares de SO_4^{2-} e PO_4^{3-} cuja origem antrópica está relacionada à pressão urbana da cidade de Votorantim.

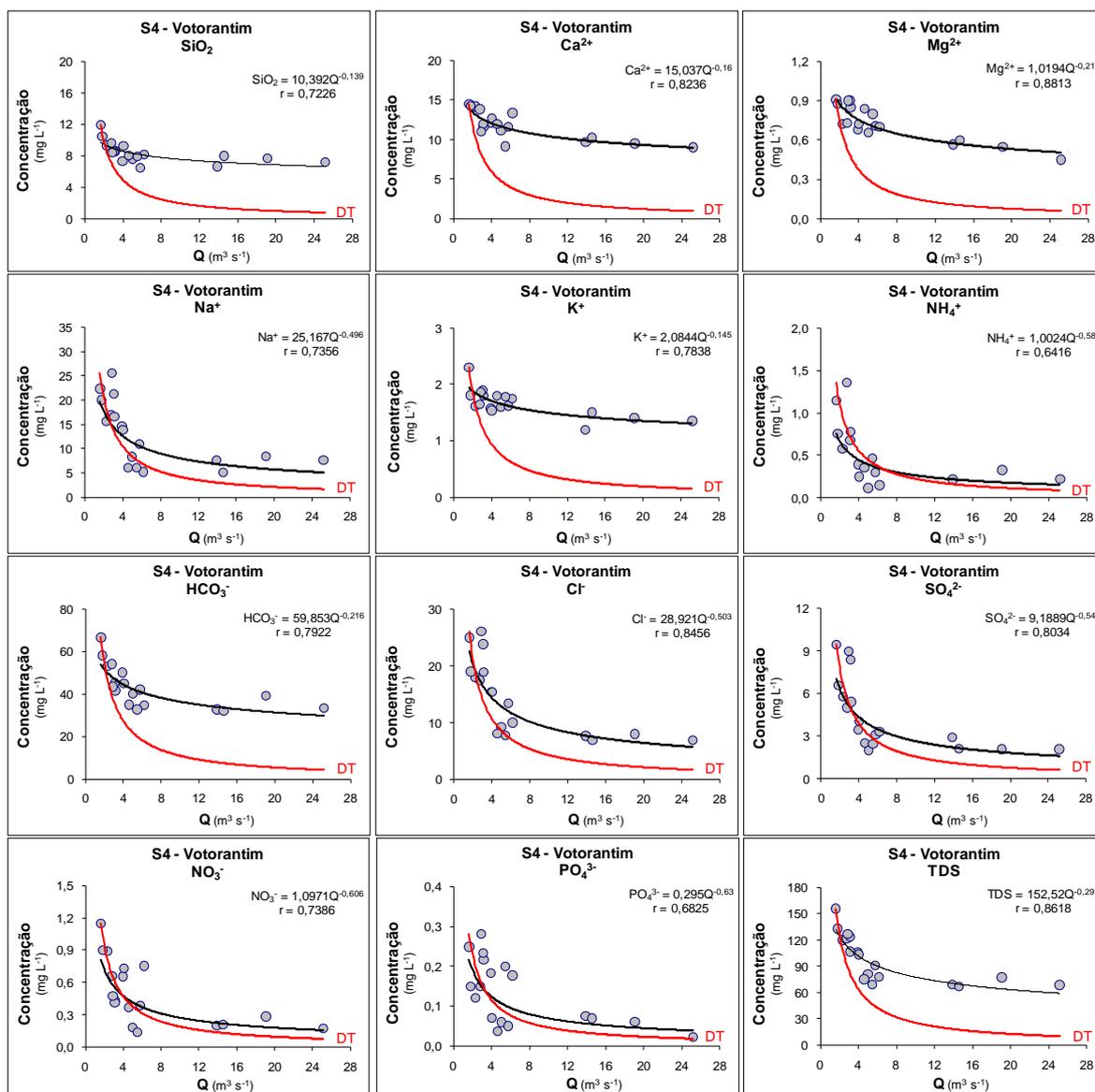


Figura 45 - Relação concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S4 – Votorantim, com as respectivas regressões de potência e curvas de diluição teórica (DT), durante o período estudado

A Figura 46 ilustra o relacionamento concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba próximo às nascentes, estação S5 – Ibiúna. Com exceção das espécies nitrogenadas NH_4^+ e NO_3^- , como também o PO_4^{3-} , de possíveis origens pontuais com afinidade antrópica, as demais espécies

químicas se mostraram principalmente associadas aos aportes difusos, sendo significantes os modelos ajustados de potência decrescentes.

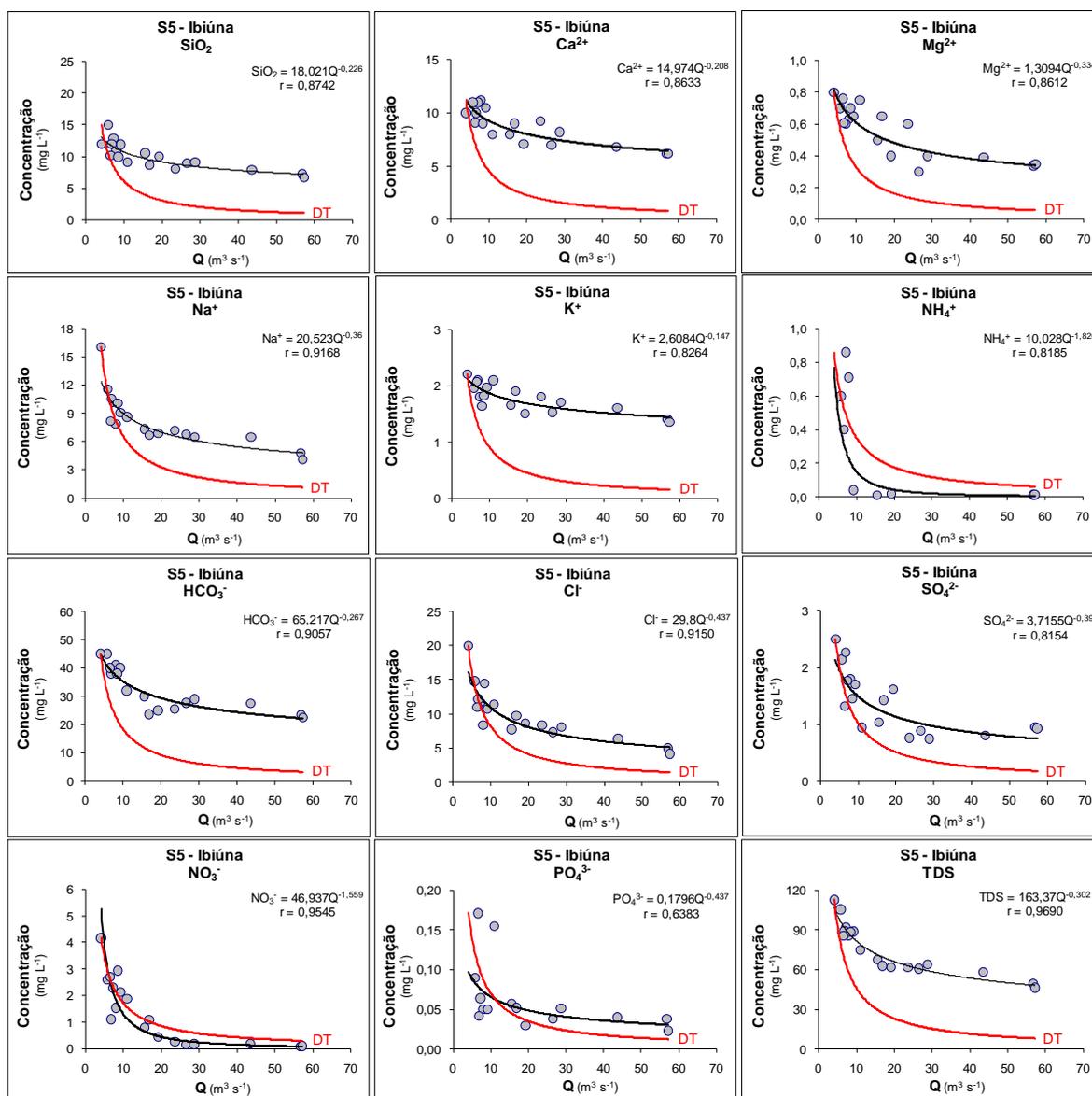


Figura 46. Relação concentração - vazão para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba na estação S5 – Ibiúna, próximo às nascentes, com as respectivas regressões de potência e curvas de diluição teórica (DT), durante o período estudado.

9.2.5. Matriz de Correlação

As matrizes dos coeficientes de correlação linear simples foram estabelecidas entre as principais espécies químicas analisadas para o rio Sorocaba, conforme descrito no item 6.5, podendo ser observadas nas Tabelas 19 a 23.

Os resultados obtidos para a foz do rio Sorocaba, estação S1 – Laranjais Paulista, durante o período estudado podem ser verificados na Tabela 19.

Tabela 19 - Matriz dos coeficientes de correlação entre as principais espécies químicas dissolvidas junto à foz do rio Sorocaba, estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, durante o período estudado

Correl. ($p < 0,01$)	S1 - Laranjal Paulista												
	Cond	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	TDS
Q	<u>-0.848</u>	<u>-0.783</u>	<u>-0.895</u>	<u>-0.763</u>	<u>-0.794</u>	<u>-0.845</u>	<u>-0.828</u>	<u>-0.740</u>	<u>-0.837</u>	<u>-0.767</u>	<u>-0.843</u>	<u>-0.704</u>	<u>-0.844</u>
TDS	<u>0.955</u>	<u>0.942</u>	<u>0.947</u>	<u>0.749</u>	<u>0.979</u>	<u>0.747</u>	<u>0.942</u>	<u>0.902</u>	<u>0.978</u>	<u>0.935</u>	<u>0.957</u>	<u>0.886</u>	
PO ₄ ³⁻	<u>0.777</u>	<u>0.855</u>	<u>0.858</u>	<u>0.738</u>	<u>0.858</u>	<u>0.687</u>	<u>0.872</u>	<u>0.730</u>	<u>0.871</u>	<u>0.825</u>	<u>0.865</u>		
NO ₃ ⁻	<u>0.930</u>	<u>0.877</u>	<u>0.897</u>	<u>0.853</u>	<u>0.913</u>	<u>0.861</u>	<u>0.949</u>	<u>0.855</u>	<u>0.928</u>	<u>0.934</u>			
SO ₄ ²⁻	<u>0.912</u>	<u>0.881</u>	<u>0.852</u>	<u>0.813</u>	<u>0.928</u>	<u>0.740</u>	<u>0.924</u>	<u>0.772</u>	<u>0.938</u>				
Cl ⁻	<u>0.920</u>	<u>0.924</u>	<u>0.937</u>	<u>0.726</u>	<u>0.989</u>	<u>0.707</u>	<u>0.957</u>	<u>0.827</u>					
HCO ₃ ⁻	<u>0.921</u>	<u>0.748</u>	<u>0.862</u>	0,589	<u>0.846</u>	<u>0.617</u>	<u>0.795</u>						
NH ₄ ⁺	<u>0.836</u>	<u>0.947</u>	<u>0.925</u>	<u>0.932</u>	<u>0.942</u>	<u>0.920</u>							
K ⁺	<u>0.762</u>	<u>0.723</u>	<u>0.713</u>	<u>0.911</u>	<u>0.651</u>								
Na ⁺	<u>0.906</u>	<u>0.922</u>	<u>0.923</u>	<u>0.691</u>									
Mg ²⁺	<u>0.736</u>	<u>0.703</u>	<u>0.716</u>										
Ca ²⁺	<u>0.886</u>	<u>0.865</u>											
SiO ₂	<u>0.861</u>												

Comparando os coeficientes de correlação obtidos entre as espécies químicas dissolvidas para a estação S1 – Laranjal Paulista, foi possível observar que as correlações obtidas entre a vazão e todas as espécies químicas estudadas foram significativas e inversas, seguindo o modelo de diluição e as espécies químicas dissolvidas apresentaram correlações positivas significativas com os valores de TDS e condutividade elétrica. Os cátions principais Ca²⁺, Na⁺ e K⁺ apresentaram correlações significativas com o HCO₃⁻, como também com o SiO₂, o que é normalmente esperado nos produtos de intemperismo, com exceção do Mg²⁺ que só foi correlacionado com o SiO₂.

Para os ânions Cl⁻ e SO₄²⁻, os mesmos se mostraram correlacionados com o SiO₂, sendo o Cl⁻ também relacionado com o Na⁺ e K⁺, como era de se esperar, enquanto que o SO₄²⁻ se correlacionou com os todos os alcalinos e alcalinos terrosos, enquanto que o NO₃⁻ se mostrou correlacionado com a maioria das espécies químicas estudadas.

A Tabela 20 apresenta os resultados para o rio Sorocaba na estação S2 – Tatuí, durante o período estudado.

Tabela 20 - Matriz dos coeficientes de correlação entre as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, estação de amostragem S2 – Tatuí, durante o período estudado

Correl. (p < 0,01)	S2 - Tatuí												
	Cond	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	TDS
Q	-0.850	-0.750	-0.882	-0.688	-0.815	-0.719	-0.724	-0.737	-0.788	-0.854	-0.826	-0,625	-0.853
TDS	0.937	0.939	0.949	0.760	0.948	0.699	0.923	0.891	0.940	0.932	0.756	0,662	
PO ₄ ³⁻	0.767	0,615	0.731	0.732	0,636	0,565	0.720	0,458	0,587	0.721	0,609		
NO ₃ ⁻	0.674	0.699	0.807	0.855	0.666	0.918	0,576	0,584	0.636	0.841			
SO ₄ ²⁻	0.885	0.857	0.886	0.814	0.871	0.731	0.823	0.820	0.821				
Cl ⁻	0.928	0.866	0.903	0.602	0.976	0,559	0.887	0.765					
HCO ₃ ⁻	0.810	0.762	0.800	0,577	0.793	0,503	0.829						
NH ₄ ⁺	0.912	0.846	0.921	0.676	0.899	0,542							
K ⁺	0,575	0.712	0.760	0.937	0,586								
Na ⁺	0.958	0.848	0.908	0.654									
Mg ²⁺	0.669	0.771	0.792										
Ca ²⁺	0.918	0.857											
SiO ₂	0.829												

Para a estação S2 – Tatuí foi possível observar que as correlações obtidas entre a vazão e as espécies químicas estudadas foram significativas e inversas, com exceção do PO₄³⁻. Já as espécies químicas dissolvidas apresentaram correlações positivas significativas com os valores de TDS e condutividade elétrica, com exceção de K⁺ e PO₄³⁻.

Os cátions principais Ca²⁺, Na⁺ e K⁺, apresentaram correlações significativas com o HCO₃⁻, como também com o SiO₂, o que é normalmente esperado nos produtos de intemperismo, com exceção do Mg²⁺ que só foi correlacionado com o SiO₂, enquanto que para os ânions Cl⁻ e SO₄²⁻, se mostraram correlacionados com o SiO₂, sendo o Cl⁻ também relacionado com o Ca²⁺ e Na⁺, como era de se esperar, enquanto que o SO₄²⁻ se correlacionou com os todos os alcalinos e alcalinos terrosos. O NO₃⁻ se mostrou correlacionado com a maioria das espécies químicas estudadas, com exceção do NH₄⁺.

Os resultados para o rio Sorocaba, estação S3 – Itavuvú, durante o período estudado podem ser observados na Tabela 21.

Tabela 21 - Matriz dos coeficientes de correlação entre as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, estação de amostragem S3 – Itavuvú, durante o período estudado

Correl. (p < 0,01)	S3 - Itavuvú												
	Cond	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	TDS
Q	-0.678	-0.733	-0.875	-0.798	-0.717	-0.766	-0.741	-0.675	-0.773	-0.689	-0.639	-0,556	-0.776
TDS	0.950	0.923	0.876	0,640	0.964	0.678	0.967	0.976	0.983	0.909	0,457	0,330	
PO ₄ ³⁻	0,168	0,600	0,461	0.722	0,115	0,450	0,406	0,218	0,229	0,214	0,512		
NO ₃ ⁻	0,330	0,544	0.616	0.731	0,337	0,578	0,381	0,350	0,407	0,365			
SO ₄ ²⁻	0.890	0.803	0.819	0,584	0.852	0.649	0.867	0.884	0.877				
Cl ⁻	0.973	0.876	0.839	0.597	0.976	0.628	0.934	0.959					
HCO ₃ ⁻	0.939	0.853	0.814	0,503	0.948	0.587	0.937						
NH ₄ ⁺	0.902	0.932	0.853	0.641	0.909	0.674							
K ⁺	0,553	0,658	0.809	0.900	0,581								
Na ⁺	0.942	0.849	0.784	0,515									
Mg ²⁺	0,515	0.736	0.738										
Ca ²⁺	0.772	0.786											
SiO ₂	0.839												

Comparando os coeficientes de correlação obtidos entre as espécies químicas dissolvidas para a estação S3 – Itavuvú, foi possível observar que as espécies químicas estudadas foram significativas e inversas, seguindo o modelo de diluição. Já as espécies químicas dissolvidas apresentaram correlações positivas significativas com os valores de TDS e condutividade elétrica, com exceção de Mg²⁺, NO₃⁻ e PO₄³⁻.

Os cátions principais Ca²⁺, Na⁺ e K⁺, apresentaram correlações significativas com o HCO₃⁻, como também com o SiO₂, o que é normalmente esperado nos produtos de intemperismo, com exceção do Mg²⁺ que só foi correlacionado com o SiO₂, enquanto que os ânions Cl⁻ e SO₄²⁻ se mostraram correlacionados com o SiO₂, sendo o Cl⁻ também relacionado com o Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺, enquanto que o SO₄²⁻ se correlacionou com os todos os alcalinos e alcalinos terrosos, exceto com o Mg²⁺. O NO₃⁻ se mostrou correlacionado somente com Ca²⁺ e Mg²⁺.

Os resultados para o rio Sorocaba, estação S4 – Votorantim, durante o período estudado podem ser observados na Tabela 22.

Tabela 22 - Matriz dos coeficientes de correlação entre as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, estação de amostragem S4 – Votorantim, durante o período estudado

Correl. (p < 0,01)	S4 - Votorantim												
	Cond	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	TDS
Q	-0,482	-0,524	-0,730	-0,845	-0,575	-0,689	-0,466	-0,586	-0,665	-0,582	-0,590	-0,589	-0,668
TDS	0,872	0,796	0,755	0,701	0,939	0,693	0,783	0,926	0,946	0,914	0,799	0,662	
PO ₄ ³⁻	0,652	0,482	0,337	0,728	0,706	0,716	0,601	0,446	0,764	0,781	0,425		
NO ₃ ⁻	0,569	0,807	0,918	0,486	0,589	0,567	0,534	0,853	0,647	0,633			
SO ₄ ²⁻	0,861	0,702	0,570	0,762	0,936	0,732	0,729	0,716	0,961				
Cl ⁻	0,897	0,644	0,611	0,754	0,976	0,692	0,730	0,762					
HCO ₃ ⁻	0,752	0,808	0,804	0,515	0,772	0,578	0,742						
NH ₄ ⁺	0,716	0,739	0,561	0,570	0,756	0,587							
K ⁺	0,648	0,712	0,567	0,876	0,594								
Na ⁺	0,884	0,623	0,535	0,683									
Mg ²⁺	0,595	0,609	0,550										
Ca ²⁺	0,465	0,747											
SiO ₂	0,592												

Comparando os coeficientes de correlação obtidos entre as espécies químicas dissolvidas para a estação S4 – Votorantim, foi possível observar que devido ao fato das vazões serem controladas pelo Reservatório de Itupararanga e as baixas concentrações observadas para as espécies químicas estudadas, apresentaram correlações significativas e inversas, seguindo o modelo de diluição, entre a vazão e somente as espécies Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Cl⁻ e NO₃⁻. As espécies químicas dissolvidas apresentaram correlações positivas significativas com os valores de TDS; o mesmo ocorrendo para a condutividade elétrica, com exceção de Ca⁺ e NO₃⁻.

Para os cátions principais Ca²⁺ e Na⁺ apresentaram correlações significativas com o HCO₃⁻, enquanto que Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺ se correlacionaram com o SiO₂, o que é normalmente esperado nos produtos de intemperismo, enquanto que os ânions Cl⁻ e SO₄²⁻ se mostraram correlacionados com o SiO₂, sendo o Cl⁻ também relacionado com o Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺, enquanto que o SO₄²⁻ se correlacionou com os todos os alcalinos e alcalinos terrosos, exceto com o Ca⁺. O NO₃⁻ se mostrou correlacionado somente com Ca²⁺.

Os resultados para a região das nascentes do rio Sorocaba, estação S5 – Ibiúna, durante o período estudado podem ser observados na Tabela 23.

Tabela 23 - Matriz dos coeficientes de correlação entre as principais espécies químicas dissolvidas próximo às nascentes do rio Sorocaba, estação de amostragem S5 – Ibiúna, durante o período estudado

Correl. (p < 0,01)	S5 - Ibiúna												
	Cond	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	TDS
Q	-0,576	-0.787	-0.818	-0.806	-0.751	-0.784	-0,587	-0.774	-0.776	-0.665	-0.742	-0,483	-0.838
TDS	0.782	0.883	0.844	0.801	0.934	0.775	0.735	0.965	0.909	0.838	0.907	0,439	
PO ₄ ³⁻	0,123	0,211	0,247	0.731	0,386	0.683	0,607	0,447	0,534	0,008	0.698		
NO ₃ ⁻	0.723	0.672	0.672	0.865	0.867	0.758	0,704	0.861	0.906	0.709			
SO ₄ ²⁻	0.708	0.810	0.717	0.586	0.811	0,566	0,653	0.765	0.765				
Cl ⁻	0.825	0.710	0.655	0.808	0.966	0.822	0,606	0.791					
HCO ₃ ⁻	0.699	0.856	0.825	0.738	0.837	0.690	0.745						
NH ₄ ⁺	0,561	0,660	0.800	0,678	0,667	0,450							
K ⁺	0.617	0,572	0.659	0.891	0.776								
Na ⁺	0.888	0.768	0.688	0.736									
Mg ²⁺	0,558	0,565	0.742										
Ca ²⁺	0,557	0.821											
SiO ₂	0.593												

Na estação S5 – Ibiúna foi possível observar que as correlações obtidas entre a vazão e as espécies químicas estudadas foram significativas e inversas, seguindo o modelo de diluição, com exceção do NH₄⁺ e PO₄³⁻. As espécies químicas dissolvidas apresentaram correlações positivas significativas com os valores de TDS e condutividade elétrica, com exceção do PO₄³⁻, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺.

Para os cátions principais Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺ apresentaram correlações significativas com o HCO₃⁻ e somente Ca²⁺ e Na⁺ com o SiO₂ enquanto que os ânions Cl⁻ e SO₄²⁻ se mostraram correlacionados com o SiO₂, sendo o Cl⁻ também relacionado com o Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺, enquanto que o SO₄²⁻ se correlacionou com os todos os alcalinos e alcalinos terrosos, exceto com o K⁺. O NO₃⁻ se mostrou correlacionado com o Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺.

9.2.6. Diagramas ternários aplicados a águas fluviais

Conforme descrito no item 6.6., foram construídos diagramas ternários para cátions e ânions com o objetivo de caracterizar as águas da bacia do rio Sorocaba, os quais podem ser verificados na Figura 47.

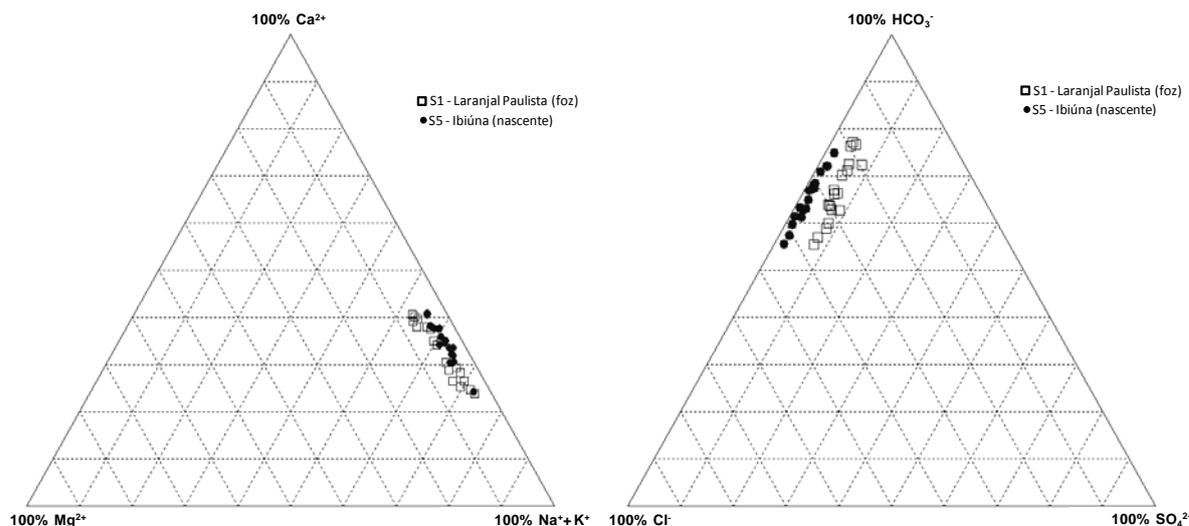


Figura 47 - Diagramas ternários de cátions e ânions para as cargas dissolvidas na nascente (S5 - Ibiúna) e foz (S1 – Laranjal Paulista) do rio Sorocaba, para o período estudado

O rio Sorocaba apresentou, em termos de cátions, tanto para a nascente quanto para a foz, uma característica sódica, tendo o Na^+ como a espécie química mais importante (entre 50 e 70 %), uma vez que a contribuição do K^+ foi baixa. O Ca^{2+} apresentou-se com valores entre 20 e 40 % no diagrama, enquanto que para o Mg^{2+} a ocorrência foi menor que 10%. Em termos de ânions, as águas se mostraram bicarbonatadas, com um domínio de HCO_3^- entre 50 e 80 %, seguido pelo Cl^- (20 e 40 %) e o SO_4^{2-} com menos de 10%. Foi possível ainda verificar que as concentrações de SO_4^{2-} foram mais importantes junto à foz do que em relação às nascentes.

9.3. Transporte fluvial

9.3.1. Método Estocástico e Determinístico

Os transportes totais e específicos das principais espécies químicas dissolvidas nas águas da bacia do rio Sorocaba foram calculados pelos métodos estocástico e determinístico conforme descrito no item 6.7.1., podendo ser verificados nas Tabelas 24 e 25.

Tabela 24 - Transporte Fluvial Total (T_S , em kg d^{-1}) e Específico (T_{SE} , em $\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$) para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, nas respectivas estações de amostragem, obtido pelo método estocástico, para o período estudado

Transporte das Espécies Químicas Dissolvidas por Estação de Amostragem										
Método Estocástico										
Espécies químicas	S1 - Laranjal Paulista		S2 - Tatuí		S3 - Itavuvu		S4- Votorantim		S5 - Ibiúna	
	T_S (kg d^{-1})	T_{SE} ($\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$)	T_S (kg d^{-1})	T_{SE} ($\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$)	T_S (kg d^{-1})	T_{SE} ($\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$)	T_S (kg d^{-1})	T_{SE} ($\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$)	T_S (kg d^{-1})	T_{SE} ($\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$)
SiO_2	166997,19	31,69	103671,05	26,30	62978,04	39,19	4671,18	4,49	14823,28	21,80
Ca^{2+}	121391,98	23,04	72682,46	18,44	62795,30	39,08	6360,10	6,12	13021,48	19,15
Mg^{2+}	11749,26	2,23	6826,47	1,73	4648,06	2,89	378,15	0,36	778,26	1,14
Na^+	111604,32	21,18	64001,65	16,24	69536,08	43,27	5725,68	5,51	11204,74	16,48
K^+	15485,01	2,94	12694,10	3,22	10580,80	6,58	911,93	0,88	2762,73	4,06
NH_4^+	331,55	0,06	2268,37	0,58	4641,76	2,89	180,62	0,17	97,74	0,14
HCO_3^-	398733,40	75,68	258823,28	65,66	232864,53	144,91	22905,45	22,02	47693,81	70,14
Cl^-	80430,20	15,26	50887,00	12,91	57721,93	35,92	6224,19	5,98	12883,70	18,95
SO_4^{2-}	55487,05	10,53	30105,94	7,64	39441,71	24,54	1874,24	1,80	1864,54	2,74
NO_3^-	41008,08	7,78	15448,75	3,92	7743,79	4,82	204,62	0,20	1068,44	1,57
PO_4^{3-}	1541,03	0,29	529,09	0,13	699,35	0,44	54,39	0,05	71,79	0,11
TDS	1004759,07	190,69	617938,16	156,76	553651,35	344,52	49490,55	47,59	106270,52	156,28

Tabela 25 - Transporte Fluvial Total (T_D , em kg d^{-1}) e Específico (T_{DE} , em $\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$) para as principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, nas respectivas estações de amostragem, obtido pelo método determinístico, para o período estudado

Transporte das Espécies Químicas Dissolvidas por Estação de Amostragem										
Método Determinístico										
Espécies químicas	S1 - Laranjal Paulista		S2 - Tatuí		S3 - Itavuvu		S4- Votorantim		S5 - Ibiúna	
	T_D (kg d^{-1})	T_{DE} ($\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$)	T_D (kg d^{-1})	T_{DE} ($\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$)	T_D (kg d^{-1})	T_{DE} ($\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$)	T_D (kg d^{-1})	T_{DE} ($\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$)	T_D (kg d^{-1})	T_{DE} ($\text{kg km}^{-2} \text{d}^{-1}$)
SiO_2	133312,01	25,30	77607,52	19,69	45530,71	28,33	1952,57	1,88	9374,47	13,79
Ca^{2+}	80738,98	15,32	75412,74	19,13	36297,96	22,59	2594,32	2,49	6955,88	10,23
Mg^{2+}	7454,35	1,41	2561,35	0,65	3334,49	2,07	322,55	0,31	704,94	1,04
Na^+	127754,39	24,25	53893,21	13,67	46141,79	28,71	5899,85	5,67	11483,46	16,89
K^+	12327,55	2,34	5160,60	1,31	4847,33	3,02	570,06	0,55	1264,50	1,86
NH_4^+	807,93	0,15	5093,42	1,29	7360,81	4,58	314,49	0,30	245,37	0,36
HCO_3^-	284360,83	53,97	175371,37	44,49	64216,19	39,96	7629,46	7,34	24446,04	35,95
Cl^-	90736,43	17,22	55836,33	14,16	48272,15	30,04	4448,08	4,28	15673,47	23,05
SO_4^{2-}	53180,66	10,09	30379,18	7,71	35946,49	22,37	1321,80	1,27	1438,17	2,11
NO_3^-	76077,53	14,44	23642,25	6,00	7689,33	4,78	10077,69	9,69	2233,54	3,28
PO_4^{3-}	3239,59	0,61	944,32	0,24	899,29	0,56	2919,52	2,81	102,62	0,15
TDS	841792,90	159,76	504399,59	127,96	216148,88	134,50	19857,54	19,09	74171,43	109,08

Os resultados observados para os transportes fluviais específicos ao longo do rio Sorocaba, de acordo com os métodos estocástico e determinístico, foram de uma maneira geral similares para a maioria das espécies químicas estudadas. No entanto, os transportes calculados pelo método estocástico se mostraram superiores para as espécies químicas mais concentradas, quando comparados com o transporte determinístico, tanto nas regiões de nascente (estação S5 – Ibiúna) como próximo a foz (estação S1 – Laranjal Paulista).

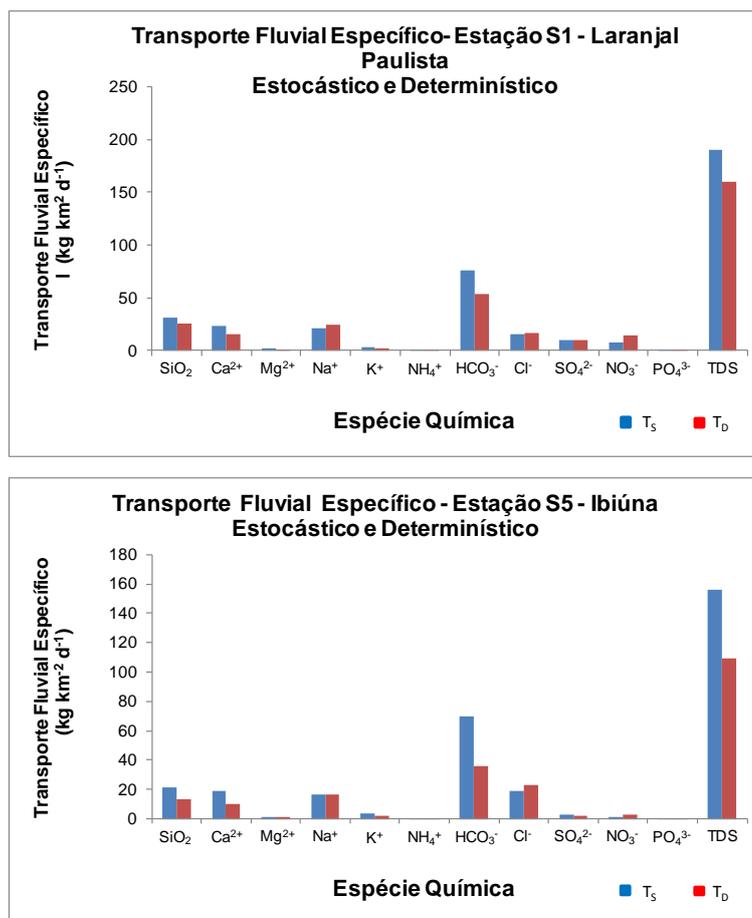


Figura 48 - Comparação entre os transportes fluviais específicos calculados de acordo com os métodos estocástico (T_S) e determinístico (T_D) para as principais espécies químicas dissolvidas junto à foz (S1 – Laranjal Paulista) e região de nascentes (S5 – Ibiúna), do rio Sorocaba para o período estudado

Tal fato está relacionado com a média das vazões utilizadas no cálculo estocástico, que representou apenas o período amostrado, não configurando a média das vazões diárias do ano hidrológico, nesse caso, superestimando as mesmas (Figura 48).

Em função dessa constatação, optou-se no presente trabalho, pela utilização do método determinístico no cálculo do transporte das principais espécies químicas dissolvidas no rio Sorocaba, conforme recomendação de Kattan et al. (1987), para bacias de drenagem de médio porte.

Para as nascentes do rio Sorocaba, representada pela estação S5 – Ibiúna, em termos de cátions principais o Na⁺ foi o elemento que mais contribuiu na carga dissolvida com um transporte fluvial específico de 16,89 kg km⁻² d⁻¹, seguido por Ca²⁺ com um transporte fluvial específico de 10,23 kg km⁻² d⁻¹. Com relação aos

ânions houve um predomínio de HCO_3^- com um transporte específico de $35,95 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$, seguido do Cl^- com um transporte fluvial específico de $23,05 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Em termos de SiO_2 e TDS, os transportes fluviais específicos foram de $13,79$ e $109,08 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente.

Junto à foz do rio Sorocaba (S1- Laranjal Paulista), para os cátions principais houve um predomínio de Na^+ com um transporte específico de $24,25 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$, seguido por Ca^{2+} com um transporte fluvial específico de $15,32 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Dentre os ânions a contribuição mais importante foi a do HCO_3^- com $53,97 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$, e ainda contribuições menores de Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , com $17,22$; $14,44$; $10,09 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente. Em termos de SiO_2 , principalmente associados aos processos de alteração de rochas da bacia de drenagem, um transporte específico de $25,30 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$ foi observado. O transporte fluvial específico das principais espécies químicas dissolvidas, representada pelo TDS, junto à foz, foi de $159,76 \text{ kg km}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Somente com a avaliação da distribuição do transporte específico ao longo da bacia de drenagem, que considera a área de influência à montante da estação de amostragem, não foi possível verificar a contribuição local entre cada estação de amostragem. Tal análise foi realizada considerando o transporte específico parcial (T_{EP}), obtido pela diferença dos transportes específicos totais a montante e a jusante para cada intervalo de estações de amostragem, normalizados pela área de contribuição parcial nesses intervalos.

A Figura 49 ilustra a distribuição espacial dos transportes total, específico e específico parcial por espécie química, ao longo do rio Sorocaba para o período estudado.

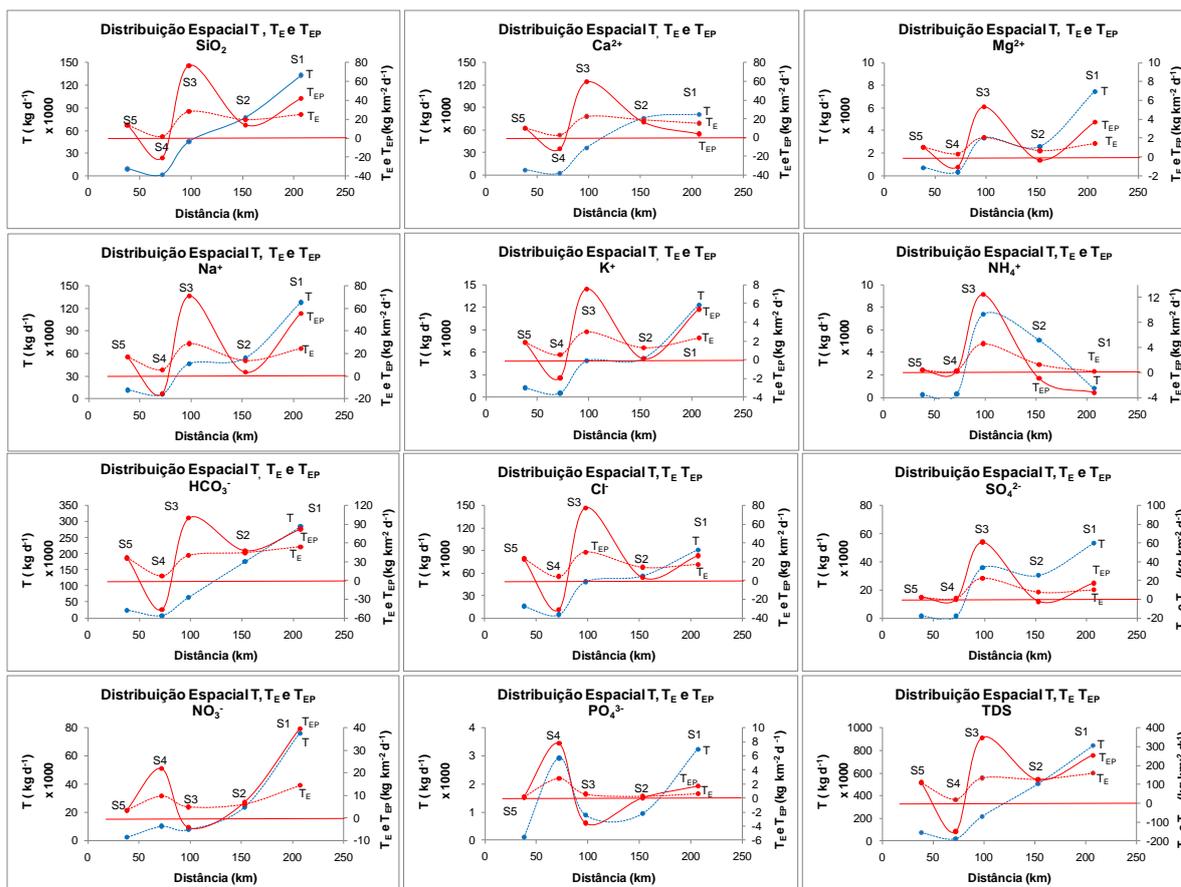


Figura 49 - Distribuição espacial do transporte fluvial total (T), transporte fluvial específico (T_E) e transporte fluvial específico parcial para SiO_2 , cátions, ânions e TDS presentes nas amostras fluviais do rio Sorocaba, calculados para as estações de amostragem S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, durante o período estudado

A evolução espacial do transporte específico parcial de SiO_2 dissolvido nas águas do rio Sorocaba apresentou uma diminuição da região de nascentes (S5 – Ibiúna) para a estação (S4 - Votorantim), indicando a influência do reservatório de Itupararanga que, além de controlar a vazão nesta estação, recebe grande parte da contribuição da área de drenagem parcial, com reflexos na carga dissolvida. Já a estação S3 – Itavuvú apresentou o maior T_{EP} , uma vez que em sua área de drenagem parcial encontra-se a maior mancha urbana da bacia, além de receber a contribuição do rio Pirajibú, que drena uma área ocupada principalmente por pastagens e campos antrópicos. A partir deste ponto, o T_{EP} se normaliza em S2 - Tatuí, aumentando um pouco em direção a foz em função do manejo agrícola dos solos da região.

Para os cátions, a distribuição espacial foi similar, indicando uma forte pressão das atividades antrópicas nas águas do rio Sorocaba, principalmente na estação de amostragem S3 – Itavuvú, em termos de Ca^{2+} e Mg^{2+} , possivelmente oriundos da mineração, na região, conforme observado por Sardinha et al. (2008). Já o Na^+ e K^+ podem ter suas origens associadas aos efluentes domésticos.

As distribuições espaciais dos ânions também foram semelhantes aos cátions, aumentando os transportes específicos parciais entre as estações S4 – Votorantim e S3 – Itavuvu, casos do HCO_3^- e SO_4^{2-} , relacionados à degradação da matéria orgânica, e Cl^- , oriundo principalmente dos esgotos domésticos. Com relação ao PO_4^{3-} , o aumento observado no transporte específico parcial em S4 – Votorantim pode estar relacionado com aportes pontuais de esgoto doméstico a montante, conforme já descrito na literatura para outras bacias de drenagem (HORNBECK, 1982; HOPMANS et al., 1987; STEVENS et al., 1995; VITTAL et al., 1999). Comportamento similar pode ser observado para o NO_3^- , com relação ao aporte pontual em S4 – Votorantim, a jusante deste ponto verificou-se um aumento no T_{EP} de NO_3^- , indicativo da influência dos processos de mineralização de N da bacia. Em termos de TDS, que representa a carga total dissolvida, o padrão de distribuição do transporte específico parcial foi similar aos cátions e ânions na bacia de drenagem.

9.4. Aportes Atmosféricos Totais

A caracterização dos aportes atmosféricos e a verificação de sua influência na carga dissolvida fluvial foram realizadas de acordo com os procedimentos descritos no item 7 do presente estudo. Os resultados das análises químicas para os íons maiores e o total precipitado na bacia do rio Sorocaba, são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados de precipitação pH, TDS e concentração de cátions e ânions das amostras de água de chuva ocorridas na bacia de drenagem no período de 15/05/2009 a 01/09/2010

Data	pH	P (mm)	PRECIPITAÇÃO											TDS
			Concentração (mg L ⁻¹)											
			Cátions				Ânions							
Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₂ ⁻				
15/05/2009	5,7	11,7	3,17	0,10	0,34	0,36	1,27	LD	3,82	1,53	2,11	0,09	LD	12,77
16/05/2009	5,3	11,7	0,03	0,02	0,12	0,09	0,27	LD	0,83	0,39	0,58	0,05	LD	2,38
27/05/2009	6,4	9,4	4,24	0,13	0,32	0,35	0,56	1,36	0,67	2,10	2,36	LD	0,04	12,13
10/06/2009	6,4	26,5	2,18	0,05	0,16	0,13	0,33	3,51	0,23	0,91	0,83	LD	0,04	8,37
25/06/2009	6,7	10,3	8,26	0,19	0,45	0,25	0,16	7,66	0,57	2,33	1,24	LD	0,06	21,16
27/06/2009	6,6	5,7	4,77	0,11	0,67	0,26	0,41	1,73	1,38	1,23	0,93	LD	0,01	11,47
30/06/2009	6,4	5,6	3,12	0,07	0,33	0,17	0,30	0,34	0,41	0,72	0,54	LD	0,12	6,12
02/07/2009	6,5	16,1	3,15	0,07	0,32	0,17	0,24	1,61	0,39	0,76	0,47	LD	0,10	7,27
11/07/2009	6,5	16,1	2,13	0,07	0,24	0,12	0,36	LD	0,22	0,63	0,57	0,06	0,06	4,45
12/07/2009	6,0	66,1	1,09	0,03	0,34	0,05	0,00	LD	0,31	0,42	0,13	LD	0,01	2,39
24/07/2009	6,5	18,7	3,66	0,09	0,20	0,11	0,12	2,76	0,22	0,90	0,70	0,01	0,07	8,83
25/07/2009	5,9	23,5	1,79	0,04	0,10	0,04	0,00	LD	0,09	0,31	0,27	0,01	0,08	2,72
26/07/2009	5,9	19,9	1,31	0,03	0,13	0,04	0,16	LD	0,12	0,45	0,49	0,03	0,06	2,81
27/07/2009	6,4	14,4	3,12	0,09	0,29	0,09	0,10	2,67	0,32	0,64	0,54	0,09	0,32	8,26
30/07/2009	6,2	28,6	1,92	0,06	0,19	0,09	0,54	LD	0,22	0,59	0,90	0,00	0,03	4,53
18/08/2009	6,7	7,7	9,25	0,23	0,42	0,29	0,11	7,66	0,54	1,80	1,25	0,01	0,06	21,62
19/08/2009	6,6	14,7	9,33	0,23	0,56	0,33	0,12	6,56	0,76	1,94	1,31	0,02	0,05	21,21
21/08/2009	6,4	13,3	2,78	0,07	0,12	0,09	0,12	2,67	0,12	0,44	0,25	0,03	0,05	6,73
04/09/2009	6,5	14,2	7,77	0,21	0,42	0,31	0,30	7,55	0,60	1,43	1,21	0,01	0,04	19,85
06/09/2009	6,3	23,2	2,91	0,07	0,11	0,10	0,59	2,67	0,16	0,88	0,70	0,08	0,02	8,29
08/09/2009	5,9	30,2	1,45	0,04	0,06	0,06	0,18	1,07	0,10	0,31	0,44	0,03	0,05	3,79
09/09/2009	5,9	35,2	1,29	0,04	0,08	0,06	0,17	1,84	0,10	0,37	0,47	0,03	0,04	4,50
19/09/2009	6,2	7,1	4,13	0,11	0,23	0,16	0,03	5,13	0,37	0,95	0,52	0,08	0,07	11,78
21/09/2009	6,2	10,8	3,61	0,07	0,18	0,12	0,19	2,37	0,27	0,79	1,26	0,02	0,07	8,95
23/09/2009	5,7	20,2	1,31	0,03	0,23	0,12	0,29	1,10	0,44	0,42	0,31	0,01	0,13	4,39
28/09/2009	6,2	12,6	5,60	0,17	0,47	0,47	1,15	5,11	1,20	2,14	1,60	0,05	LD	17,97
16/10/2009	5,7	15,6	3,67	0,08	0,17	0,17	0,12	4,28	0,25	0,78	0,57	0,16	LD	10,24
18/10/2009	5,8	24,2	3,56	0,07	0,15	0,15	0,14	5,13	0,21	0,69	0,55	0,10	0,10	10,86
19/10/2009	5,7	13,4	3,60	0,08	0,15	0,17	0,13	2,67	0,22	0,74	0,62	0,05	0,26	8,68
22/10/2009	5,5	16,4	1,27	0,04	0,10	0,11	0,45	0,23	0,12	0,60	0,68	0,01	0,24	3,85
25/10/2009	5,6	25,1	2,20	0,05	0,13	0,08	0,14	0,32	0,19	0,47	0,49	0,02	LD	4,09
05/11/2009	6,1	21,6	5,00	0,17	0,28	0,77	0,36	7,25	0,48	0,74	0,61	0,02	LD	15,70
06/11/2009	6,1	14,4	4,89	0,17	0,32	0,67	0,40	7,57	0,53	0,83	0,55	0,04	0,07	16,04
08/11/2009	5,6	32,4	2,72	0,10	0,15	0,27	0,23	4,28	0,24	0,35	0,02	0,04	0,04	8,43
09/11/2009	5,3	13,5	0,68	0,02	0,07	0,08	0,14	0,23	0,10	0,17	0,03	0,05	LD	1,57
21/11/2009	5,9	31,4	1,35	0,04	0,23	0,14	0,52	1,10	0,30	0,62	0,55	0,03	0,15	5,03
23/11/2009	6,2	15,8	2,14	0,07	0,21	0,22	0,82	2,69	0,38	0,85	0,87	0,04	LD	8,28
24/11/2009	6,3	15,8	2,37	0,09	0,31	0,38	0,71	3,07	0,57	1,00	0,80	0,07	0,02	9,38
27/11/2009	6,1	7,4	1,79	0,06	0,11	0,15	0,50	2,37	0,21	0,56	0,56	0,01	0,05	6,37
28/11/2009	6,1	15,2	1,78	0,06	0,14	0,16	0,44	3,21	0,23	0,54	0,50	0,08	0,25	7,38
29/11/2009	5,3	32,8	0,32	0,01	0,07	0,04	0,13	LD	0,05	0,14	0,14	0,09	LD	0,97
01/12/2009	5,3	10,1	0,63	0,02	0,15	0,12	0,50	0,77	0,18	0,56	0,68	0,01	0,08	3,69
03/12/2009	5,8	23,9	0,24	0,01	0,07	0,06	0,63	0,32	0,08	0,31	0,26	0,03	0,07	2,06
07/12/2009	6,0	22,4	2,87	0,07	0,56	0,10	0,36	3,07	0,65	0,94	0,68	0,04	0,03	9,36
08/12/2009	5,5	56,2	0,26	0,01	0,06	0,02	0,11	1,32	0,06	0,03	0,03	LD	LD	1,89
11/12/2009	5,6	11,3	0,92	0,03	0,24	0,07	0,22	0,32	0,20	0,35	0,44	0,05	0,11	2,94
12/12/2009	5,7	14,6	1,36	0,04	0,18	0,08	0,27	0,23	0,50	0,38	0,40	LD	0,05	3,48
17/12/2009	5,7	37,1	1,06	0,04	0,18	0,10	0,19	1,83	0,30	0,54	0,39	0,03	0,01	4,68
18/12/2009	5,7	23,4	0,81	0,02	0,11	0,04	0,11	0,23	0,20	0,31	0,47	0,02	0,06	2,38
25/12/2009	5,8	10,0	0,87	0,02	0,09	0,03	0,09	1,07	0,12	0,27	0,07	0,04	0,06	2,73
27/12/2009	5,7	14,8	0,96	0,02	0,11	0,04	0,16	0,23	0,17	0,21	0,13	0,02	0,08	2,12
28/12/2009	5,7	22,8	0,64	0,01	0,09	0,04	0,19	0,23	0,16	0,17	0,04	0,03	LD	1,59
29/12/2009	5,8	15,3	0,66	0,01	0,08	0,02	0,19	1,07	0,13	0,10	0,03	0,00	0,01	2,30
30/12/2009	5,5	24,1	0,64	0,02	0,06	0,02	0,13	0,23	0,11	0,16	0,01	LD	0,10	1,49
02/01/2010	5,6	12,7	0,50	0,01	0,09	0,04	0,17	LD	0,19	0,10	0,08	LD	0,12	1,29
06/01/2010	5,8	32,1	1,26	0,03	0,17	0,06	0,30	0,23	0,24	0,44	0,54	0,03	LD	3,28
07/01/2010	5,2	11,5	0,67	0,01	0,07	0,03	0,12	LD	0,11	0,25	0,30	LD	0,02	1,57
08/01/2010	5,2	12,2	0,47	0,01	0,05	0,02	0,19	LD	0,09	0,23	0,35	0,05	0,02	1,49
09/01/2010	5,1	19,7	0,50	0,01	0,04	0,02	0,17	LD	0,07	0,24	0,28	LD	LD	1,32
11/01/2010	6,1	5,6	1,67	0,04	0,23	0,14	0,91	2,67	0,35	0,66	0,54	LD	LD	7,21
14/01/2010	5,5	20,8	1,20	0,04	0,13	0,06	0,20	0,23	0,24	0,19	0,26	0,07	LD	2,61
16/01/2010	5,2	50,7	0,59	0,01	0,21	0,07	0,43	LD	0,45	0,36	0,36	LD	LD	2,48
17/01/2010	4,9	29,9	0,45	0,01	0,18	0,06	0,69	LD	0,77	0,41	0,45	LD	LD	3,02
18/01/2010	4,0	28,7	0,41	0,01	0,13	0,03	0,64	LD	4,31	0,42	0,46	LD	LD	6,41
19/01/2010	5,0	26,0	0,45	0,02	0,17	0,04	0,24	LD	0,54	0,31	0,39	0,01	LD	2,17
20/01/2010	5,0	20,4	0,97	0,04	0,20	0,06	0,29	LD	0,78	0,50	0,63	LD	LD	3,46
21/01/2010	5,5	28,8	0,40	LD	0,19	0,17	LD	LD	0,39	0,32	0,68	LD	LD	2,14
22/01/2010	5,7	9,2	0,49	LD	0,17	0,12	LD	LD	0,15	0,36	0,60	LD	LD	1,88
23/01/2010	5,5	21,4	0,33	LD	0,09	0,06	LD	LD	0,18	0,27	0,17	LD	LD	1,10
25/01/2010	5,6	28,6	0,31	LD	0,06	0,06	LD	0,23	LD	0,27	0,20	LD	LD	1,12
28/01/2010	5,7	27,6	0,40	LD	0,07	0,05	LD	0,23	0,14	0,34	0,15	LD	LD	1,38
29/01/2010	5,8	26,1	0,33	LD	0,08	0,06	LD	0,23	0,10	0,14	LD	LD	LD	0,95
30/01/2010	4,3	7,6	0,40	LD	0,08	0,08	LD	LD	2,95	0,09	LD	LD	LD	3,59
31/01/2010	5,0	19,8	0,26	LD	0,08	0,04	LD	LD	0,35	0,14	LD	LD	LD	0,87
01/02/2010	4,8	15,4	0,42	LD	0,08	0,07	LD	LD	0,62	0,39	0,76	LD	LD	2,34
06/02/2010	5,8	10,7	1,57	0,05	0,24	0,27	0,78	0,23	0,58	1,24	2,60	LD	LD	7,56
19/02/2010	6,2	16,6	2,70	0,11	0,17	0,17	LD	2,37	0,31	0,85	1,29	LD	LD	7,97
06/03/2010	6,5	13,3	2,42	0,10	0,18	0,09	LD	1,70	LD	0,80	0,60	0,01	LD	5,89
22/03/2010	6,3	13,3	1,85	0,08	0,09	0,16	LD	2,37	LD	0,37	0,55	0,07	LD	5,53
28/03/2010	6,0	11,8	3,24	0,14	0,21	0,26	LD	4,27	0,22	0,53	0,84	0,03	LD	9,75
29/03/2010	5,3	27,5	0,58	LD	0,07	0,03	LD	LD	0,45	0,12	0,11	LD	LD	1,36
03/04/2010	5,8	39,5	1,11	0,01	0,04	LD	LD	0,74	LD	0,30	0,02	0,14	LD	2,36
04/04/2010	6,0	10,1	1,09	0,02	0,04	LD	LD	1,83	LD	0,21	0,02	LD	LD	3,21
23/04/2010	6,3	15,3	5,23	0,30	0,94	0,40	LD	6,71	1,85	1,08	1,34	0,02	LD	17,86
C _{MNP}			1,71	0,05	0,18	0,12	0,30	2,13	0,43	0,51				

Considerando-se as concentrações médias de TDS, cátions e ânions, foi possível estabelecer a partição percentual das espécies químicas de interesse nas águas pluviais da bacia de drenagem, de acordo com o descrito no item 6.2, podendo ser observado na Figura 50.

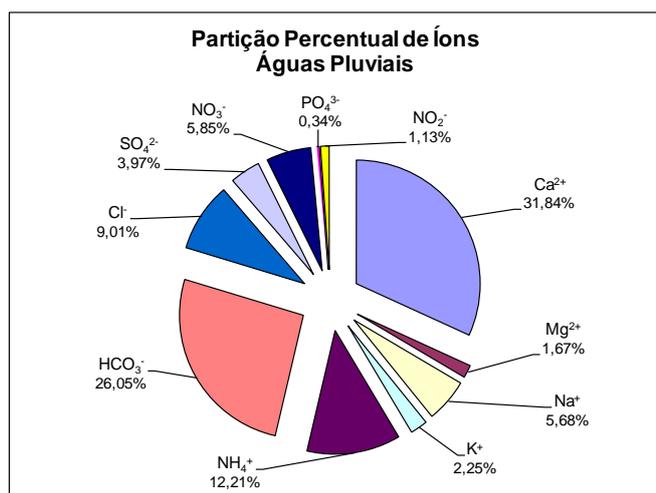


Figura 50 - Distribuição percentual das principais espécies químicas presentes nas amostras de águas pluviais, para a bacia do rio Sorocaba, durante o período estudado

Conforme pode ser observado o Ca²⁺ (31,84 %) e NH₄⁺ (12,21 %) foram os cátions que apresentaram participação mais significativa nas amostras de água de chuva, enquanto que para os ânions, as maiores abundâncias relativas foram de HCO₃⁻ e NO₃⁻, com 26,05 % e 5,85 %, respectivamente.

De uma forma geral, como destacado anteriormente, foi possível observar um predomínio de Ca²⁺ e HCO₃⁻ presentes na carga pluvial dissolvida. Cabe destacar que a presença dos nitrogenados NH₄⁺ e NO₃⁻, com 12,21 e 5,85 %, respectivamente, podem estar associadas às emissões biológicas nessa região de predominância de atividades agrícolas.

Com a definição da composição química das águas pluviais para a bacia do rio Sorocaba foi possível calcular os aportes atmosféricos para cada espécie química, em termos totais e específicos, conforme item 7, os quais podem ser verificados na Tabela 27.

Tabela 27 - Aportes atmosféricos totais (kg a^{-1}) e específicos ($\text{kg km}^{-2} \text{a}^{-1}$) para as principais espécies químicas dissolvidas nas águas pluviais da bacia do rio Sorocaba durante o período estudado

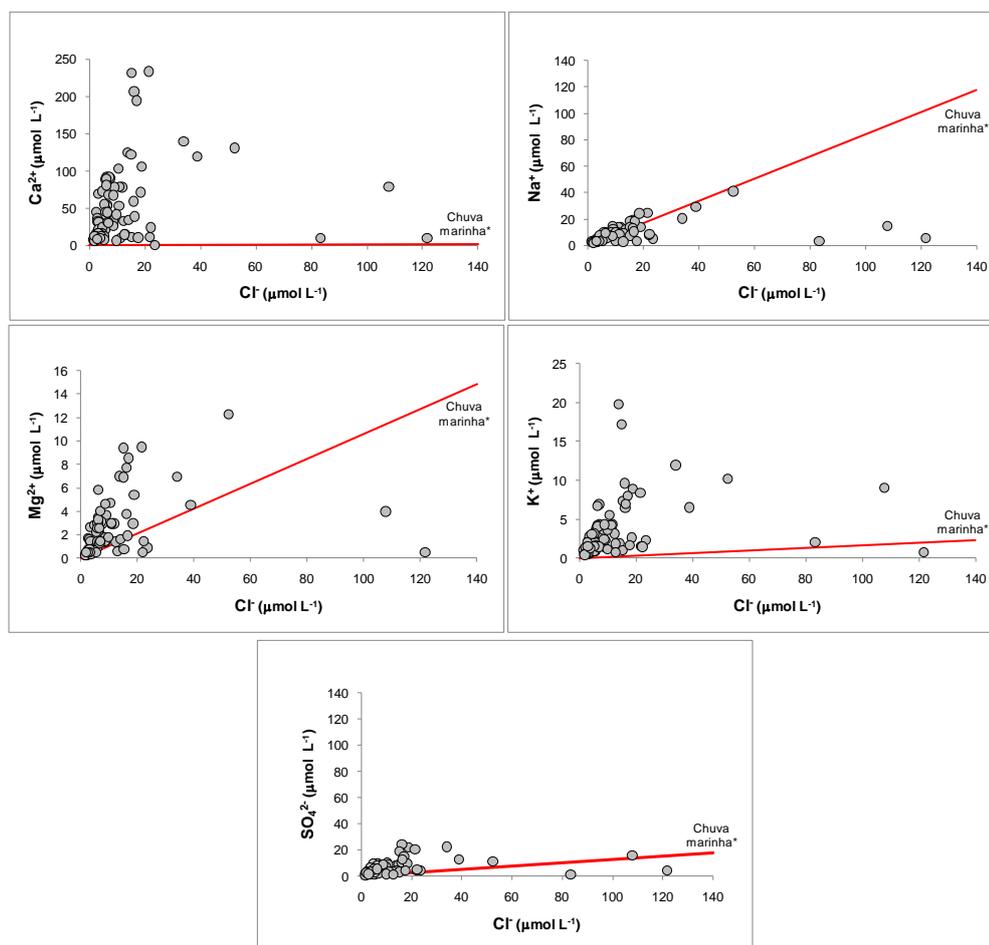
Aporte Atmosférico		
	Aporte total	Aporte específico
	(kg a^{-1})	($\text{kg km}^{-2} \text{a}^{-1}$)
Ca²⁺	16174506	3069,75
Mg²⁺	516286	97,99
Na⁺	1659556	314,97
K⁺	1118674	212,31
NH₄⁺	2791521	529,80
HCO₃⁻	20179511	3829,86
Cl⁻	4056896	769,96
SO₄²⁻	4840503	918,68
NO₃⁻	4609934	874,92
PO₄³⁻	405079	76,88
NO₂⁻	661332	125,51
TDS	48792291	9260,26

Pode ser observado que as cargas pluviais totais tiveram um domínio de HCO_3^- e Ca^{2+} , com aportes de $20,2 \cdot 10^6$ e $16,2 \cdot 10^6 \text{ kg a}^{-1}$, respectivamente. Os aportes de Na^+ e Cl^- foram de $1,7 \cdot 10^6$ e $4,1 \cdot 10^6 \text{ kg a}^{-1}$, enquanto que para os nitrogenados NH_4^+ e NO_3^- foram de $2,8 \cdot 10^6$ e $4,6 \cdot 10^6 \text{ kg a}^{-1}$, respectivamente. O aporte de sólidos totais dissolvidos (TDS) foi de $48,8 \cdot 10^6 \text{ kg a}^{-1}$, o que correspondeu à um aporte específico de $9260,26 \text{ kg km}^{-2} \text{a}^{-1}$, muito próximo ao obtido por Bortoletto Junior (2004) para as bacias dos rios Tietê, em Tietê e Piracicaba, em Artemis, com 12600 e $8700 \text{ kg km}^{-2} \text{a}^{-1}$, respectivamente.

Em estudos hidrogeoquímicos de bacias de drenagem, a razão molar $\text{íon}/\text{Cl}^-$ pode ser utilizada como traçador das diferentes origens das águas nesses ecossistemas, possibilitando estabelecer as várias fontes de contribuição para as espécies químicas de interesse, com destaque para a distinção das contribuições marinhas das terrestres. O íon Cl^- foi utilizado como referência em função do seu caráter conservativo no ambiente (STALLARD; EDMOND, 1981; MEYBECK, 1984; LEAL et al., 2004).

As razões molares $\text{íon}/\text{Cl}^-$ utilizadas para caracterizar a origem marinha das águas de chuva foram as mesmas determinadas por Stallard e Edmond (1981) sendo representadas por: $\text{Ca}^{2+} = 0,018$; $\text{Mg}^{2+} = 0,106$; $\text{Na}^+ = 0,841$; $\text{K}^+ = 0,017$ e $\text{SO}_4^{2-} = 0,127$.

A Figura 51 ilustra o comportamento de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e SO_4^{2-} em função do Cl^- presente nas águas de chuva da bacia do rio Sorocaba, em comparação com a origem marinha.



* Stallard & Edmond, 1981

Figura 51 - Razão molar entre os íons Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} e SO_4^{2-} e o Cl^- presentes nas águas pluviais, para a bacia do rio Sorocaba, durante o período estudado, e as respectivas curvas de referência para a chuva marinha

Pode ser verificado que as razões íon/ Cl^- determinadas para as águas de chuva da bacia do rio Sorocaba não se mostraram de uma forma geral associadas aos sais cíclicos e aerossóis marinhos, mostrando uma influência predominante dos aportes terrestres locais, fato já verificado por Bortoletto Junior (2004) para as bacias agrícolas dos rios Tietê e Piracicaba, com exceção da razão Na^+/Cl^- , que pareceu estar em deficiência de Na^+ , possivelmente devido ao excesso de K^+ nas razões K^+/Cl^- , muito comum em ambientes agrícolas.

As contribuições dos aportes atmosféricos totais na carga dissolvida do rio Sorocaba, em termos das principais espécies de interesse hidrogeoquímico, podem ser verificadas na Tabela 28.

Tabela 28 - Contribuição dos aportes atmosféricos totais na carga fluvial dissolvida do rio Sorocaba (%) para o período estudado

Contribuição dos Aportes Atmosféricos Totais na Carga Fluvial Dissolvida			
Espécie Química	Trasporte Fluvial (kg km⁻² a⁻¹)	Aporte Pluvial (kg km⁻² a⁻¹)	Contribuição %
Ca ²⁺	5593,04	3069,75	54,89
Mg ²⁺	516,39	97,99	18,98
Na ⁺	8849,94	314,97	3,56
K ⁺	853,97	212,31	24,86
HCO ₃ ⁻	19698,56	3829,86	19,44
Cl ⁻	6285,59	769,96	12,25
SO ₄ ²⁻	3683,99	918,68	24,94

Devido às baixas concentrações de Ca²⁺ verificadas na carga fluvial dissolvida do rio Sorocaba, a contribuição dos aportes atmosféricos totais para essa espécie química foi significativa, de 54,89 %, ou seja, quase metade do Ca²⁺ presente no rio tem origem na chuva, contribuição essa superior à observada por Bortoletto Júnior (2004) para as bacias do Tietê, em Tietê (18,9 %) e Piracicaba, em Artemis (38,5 %). As contribuições das demais espécies químicas para a bacia do rio Sorocaba foram bastante similares ao verificado para essas bacias de drenagens.

9.5. Caracterização Carga Particulada Fluvial

9.5.1. Dinâmica do sedimento fino em suspensão

A Tabela 29 apresenta os resultados de vazão e concentração de FSS, com suas respectivas médias normalizadas e desvios padrão, obtidos para as amostragens realizadas no período de março de 2009 a setembro de 2010, ao longo da bacia do rio Sorocaba.

Tabela 29 - Resultados das concentrações dos sedimentos finos em suspensão (FSS, mg L^{-1}) na bacia do rio Sorocaba e respectivas vazões (Q, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), desde a nascente (S5 – Ibiúna) até a foz (S1 – Laranjal Paulista), durante o período estudado

SEDIMENTO FINO EM SUSPENSÃO										
Data	Estação S1 Laranjal Paulista		Estação S2 Tatui		Estação S3 Itavuvú		Estação S4 Votorantim		Estação S5 Ibiúna	
	Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	FSS (mg L^{-1})	Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	FSS (mg L^{-1})	Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	FSS (mg L^{-1})	Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	FSS (mg L^{-1})	Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	FSS (mg L^{-1})
10/03/2009	51,50	16,33	37,38	17,00	28,80	43,17	3,93	35,33	7,98	16,00
07/04/2009	59,30	20,67	42,16	17,50	32,21	27,00	4,05	20,67	9,20	26,17
12/05/2009	46,83	25,33	34,51	19,17	26,76	27,33	2,30	11,83	7,25	15,50
17/06/2009	37,47	14,33	28,77	19,50	22,67	40,17	1,64	21,50	5,79	11,17
21/07/2009	43,71	46,50	32,60	31,00	25,40	62,83	1,81	10,83	6,76	9,50
25/08/2009	123,23	54,33	81,35	70,33	60,13	40,00	2,78	10,33	19,20	13,33
22/09/2009	99,84	45,33	67,01	50,83	49,92	49,67	5,00	8,50	15,54	21,67
10/11/2009	170,01	145,00	110,03	215,33	80,56	92,83	5,77	15,83	26,51	28,17
12/12/2009	363,35	87,17	228,58	74,00	165,01	29,00	13,89	13,67	56,75	18,50
15/01/2010	279,15	47,67	176,95	33,67	128,24	18,00	25,16	13,33	43,58	16,67
20/01/2010	366,47	101,50	230,49	66,33	166,38	48,50	19,07	29,50	57,24	65,00
23/02/2010	184,04	37,83	118,64	25,83	86,69	18,83	14,58	13,67	28,71	11,50
30/03/2010	151,30	178,00	98,56	66,67	72,39	117,67	6,19	33,67	23,58	20,83
27/04/2010	107,64	51,00	71,79	41,67	53,32	41,00	4,60	15,33	16,76	9,33
27/05/2010	70,21	22,67	48,85	18,33	36,98	32,50	3,16	14,17	10,91	9,00
24/06/2010	42,15	14,50	31,64	11,83	24,72	27,17	3,10	17,67	6,52	15,83
27/07/2010	54,62	28,83	39,29	18,33	30,16	40,67	5,47	13,67	8,47	13,50
01/09/2010	26,56	17,67	22,08	13,83	17,91	19,50	2,89	19,33	4,08	15,17
C_{MNO}		73,55		59,65		43,91		18,05		24,80
DP_{MNO}		44,96		48,75		27,20		7,69		18,32

As concentrações de FSS, de uma forma geral, aumentaram da região de nascente S5 – Ibiúna em direção à foz S1 - Laranjal Paulista, com concentrações médias variando de 24,80 a 73,55 mg L^{-1} , respectivamente. Tais variações podem estar relacionadas à distribuição das chuvas ao longo da bacia de drenagem, diversidade de usos e ocupações do solo, mecanismos de deposição e remobilização dos sedimentos em suspensão entre outros. No entanto, para a estação de amostragem S4 – Votorantim, devido à presença do reservatório de Itupararanga, as concentrações foram controladas chegando a um valor médio de 18,05 mg L^{-1} .

Para o período de cheia do rio Sorocaba, a estação S5 – Ibiúna apresentou concentração máxima de FSS de 65,00 mg L^{-1} , enquanto que no período seco tal concentração foi de 9,00 mg L^{-1} . Já para a foz, representado pela estação S1 – Laranjal Paulista, tais concentrações foram de 178,00 e 14,33 mg L^{-1} , respectivamente. Cabe ressaltar que as concentrações obtidas junto à foz não seguiram as distribuições das vazões nos períodos de cheia, evidenciando processos de remobilização e sedimentação bastante rápidos sendo a concentração máxima de 178,00 mg L^{-1} obtida durante o período de vazante do rio.

9.5.2. Variabilidade Temporal do FSS

A Figura 52 ilustra a distribuição temporal das vazões e concentrações de sedimentos finos em suspensão na bacia do rio Sorocaba, desde as regiões de nascentes (S5 - Ibiúna) até a foz (S1 – Laranjal Paulista), durante o período estudado.

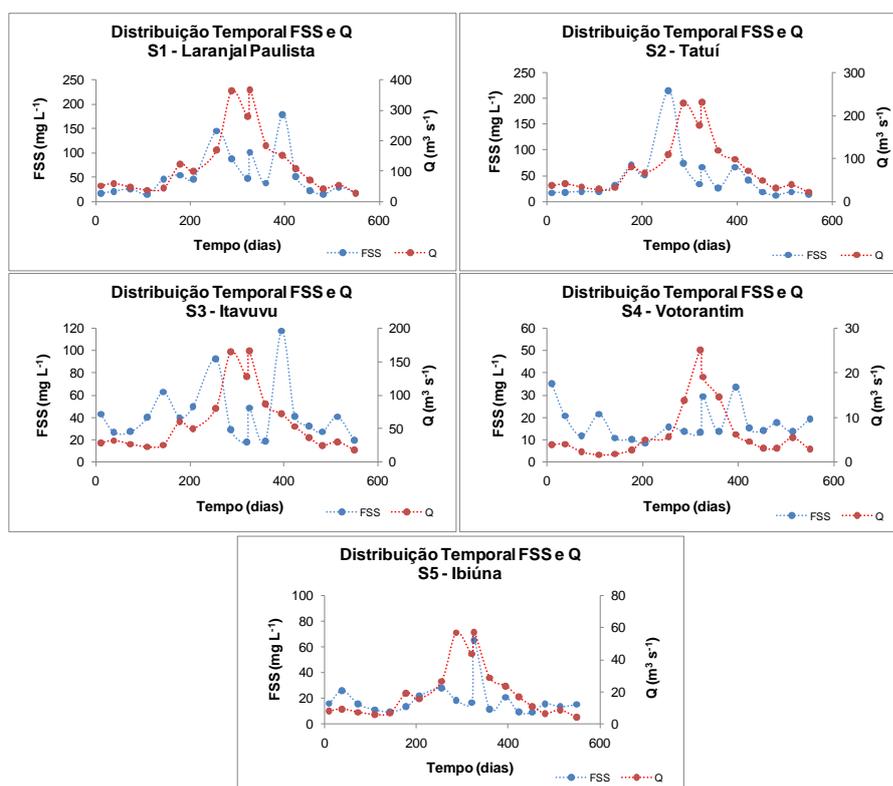


Figura 52 - Variabilidade temporal dos sedimentos finos em suspensão (FSS, mg L⁻¹) na bacia do rio Sorocaba e respectivas vazões (Q, m³ s⁻¹), desde a nascente (S5 – Ibiúna) até a foz (S1 – Laranjal Paulista), durante o período estudado

As variabilidades temporais das concentrações de FSS e respectivas vazões seguiram um padrão de distribuição similar entre as estações amostradas, em fase ou fora de fase com as vazões observadas, característico dos processos dinâmicos de remobilização e sedimentação em rios de pequeno a médio porte (PROBST, 1986; MORTATTI et al., 2003).

No entanto, cabe ressaltar que a variabilidade temporal de concentração de FSS na estação de amostragem S4 – Votorantim pode estar relacionada com o controle da vazão do reservatório de Itupararanga, localizado a montante desta estação de amostragem.

9.5.3. Relacionamento Concentração de FSS - Vazão

A Figura 53 apresenta o comportamento dos sedimentos finos em suspensão em função das respectivas vazões para cada estação de amostragem ao longo do rio Sorocaba, conforme descrito no item 6.4, deste presente estudo.

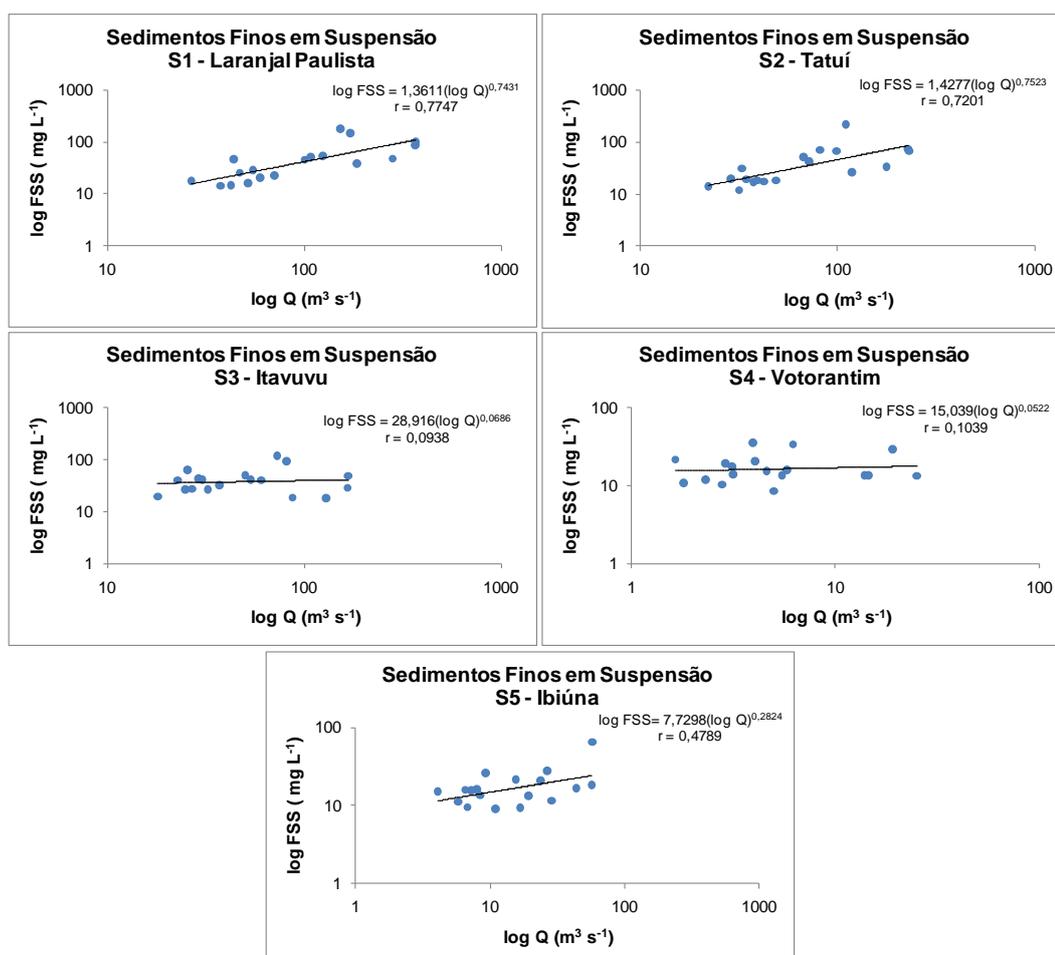


Figura 53 - Correlação bilogarítmica entre as concentrações dos sedimentos finos em suspensão (FSS, mg L⁻¹) e respectivas vazões (Q, m³ s⁻¹) para as estações de amostragem ao longo do rio Sorocaba: S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, para o período estudado

Foi possível observar um modelo de correlação bilogarítmica altamente significativo ($p < 0,001$) entre as concentrações de FSS e as vazões, principalmente para as estações de amostragem mais a jusante, S1 – Laranjal Paulista e S2 – Tatuí, conforme estabelecido na literatura para rios de médio porte, casos do Garone na França (PROBST; BAZERBACHI, 1986), Senegal na África (KATTAN

et al., 1987), Tietê e Piracicaba (BORTOLETTO JUNIOR, 2004). Para as demais estações esta correlação não foi significativa.

As variações nos valores dos expoentes dos modelos bilogarítmicos podem refletir diferentes características físicas das áreas de contribuição, associadas a possíveis regimes hidrológicos e climáticos diferenciados e uso e ocupação dos solos ao longo da bacia de drenagem (MEYBECK, 1984).

Os expoentes dos modelos bilogarítmicos foram similares para as estações S1 e S2, com valores de 0,7431 e 0,7523 respectivamente, representando um mesmo sistema de distribuição. Os valores dos expoentes observados para as estações S5 – Ibiúna, S4 – Votorantim e S3 – Itavuvú foram respectivamente de 0,2824, 0,0522 e 0,0686, considerados bastante inferiores em comparação com as estações próximas à foz, evidenciando um padrão de distribuição diferente. Quanto mais elevado o expoente, maior a carga de sedimento fino em suspensão transportado.

9.5.4. Composição mineralógica e química do sedimento fino em suspensão

A composição química e mineralógica do sedimento em suspensão para a bacia do rio Sorocaba, determinada de acordo com o procedimento descrito no item 8.1.3. foram avaliadas somente com relação a foz (S1 – Laranjal Paulista), integrando toda a bacia de drenagem, onde o material coletado foi suficiente para a análise. A Tabela 30 apresenta os resultados químicos totais das principais espécies presentes nos sedimentos em suspensão.

Tabela 30 - Resultados químicos totais das principais espécies presentes no sedimento em suspensão junto à foz do rio Sorocaba, estação S1 – Laranjal Paulista, durante o período estudado, com suas respectivas médias e desvios padrão

Data	S1 - Laranjal Paulista																
	Si	Al	Fe	Mn	Cu	Co	Cr	Zn	Cd	Ni	Pb	Sr	Sc	Ca	Mg	Na	K
	(µg g ⁻¹)																
10/03/2009	192557,75	104191,63	76334,75	4185,07	54,61	19,50	48,56	618,78	16,32	25,37	75,99	74,82	13,26	5957,70	5203,12	3265,86	17063,13
07/04/2009	213701,96	118790,63	81403,16	3780,68	41,72	22,26	60,38	653,10	18,30	29,75	64,54	71,22	16,76	5264,76	5363,58	2943,34	17818,32
12/05/2009	215041,13	102875,92	61589,86	3029,40	32,00	20,21	82,64	299,43	12,41	39,87	169,68	65,73	13,21	5085,80	4967,02	2819,52	16802,23
17/06/2009	196766,87	103196,94	72290,47	3071,94	28,22	14,57	59,01	375,21	14,55	40,03	43,55	66,71	12,35	5025,34	4489,24	2858,36	16766,39
21/07/2009	208377,54	124246,08	59161,98	2402,04	29,59	15,48	54,63	336,87	10,74	25,73	45,56	61,62	13,58	3949,98	4858,57	2791,21	19122,52
25/08/2009	223338,12	113369,68	53118,65	1748,39	32,56	18,18	61,01	357,79	10,75	25,10	42,10	60,51	14,13	4001,37	4895,79	2380,01	18400,47
22/09/2009	201853,26	107222,21	54346,43	2380,07	30,95	18,17	67,72	284,41	11,61	28,32	42,44	59,08	13,23	4065,02	4683,86	2308,61	17164,57
10/11/2009	229742,54	99169,35	46384,96	1270,06	27,15	10,87	49,87	163,97	6,91	12,97	43,64	60,89	13,03	3638,16	5317,93	2429,09	16886,99
12/12/2009	228709,45	103999,82	49185,93	1711,80	23,46	19,87	56,87	190,34	6,98	18,93	41,69	61,33	13,34	3712,65	4927,80	2500,96	17743,61
15/01/2010	241303,04	112991,59	59914,63	2613,97	28,43	14,46	52,43	253,90	11,36	21,37	48,48	77,32	14,28	4840,62	6290,76	2774,68	20433,03
20/01/2010	232222,75	114926,43	54649,94	1598,28	29,49	16,95	58,48	207,08	13,07	24,64	29,53	74,36	15,17	3893,73	5828,86	2070,12	17978,55
23/02/2010	248675,20	105859,27	59082,30	3840,49	28,17	18,79	57,41	185,99	9,91	25,39	33,78	73,95	14,12	4588,79	5105,59	2743,94	20298,64
30/03/2010	264212,55	114348,23	51713,89	1576,80	27,99	20,76	54,32	179,54	9,02	25,87	19,58	63,33	14,95	4029,37	5185,40	2433,60	19731,61
27/04/2010	235821,80	120536,05	65063,50	3717,05	30,02	16,70	73,73	431,96	15,26	28,55	51,40	73,22	15,28	4812,56	5271,25	2553,24	21460,68
27/05/2010	243275,34	121281,00	81323,58	3980,75	36,16	22,63	137,75	877,90	15,86	32,84	377,59	82,14	15,41	5431,09	5452,23	2924,53	22261,92
24/06/2010	217152,07	121949,15	95752,05	5340,79	57,88	20,21	72,46	581,72	18,82	33,68	68,65	89,11	15,85	6622,50	5194,57	2597,13	19498,95
27/07/2010	223356,49	128219,59	71691,10	4124,07	36,94	13,07	74,53	534,41	14,54	31,75	58,49	78,18	14,98	5361,27	5188,34	2544,65	21409,09
01/09/2010	270872,83	87453,30	59132,62	5657,74	38,63	18,33	62,08	572,67	11,19	30,85	58,39	80,69	12,29	7746,84	4799,25	3403,09	17022,96
C _m	227054,48	111368,16	64007,77	3112,74	34,11	17,83	65,77	394,72	12,65	27,83	73,06	70,79	14,18	4890,42	5167,95	2685,66	18770,20
DP	21539,78	10404,50	13208,34	1303,38	9,24	3,18	20,22	203,53	3,48	6,69	82,37	8,80	1,25	1088,84	416,92	331,50	1811,37

Em termos de concentração média foi possível verificar que o Si foi à espécie química que mais contribuiu na composição química do sedimento em suspensão com um valor médio de 227054,48 µg g⁻¹, seguido pelo Al e Fe, com valores médios de 111368,16 e 64007,77 µg g⁻¹, respectivamente. Tais elementos estão associados aos processos de intemperismo, os quais são influenciados pelo clima e manejo do solo (SARDINHA et al., 2008).

Com relação aos metais pesados, com exceção do Sr e Sc, foi possível observar um predomínio de Zn com concentração média de 394,72 µg g⁻¹, seguido pelo Pb, Cr, Cu, Ni, Co e Cd, com valores médios variando de 12,65 a 73,06 µg g⁻¹. A concentração de Sc foi aparentemente constante durante o período estudado, com um valor médio de 14,18 µg g⁻¹.

Com relação aos íons maiores representado pela fração trocável houve uma predominância de K com uma concentração média de 18770,20 µg g⁻¹, seguido por Mg (5167,65 µg g⁻¹), Ca (4890,42 µg g⁻¹) e Na (2685,66 µg g⁻¹). Em geral, Na e Ca podem ser liberados pela hidrólise do plagioclásio e K pela hidrólise da biotita, muscovita e feldspato potássico. Já o Mg pode ser liberado pela hidrólise da biotita, muscovita (TOLEDO et al., 2000).

Os resultados dos óxidos principais, normalmente utilizados na caracterização química dos sedimentos finos em suspensão podem ser verificados na Tabela 31, onde também são observados as concentrações da matéria orgânica, médias e respectivos desvios padrão.

Tabela 31 - Composição química dos óxidos principais e matéria orgânica nos sedimentos finos em suspensão junto à foz do rio Sorocaba, na estação de amostragem S1 – Laranjal Paulista, durante o período estudado

Data	S1 - Laranjal Paulista								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	M.Org
	(%)								
10/03/2009	41,22	19,69	9,82	0,54	0,83	0,86	0,44	2,06	6,88
07/04/2009	45,74	22,45	10,47	0,49	0,74	0,89	0,40	2,15	6,57
12/05/2009	46,03	19,44	7,92	0,39	0,71	0,82	0,38	2,02	6,21
17/06/2009	42,12	19,50	9,30	0,40	0,70	0,74	0,39	2,02	8,15
21/07/2009	44,60	23,48	7,61	0,31	0,55	0,81	0,38	2,30	6,09
25/08/2009	47,80	21,43	6,83	0,23	0,56	0,81	0,32	2,22	5,76
22/09/2009	43,20	20,26	6,99	0,31	0,57	0,78	0,31	2,07	5,81
10/11/2009	49,17	18,74	5,97	0,16	0,51	0,88	0,33	2,03	3,89
12/12/2009	48,95	19,65	6,33	0,22	0,52	0,82	0,34	2,14	4,71
15/01/2010	51,65	21,35	7,71	0,34	0,68	1,04	0,37	2,46	4,59
20/01/2010	49,71	21,72	7,03	0,21	0,54	0,97	0,28	2,17	4,06
23/02/2010	53,23	20,01	7,60	0,50	0,64	0,85	0,37	2,45	4,39
30/03/2010	56,55	21,61	6,65	0,20	0,56	0,86	0,33	2,38	4,27
27/04/2010	50,48	22,78	8,37	0,48	0,67	0,87	0,34	2,59	5,40
27/05/2010	52,07	22,92	10,46	0,51	0,76	0,90	0,39	2,68	6,69
24/06/2010	46,48	23,05	12,32	0,69	0,93	0,86	0,35	2,35	8,05
27/07/2010	47,81	24,23	9,22	0,53	0,75	0,86	0,34	2,58	7,12
01/09/2010	57,98	16,53	7,61	0,73	1,08	0,80	0,46	2,05	9,87
%Média	48,60	21,05	8,23	0,40	0,68	0,86	0,36	2,26	6,03
DP	4,61	1,97	1,70	0,17	0,15	0,07	0,04	0,22	1,62

De maneira geral, foi possível observar um predomínio de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ ao longo do período estudado, com porcentagens médias de 48,60 ± 4,61; 21,05 ± 1,97 e 8,23 ± 1,70, respectivamente, não sendo verificada nenhuma influência sazonal expressiva. Valores semelhantes a estes também foram obtidos por Lopes (2010) em um estudo da parte alta da bacia do rio Tietê, próximo as nascentes, onde ocorreu um predomínio de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, com concentrações de 51,61 ± 2,21, 29,79 ± 1,19 e 3,34 ± 0,33 %, respectivamente. Cabe salientar que os valores percentuais de K₂O foram significativos, representando em termos médios 2,26 ± 0,22.

A concentração média da matéria orgânica, calculada para o período estudado, foi de 6,03 ± 1,62 %. Diferentemente do observado para os óxidos de Si, Al e Fe, foi possível verificar um efeito da sazonalidade nas concentrações da matéria orgânica, possivelmente em função dos processos de remobilização e maior intensidade da erosão mecânica no período chuvoso.

A presença de solos vermelhos lateríticos na bacia de drenagem do rio Sorocaba justifica as concentrações elevadas de Fe e Mn observadas, atribuídas à presença de óxidos de Fe e Mn na carga de sedimentos finos em suspensão, conforme também verificado por Mortatti et al. (2002) na bacia do rio Piracicaba.

Com relação à composição mineralógica, ocorreu o predomínio de quartzo, caulinita, magnetita, feldspatos potássicos e plagioclásios indicando ainda presenças significativas de ilita e muscovita, o que confirma os resultados de Sardinha (2007), principalmente para o alto rio Sorocaba e também os obtidos por Silva et al. (2002) e Bortoletto Júnior (2004) na bacia do rio Tietê, na qual o predomínio foi de feldspatos potássicos.

9.5.5. Degradação física específica

A degradação física específica da bacia de drenagem do rio Sorocaba foi calculada de acordo com o procedimento descrito no item 8.1.4. Para tal, foram coletadas três amostras de solos representativos ao longo da área de estudo para determinação da densidade média dos solos.

Na região das nascentes (S5 – Ibiúna) ocorreu o predomínio do Latossolo Vermelho-Amarelo com uma densidade média de $1,23 \text{ t m}^{-3}$, enquanto que na parte média da bacia de drenagem em estudo (S3 – Itavuvú) foi Argissolo Vermelho-Amarelo ($1,64 \text{ t m}^{-3}$). Já na região da foz (S1 – Laranjal Paulista) o Latossolo Vermelho apresentou uma densidade de $1,52 \text{ t m}^{-3}$. A densidade obtida pela média dos três solos amostrados foi de $1,47 \text{ t m}^{-3}$.

A degradação física específica calculada para a bacia do rio Sorocaba, junto à foz (S1 – Laranjal Paulista) foi de $37,88 \text{ m Ma}^{-1}$. Tal resultado evidenciou uma maior importância das áreas agrícolas na erosão mecânica, devido ao constante manejo dos solos dessa região.

De acordo com Bortoletto Júnior (2004) a degradação física específica da bacia do rio Tietê foi da ordem de $42,6 \text{ m Ma}^{-1}$. Já para a bacia de drenagem do rio Piracicaba, a erosão mecânica foi de $39,6 \text{ m Ma}^{-1}$. Ainda a título de comparação, os resultados obtidos para a bacia amazônica (MORTATTI, 1995) estimaram a taxa de perda de solo por erosão mecânica como sendo 123 m Ma^{-1} . Isso significa que os solos da bacia amazônica não se encontram em equilíbrio e as suas espessuras tendem a se reduzir nas condições atuais. Tais resultados foram semelhantes aos obtidos para a mesma região por Gaillardet et al. (1997).

9.5.6. Transporte fluvial de FSS

Os transportes totais e específicos dos sedimentos finos em suspensão ao longo da bacia do rio Sorocaba foram calculados de acordo com o método estocástico, mais apropriado segundo Probst (1992), para cargas particuladas, devido a possíveis defasagens entre a concentração de FSS e as respectivas vazões. Os resultados desses transportes fluviais podem ser verificados na Tabela 32.

Tabela 32 - Transporte médio anual de sedimentos finos em suspensão (FSS), total (T) e específico (T_E), por estação de amostragem ao longo do rio Sorocaba, para o período de estudo

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS FINOS EM SUSPENSÃO				
Estação de amostragem	Área (km ²)	Q médio (m ³ s ⁻¹)	T (t a ⁻¹)	T_E (t km ⁻² a ⁻¹)
S1 - Laranjal Paulista	5269	126,52	293461	55,70
S2 - Tatuí	3942	83,37	156825	39,78
S3 - Itavuvú	1607	61,57	85257	53,05
S4 - Votorantim	1040	6,97	3966	3,81
S5 - Ibiúna	680	19,71	15420	22,68

Foi possível verificar um aumento do transporte de montante a jusante na bacia de drenagem do rio Sorocaba, de 15420 t a⁻¹ para a estação S5 – Ibiúna, próximo às nascentes, até 293461 t a⁻¹ para a estação S1 – Laranjal Paulista, próximo à foz. A baixa carga transportada observada na estação S4 – Votorantim (3966 t a⁻¹) pode ser justificada pela sua proximidade ao reservatório de Itupararanga, que controla a vazão do rio Sorocaba e retém grande parte dos sedimentos finos em suspensão originados na área de contribuição à montante da barragem.

Em termos de transporte específico, a contribuição da foz do rio Sorocaba, estação S1 – Laranjal Paulista, para o canal principal do rio Tietê foi de 55,70 t km⁻² a⁻¹, o que configura a erosão mecânica muito semelhante ao observado por Bortoletto Junior (2004) no próprio rio Tietê, em Tietê, de 59,60 t km⁻² a⁻¹, como também ao verificado no rio Piracicaba, em Artemis, de 55,50 t km⁻² a⁻¹.

Meybeck et al. (2003) propuseram uma classificação da erosão mecânica em termos do transporte específico de sedimentos finos em suspensão para os rios do mundo em muito baixo ($< 3,65 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), baixo (de $3,65$ a $18,25 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), médio (de $18,25$ a $73 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), alto (de 73 a $365 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), muito alto (de 365 a $1825 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) e extremamente alto ($> 1825 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$). Para essa classificação, o rio Sorocaba foi enquadrado como um rio de transporte médio de FSS, por apresentar em sua foz, S1 - Laranjal Paulista, uma carga de $55,70 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Tal valor pôde ser considerado como muito próximo aos apresentados por Meybeck et al. (2003) para os rios Chena – EUA ($T_E = 54,75 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) e Chaudiere – França ($T_E = 56,58 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), também classificados como médio e que apresentam áreas de drenagem de mesma magnitude que o rio Sorocaba, com 5125 km^2 e 5805 km^2 , respectivamente.

Ainda a título de comparação, a erosão mecânica representada pelo transporte específico, observada para o rio Sorocaba em sua foz, foi quatro vezes maior à verificada por Nkounkou e Probst (1987) para o rio Congo em Brazzaville - África, de $12,97 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$; e cerca de três vezes menor do que a observada por Mortatti et al. (1994) para o rio Amazonas em Óbidos, que foi de $170,83 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$.

A Figura 54 ilustra a distribuição espacial da erosão mecânica, em termos do transporte médio específico anual, para a bacia do rio Sorocaba em suas respectivas estações de amostragem, desde a nascente até a foz, comparadas com evolução das vazões.

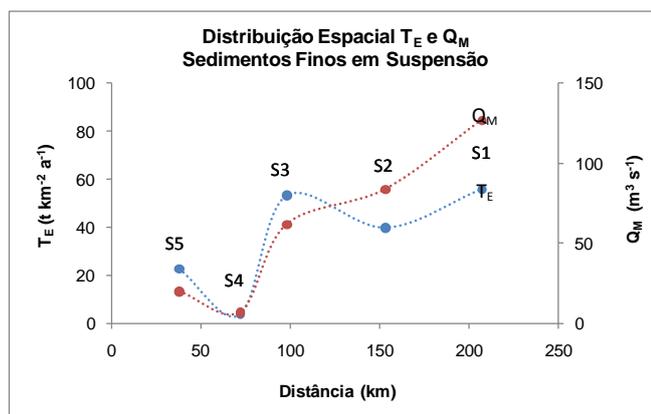


Figura 54 - Distribuição espacial da erosão mecânica, em termos do transporte médio específico anual de sedimento fino em suspensão e da vazão média (Q_M) ao longo da bacia do rio Sorocaba, para as estações de amostragem S1 – Laranjal Paulista, S2 – Tatuí, S3 – Itavuvú, S4 – Votorantim e S5 – Ibiúna, para o período de estudo

Foi possível verificar o aumento do transporte médio específico anual em função do aumento da vazão, mesmo considerando as respectivas áreas de drenagem. Essa evolução apresentou uma tendência positiva entre as estações S5 – Ibiúna e S1 – Laranjal Paulista.

Cabe destacar o aumento expressivo de FSS observado para a estação S3 – Itavuvú, próximo ao observado para a estação S1 – Laranjal Paulista, o que pode estar associado a um elevado transporte de sedimentos de um tributário não engajado, que foi o caso do rio Pirajibú, que conflui no rio Sorocaba à montante da estação S3, bem como aos processos erosivos mecânicos de margem e em menores proporções da remobilização das camadas superficiais dos sedimentos de fundo.

10. CONCLUSÕES

O estudo realizado na bacia do rio Sorocaba através das cargas particulada, representada pelo sedimento fino em suspensão, e dissolvida, transportadas fluvialmente, considerando-se os aportes de origem atmosférica, permitiram a utilização de modelos hidrogeoquímicos propostos em bacias de médio e grande porte. A coleta ao longo 18 meses mostrou-se de fundamental importância para avaliar os períodos de cheia e estiagem na bacia de drenagem.

A utilização do software WinXPRO 3.0. auxiliou na visualização da morfologia dos canais fluviais nas 5 estações de amostragem definidas no presente trabalho, bem como calcular a área úmida da seção transversal da bacia do rio Sorocaba, utilizando os dados de altura da lamina d'água, definidos como batimetria.

Através das análises de relacionamento vazão e precipitação, e separação do hidrograma de cheia durante o período de 1984 a 2008, foi possível verificar a influência da sazonalidade da chuva no regime fluviométrico do rio Sorocaba, bem como as contribuições na carga fluvial pelo escoamento superficial rápido (37,18 %) e subterrâneo (62,82 %).

Na foz do rio Sorocaba foi possível observar que houve uma tendência de desequilíbrio com o predomínio de HCO_3^- podendo ainda ser verificadas importantes participações de SiO_2 , Ca^{2+} e Cl^- . Já a região das nascentes apresentou um predomínio de Na^+ .

Na estação S1 – Laranjal Paulista o SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- e TDS apresentaram curvas de distribuição de concentração distantes das respectivas curvas de diluição teórica, indicando possíveis aportes difusos. Já o Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NH_4^+ e NO_3^- as curvas de distribuição das concentrações foram muito próximas às curvas de diluição teóricas calculadas, indicando origens possivelmente pontuais.

Na região das nascentes, estação S5 – Ibiúna, o SiO_2 , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} e TDS apresentaram curvas de distribuição de concentração distantes das respectivas curvas de diluição teórica, indicando possíveis aportes difusos. Já o PO_4^{3-} , NH_4^+ e NO_3^- as curvas de distribuição das concentrações foram muito próximas às curvas de diluição teóricas calculadas, indicando origens possivelmente pontuais

Numa análise complementar da caracterização hidroquímica fluvial quanto aos aspectos qualitativos, pode-se verificar que o rio Sorocaba apresentou em termos de cátions uma característica sódica, tanto para a nascente quanto para a foz. Já em termos de ânions, as águas se mostraram bicarbonatadas.

Com relação ao transporte específico fluvial junto à foz do rio Sorocaba (S1- Laranjal Paulista), houve um predomínio de Na^+ e HCO_3^- , para os cátions e ânions principais, respectivamente, calculado método determinístico, o qual se mostrou adequado para bacias de médio porte.

Em termos de aportes atmosféricos, calculado pelo método estocástico, o HCO_3^- e Ca^{2+} , foram as espécies químicas que mais contribuíram na carga fluvial com aportes de $20,2 \cdot 10^6$ e $16,2 \cdot 10^6 \text{ kg a}^{-1}$, respectivamente.

O transporte de FSS, calculado pelo método estocástico, aumentou de montante a jusante na bacia de drenagem do rio Sorocaba classificando-o como um rio médio transportador de sedimento. A baixa carga transportada observada na estação S4 – Votorantim pode ser justificada pela sua proximidade ao reservatório de Itupararanga.

A erosão mecânica mostrou-se como uma taxa de degradação física dos solos da bacia do rio Sorocaba de $37,88 \text{ m Ma}^{-1}$, indicando possivelmente a influencia da área cultivada com cana-de-açúcar, milho e possíveis alterações de manejo.

Na composição química do sedimento foi possível verificar que o Si foi à espécie química que mais contribuiu, seguido pelo Al e Fe. Com relação aos metais pesados, com exceção do Sr e Sc, foi possível observar um predomínio de Zn, seguido pelo Pb, Cr, Cu, Ni, Co e Cd. A concentração de Sc ao longo do tempo foi aparentemente constante durante o período estudado. Já os íons maiores apresentaram um predomínio de K, seguido por Mg, Ca e Na.

Com relação à composição mineralógica, ocorreu o predomínio de quartzo, caulinita e magnetita, indicando ainda presenças significativas de ilita e muscovita.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, H.W. **Forest and water**: effects of management on floods, sedimentation, and watersupply. Washington, DC: USDA, Forest Service, 1976. 115 p. (General Technical Report, 18).

ARAUJO, A.A.M. de; DIAS, N.L. Separação do hidrograma de cheias através de filtros auto-recursivos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1995, Recife, PE. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 1995. p. 267-272.

ARAUJO, C.C.; MARQUES, J.A.V.; NETO, R.R.S.; DOURADO, J.C.; MACHADO, R.N.S. Estudo da produção de sedimentos da sub-bacia do Ribeirão Taquaruçu Grande (TO). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba, PR. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2003. 1 CD-ROM.

BIBIAN, J.P.R. **Caracterização hidrogeoquímica da microbacia de drenagem do córrego Barra Bonita, São Paulo**. 2007. 194 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BOEGLIN, J.I.; PROBST, J.L. Physical and chemical weathering rates and CO₂ consumption in a tropical lateritic environment: the upper Niger basin. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 148, p. 137-156, 1998.

BORTOLETTO JUNIOR, M.J. **Balço de alteração e erosão química na bacia hidrográfica do rio Corumbataí**. 1999. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

BORTOLETTO JUNIOR, M.J. **Características hidrogeoquímicas e processos erosivos mecânicos e químicos nas bacias de drenagem dos rios Tietê e Piracicaba**. 2004. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

BRUIJNZEEL, L.A. **Hydrology of moist tropical forest and effects of conversion: a state of knowledge review**. Amsterdam: UNESCO, 1990. 224 p.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JUNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C. dos; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. 132 p.

CASSOL, E.A.; ELTZ, F.L.F.; MARTINS, D.; LEMOS, A.M. de; LIMA, V.S. de; BUENO, A.C. Erosividade, padrões hidrológicos, períodos de retorno e probabilidade de ocorrência das chuvas em São Borja, RS. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1239-1251, 2008.

CAVALCANTE, D.M.; BEZERRA da SILVA, Y.J.A.; OLIVEIRA da SILVA, M.D.R.; SOUZA, W.L.S.; PISCOYA, V.C.; MENDES, M.H.S.; CANTALICE, J.R.B.; ARAÚJO, A.M. Medição da produção de sedimentos da bacia hidrográfica do rio Capibaribe. In: JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO – JEPEX, 10., 2010, Recife, PE. **Anais...** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2010. 1 CD-ROM.

CHAKRAPANI, G.J. Factors controlling variations in river sediment loads. **Current Science**, Bangalore, v. 88, n. 4, p. 569-575, 2005.

CHELLAM, M.R.; FERNANDES, C.V.S.; FERMIANO, G.A.; FILL, H.D. Avaliação do transporte de sedimentos no rio Barigui. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 10, n. 3, p. 105-111, 2005.

CRUZ, C.M.C.A.; SILVA, Y.J.A.B.; SOUZA, W.L.S.; CAVALCANTE, D.M.; NETO, L.A.A.; CANTALICE, J.R.B.; ARAUJO, M.A.; ALVES, P.S.; FILHO, M.C. Avaliação do transporte de sedimento suspenso e por carga de fundo da bacia hidrográfica do rio Jaboatão. In: JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO – JEPEX, 10., 2010, Recife, PE. **Anais...** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2010. 1 CD-ROM.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos. **Banco de dados fluviométricos do rio Sorocaba-SP**. São Paulo: DAEE, CTH, 2009. Acesso em: 11 mar. 2009.

DROPPO, I.G. A new definition of suspended sediment: implications for the measurement and prediction of sediment transport. In: WORKSHOP ON EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT MEASUREMENT IN RIVERS: TECHNOLOGICAL AND METHODOLOGICAL ADVANCES, 2002, Oslo, Norway. Oslo: IAHS, 2002. p. 3-12. (IAHS Publication, 283).

EDWARDS, K.H. Fluvial environments. In: PERRY, C.; TAYLOR, K. (Ed.). **Environmental sedimentology**. London, UK: Blackwell Publishing, 2007. cap. 3., p. 75-108.

FÁVERO, O.A. **Paisagem e sustentabilidade na bacia hidrográfica do rio Sorocaba (SP)**. 2007. 330 p. Tese (Doutorado em Geografia Humana) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

FERRAZ, F.F.B.; MILDE, L.C.E.; MORTATTI, J. Modelos hidrológicos acoplados a sistemas de informações geográficas: um estudo de caso. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 14, n. 23, p. 45-56, 1999.

FIETZ, S.R. Água, o recurso natural do terceiro milênio. **A Lavoura**, Rio de Janeiro, n. 657, p. 18-19, 2006.

GOMES, J.P.M.; MERTEN, G.H.; RIBEIRO, G.S. Estimativa da umidade antecedente do solo e sua influência na produção de sedimentos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 8., 2006, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2006. 1 CD-ROM.

HÉRLON, R.F.; PAULINO, W.D. **Recomendações e cuidados na coleta de amostras de água**. 1. ed. Fortaleza, CE: COGERH, 2001. 20 p. (Informe Técnico, 2).

HINO, M.; HASEBE, M. Analysis of hydrologic characteristics from runoff data – a hydrologic inverse problem. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 49, p. 287-313, 1981.

HOOPER, R.P.; SCHOEMAKER, C.A. A comparison of chemical and isotopic hydrograph separation. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 22, p. 1444-1454, 1986.

HORBE, A.M.C.; GOMES, I.L.F.; MIRANDA, S.F.; SILVA, S.R. Contribuição à hidroquímica de drenagens no município de Manaus – AM. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 35, n. 2, p. 119-224, 2005.

HOYT, W.G.; TROXELL, H.C. Forest and streamflow. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, New York, v. 56, p. 1-32, 1932.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Plano de Bacia da unidade de gerenciamento de recursos hídricos do Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI 10)**. Relatório final. São Paulo: Centro de Tecnologias Ambientais e Energéticas – CETAE, Laboratório de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental – LabGeo, 2006. 155 p. (Relatório Técnico, 91 265-205).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Atualização do relatório de situação dos recursos hídricos 1995 da bacia do Sorocaba e Médio Tietê (Relatório Zero) como subsídio à elaboração do plano de bacia**. São Paulo: Agrupamento de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente – AGAMA, Divisão de Geologia – DiGeo, 2005. v. 1, 420 p. (Relatório Técnico, 80 401-205).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Contagem da População 2007**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 311 p. Disponível em:

Acesso em: 03 dez. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Dados do Censo 2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 04 nov. 2010. Disponível em: . Acesso em: 03 dez. 2010.

JENKINS, A.; PETERS, N.E.; RODHE, A. Hidrology. In: MOLDAN, B.; CERNY, J. (Coord.). **Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research**. Chichester: John Wiley, 1994. p. 31-54.

JULIEN, P.Y. **Erosion and sedimentation**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

JULIEN, P.Y. **Erosion and sedimentation**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

JUNIOR, G.M.; SOUZA COSTA, C.E.F.; NETO, I.C. Avaliação hidroquímica e da qualidade das águas de um trecho do rio Açú, Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 16, n. 2, p. 27-36, 2003.

KATTAN, Z.; GAC, J.I.; PROBST, J.L. Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin, estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 92, p. 59-76, 1987.

KLEIN, R.D. Urbanization and stream quality impairment. **Journal of the American Water Resources Association - JAWRA**, Herndon, v. 15, n. 4, p. 948-963, 1979.

KONRAD, C.P. **Effects of urban development on floods**. Tacoma, WA: US Geological Survey, 2003. 4 p. (Fact Sheet Fs-076-03). Disponível em: [http://pubs.usgs.gov/of/2003/076/](#). Acesso em: 03 dez. 2010.

LIKENS, G.E.; BORMANN, F.H.; PIERCE, R.S. **Biogeochemistry of a forested ecosystem**. New York: Springer-Verlag, 1977. 146 p.

LIMA, J.F. Os recursos hídricos no Brasil: algumas considerações preliminares. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 30, n. 1, p. 64-75, 1999.

LIMA, J.E.F.W.; LOPES, W.T.A.; SILVA, E.M.; VIEIRA, M.R.; Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na Bacia do rio Paranapanema. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa, PB. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2005.

LIQUETE, C.; CANALS, M.; LUDWIG, W.; ARNAU, P. Sediment discharge of the rivers of Catalonia, NE Spain, and the influence of human impacts. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 366, p. 76-88, 2009.

MARCO da SILVA, A. Potencial natural de erosão no município de Sorocaba, São Paulo, Brasil. **Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil**, v. 8, n. 1, p. 5-14, 2008.

MARTINELLI, L.A.D.A.H.; FORSBERG, B.R.; VICTORIA, R.L.; RICHEY, J.E. Descarga de sólidos dissolvidos totais do rio Amazonas e seus principais tributários. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 3, p. 141-148, 1989.

MEADE, R.H.; PARKER, R.S. Sediment in rivers of the United States. In: US GEOLOGICAL SURVEY. **National water summary 1984**. Reston, VA, 1984. p. 49-60. (USGS Water-Supply Paper, 2275).

MEADE, R.H.; DUNNE, T.; RICHEY, J.E.; SANTOS, U.; SALATI, E.; Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon river of Brazil. **Science**, Washington, DC, v. 228, p. 488-490, 1985.

MECHI, A.; SANCHES, D.L. Impactos ambientais da mineração no estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010.

MEDEIROS, P.R.P.; KNOPPERS, B.A.; SANTOS JUNIOR, R.C.S.; SOUZA, W.F.L.; Aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na zona costeira do rio São Francisco (SE/AL). **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 212-231, 2007.

MESSAITFA, A. **Transfert d'eau, des sédiments et de polluants associés sur le bassin de l'Ill: cas de mercure**. 1997. 209 p. Thèse (Doctorat) - Centre de Géochimie de la Surface, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1997.

MEYBECK, M.B. **Hydrochimique et géochimique du Lac Léman**. 1970. 245 p. **Thesis** (Doctor) – C.R.G. Thonon lês Bains, Université dês Sciences, Paris, 1970.

MEYBECK, M. Composition chimique des ruisseaux nos pollués de France. **Science Géologiques Bulletin**, Strasbourg, v. 39, p. 3-77, 1986.

MEYBECK, M.; FRIEDRICH, G.; THOMAS, R.; CHAPMAN, D. In: CHAPMAN, D. (Ed.). **Water quality assessments**. London: UNESCO, WHO, UNEP, 1996. p. 241-320.

MILLIMAN, J.D. A synthesis. **Upper Continental Sedimentology**, Stuttgart, v. 4, p. 151-175, 1991.

MILLIMAN, J.D.; SYVITSKI, J.P.M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. **Journal of Geology**, Chicago, v. 100, p. 525-544, 1992.

MOREIRA-NORDEMANN, L.M.; GIRARDI, P.; RÉ POPPI, N. Química da precipitação atmosférica na cidade de Campo Grande – MS. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 35-44, 1997.

MORTATTI, J. **Erosão na Amazônia: processos, modelos e balanço**. 1995. 155 f. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

MORTATTI, J.; VICTORIA, R.L.; TARDY, Y. Balanço de alteração e erosão química na bacia Amazônica. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 2-13, 1993.

MORTATTI, J.; PROBST, J.L.; TARDY, Y. Avaliação do escoamento superficial na bacia Amazônica através do transporte de material fluvial. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 2, p. 235-243, 1994.

MORTATTI, J.; RODRIGUES, J.R.; MARTINELLI, L.A. Balanço da erosão do rio Piracicaba: resultados preliminares. In: WORKSHOP DO PROJETO PIRACENA, 2., 1996, Nazaré Paulista. **A bacia hidrográfica como unidade de estudo: estrutura e processos; anais**. Piracicaba: CENA/USP, 1996. p. 137-139.

MORTATTI, J.; VICTORIA, R.L.; TARDY, Y. Balanço de alteração e erosão química na bacia Amazônica. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 11, n.1, p. 2-13, 1997.

MORTATTI, J.; MORAES, J.M.; VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.A. Hydrograph separation of the Amazon River: a methodological study. **Aquatic Geochemistry**, Heidelberg, v. 3, p. 117-128, 1997.

MORTATTI, J.; PROBST, J.L.; FERNANDES, A.M.; MORTATTI, B.C.; OLIVEIRA, H. Influence of discharge on silicate weathering dynamics of the Tiete river basin: major cations and dissolved silica approach. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 15-26, 2008.

MOUKOLO, N.; LARAQUE, A.; OLIVRY, J.C.; BRICQUET, J.P. Transport en solution et en suspension par le fleuve Congo (Zaire) et ses principaux affluents de la rive droite. **Hidrological Sciences Journal**, Wallingford, v. 38, p. 133-145, 1993.

NEARING, M.A.; NICHOLS, M.H.; STONE, J.J.; RENARD, K.G.; SIMANTON, J.R. Sediment yields from unit-source semiarid watersheds at Walnut Gulch. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 43, W06426, 2008. doi:10.1029/2006WR005692.

NKOUNKOU, R.R.; PROBST, J.L. Hydrology and geochemistry of the Congo River system. **Mitteilungen des Geologisch-Paläontologischen Instituts der Universität Hamburg, SCOPE/UNEP – Sonderband**, Hamburg, n. 64, p. 483-508, 1987.

ODUM, E. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Ed Guanabara, 1988. 434 p.

OLIVEIRA, H.; VENDRAMINI, D.; MORTATTI, J. Transporte de espécies químicas dissolvidas em águas fluviais de uma microbacia com eucaliptos em Angatuba, São Paulo. **Geociencias**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 79-89, 2009.

OLIVEIRA, J.B. **Solos do estado de São Paulo**: descrição das classes registradas no mapa pedológico, por João Bertoldo de Oliveira. Campinas: Instituto Agrônomo, 1999. 112 p. (Boletim Científico, 45).

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 64 p.

PEDRAZZI, F.J.M.; CONCEIÇÃO F.T.; MOSCHINI-CARLOS, V.; POMPEÃO, M.L.M. Qualidade da água do reservatório de Itupararanga (Bacia do Alto Sorocaba – SP) – Gradiente espacial horizontal. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 8., 2007, Caxambu, MG. **Anais...** Caxambu: Sociedade de Ecologia do Brasil, 2007. 1 CD-ROM.

PERAY, N. **Composition chimique des eaux e l'ill à Strasbourg**: variations saisonnières des flux de matières et bilan de l'érosion chimique. Strasbourg: ULP, Centre de Géochimie de La Surface, 1998.

PERROTA, M.M.; SALVADOR, E.D.; LOPES, R.C.; D'AGOSTINHO, L.Z.; PERUFFO, N.; GOMES, S.D.; SACHS, L.L.B.; MEIRA, V.T.; GARCIA, M.G.M.; LACERDA FILHO, J.V. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Convênio CPRM/Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento do Estado de São Paulo, 2005. 1 mapa. Escala 1:750.000.

PILGRIM, D.H.; HUFF, D.D.; STEELE, T.D. Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm runoff. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 15, n. 2, p. 329-339, 1979.

PORTO, F.A. Estabelecimento dos parâmetros de controle da poluição. In: PORTO, S.M.; CLEARY, R.W.; COIMBRA, R.M.; EIGER, S.; LUCA, S.J.; NOGUEIRA, V.P.O.; PORTO, F.A. (Ed.). **Hidrologia ambiental**. São Paulo: EDUSP, 1991. p. 375-390.

PROBST, J.L. Dissolved and suspended matter transported by the Girou River (France): mechanical e chemical erosion rates in a calcareous molasse basin. **Hydrological Sciences Journal**, Wallingford, v. 31, p. 61-79, 1986.

PROBST, J.L. **Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale**. Mécanismes, Bilan Global Actuel et Fluctuations au Cours des 500 Derniers millions d'années., Strasbourg: Université Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de Géologie, 1992. 167 p. (Sciences Géologiques – Memoirs, 94).

PROBST, J.L.; BAZERBACHI, A. Transports en solutions et en suspension par la Garonne supérieure. **Science Geologiques Bulletin**, Strasbourg, v. 39, n. 1, p. 79-98, 1986.

PROBST, J.L.; SIGHA, N. Estimation de l'écoulement superficiel et de as charge en suspension sur quelques grands bassins fluviaux du monde. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, Paris, v. 309, n. 4, p. 357-363, 1989.

PROBST, J.L.; MORTATTI, J.; TARDY, Y.; Carbon river fluxes and global weathering CO₂ consumption in the Congo and Amazon River basins. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 9, p. 1-13, 1994.

PRUSKI, F.F.; RODRIGUES, L.N.; SILVA, D.D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 301-307, 2001.

REDES DAS ÁGUAS. **Relatório parcial**: Caracterização geral da UGRHi 10. Conteúdo, tratamento e apresentação de dados. Rio de Janeiro, 2000. cap. 1. 183 p.

RIBANI, M.; BOTTOLI, C.B.G.; COLLINS, C.H.; JARDIM, I.C.S.F.; MELO, L.F.C. Validação em métodos cromatográficos e eletroforéticos. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n. 5, p. 771-780, 2004.

RICHEY, J.E.; HEDGES, J.I.; DEVOL, A.H.; QUAY, P.D.; VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.A.; FORSBERG, B.R.; Biogeochemistry of carbon in the Amazon river. **Limnology and Oceanography**, Grafton, v. 35, n. 2, p. 352-371, 1990.

ROBSON, A.; NEAL, C. Hydrograph separation using chemical techniques: an application to catchments in mid-Wales. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 116, v. 1/4, p. 345-363, 1990.

ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Laboratório de Geomorfologia, Depto. Geografia, FFLCH/USP; Laboratório de Cartografia Geotécnica – Geologia Aplicada – IPT; FAPESP, 1997. 63 p. (Mapas e Relatórios).

SAMUEL, J.; ROUAULT, R.; BESNUS, Y. Analyse multiélémentaire standardisée des matériaux géologiques en spectrométrie d'émission par plasma à couplage inductif. **Analisis**, Paris, v. 13, p. 312-317, 1985.

SANTOS, C.M.M. **Geoquímica do carbono e nitrogênio orgânico particulado transportados durante um ano hidrológico (1984-1985) pelo rio São Francisco, Brasil, e transferidos ao seu estuário**. 1993. 70 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 1993.

SARDINHA, D.S.; TOMAZINI da CONCEIÇÃO, F.; BONOTTO, D.M.; DOURADOR de SALLES, H.; ANGELUCCI, V.A. Avaliação de balanço anual de cátions e ânions na bacia do Alto Sorocaba (SP). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 38, n. 4, p. 730-740, 2008.

SERCON THE STABLE ISOTOPE COMPANY. **ANCA-GSL Sercon Hidra 20-20 operator's manual**. Cheshire, UK. Disponível em: . Acesso em: 11 jan. 2010.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M.; MARQUES, J.J.G.S.M.; LIMA, L.A. Resistência ao salpico provocado por impacto de gotas de chuva simulada em latossolos e sua relação com características químicas e mineralógicas. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 176-182, 1995.

SIMÕES, S.J.C.; COIADO, E.M. Processos erosivos. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre, RS: ABRH, 2001. 625 p.

SINGH, M.; SINGH, I.B.; MULLER, G. Sediment characteristics and transportation dynamics of the Ganga River. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 86, p. 144-175, 2007.

SINGH, P.K.; BHUNYA, P.K.; MISHRA, S.K.; CHAUBE, U.C. A sediment graph model based on SCS-CN method. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 349, p. 244-255, 2008.

SIVIERO, M.R.L.; COIADO, E.M. A produção de sedimentos a montante de uma seção no rio Atibaia associada à descarga sólida transportada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 13., 1999, Belo Horizonte, MG. **Anais...** Belo Horizonte: ABRH, 1999. 1 CD-ROM.

SOPPER, W.E. Effects of timber harvesting and related management practices on water quality in forested watersheds. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 4, n. 1, p. 24-29, 1975.

SOUZA, W.F.L.; KNOPPERS, B.; Fluxos de Água e Sedimentos a Costa Leste do Brasil: Relações Entre a Tipologia e as Pressões Antrópicas. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 1, p. 57-74, 2003.

STALLARD, R.F.; EDMOND, J.M. Precipitation chemistry and marine contribution to the dissolved load the time of peak discharge. **Journal of Geophysical Research. Serie C**, Washington, DC, v. 86, p. 9844-9858, 1981.

SWAMI, M. V.; MATOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1975. 233 p.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre, RS: ABRH, 2001. 943 p.

TUCCI, C.E.M. Inundações e drenagem urbana. In: TUCCI, C.E.M.; BERTONI, J.C. (Org.). **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre, RS: ABRH, 2003.

TUNDISI, J.G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: RiMa, 2005. v. 2, 248 p.

TUNDISI, J.G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 1-10, 2008.

VOROSMARTY, C.J.; MEYBECK, M.; FEKETE, B.; SHARMA, K. The potential impact of neo-castorization on sediment transport by the global network of rivers. In: WALLING, D.; PROBST, J.-L. (Ed.). **Human impact on erosion and sedimentation**. Wallingford UK: IAHS Press, 1997. p. 261-273.