

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

**DIEGO DE SOUZA SARDINHA**

**AVALIAÇÃO DA TAXA DE INTEMPERISMO QUÍMICO NA  
BACIA DO RIO JAÚ (SP)**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia Regional.

Orientador: Daniel Marcos Bonotto

Rio Claro (SP)  
2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

**DIEGO DE SOUZA SARDINHA**

**AVALIAÇÃO DA TAXA DE INTEMPERISMO QUÍMICO NA  
BACIA DO RIO JAÚ (SP)**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia Regional.

Orientador: Daniel Marcos Bonotto

Rio Claro (SP)  
2011

**DIEGO DE SOUZA SARDINHA**

**AVALIAÇÃO DA TAXA DE INTEMPERISMO QUÍMICO NA  
BACIA DO RIO JAÚ (SP)**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia Regional.

**Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto**

*DPM/IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)*

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Leila Soares Marques**

*IAG/USP/São Paulo (SP)*

**Prof. Dr. Jefferson Mortatti**

*CENA/USP/Piracicaba (SP)*

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Margarita Torres Moreno**

*DPM/IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)*

**Prof. Dr. Antonio José Ranalli Nardy**

*DPM/IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)*

SITUAÇÃO: APROVADO

**Rio Claro, SP 22 de dezembro de 2011**

551.9 Sardinha, Diego de Souza  
S244d Avaliação da taxa de intemperismo químico na bacia do  
Rio Jaú (SP) / Diego de Souza Sardinha. - Rio Claro : [s.n.],  
2011  
109 f. : il., figs., gráfs., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista,  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Daniel Marcos Bonotto

1. Geoquímica. 2. Geoquímica de superfície. 3. Taxa de  
intemperismo das rochas. 4. Balanço geoquímico. 5. Bacia  
hidrográfica do Rio Jaú. 6. Hidrólise de silicatos minerais. I.  
Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP  
Campus de Rio Claro/SP

*A memória dos precursores que, por aqui  
passaram...*

*(Vail Donadel e Augusto de Souza  
Sardinha)*

*“Isso de querer ser exatamente aquilo  
que a gente é ainda vai nos levar além”*

*Paulo Leminski*

## AGRADECIMENTOS

Aos Professores Dr. Daniel Marcos Bonotto, Dr. Fabiano Tomazini da Conceição e Maria Margarita Torres Moreno pelas horas de orientação, construção do conhecimento, amizade, honestidade, e ao ensino de perseverança, respeito e amor ao trabalho de docente e pesquisador.

A minha família (Zé Luiz, Magda, Rodrigo, Amanda, Lívia, Zé Godoy, Cecília Hirata, Letícia, Vail, Lala).

A Letícia Hirata Godoy, pelo companheirismo, paciência e dedicação a toda a construção deste trabalho, do início ao fim.

Aos amigos Bruce Wilton Tessari e Adilson Roberto Fontanetti pelas ajudas nas análises laboratoriais e prosas diversas.

A todos os professores do curso de Pós-Graduação em Geologia Regional e Geociências e Meio Ambiente (Antonio José Ranalli Nardy, Antonio Misson Godoy, Daniel Marcos Bonotto, Jairo Roberto Jimenez-Rueda, Maria Margarita Torres Moreno, Nelson Angeli, Norberto Morales, Yociteru Hasui, José Eduardo Zaine, Walter Malagutti Filho, Paulo Milton Barbosa Landim e Fabiano Tomazini da Conceição) que contribuíram para a minha educação durante esses anos.

A todos os colegas (Adilson, Vânia, Vladimir, Rosangela, Bia, Alê, Simone, Tiago, César, Fabíola, Robson, Hiran, Humbertinho, Liliane, Susana, Roberto, Fabiano, Francely, Maitê, Sidnei, Tito, Aguinaldo, Miguel, Patrick.....) que durante esses anos compartilharam momentos difíceis e de alegria no conjunto da obra.

A todo o pessoal do SAAEDOCO (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Dois Córregos), pela ajuda nas coletas de água de chuva e conseqüente elaboração deste trabalho (Cleuber Edivaldo Venaruso, Valdeci Rinaldi, Valdyr Francisco da Silva, Silvio César Scandorela e Luiz Batista da Silva) pela grande receptividade.

A banca de doutorado (Daniel Marcos Bonotto, Leila Soares Marques, Jefferson Mortatti, Maria Margarita Torres Moreno e Antonio José Ranalli Nardy) pelos comentários e sugestões que ajudaram a melhorar este manuscrito.

Ao Prof. Jean-Luc Probst pelo pronto atendimento no envio de artigos.

Finalmente agradeço ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo suporte financeiro (Processo nº 142756/2008-3.) por incentivar o conhecimento científico e a busca do desenvolvimento e qualidade na formação acadêmica.

## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	1
2 – OBJETIVOS.....	4
3 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	5
3.1 – Aspectos climatológicos e hidrológicos .....	10
3.2 – Contexto geomorfológico .....	14
3.3 – Contexto pedológico.....	16
3.4 – Contexto geológico.....	18
3.4.1 Formação Serra Geral.....	20
3.4.2 Formação Itaqueri.....	23
4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1 – Avaliação simplificada de impactos ambientais na bacia do Rio Jaú .....	25
4.2 – Amostragem de solos, rochas e águas da bacia.....	25
4.3 – Quantificação físico-química e química de solos, rochas e águas da bacia .....	28
4.4 – Análise Mineralógica de solos e rochas da bacia .....	30
4.5 – Quantificação de urânio nos solos, rochas e águas por espectrometria alfa.....	31
4.6 – Etapa de Escritório.....	31
5 – GEOQUÍMICA DAS ROCHAS E SOLOS DA BACIA.....	32
5.1 – Caráter geoquímico das amostras de rochas e solos.....	35
5.2 – Análise mineralógica por Difração de Raios X.....	42
5.3 – Balanço geoquímico Rocha x Solo.....	47
6 – QUÍMICA DAS ÁGUAS PLUVIAIS NA BACIA .....	54
6.1 – Concentração média ponderada pelo volume (MPV).....	58
6.2 – Taxa de deposição anual nas águas pluviais da bacia .....	60
7 – AS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA.....	64
7.1 – Avaliação simplificada de impactos ambientais na bacia .....	64
7.2 – Avaliação hidroquímica das águas superficiais da bacia.....	67
7.2.1 – Parâmetros físicos e físico-químicos .....	67
7.2.2 – Diagramas e análise estatística dos dados hidroquímicos .....	74
7.3 – Transporte específico de cátions e ânions .....	77
8 – DENUDAÇÃO GEOQUÍMICA NA BACIA DO RIO JAÚ .....	81
8.1 – Reações de intemperismo e hidrólise de minerais silicatados.....	81
8.2 – Taxa de remoção de $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ e $\text{K}^+$ e $\text{SiO}_2$ na bacia .....	82
8.3 – Estimativa da taxa de intemperismo químico por intermédio de $\text{SiO}_2$ .....	87
9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	90
10 – CONCLUSÃO.....	94
11 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré com a localização das sub-bacias, incluindo a bacia do Rio Jaú (FEHIDRO-IPT, 2006). .....	6
Figura 2. Municípios da UGRHI do Tietê-Jacaré e suas relações em área de ocorrência nas sub-bacias incluindo a bacia do Rio Jaú (FEHIDRO-IPT, 2006). .....	7
Figura 3. Mapa da bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006). .....	8
Figura 4. Uso e ocupação do solo na bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006). 10	
Figura 5. Precipitações médias mensais na bacia do Rio Jaú, nos municípios de Jaú, Mineiros do Tietê e Dois Córregos (SIGRH, 2009). .....	11
Figura 6. Vazões médias mensais no entroncamento do Ribeirão do Bugio com o Rio Jaú. ..12	
Figura 7. Mapa de uso dos recursos hídricos na bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006; SIGRH, 2009). .....	14
Figura 8. Perfil geológico-geomorfológico do Estado de São Paulo. Adaptado (IPT, 1981). .15	
Figura 9. Mapa geomorfológico da bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006)....	16
Figura 10. Mapa pedológico da bacia do Rio Jaú, com os pontos de amostragem de solos (S1, S2 e S3). Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).....	18
Figura 11. Mapa de localização da Bacia do Paraná. Modificado (ZÁLAN et al., 1990). ....	20
Figura 12. Quadro litoestratigráfico da Bacia do Paraná. (MILANI et al., 1994).....	21
Figura 13. Mapa geológico da bacia do Rio Jaú, com os pontos de amostragem de rochas (R1, R2 e R3). Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).....	22
Figura 14. Amostras do arenito da Formação Itaqueri R1 (a) e seu produto de alteração S1 (b). Amostras da Formação Serra Geral R2 (c), R3 (e) e seus produtos de alteração S2 (d) e S3 (f). .....	34
Figura 15. Projeção dos resultados obtidos no diagrama de variação de Harker, para elementos maiores (% em peso) e traços ( $\mu\text{g/g}$ ). As flechas indicam o comportamento da alteração das amostras de rochas para as amostras de solos. ....	36
Figura 16. Diagrama tipo TAS (álcalis x sílica), segundo LEMAITRE, 1989. ....	37
Figura 17. Diagrama AFM elaborado por IRVINE & BARAGAR (1971). ....	38
Figura 18. Classificação de arenitos e argilas, utilizando o Diagrama de HERRON, (1988). .39	
Figura 19. Diagrama discriminante de proveniência de suítes areníticas-argilíticas, ROSER & KORSCH (1988). ....	39
Figura 20. Diagrama multielementar ilustrando o padrão de distribuição de ETRs em relação à média da crosta continental superior (C.C.). Dados normalizados pela média dos Condritos C1 (EVENSEN et al., 1978 <i>apud</i> ROLLINSON, 1993).....	40
Figura 21. Diagrama com os principais óxidos ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$ )- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{K}_2\text{O}$ em proporções moleculares mostrando o comportamento “trends” de intemperismo das amostras de rochas para os solos (NESBITT & YOUNG 1984, 1989).....	42
Figura 22. Difratoograma da amostra de rocha da Formação Itaquerí (R1).....	43
Figura 23. Difratoograma da amostra de solo (S1), horizonte C, resultante da alteração da rocha da Formação Itaquerí (R1).....	44
Figura 24. Difratoogramas comparando as amostras de rocha (R1) e solo (S1), horizonte C. .44	
Figura 25. Difratoograma da amostra de rocha da Formação Serra Geral (R2).....	45
Figura 26. Difratoograma da amostra de solo (S2), horizonte C, resultante da alteração da rocha da Formação Serra Geral (R2).....	46
Figura 27. Difratoograma da amostra de rocha da Formação Serra Geral (R3).....	46
Figura 28. Difratoograma da amostra de solo (S3), horizonte C, resultante da alteração da rocha da Formação Serra Geral (R3).....	47
Figura 29. Difratoograma das amostras de rocha (R2 e R3) e solo (S2 e S3).....	48

Figura 30. Balanço de massa dos possíveis elementos imóveis normalizados em base anidra, aplicando a equação (4) e considerando como elemento imóvel o indicado no gráfico. ....	49
Figura 31. Índice WIP (Índice de Intemperismo de Parker) para as amostras ( $K_2O$ , $Na_2O$ , $CaO$ e $MgO$ ) normalizadas em base anidra. ....	51
Figura 32. Mobilidade dos elementos $SiO_2$ , $K^+$ , $Na^+$ , $Ca^{2+}$ e $Mg^{2+}$ , da rocha (R) para o solo (S) normalizados em g/kg.....	52
Figura 33. Precipitação média mensal de Jaú, Mineiros do Tietê e Dois Córregos (SIGRH, 2009) e precipitação mensal (agosto/09 a julho/10) na bacia do Rio Jaú (CIIAGRO, 2011). .	55
Figura 34. Balanço hídrico na bacia do Rio Jaú para o período em estudo, agosto de 2009 a julho de 2010. ....	55
Figura 35. Aporte pluvial de íons ( $t/km^2/ano$ ) na bacia do Rio Jaú. ....	61
Figura 36. Mapa com os pontos avaliados pelo índice de análise ambiental simplificado. ....	64
Figura 37. Pontos analisados com a avaliação simplificada de impactos ambientais. (a) e (b) Ribeirão do Bugio, pontos (P1) e (P4). (c) e (d) Ribeirão São João, pontos (P9) e (P11). (e) e (f) Rio Jaú, pontos (P13) e (P14). ....	65
Figura 38. Pontos de coleta de amostras de água superficial na bacia do Rio Jaú. P1 e P2 (Ribeirão do Bugio); P3 e P4 (Ribeirão São João); P5 e P6 (Rio Jaú). ....	67
Figura 39. (a) Pulso hidrológico (hidroperíodo) da bacia do Rio Jaú. (b) Hidrograma e frequência das vazões específicas diárias (1984 a 1998) na bacia do Rio Jaú. (c) Curva de permanência do Rio Jaú. Modificados (REZENDE, 2009). ....	69
Figura 40. Mapa da bacia do Rio Jaú com a área de influência de cada ponto de amostragem (P1 e P2 = Ribeirão do Bugio; P3 e P4 = Ribeirão São João; P5 e P6 = Rio Jaú). ....	70
Figura 41. Vazão média dos pontos de amostragem (P5 - Rio Jaú) e (P6 - Rio Jaú: exutório), obtidas deste trabalho entre agosto de 2009 a janeiro de 2010, comparados com os dados de vazão média anual entre 1984 a 1998 de REZENDE, (2009). ....	72
Figura 42. Fluxo instantâneo diário pela vazão nas águas superficiais da bacia do Rio Jaú....	74
Figura 43. Concentração média ponderada de cátions e ânions (mg/L) para as águas fluviais da bacia do Rio Jaú. P1 e P2 = Ribeirão do Bugio, P3 e P4 = Ribeirão São João, P5 e P6 = Rio Jaú. ....	75
Figura 44. Correlações ( $P \leq 0,01$ ) entre os parâmetros obtidos nas águas superficiais da bacia do Rio Jaú. (a) cálcio e magnésio no ponto (P1). (b) sódio e potássio no ponto (P2). (c) condutividade e fosfato no ponto (P3). (d) sólidos totais suspensos e cálcio no ponto (P4). (e) sólidos totais e sulfato no ponto (P5). (f) sódio e cloreto no ponto (P6). ....	76
Figura 45. Transporte específico ( $t/km^2/ano$ ) de cátions e ânions na bacia do Rio Jaú. P1 e P2 = Ribeirão do Bugio, P3 e P4 = Ribeirão São João, P5 e P6 = Rio Jaú. ....	79
Figura 46. Possíveis reações envolvendo os minerais encontrados nos arenitos da Formação Itaquerí e basaltos da Formação Serra Geral na bacia do Rio Jaú.....	82
Figura 47. Bloco diagrama esquemático, com as condições adotadas neste trabalho com o fluxo hídrico e de $SiO_2$ na bacia do Rio Jaú, e com a indicação da altitude atual na cabeceira do Ribeirão do Bugio (861 m). ....	88

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Números, nomes e áreas das sub-bacias para a UGRHI-TJ (FEHIDRO-IPT, 2006).	5
Tabela 2. Bacia do Rio Jaú com os respectivos municípios componentes, população e distribuição territorial (FEHIDRO-IPT, 2006; IBGE, 2009).	8
Tabela 3. Distribuição percentual em área das classes de uso na bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).	9
Tabela 4. Localização das estações meteorológicas na bacia do Rio Jaú. Modificado (SIGRH, 2009).	11
Tabela 5. Localização da estação fluviométrica. Modificado (SIGRH, 2009).	12
Tabela 6. Abastecimento público nos municípios da bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).	13
Tabela 7. Pontos de lançamentos de cargas orgânicas domésticas dos municípios da bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006; CETESB, 2010).	13
Tabela 8. Distribuição percentual em área das classes de declividade na bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).	16
Tabela 9. Distribuição percentual em área dos principais compartimentos pedológicos na bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).	18
Tabela 10. Distribuição percentual em área das unidades geológicas na bacia do Rio Jaú (FEHIDRO-IPT, 2006).	19
Tabela 11. Pesos utilizados para situações encontradas em campo visando identificar impactos ambientais na bacia do Rio Jaú.	26
Tabela 12. Análises químicas dos principais óxidos (% em peso) nas rochas e solos da bacia.	32
Tabela 13. Análises químicas dos elementos terras raras ( $\mu\text{g/g}$ ) nas rochas e solos da bacia.	32
Tabela 14. Análises químicas dos elementos traços ( $\mu\text{g/g}$ ) nas rochas e solos da bacia.	32
Tabela 15. Resultados das análises radiométricas nas amostras de rochas e solos.	33
Tabela 16. Concentração média ponderada pela área da mobilidade de $\text{SiO}_2$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ e $\text{Mg}^{2+}$ normalizados, em (g/kg), das amostras de rocha para solos da bacia do Rio Jaú.	53
Tabela 17. Resultados das análises das amostras de águas de chuva da bacia (valores em mg/L), exceto pH e precipitação (mm).	56
Tabela 18. Correlação ( $P \leq 0,01$ ) entre todos os parâmetros obtidos (meq/L) para as águas de pluviais na cidade de Dois Córregos (SP).	58
Tabela 19. Resultado da análise radiométrica nas águas pluviais de Dois Córregos.	58
Tabela 20. Composição química das águas pluviais da bacia do Rio Jaú.	59
Tabela 21. Aporte pluvial de cátions e ânions ( $\text{t/km}^2/\text{ano}$ ) em diferentes regiões brasileiras.	62
Tabela 22. Resultados da aplicação do questionário de avaliação simplificada de impactos ambientais na bacia do Rio Jaú.	66
Tabela 23. Resultados dos parâmetros físicos e físico-químicos analisados nas águas fluviais da bacia do Rio Jaú.	68
Tabela 24. Área de influência ( $\text{km}^2$ ) e vazão (L/s) dos pontos de amostragem da bacia do Rio Jaú.	71
Tabela 25. Valores médios e média ponderada dos parâmetros analisados durante todo o período de coleta.	72
Tabela 26. Resultado da análise radiométrica nas águas superficiais.	73
Tabela 27. Valores de transporte específico ( $\text{t/km}^2/\text{ano}$ ) para os principais cátions e ânions nas águas fluviais da bacia do Rio Jaú.	78
Tabela 28. Transporte específico de cátions e ânions ( $\text{t/km}^2/\text{ano}$ ) em diferentes bacias hidrográficas do estado de São Paulo.	80

Tabela 29. Concentrações medidas (valor médio) e corrigidas no Rio Jaú (P6) e nas águas de chuva para os principais íons dissolvidos.....	84
Tabela 30. Fluxo anual de elementos (t/km <sup>2</sup> /ano) nas águas do Rio Jaú (P6) e concentração média ponderada de mobilidade dos elementos das rochas para os solos (kg/t).....	85
Tabela 31. Quantidade de material solubilizado por unidade de área e tempo (W).....	85
Tabela 32. Quantidade de material removido anualmente na bacia do Rio Jaú, utilizando cálcio, magnésio, sódio, potássio e sílica. ....	86
Tabela 33. Taxas de intemperismo químico em diferentes locais do Brasil e do mundo. ....	91
Tabela 34. Taxa de intemperismo químico na bacia do Rio Jaú, levando em conta a lixiviação dos cátions Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> e de SiO <sub>2</sub> . ....	93

## Avaliação da taxa de intemperismo químico na bacia do Rio Jaú (SP)

Autor: Diego de Souza Sardinha

Orientador: Daniel Marcos Bonotto

### RESUMO

A determinação das taxas de intemperismo é importante em geoquímica de superfície, pois, fornece conhecimentos úteis para um melhor entendimento das condições de uso e evolução dos solos, entre outros aspectos. Neste trabalho foram utilizados o sódio ( $\text{Na}^+$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e sílica ( $\text{SiO}_2$ ) para avaliar a taxa de intemperismo químico das rochas sedimentares e ígneas das Formações Itaqueri e Serra Geral na bacia do Rio Jaú, Estado de São Paulo. As análises químicas e mineralógicas demonstram que ocorrem alterações químicas moderadas nos minerais primários (feldspato potássico, anortoclásio, augita, albita e anortita), com a geração de minerais secundários (caulinita, haloisita, saponita e esmectita). Sódio, potássio, cálcio, magnésio e sílica são os primeiros elementos a serem mobilizados devido ao estágio de intemperismo e alteração dos minerais primários. A solubilidade do quartzo é menor do que a de outros minerais, acarretando na geração de argilo minerais e nos processos de monossilicificação, bissilicificação e quartzo residual nos solos da bacia. Ao se utilizar os principais cátions, cálcio, magnésio, sódio e potássio, com o propósito de investigar a taxa de intemperismo químico, foi possível identificar alguns problemas, provavelmente relacionados com as contribuições antropogênicas ou geogênicas que ocorrem neste sistema natural (alta mobilidade, colóides, atividades agrícolas, urbanas e industriais). Como a solubilidade do quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) é menor do que a de outros minerais, a taxa de intemperismo químico da rocha será menor levando em conta a sua lixiviação durante o intemperismo das rochas para o saprolito. Isto significa que se o quartzo não é dissolvido, toda a sílica será proveniente da hidrólise de silicatos minerais, e o aumento da alteração destes minerais também aumenta a taxa de intemperismo. Assim, a taxa de intemperismo químico utilizando a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) correspondeu a 0,00613 mm/ano ou 6,13 m/Ma, a qual indica que serão necessários aproximadamente 163.000 anos para alterar 1 m de rocha nas condições climáticas atuais.

**Palavras-chave:** Geoquímica de superfície, Taxa de intemperismo das rochas, Balanço geoquímico, Bacia hidrográfica do Rio Jaú, Hidrólise de silicatos minerais.

## Evaluation of the chemical weathering rate at Jaú River basin (SP)

Autor: Diego de Souza Sardinha

Orientador: Daniel Marcos Bonotto

### ABSTRACT

The weathering rate evaluation is important on surface geochemistry, providing useful information for a better understanding of the conditions of soil evolution, among other aspects. This work used sodium ( $\text{Na}^+$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) and silica ( $\text{SiO}_2$ ) to evaluate the chemical weathering rate of sedimentary and igneous rocks from Itaqueri and Serra Geral Formations at the Jaú River basin, São Paulo State. The chemical and mineralogical analysis showed that moderate chemical changes occur in primary minerals (K-feldspar, anorthoclase, augite, albite and anortite), with the generation of secondary minerals (kaolinite, halloysite, saponite and smectite). Sodium, potassium, calcium, magnesium and silica are the first elements to be mobilized due to the weathering stage and alteration of primary minerals. The quartz solubility is lower than that of other minerals, resulting in clay minerals generation and into process of monossilicization, bisilicization and residual quartz in the soils of the basin. By using the major cations, calcium, magnesium, sodium and potassium, with the purpose of investigating the chemical weathering rate, some problems were identified, probably related to anthropogenic or geogenic contributions that occur in this natural system (high mobility, colloids, agricultural, urban and industrial activities). Since the solubility of quartz ( $\text{SiO}_2$ ) is lower than that of other minerals, the chemical weathering rate of the rock will be lower considering the leaching during the weathering of rocks to saprolite. This means that if the quartz is not dissolved, all silica will be derived from silicate minerals hydrolysis, and the increase of these minerals modification also increases the weathering rate. Hence, the chemical weathering rate using silica ( $\text{SiO}_2$ ) corresponded to 0,00613 mm /year or 6,13 m/Ma, which indicates that approximately 163.000 years are necessary to weather 1 m of rock under the present climate conditions.

**Key-words:** Surface geochemistry, Rock weathering rate, Geochemical balance, Jaú river hydrographic basin, Silicate mineral hydrolysis.

## ***1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA***

O intemperismo é o resultado dos diversos elementos da atmosfera e, em particular, da água, do oxigênio, do gás carbônico e da temperatura sobre as rochas, aos quais é necessário juntar em certos casos produtos da vida animal e vegetal (MELFI, 1967). O intemperismo é um processo tipicamente destrutivo, que permite o desenvolvimento de novos minerais a partir daqueles alterados (MELFI & PEDRO, 1977). São originadas partículas minerais discretas (produtos residuais) presentes na rocha matriz, que permanecem mais ou menos inalteradas, ao lado de novos minerais formados/transformados por intemperismo, além de materiais em solução (SUGUIO, 2003). Os produtos do intemperismo, rocha alterada e solo, estão sujeitos a outros processos do ciclo supérgeno – erosão, transporte, sedimentação – os quais acabam levando à denudação continental, com o conseqüente aplainamento do relevo (TEIXEIRA et al., 2000).

O intemperismo químico ocorre quando o equilíbrio do conjunto de átomos, que constitui os minerais é rompido e ocorrem reações químicas que conduzem o mineral a um arranjo mais estável, sob novas condições mais próximas à superfície terrestre, transformando os minerais primários da rocha original em minerais secundários, que passam a constituir um complexo de alteração (SALOMÃO & ANTUNES, 1998). O intemperismo químico está relacionado com o transporte de materiais dissolvidos pelos rios, tendendo a um aprofundamento do perfil de alteração do solo (MORTATTI & PROBST, 2003).

Pequenas bacias hidrográficas são um importante espaço no qual as taxas de intemperismo químico natural podem ser calculadas (BERNER & BERNER, 1996). O interesse na avaliação das taxas de intemperismo em bacias hidrográficas cresceu nos últimos anos, principalmente no hemisfério norte (KATTAN et al., 1987; PROBST & TARDY, 1987; NKOUNKOU & PROBST, 1987; PROBST et al., 1992; SUCHET & PROBST, 1993; SVERDRUP & WARFVINGE, 1993; PROBST et al., 1994; LANGAN et al., 1996; HODSON et al., 1996; KOPTSIK et al., 1999; HODSON, 2002; TARDY et al., 2004). Modelos que utilizam a concentração de sódio, cálcio, potássio, magnésio, sólidos totais dissolvidos e sílica tem levado em conta as entradas provenientes das águas pluviais e as correções para se obter a fração dissolvida das rochas (CLOW & DREVER, 1996; BOEGLIN & PROBST, 1998; LAND et al., 1999; ROY et al., 1999; GRASBY & HUTCHEON, 2000; SEMHI et al., 2000; BAIN et al., 2001; MILLOT et al., 2003; PRICE et al., 2008; CHAKRAPANI et al., 2009). Vários estudos de avaliação da taxa de intemperismo das rochas têm sido também realizados na América do Sul (MOREIRA-NORDEMANN, 1980,

STALLARD & EDMOND, 1982; LEWIS, Jr. et al., 1987; TARDY et al., 1993a e 1993b; BORTOLETTO et al., 2002; MORTATTI & PROBST, 2003; CONCEIÇÃO & BONOTTO, 2003; TARDY et al., 2005; BONOTTO et al., 2007).

Além de sua importância nos processos intempéricos, a água é essencial à vida, portanto, todos os organismos vivos, incluindo o homem, dependem dela para a sua sobrevivência. No Brasil, há vários estudos que relacionam a variação química das águas superficiais em relação à alteração das rochas e deposição atmosférica (MOREIRA-NORDEMANN, 1984; ANDREAE et al., 1990; DANELON & MOREIRA-NORDEMANN, 1991; MORTATTI, et al., 1997; MORTATTI, et al., 2003; CONCEIÇÃO & BONOTTO, 2004; CONCEIÇÃO et al., 2007; MORTATTI, et al., 2008; SARDINHA et al., 2010).

A bacia hidrográfica do Rio Jaú localiza-se na região central do Estado de São Paulo e faz parte da bacia hidrográfica do Tietê/Jacaré, definida por lei como a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13 (UGRHI-13). Compreende 5 municípios com uma população total de 182.136 habitantes, dos quais 3 com sede em seu território e 2 possuindo apenas porções rurais. As demandas de água para o abastecimento público nos municípios que compõem a bacia do Rio Jaú demonstram que a utilização de águas superficiais é realizada nos cinco municípios com 10 pontos de captação dentro da bacia. O Rio Jaú nasce na Serra do Tabuleiro no município de Torrinha (SP) á 861 metros de altitude e é formado por dois rios principais, o Ribeirão do Bugio e o Ribeirão São João, cujas cabeceiras se encontram nos municípios de Torrinha (SP) e Mineiros do Tietê (SP).

As rochas que afloram na bacia do Rio Jaú, formaram-se em um ambiente diferente daquele que há na superfície terrestre atual, onde pressão e temperatura são baixas e onde a água e o oxigênio são muito abundantes. Os minerais que formam essas rochas estão hoje em desequilíbrio químico e tendem a se transformar em outros, mais estáveis. Os elementos (sódio, potássio, cálcio, magnésio e sílica) em solução resultantes da dissolução dos minerais das rochas podem ser mobilizados pela percolação da água e a fase sólida remanescente irá diferir da fase sólida inicial. Por outro lado, elementos como Al, Ti, V, Y, Th e Zr podem ser considerados imóveis durante o intemperismo, ou ainda, quando mobilizado no perfil de solo, pode ser apenas internamente redistribuído e não lixiviado do regolito. Dessa forma, o intemperismo químico é um processo geológico importante no ciclo das rochas da bacia do Rio Jaú, pois modela a superfície do terreno e altera os materiais rochosos, sendo responsável pelo principal aporte de matéria dissolvida nas águas da bacia. Neste sentido, este trabalho tem como diretriz principal estudar o intemperismo químico das rochas da bacia do Rio Jaú a

partir do emprego do sódio, potássio, cálcio, magnésio e sílica ( $\text{SiO}_2$ ), elementos que possuem um comportamento geoquímico consistente durante o intemperismo químico.

A avaliação do desgaste das rochas na bacia fornece informações úteis para um melhor conhecimento da modelagem do terreno, erosão e evolução de paisagem, entre outros aspectos. Fornece, assim, subsídios para ações voltadas ao planejamento, desenvolvimento do uso do solo, diminuição da degradação ambiental e gerenciamento integrado desta importante bacia hidrográfica localizada no interior paulista.

## **2 – OBJETIVOS**

O objetivo principal deste estudo constitui a avaliação da taxa de intemperismo químico da bacia do Rio Jaú (SP). Como a liberação ou descarga de matéria resultante de atividade antrópica pode afetar o modelo utilizado, é necessária a avaliação da qualidade das águas superficiais e pluviais, a qual propicia parâmetros para correções a partir do balanço anual de cátions e ânions na bacia. Para se atingir esse objetivo, as seguintes etapas foram realizadas:

- Levantamento dos aspectos fisiográficos da bacia do Rio Jaú;
- Determinação da composição química e mineralógica das rochas da bacia do Rio Jaú, bem como dos produtos de sua alteração (solos);
- Avaliação da qualidade das águas superficiais e pluviais na bacia do Rio Jaú no seu gradiente espacial e temporal;
- Avaliação das taxas de alteração química das rochas e balanço anual de cátions e ânions.

### 3 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré, definida como a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13 (UGRHI-13) pela Lei nº 9.034/94, teve o Comitê de Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré – CBH-TJ instalado em 10/11/1995. Possui uma área total de 15.808 km<sup>2</sup>, segundo o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH, 1999), sendo a sétima UGRHI em área de drenagem no Estado. No caso da Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré, a área calculada através da base cartográfica na escala 1:250.000, com o software MapInfo Professional, versão 5.01, totaliza 11.784,6 km<sup>2</sup> (*Relatório nº 40.674 - Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré – Relatório Final*, FEHIDRO-IPT, 2006), ou seja, valor em torno de 25,5% inferior ao apresentado pelo (CERH, 1999). Entretanto, considerando-se a área indicada pela Secretaria do Meio Ambiente (SMA, 1997) de 11.537 km<sup>2</sup>, a área obtida a partir da base cartográfica (11.784,6 km<sup>2</sup>) é 2,1% maior, ocupando a 14<sup>o</sup> posição em área de drenagem entre as demais UGRHI do Estado.

A UGRHI do Tietê/Jacaré foi objeto de divisão em sub-bacias, utilizando-se de critérios hidrológicos, e os seus limites foram definidos a partir dos divisores principais e das bacias de captação dos rios de maior porte (FEHIDRO-IPT, 2006). Assim, foram propostas 09 (nove) sub-bacias, designadas com o nome do curso d'água principal ou com dois nomes das drenagens principais. A Tabela 1 apresenta os números das sub-bacias, seus nomes, as respectivas áreas em km<sup>2</sup> e percentuais relativos à área total da UGRHI do Tietê-Jacaré. A Figura 1 ilustra o mapa da UGRHI, a rede de drenagem e os limites das 9 (nove) sub-bacias. Já a Figura 2 apresenta a distribuição dos municípios nas 9 sub-bacias da área da UGRHI.

Tabela 1. Números, nomes e áreas das sub-bacias para a UGRHI-TJ (FEHIDRO-IPT, 2006).

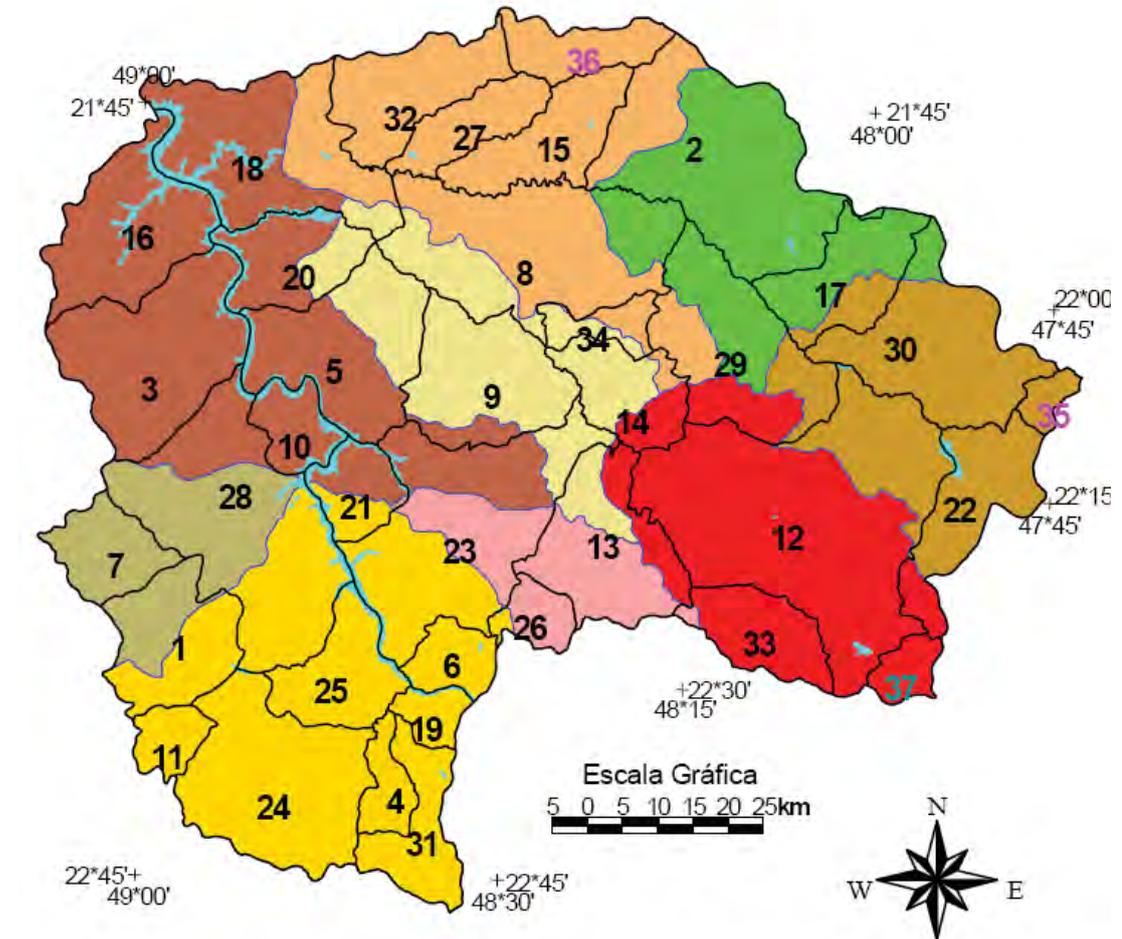
<i>SUB-BACIA</i>		<i>ÁREA</i>	
<i>Número</i>	<i>Nome</i>	<i>Km<sup>2</sup></i>	<i>% da UGRHI</i>
<b>1</b>	Rio Tietê/Rio Claro	2.267,28	19,2
<b>2</b>	Rio Tietê/Rio Lençóis	2.085,79	17,7
<b>3</b>	Rio Bauru	614,74	5,2
<b>4</b>	Baixo Jacaré-Guaçu	1.708,34	14,5
<b>5</b>	Médio Jacaré-Guaçu	1.065,67	9,0
<b>6</b>	Alto Jacaré-Guaçu	1.112,91	9,5
<b>7</b>	Baixo-Médio Jacaré-Pepira	1.051,65	8,9
<b>8</b>	Alto Jacaré Pepira	1.411,08	12,0
<b>9</b>	Rio Jaú	467,16	4,0
<b>TOTAIS</b>		<b>11.784,62</b>	<b>100,0</b>



Figura 1. Bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré com a localização das sub-bacias, incluindo a bacia do Rio Jaú (FEHIDRO-IPT, 2006).

A bacia hidrográfica do Rio Jaú situa-se entre os paralelos  $22^{\circ}28'02''$  e  $22^{\circ}09'37''$  de latitude S e meridianos  $48^{\circ}37'29''$  e  $48^{\circ}16'00''$  de longitude W, sendo o Rio Jaú o principal curso de água. Quanto à malha viária que corta a área da bacia, destaca-se a SP-225, que cruza toda a sua extensão no sentido oeste-leste, e a SP-304 que corta a bacia de noroeste a sul. Várias estradas vicinais também estão presentes nos domínios da bacia, fazendo ligação de centros agrícolas produtores com as rodovias principais (Figura 3).

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ - CBH - TJ  
FEHIDRO - IPT



LEGENDA

	Reservatórios e lagos		
<b>Sub-bacias</b>			
	Rio Tietê / Rio Claro		
	Rio Tietê / Rio Lençóis		
	Rio Bauru		
	Baixo Jacaré-Guaçu		
	Médio Jacaré-Guaçu		
	Alto Jacaré-Guaçu		
	Baixo/Médio Jacaré-Pepira		
	Alto Jacaré-Pepira		
	Rio Jaú		
<b>MUNICÍPIOS COM SEDE NA UGRHI</b>			
1-Agudos	18- Ibitinga		
2-Araraquara	19-Iguaraçu do Tietê		
3-Arealva	20- Itaju		
4-Areiópolis	21- Itapuí		
5-Bariri	22- Itirapina		
6-Barra Bonita	23-Jaú		
7-Bauru	24-Lençóis Paulista		
8-Boa Esperança do Sul	25- Macatuba		
9-Bocaina	26-Mineiros do Tietê		
10-Boracéia	27-Nova Esperança		
11-Borebi	28-Pederneiras		
12-Brotas	29-Ribeirão Bonito		
13-Dois Córregos	30-São Carlos		
14-Dourado	31-São Manuel		
15-Gavião Peixoto	32- Tabatinga		
16-Iacanga	33-Torrinha		
17-Ibaté	34- Traraju		
<b>MUNICÍPIO COM SEDE FORA DA UGRHI</b>			
35 - Analândia	37 - São Pedro		
36 - Matão			

Figura 2. Municípios da UGRHI do Tietê-Jacaré e suas relações em área de ocorrência nas sub-bacias incluindo a bacia do Rio Jaú (FEHIDRO-IPT, 2006).

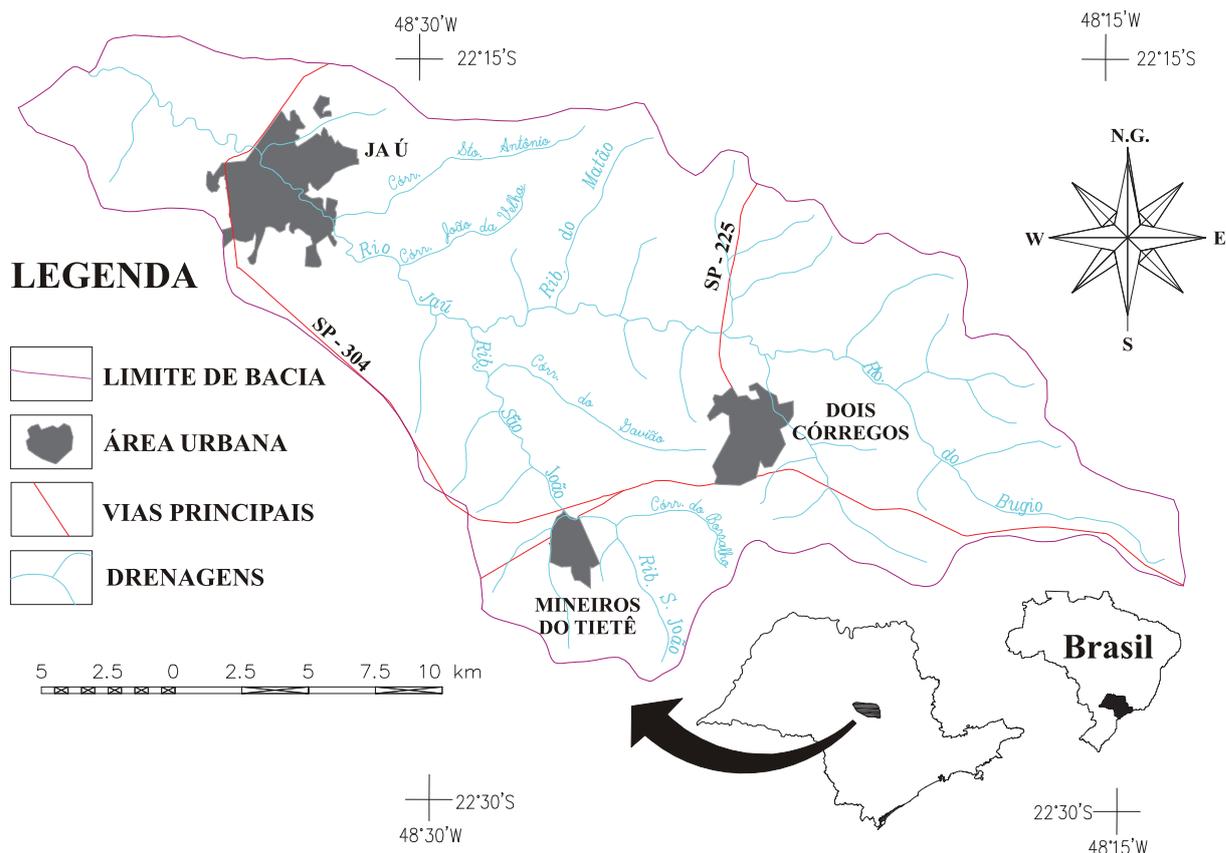


Figura 3. Mapa da bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).

A bacia do Rio Jaú abrange 5 municípios com uma população total de 182.136 habitantes, sendo que, os municípios de Dois Córregos (45,61%) e Jaú (36,36%) apresentam as maiores áreas percentuais desta bacia. Porém nem todos os municípios possuem suas áreas urbanas dentro da bacia (Figura 2 e Tabela 2).

Tabela 2. Bacia do Rio Jaú com os respectivos municípios componentes, população e distribuição territorial (FEHIDRO-IPT, 2006; IBGE, 2009).

<i>Município</i>	<i>Área total (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Porcentagem do município na bacia (%)</i>	<i>População</i>
<i>Dois Córregos</i>	213,09	45,61	24.384
<i>Itapuí</i>	2,03	0,44	11.605
<i>Jaú</i>	169,85	36,36	125.469
<i>Mineiros do Tietê</i>	74,52	15,95	11.760
<i>Torrinha</i>	7,67	1,64	8.918

A ocupação desta área está vinculada ao avanço da cafeicultura no final do séc. XIX, quando da expansão do modelo econômico agrário-exportador, então dominante. Segundo SEADE (2003), a região apresenta dois vetores distintos de ocupação do território: um deles,

na direção oeste, a partir de Campinas, chegando até as regiões de Araraquara, Ribeirão Preto e São José do Rio Preto, onde estão as terras mais férteis do Estado. O outro, a partir de Sorocaba, adentrando a região pela margem esquerda do Rio Tietê.

A lavoura do café espalhou-se rapidamente pela região, promovendo o assentamento de populações e impulsionando outras atividades, como a pecuária e culturas alimentícias. As ferrovias e a imigração constituíram-se em fatores de fundamental importância no processo de desenvolvimento da cafeicultura e de povoamento desta região. Com a crise de 1929 e em decorrência da queda nos preços internacionais do café, a região passa por um período de estagnação e de mudanças. O plantio do café foi, aos poucos, substituído pelas culturas de subsistência, algodão, e cana-de-açúcar (TARTAGLIA & OLIVEIRA, 1988).

Hoje a bacia do Rio Jaú apresenta uma economia bastante diversificada, com destaque para o complexo sucro-alcooleiro. A atividade é formada pela produção do açúcar e do álcool, envolvendo a mesma matéria-prima, a cana-de-açúcar, mas abastecendo mercados distintos: bem final de consumo ou insumo para a indústria de alimentos e insumo para a indústria química ou combustível para motores de automóveis.

Na bacia, o município de Jaú destaca-se por apresentar boas condições de infraestrutura. Possui malha viária bem estruturada, sendo acessado pela rodovia SP-225, pela SP-300 e pela malha ferroviária. Abriga seis distritos industriais dispostos em áreas próximas às rodovias que cortam a cidade. As principais atividades econômicas desenvolvidas pelo setor industrial do município estão ligadas aos produtos de calçados, tecelagem e metalurgia.

Tabela 3. Distribuição percentual em área das classes de uso na bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).

<i>Bacia</i>	<i>Classe de uso e ocupação (% da área da bacia)</i>				<i>Lagos</i>
<i>Rio Jaú</i>	<i>Vegetação natural</i>	<i>Pastagem</i>	<i>Atividades agrícolas</i>	<i>Área urbana</i>	<i>Área (%)</i>
	0,5	11,5	82,1	5,8	0,0

Em termos de distribuição das categorias de uso e ocupação do solo na bacia do Rio Jaú, as áreas de vegetação natural apresentam-se em pequenos maciços preservados, ou ao longo dos principais cursos d'água, formando as "matas-galerias". As pastagens predominam mais fortemente nas cabeceiras dos Ribeirões do Bugio e São João, nas cidades de Dois Córregos e Mineiros do Tiete respectivamente. Dentre as atividades agrícolas (82,1%), o cultivo da cana-de-açúcar destaca-se como predominante. Com relação às áreas urbanas,

(5,8%) a cidade de Jaú é o principal centro urbano da bacia. A Tabela 3 apresenta a distribuição percentual em área, na bacia do Rio Jaú, das classes de uso (Figura 4).

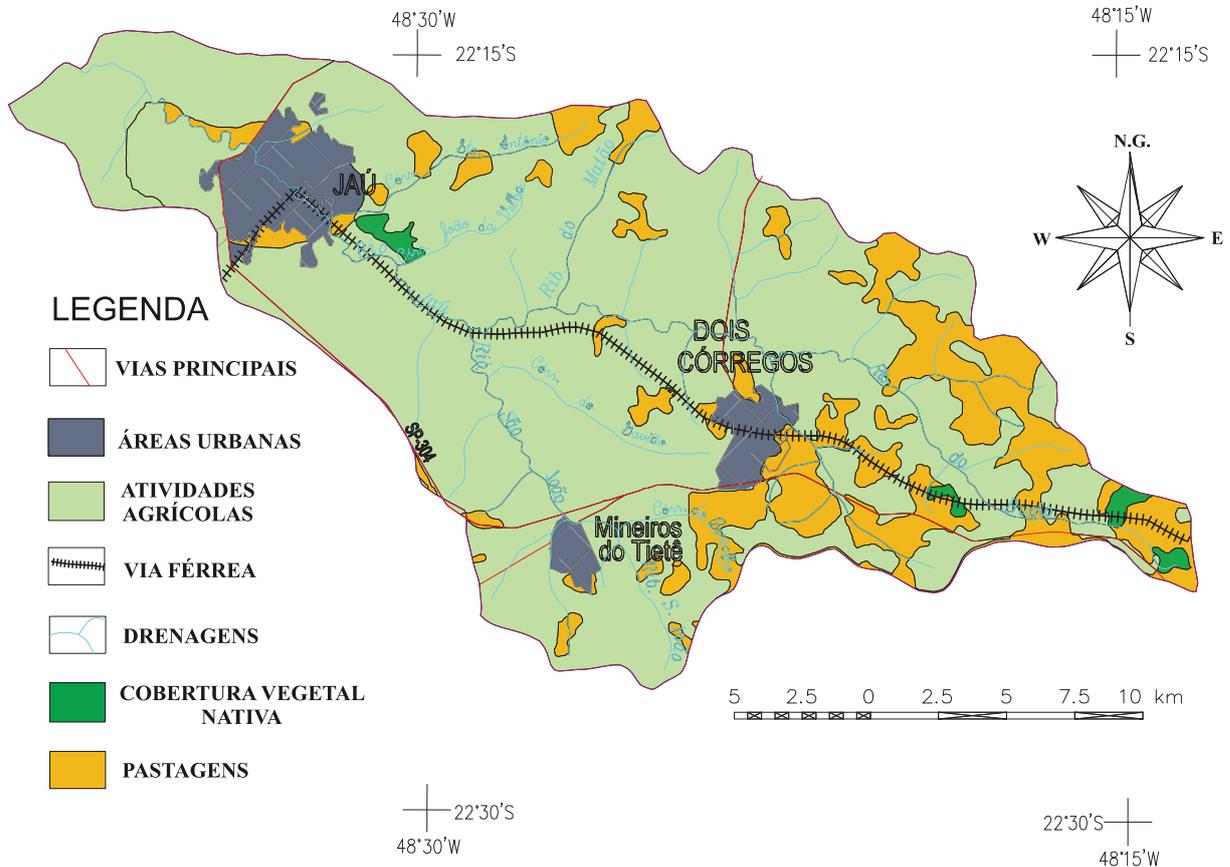


Figura 4. Uso e ocupação do solo na bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).

### 3.1 – Aspectos climatológicos e hidrológicos

O clima da bacia do Rio Jaú é do tipo Cwa conforme a classificação de Köppen, ou seja, mesotérmico ou tropical de altitude, com verão úmido e inverno seco. As chuvas concentram-se, de maneira geral, de outubro a março, com diferenciações quanto ao trimestre mais chuvoso, sendo que o período de menor pluviosidade ocorre de abril a setembro, com o trimestre mais seco distribuído entre junho e agosto, como acontece em praticamente todo o Estado de São Paulo (FEHIDRO-IPT, 2006). Uma série histórica de precipitações mensais e anuais entre os anos de 1986 e 1999 no município de Jaú, entre 1986 e 1999 no município de Mineiros do Tietê, e entre 1985 a 2006 em Dois Córregos foram obtidas junto ao Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (SIGRH, 2009), que possui três estações meteorológicas nos municípios de Jaú, Mineiros do Tietê e Dois Córregos (Tabela 4).

Tabela 4 Localização das estações meteorológicas na bacia do Rio Jaú. Modificado (SIGRH, 2009).

<i>Município</i>	<i>Prefixo</i>	<i>Nome</i>	<i>Altitude</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>
<i>Jaú</i>	D5-007	Jaú	500 m	22°18' S	48°32' W
<i>Mineiros do Tietê</i>	D5-022	Mineiros do Tietê	680 m	22°25' S	48°27' W
<i>Dois Córregos</i>	D5-087	Guarapua	720 m	22°15' S	48°23' W

Na área da bacia do Rio Jaú, observa-se um comportamento semelhante ao do resto do Estado, na distribuição média anual das chuvas, com valores que variam em torno de 1.200 a 1.600 mm. Comparando-se as precipitações médias mensais, observa-se que, os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março apresentam características excepcionais, com intensidade de chuvas em geral bastante superiores. Já os meses de junho, julho e agosto, apresentam pouca intensidade de chuvas, comparável aos meses menos chuvosos do estado, com valores inferiores a 50 mm (Figura 5).

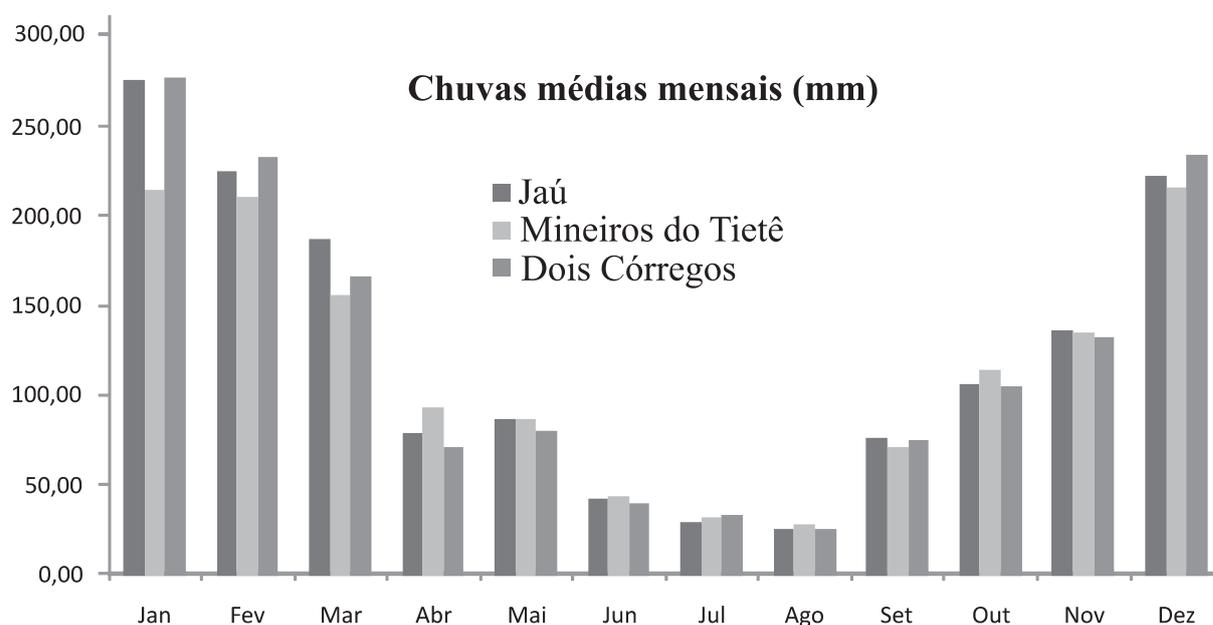


Figura 5. Precipitações médias mensais na bacia do Rio Jaú, nos municípios de Jaú, Mineiros do Tietê e Dois Córregos (SIGRH, 2009).

Pode-se considerar que a bacia do Rio Jaú apresenta um comportamento com concentração de chuvas nos meses de verão e escassez nos meses do período de inverno. Assim, tem-se, no período de novembro a março, intensidade pluviométrica média mensal histórica igual ou ligeiramente superior a 150 mm. Por outro lado, nos meses que

correspondem ao inverno, as intensidades pluviométricas médias históricas são bastante reduzidas, aproximadamente 50 mm (Figura 4). Já as temperaturas médias anuais variam de 21 a 23°C, as médias máximas em janeiro situam-se entre 29 a 32°C; e a média das mínimas em julho de 11 a 13°C.

Quanto ao regime de vazões, entre 1981 até 1999 havia um posto fluviométrico no entroncamento do Ribeirão do Bugio com o Rio Jaú (Tabela 5). Os valores entre os períodos de 1981 a 1999 (SIGRH, 2009), demonstram que, o mês de Fevereiro é o de maior vazão média mensal (10,52 m<sup>3</sup>/s), e o de agosto (3,99 m<sup>3</sup>/s) menor vazão (Figura 6). Os valores correspondem ao comportamento verificado pelos dados pluviométricos, com concentrações maiores nos meses de verão e menores nos meses do período de inverno. Na elaboração de fluviogramas para caracterizar a vazão específica, utilizando os dados do mesmo local entre o período de 1981 a 1997 FEHIDRO-IPT, (2006) chegou a um valor de menor vazão (1,58 m<sup>3</sup>/s), média (15,26 m<sup>3</sup>/s) e máxima (68,89 m<sup>3</sup>/s). Já Resende, (2009) utilizando os dados do mesmo local entre o período de 1984 a 1998 chegou a um valor de (1,40 m<sup>3</sup>/s) menor vazão, (5,88 m<sup>3</sup>/s) média e (68,90 m<sup>3</sup>/s) máxima vazão.

Tabela 5. Localização da estação fluviométrica. Modificado (SIGRH, 2009).

<i>Município</i>	<i>Prefixo</i>	<i>Nome</i>	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Curso d'Água</i>
<b>Jaú</b>	5D-029	Jaú	22°18'02" S	48°32'30" W	Jau, R / Bugio, Ribeirão do

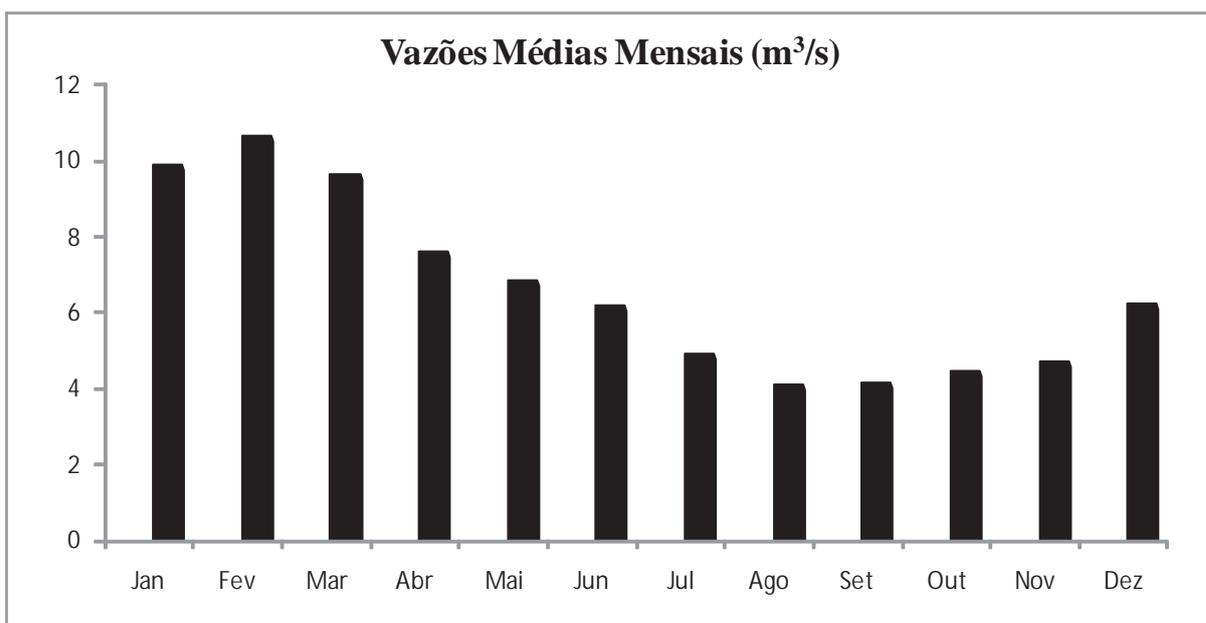


Figura 6. Vazões médias mensais no entroncamento do Ribeirão do Bugio com o Rio Jaú.

As demandas de água para o abastecimento público nos municípios que compõem a bacia demonstram que a utilização de águas superficiais é realizada nos cinco municípios em 10 pontos de captação. O abastecimento exclusivamente por água subterrânea é realizado em quatro municípios com 19 poços de captação cadastrados. A Tabela 6 e a Figura 7 apresentam a relação de utilização de cada manancial e o número de poços ou captações por município.

Tabela 6. Abastecimento público nos municípios da bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).

<i>Município</i>	<i>Operação</i>	<i>Manancial (%)</i>		<i>Número de</i>	
		<i>Subterrâneo</i>	<i>Superficial</i>	<i>Poços</i>	<i>Captações</i>
<i>Dois Córregos</i>	SAAEDOCO	37	63	4	2
<i>Itapuí</i>	Prefeitura	70	30	5	2
<i>Jaú</i>	SAEMJA	15	85	7	4
<i>Mineiros do Tietê</i>	SANECISTE	90	10	3	1
<i>Torrinha</i>	DAE	0	100	0	1

Com relação ao esgotamento sanitário, pode-se dizer que as cidades da bacia do Rio Jaú apresentam uma condição com um alto percentual de atendimento de coleta de esgotos e distribuição de água potável. Entretanto, quando se enfoca o tratamento e disposição final dos efluentes líquidos nota-se que parte destes, são lançadas “in natura” em alguns corpos receptores dentro da bacia. Segundo FEHIDRO-IPT (2006), nos municípios da bacia do Rio Jaú foram identificados 24 pontos de lançamentos de efluentes domésticos de uso público, sendo oito desses pontos, localizados fora do limite da bacia do Rio Jaú (Tabela 7 e Figura 7).

Tabela 7. Pontos de lançamentos de cargas orgânicas domésticas dos municípios da bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006; CETESB, 2010)

<i>Município</i>	<i>Corpo receptor</i>	<i>Atendimento (%)</i>		<i>Eficiência</i>
		<i>Coleta</i>	<i>Tratamento</i>	<i>%</i>
<i>Dois Córregos</i>	Córregos do Lajeado, Fundo e Areia Branca	100	60	80
<i>Itapuí</i>	*Rio Tietê	80	0	--
<i>Jaú</i>	Rio Jaú (4 pontos), *Córrego da Figueira (2 pontos), Córrego dos Pires (2 pontos), Córregos da Independência, *Ave Maria e Água Branca, e Ribeirão Pouso Alegre	100	100	90
<i>Mineiros do Tietê</i>	Córrego do Pascoal (4 pontos)	100	100	74
<i>Torrinha</i>	*Ribeirão dos Pinheiros (2 pontos), *Córrego do Talo e *Rio Boa Esperança	100	100	80

(\*) Lançamentos localizados fora dos limites da bacia do Rio Jaú.

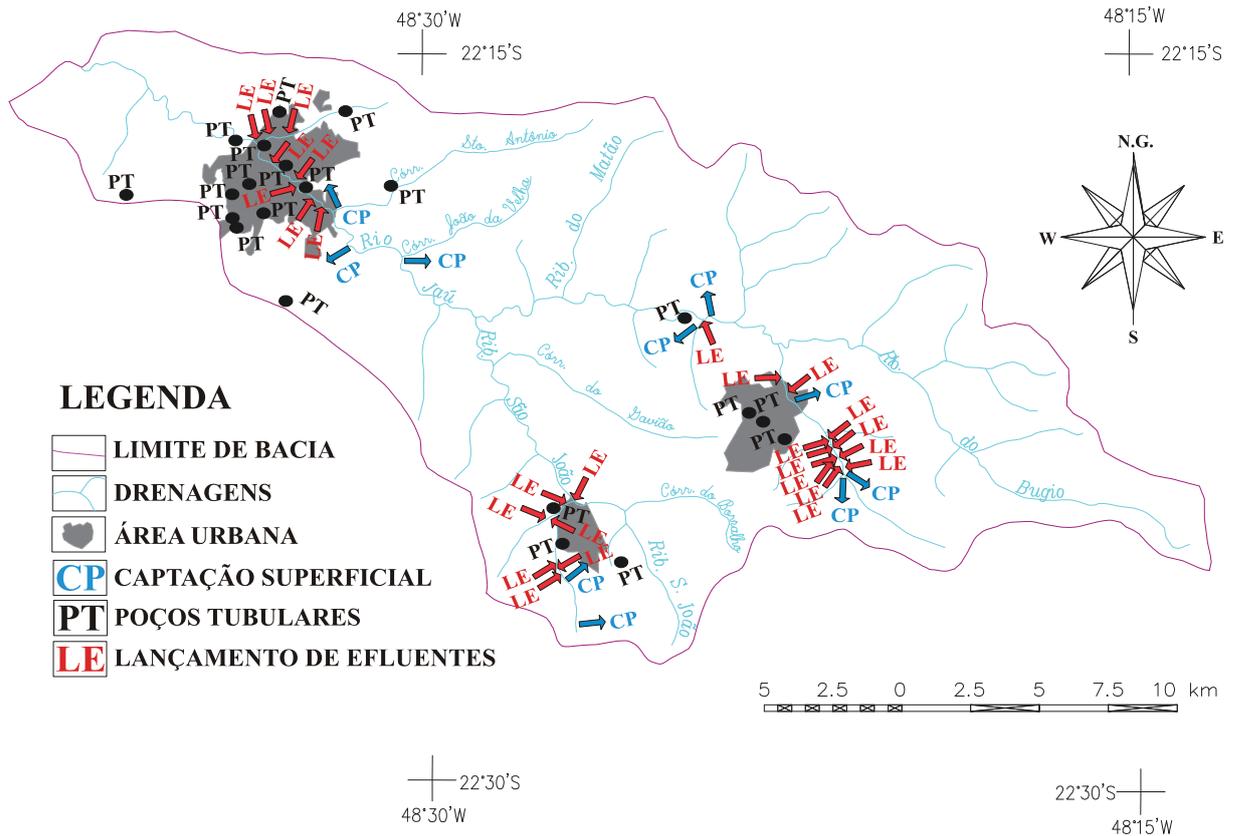


Figura 7. Mapa de uso dos recursos hídricos na bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006; SIGRH, 2009).

### 3.2 – Contexto geomorfológico

A bacia do Rio Jaú está inserida na Província Geomorfológica das Cuestas Basálticas (Figura 8), segundo a subdivisão geomorfológica do Estado de São Paulo (IPT, 1981). Esta província geomorfológica apresenta-se sob a forma de diversos planaltos e transições interplanálticas, configurando um vasto interflúvio, que avança sobre a Depressão Periférica.

Esta província é dominada por derrames de rochas eruptivas básicas (basalto). Os derrames recobriram depósitos das formações Pirambóia e Botucatu, basicamente formados por arenitos de origem predominantemente fluvial e eólica (MONTANHEIRO et al., 2002). Lentes de arenitos eólicos, sobre os basaltos, encontram-se muitas vezes intercaladas nos derrames. Quanto ao sistema de relevo presentes, na área da bacia do Rio Jaú ocorrem principalmente, as Colinas Médias (53,9%), Colinas Amplas (12,3%), e o sistema de Morrotes Alongados e Espiões (33,7%) (FEHIDRO-IPT, 2006).

Colinas Médias correspondem aos sedimentos da Formação Itaqueri. Suas características principais identificam interflúvios com áreas de 1 a 4 km<sup>2</sup>, topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos; drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-

retangular, vales abertos a fechados, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.

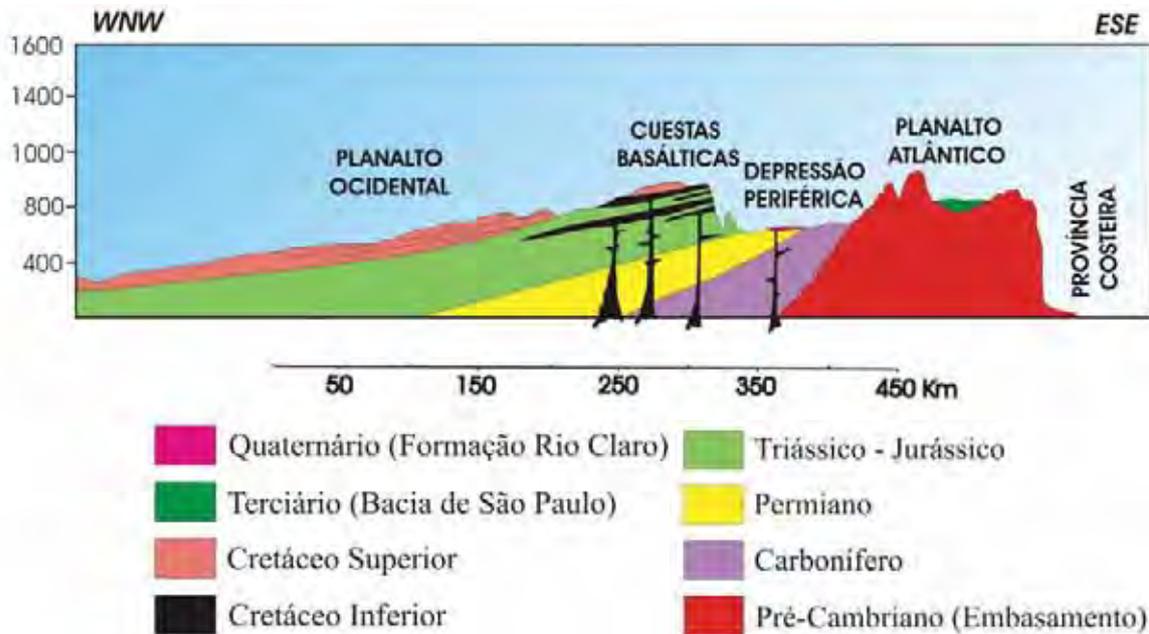


Figura 8. Perfil geológico-geomorfológico do Estado de São Paulo. Adaptado (IPT, 1981).

Nas Colinas Amplas predominam interflúvios com área superior a 4 km<sup>2</sup>. Correspondem a topos extensos e aplainados, e vertentes com perfis retilíneos a convexos, geralmente a drenagem é de baixa densidade e apresenta padrão subdendrítico; os vales são abertos com presença de planícies aluviais interiores restritas, podendo ocorrer eventualmente, lagoas perenes ou intermitentes.

Morrotes Alongados e Espigões ocorrem principalmente associados às litologias da Formação Serra Geral. Normalmente predominam interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados, vertentes ravinadas com perfis retilíneos; drenagem de média a alta densidade, padrão dendrítico e vales fechados.

A Tabela 8 e a Figura 9 mostram a distribuição das classes de declividade, apresentando predominância de terrenos com pequena declividade, topos aplainados e vertentes com perfis retilíneos entre 0 e 3% (45,1% de sua área total) e 3 à 6% (32,6% de sua área total), seguido de declividades mais acentuadas, vertentes com perfis convexos e ravinados e topos angulosos e achatados, entre 6 a 12% (21% de sua área total).



- Associação de Latossolo Vermelho-Escuro álico, A moderado e proeminente, textura média, argilosa e muito argilosa e Latossolo Roxo eutrófico e distrófico, A moderado e proeminente, textura argilosa e muito argilosa (LEa e LR). Estão associados às zonas de contato de rochas basálticas da Formação Serra Geral com arenitos pertencentes à Formação Itaqueri. Estas associações pedológicas são evidenciadas em relevos de morros amplos, morrotes e espigões alongados;

- Latossolo Roxo eutrófico (LRe), e A chernozêmico, textura muito argilosa e argilosa. Inclusões: Latossolo Vermelho-Escuro distrófico, álico, A moderado, textura média, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, A moderado, textura argilosa e média, Terra Roxa Estruturada distrófica e eutrófica, A moderado, textura muito argilosa e argilosa;

- Latossolo Vermelho-Amarelo álico, distrófico, A moderado e proeminente, textura média e argilosa (LVd), associado a Latossolo Vermelho-Escuro álico, distrófico, A moderado, textura média e argilosa. Inclusões: Latossolo Roxo eutrófico e distrófico, A moderado, textura argilosa e muito argilosa; Podzólico Vermelho-Amarelo, álico, A moderado, Tb textura arenosa/média, Litólico eutrófico e distrófico, A moderado, textura indiscriminada, Cambissolo eutrófico e distrófico, A moderado, textura indiscriminada e Areias Quartzosas álicas, A moderado. Esta associação pedológica está relacionada aos arenitos da Formação Itaqueri, em relevos de transição colinas amplas/colinas médias e morros amplos.

- Solos Litólicos eutróficos e distróficos, A chernozêmico e moderado, textura média e argilosa, fase pedregosa e não pedregosa (Re), associados a Podzólico Vermelho- Amarelo eutrófico e distrófico, abrupto e não abrupto, A moderado, textura arenosa/média e média/argilosa e Terra Roxa Estruturada eutrófica, A moderado, textura muito argilosa. Inclusões de afloramentos de rocha e Cambissolo distrófico e eutrófico, A moderado, textura argilosa. Estão condicionados aos relevos movimentados, em posições de vertentes de alta declividade.

- Terra Roxa estruturada eutrófica, A moderado, textura muito argilosa (TRe), associada a Latossolo Roxo eutrófico, A moderado, textura muito argilosa e argilosa. A Terra Roxa Estruturada ocorre em associação com o Latossolo Roxo em áreas de substrato basáltico, porém associadas a relevos relativamente mais movimentado.

Tabela 9. Distribuição percentual em área dos principais compartimentos pedológicos na bacia do Rio Jaú. Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).

<i>Bacia</i>	<i>Compartimentos pedológicos (% da área da bacia)</i>					<i>Lagos</i>
	<i>LEa/LR</i>	<i>LRe</i>	<i>LVd</i>	<i>Re</i>	<i>TRe</i>	<i>Área (%)</i>
<i>Rio Jaú</i>	34,2	12,2	29,4	0,7	23,5	0,0

Compartimentos pedológicos: LEa/LR – Associação Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo; LRe – Latossolo Roxo, eutrófico; LVd – Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; Re – Litólicos eutróficos; e Tre – Terra Roxa Estruturada eutrófica.

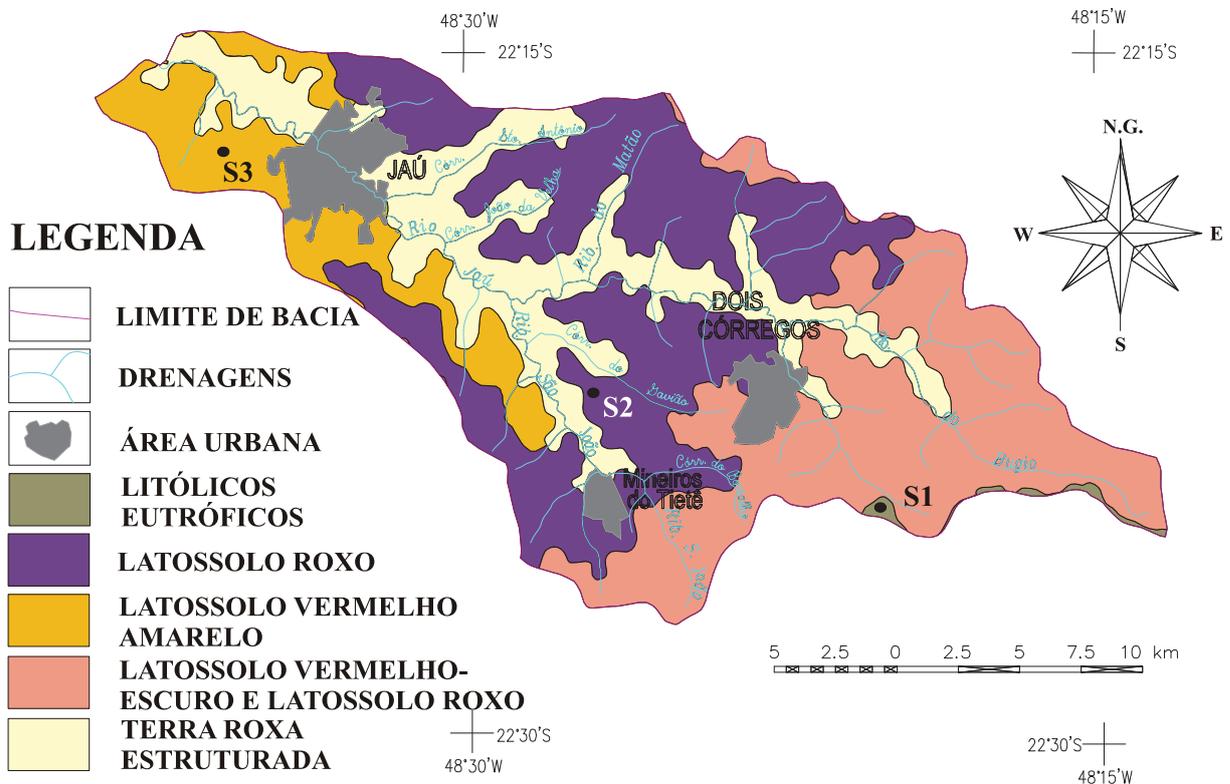


Figura 10. Mapa pedológico da bacia do Rio Jaú, com os pontos de amostragem de solos (S1, S2 e S3). Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).

### 3.4 – Contexto geológico

A área de estudo encontra-se inserida no contexto da Bacia do Paraná, considerada uma bacia tipicamente intracratônica, desenvolvida completamente sobre crosta continental que foi originada como um golfo aberto para o Panthalassa e que, com o tempo, tornou-se uma depressão intracratônica aprisionada no interior do Gondwana (ZÁLAN et al. 1990; MILANI, 1992). A Bacia documenta quase 400 milhões de anos da história geológica fanerozóica, e é preenchida por aproximadamente 6.000 m de espessura de rochas

sedimentares e vulcânicas, cujas idades variam do Neo-Ordoviciano ao Neo-Cretáceo (FÚLFARO & BJORNBERG, 1983; MILANI et al., 1994).

A Bacia do Paraná é considerada uma bacia típica intracratônica, em função de suas características tectono-sedimentares e seu posicionamento geotectônico ao longo de sua evolução geológica. A Bacia do Paraná, após longo período de relativa estabilidade, foi marcada no Permiano, pela deposição dos sedimentos do Subgrupo Irati (HACHIRO et al., 1993), e começa a registrar os primeiros sinais dos intensos processos tectônicos que culminariam, no início do Cretáceo, com o extravasamento das lavas basálticas da Formação Serra Geral (RICCOMINI, 1997a).

Estende-se pelos territórios brasileiro, uruguaio, paraguaio e argentino com uma área total de aproximadamente 1.600.000 mil km<sup>2</sup> (Figura 11). A bacia compreende a parte meridional do Brasil, abrangendo os territórios dos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A bacia tem formato alongado na direção NNE-SSW, com aproximadamente 1.750 km de comprimento e largura média de 900 km (NARDY, 1996).

As rochas sedimentares e vulcânicas que compõem o quadro litoestratigráfico da Bacia do Paraná (Figura 12) podem ser agrupadas em seis grandes seqüências aloestratigráficas de segunda ordem ou superseqüências, divididas entre si por cinco discordâncias (MILANI et al., 1994; MILANI, 1997), que correspondem a períodos de não deposição e erosão ou por baixas taxas de sedimentação: Rio Ivaí (Caradociano-Landoveriano), Paraná (Lockoviano-Frasniano), Gondwana I (Westfaliano-Scythiano), Gondwana II (Anisiano-Noriano), Gondwana III (Neojurássico-Berriasiano) e Bauru (Aptiano-Maestrichtiano) (MILANI & RAMOS, 1998).

Ocorrem na área da Bacia do Rio Jaú as unidades da Bacia do Paraná do Grupo São Bento (Formação Serra Geral) e a unidade de rocha sedimentar que ocorre como cobertura das lavas basálticas (Formação Itaqueri). A Tabela 10 e a Figura 13 apresentam a distribuição percentual em área e as duas principais formações geológicas na bacia do Rio Jaú.

Tabela 10. Distribuição percentual em área das unidades geológicas na bacia do Rio Jaú (FEHIDRO-IPT, 2006).

<i>Bacia</i>	<i>Compartimentos geológicos (% da área da bacia)</i>		<i>Lagos</i>
<i>Rio Jaú</i>	<i>Formação Itaqueri (KTi)</i>	<i>Formação Serra Geral (JKsg)</i>	<i>Área (%)</i>
	50,2	49,8	0,0

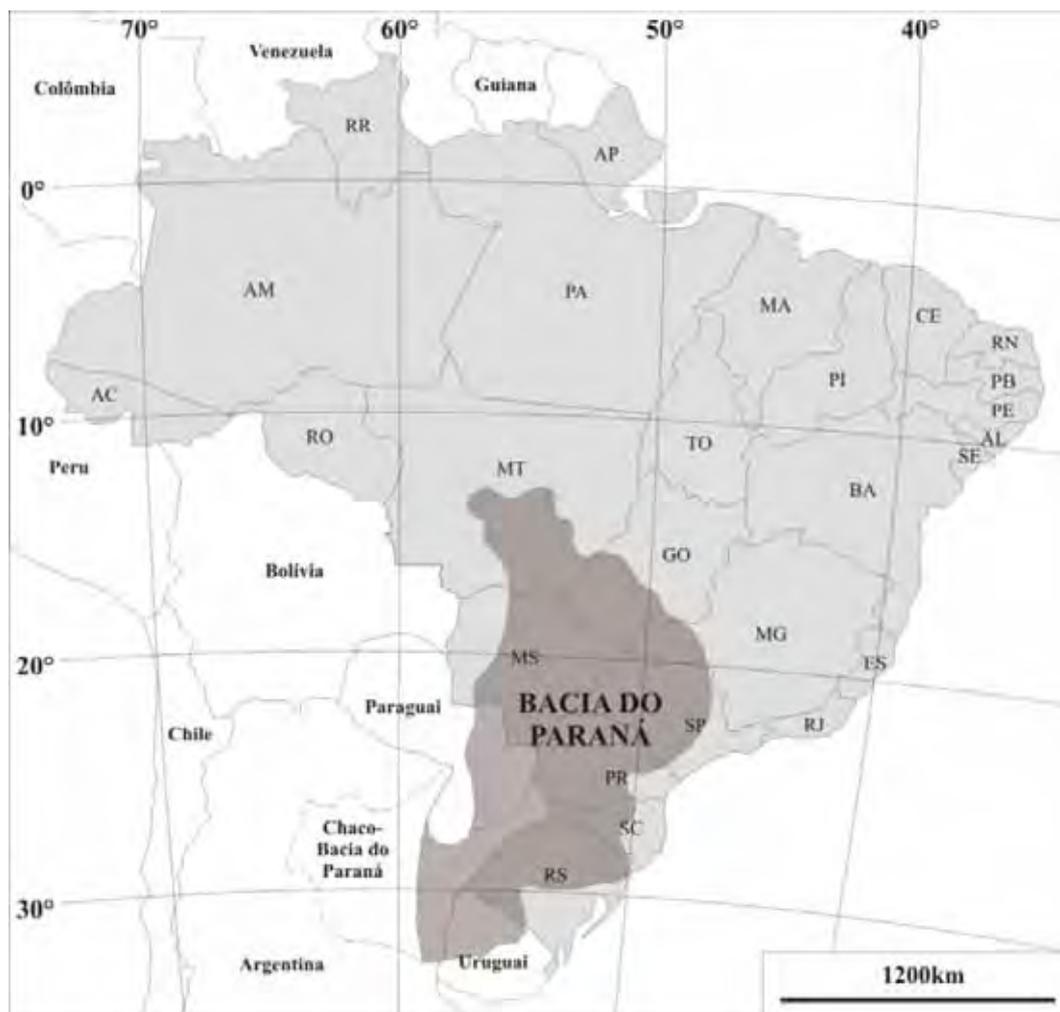


Figura 11. Mapa de localização da Bacia do Paraná. Modificado (ZÁLAN et al., 1990).

### 3.4.1 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral teve sua primeira referência em WHITE (1906) e sua área seção foi descrita na Serra Geral do Planalto Meridional Brasileiro, estrada entre Lauro Müller e São Joaquim, Estado de Santa Catarina (SBG, 2008).

Constitui em conjunto com a Formação Botucatu, a denominada Bacia Serra Geral, correspondendo à Superseqüência Gondwana III (MILANI et.al., 1994 - Figura 11; MILANI, 1997). A Formação Serra Geral é resultado de intenso magmatismo fissural, representado na forma de uma espessa cobertura de lavas, com cerca de 1.500 metros de espessura junto ao depocentro da bacia, associado a uma extensa rede de diques e múltiplos níveis de soleiras intrudidos na pilha sedimentar.

Os basaltos da Formação Serra Geral são, em grande parte, maciços, com alguns níveis vesiculares e/ou amigdaloidais, de coloração cinza a negra, adquirindo tonalidades verde-amarronzadas devido ao intemperismo (NARDY, et al., 2002). Em sua porção norte,

em especial no Estado de São Paulo, os basaltos da Formação Serra Geral estão sotopostos aos sedimentos dos Grupos Bauru e Caiuá, que ocupam praticamente toda a porção ocidental do estado, condicionando a ocorrência de basaltos em afloramentos dispostos em faixas ao longo da rede de drenagem (SQUISATO et al., 2009). As rochas basálticas são compostas por fenocristais de augita, plagioclásio, pigeonita, alguma titanomagnetita e rara olivina, em matriz composta por estes mesmos minerais (SQUISATO, 2008).

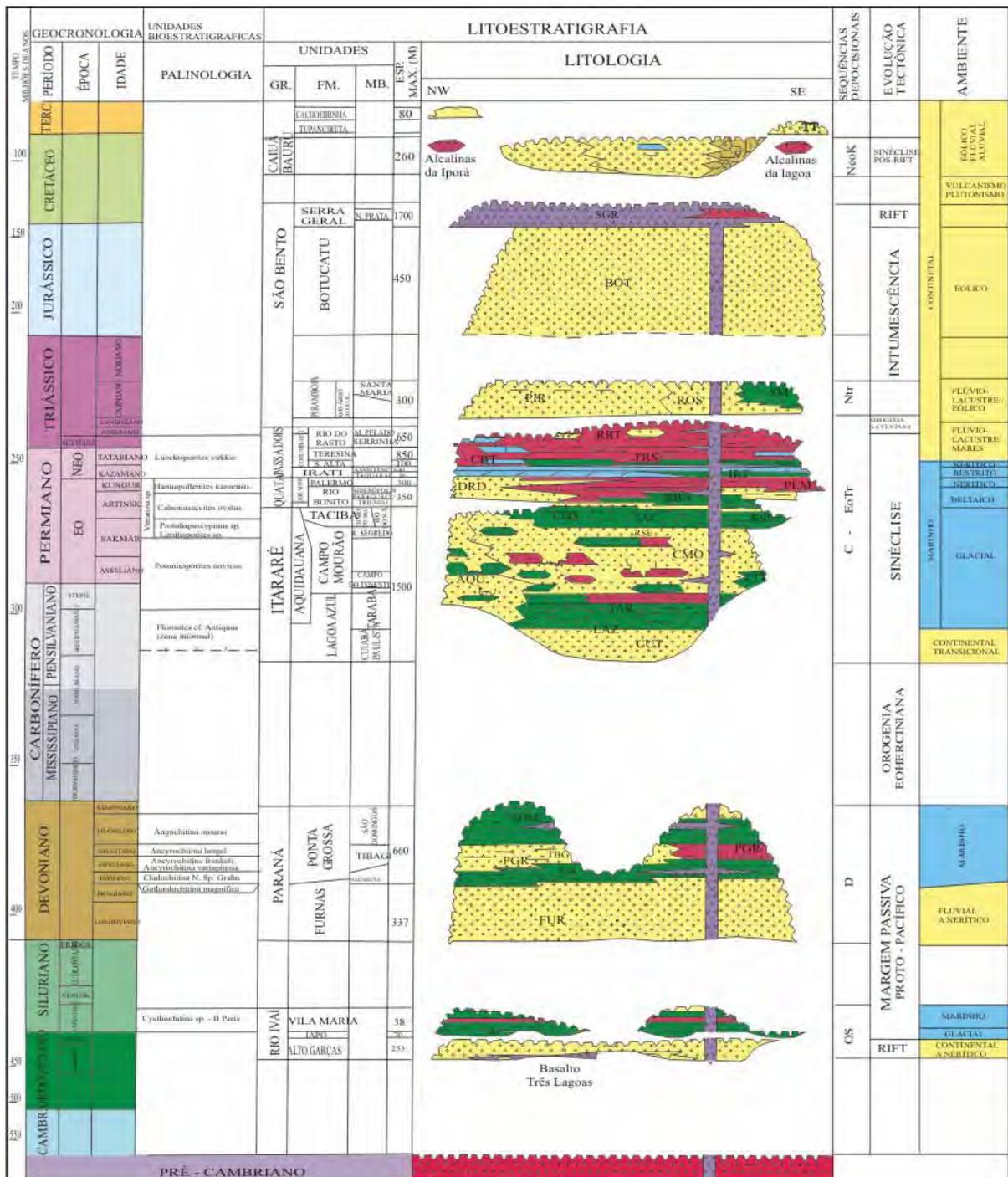


Figura 12. Quadro litoestratigráfico da Bacia do Paraná. (MILANI et al., 1994).

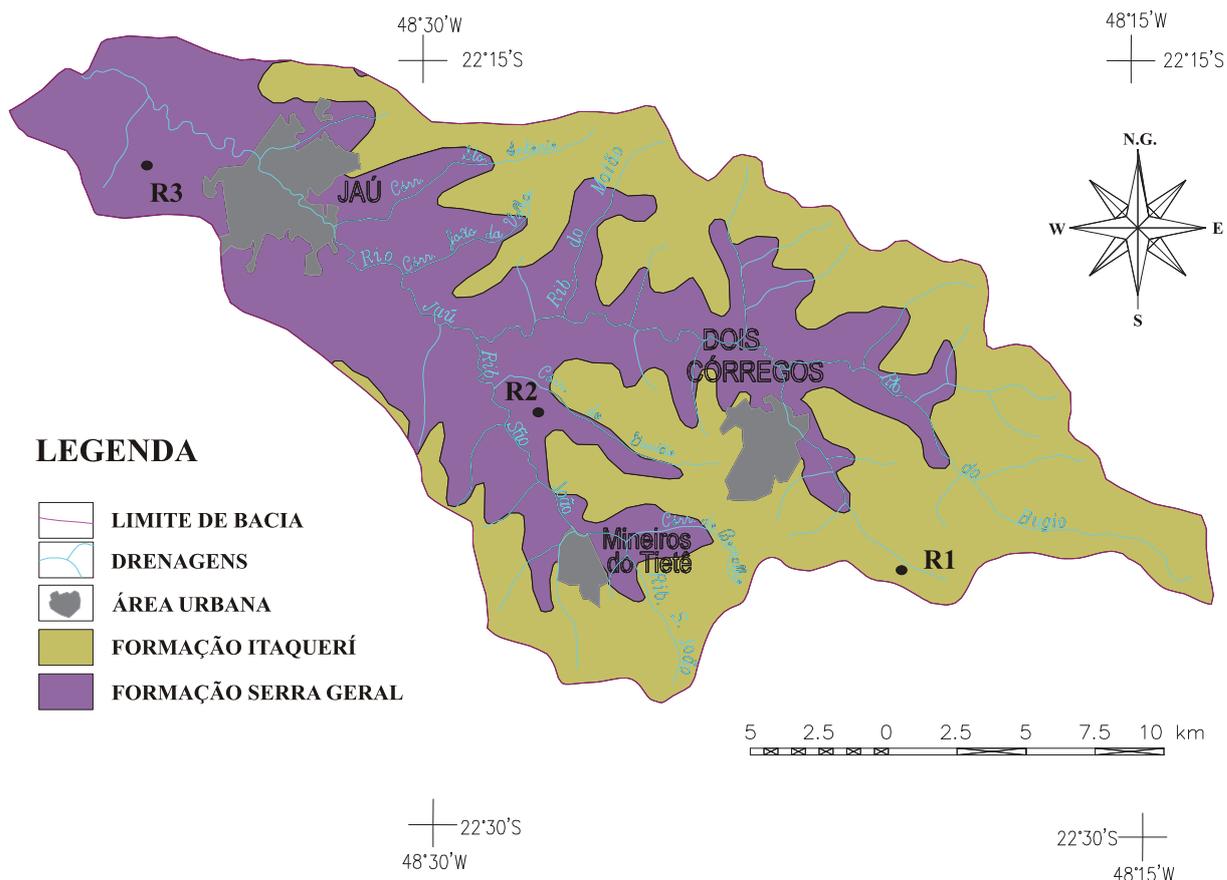


Figura 13. Mapa geológico da bacia do Rio Jaú, com os pontos de amostragem de rochas (R1, R2 e R3). Modificado (FEHIDRO-IPT, 2006).

As rochas vulcânicas da Província Magmática do Paraná possuem idades variando entre 133,6 e 131,5 Ma em sua porção norte e de 134,6 e 134,1 Ma na porção sul (RENNE et al., 1992; TURNER et al., 1994; ERNESTO et al., 1999; MINCATO et al., 2003; NARDY et al., 2008; THIEDE & VASCONCELOS, 2010; PINTO et al., 2010; JANASI et al., 2011), o que fornece um intervalo de duração do vulcanismo da ordem de 3 Ma, compatível com os dados paleomagnéticos reunidos em MARQUES & ERNESTO (2004). Estas idades são praticamente as mesmas das rochas vulcânicas observadas na região do Etendeka - África (131,7±0,7 Ma e 132,3±0,7 Ma, RENNE et al., 1996) e da bacia de Cuanza - Angola (131,9±1,6 Ma e 131,6±1,4 Ma, MARZOLI et al., 1999).

Na bacia do Rio Jaú, as rochas eruptivas da Formação Serra Geral constituem um conjunto de derrames de basaltos toleíticos de espessura individual bastante variável, desde poucos metros a mais de 50 m e extensão também individual que pode ultrapassar a dez quilômetros. Os derrames são constituídos por rochas de coloração cinza escura a negra, em geral afaníticas. Nos derrames mais espessos, a zona central é maciça, microcristalina e

apresenta-se fraturada por juntas subverticais de contração (disjunção colunar) (FEHIDRO-IPT, 2006).

### ***3.4.2 Formação Itaqueri***

A Formação Itaqueri foi definida a partir dos estudos de (SETZER, 1943 apud FEHIDRO-IPT, 2006) sobre os solos da região noroeste do Estado, que distinguiu divisão dupla na série Bauru, caracterizada de cimento calcário, ausente na inferior. Os sedimentos da Formação Itaqueri já foram considerados como pertencentes à seqüência do Grupo Bauru (SOARES et al., 1980) e também como pós-Bauru, com a denominação Itaqueri para a inferior, e Marília para a superior (FERNANDES, 1998). São admitidos com idade do Cretáceo ao Terciário (MELO, 1995).

Constituem a Formação Itaqueri membros alternados de arenitos com cimento argiloso, folhelhos e conglomerados. Os arenitos têm granulometria variável, de muito fina e siltítica até grossa, são eventualmente silicificados; podendo ser arcoseanos, com grande variedade mineralógica (RICCOMINI, 1997b). A matriz é argilosa e em pequena quantidade, o cimento é calcedônia, incluindo ainda óxido de ferro (LADEIRA & SANTOS, 2005). Os conglomerados, com espessuras de até 5 metros, compõem-se de clastos bem classificados, com até 30 centímetros de diâmetro; compostos principalmente por basalto, tendo ainda quartzo, calcedônia, granito, quartzito, argilito, filito, pegmatito, sílex e folhelhos (MONTANHEIRO et al., 2002).. As estruturas sedimentares, eventualmente caracterizadas, são a estratificação plano-paralela ou cruzada nos arenitos; disposição caótica dos clastos nos conglomerados e estratificação de corrente nos mais finos. O ambiente é fluvial, com a deposição realizada em meio de alta energia, sujeito a bruscas mudanças de velocidade de transporte, sugestivo de fanglomerados (RICCOMINI, 1997b).

Ocorre na bacia do Rio Jaú, numa mancha que se estende de leste, até as proximidades de Jaú, a oeste (estendendo-se até Bocaina, pelo flanco norte, e até a região de Mineiros do Tietê, pelo sul). Constitui-se de um pacote de até 120 metros de espessura, de camadas alternadas de arenitos com cimento argiloso, folhelhos e conglomerados, estes situados tanto na base quanto no interior do pacote. Os arenitos são de granulação variada, podem ser argilosos e apresentar intensa silicificação. Os clastos dos conglomerados são de composição variada, provenientes de fora da bacia de deposição (FEHIDRO-IPT, 2006). Estes sedimentos foram acumulados em ambiente de elevada energia, sujeitos a mudanças bruscas de

velocidade das águas, possivelmente em depósitos de leques aluviais em clima de acentuada aridez (RICCOMINI, 1997a).

## **4 – MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 – Avaliação simplificada de impactos ambientais na bacia do Rio Jaú**

A avaliação simplificada de impactos ambientais é um instrumento que permite que se faça um exame dos impactos ambientais causados por uma ação proposta. Neste sentido, procurou-se identificar os principais impactos visuais dos cursos d'água que formam a bacia do Rio Jaú. Esse método foi escolhido, pois, permite fácil compreensão dos resultados, aborda fatores biofísicos e indiretamente sociais, além de fornecer boa orientação para o prosseguimento dos estudos (SARDINHA, 2005; SARDINHA et al.; 2007; SALLES et al.; 2008; ZANFELICE, et al., 2009; CONCEIÇÃO et al., 2010).

Para facilitar a avaliação dos pontos a serem analisados, criou-se um índice de análise ambiental simplificado (Tabela 11). Considerando a subjetividade de alguns indicadores, houve uma aferição prévia dos mesmos antes de iniciar a sua aplicação em campo. O índice auxiliou na identificação dos impactos na cobertura vegetal, fauna e no entorno do recurso hídrico (riscos à saúde, impactos sonoros, lixo e saneamento) que, de uma forma ou de outra afetam o ambiente natural. Após o preenchimento da planilha contendo os pesos apresentados na Tabela 10, somaram-se os pontos de cada questão, mínimo zero e máximo trinta e três, ou seja, de 33 a 25 pontos indica mínima ou pouca presença de impacto, de 24 a 18 indica moderada presença de impacto, de 17 a 09 pontos tem-se impacto alto ou preocupante e menor ou igual a 8, presença muito alta de impacto.

Os pontos analisados a partir do emprego da Tabela 11 (análise ambiental simplificada) foram divididos por sub-bacias, sendo: sub-bacia do Ribeirão do Bugio (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 e P8); sub-bacia do Ribeirão São João (P9, P10 e P11); e Rio Jaú (P12, P13, P14 e P15).

### **4.2 – Amostragem de solos, rochas e águas da bacia**

As amostras de solos residuais (horizonte C) e rochas frescas (sem alteração) foram coletadas em três pontos representativos dentro da bacia. Antes de iniciar a coleta, sacos plásticos foram identificados com etiquetas feitas com esparadrapo. Rochas foram coletadas utilizando martelo Estwing petrográfico. A aproximadamente 40 cm de distância e na vertical de onde foram coletas as amostras de rochas, amostras de 5 cm de solos foram retiradas com auxílio de um martelo Estwing estratigráfico e espátula. As primeiras amostras (**RI** e **SI** -

Figuras 13 e 10) foram coletadas de uma amostra de rocha sedimentar da Formação Itaqueri, e solo litólico arenoso alaranjado a rosado sem estruturação. Rochas da Formação Itaqueri representam aproximadamente 50% da área na bacia (Figura 13), porém, estão encobertas por camadas espessas de Latossolos Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo (Figura 10), solos colúviais compostos por materiais pouco selecionados, como observados em campo. No segundo ponto foram coletadas rochas basálticas da Formação Serra Geral, (**R2** e **S2** - Figuras 13 e 10) e um Latossolo Roxo eutrófico, textura média- argilosa e argilosa. Já a terceira amostragem (**R3** e **S3** - Figuras 13 e 10) também foi feita de rochas basálticas da Formação Serra Geral, onde se encontra Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média e argilosa.

Tabela 11. Pesos utilizados para situações encontradas em campo visando identificar impactos ambientais na bacia do Rio Jaú.

IMPACTO		Peso	Turbidez da água	muito alta	0	
				alta	1	
				baixa	2	
				ausente	3	
Impactos na vegetação	muito impacto (sem vegetação)	0		Odor	muito forte	0
	médio impacto ( - 50% de vegetação)	1			forte	1
	pouco impacto (+ 50% de vegetação)	2	fraco		2	
	sem impacto	3	ausente		3	
Fauna do entorno / impactos na fauna	ausência de animais nativos	0	Óleos	muito alto	0	
	pouca presença de animais nativos	1		alto	1	
	moderada presença de animais nativos	2		baixo	2	
	grande presença de animais nativos	3		ausente	3	
Danos ao recurso hídrico	vandalismo	0	Espumas	muito alta	0	
	danos no entorno	1		alta	1	
	inscrições em rocha vegetação	2		baixa	2	
	sem danos	3		ausente	3	
Saneamento	fossa e/ou esgoto	0	Algas / Clorofila	muito alto	0	
	dejetos ou urina	1		alto	1	
	entulhos lixo	2		baixo	2	
	ausente	3		ausente	3	
Lixo no recurso hídrico	muito lixo	0	Larvas e vermes vermelhos	muito alta	0	
	pouco lixo	1		alta	1	
	lixo em latões	2		baixa	2	
	sem lixo	3		ausente	3	

Para as águas fluviais, seis pontos de amostragem foram estabelecidos, sendo realizadas seis coletas de águas superficiais entre Agosto de 2009 e Janeiro de 2010 (14/08/2009, 17/09/2009, 17/10/2009, 20/11/2009, 23/12/2009 e 12/01/2010).

As águas foram coletadas no centro da seção transversal utilizando balde de polietileno de 30 cm amarrado a uma corda de nylon torcida. O balde, previamente lavado com a própria água a ser coletada, foi totalmente submerso no curso d'água, sendo coletada amostras de água superficial a aproximadamente 30 cm de profundidade. No próprio local de amostragem, as águas foram caracterizadas quanto à temperatura (°C), pH e condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) por intermédio de equipamentos de leitura direta. Utilizando vasilhames de polietileno de 500 ml, previamente lavado com água destilada, enxaguado e lavado em campo com a própria água a ser coletada, amostras foram armazenadas em isopor para transporte e quantificação dos teores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SiO}_2$  e sólidos (totais e suspensos).

A vazão do ponto P1 foi medida de acordo com a metodologia descrita por (HERMES & SILVA, 2004), utilizando-se uma régua limnimétrica de leitura da medida do nível do rio (régua Vonder de aço inox de 1,50 m e escala de 1 mm, parafusada a uma régua de alumínio de 2,0 m), uma trena (de aço longa Vonder 20 m x 12,5mm), um objeto flutuador e um cronômetro, sendo as variáveis colocadas posteriormente na equação 1:

$$Q = \frac{AxDxC}{T} \quad (1)$$

Onde:

$Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$A$  = área da seção transversal do rio ( $\text{m}^2$ );

$D$  = distância usada para medir a velocidade do rio (m);

$C$  = coeficiente de correção: (0,8 para rios com fundo rochoso e 0,9 para rios com fundo lodoso);

$T$  = tempo (s) gasto pelo objeto flutuador para atravessar a distância  $D$ .

Amostras de água pluvial foram coletadas no SAAEDOCO (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Dois Córregos), município de Dois Córregos (SP). Optou-se por este local de amostragem devido à localização, direção do vento e logística. O período de amostragem foi de Agosto de 2009 à Julho de 2010 (19/08/2009, 21/08/2009, 25/08/2009, 05/09/2009, 09/09/2009, 24/09/2009, 13/10/2009, 16/10/2009, 19/10/2009, 22/10/2009, 09/11/2009/

11/11/2009, 21/11/2009, 28/11/2009, 11/12/2009, 12/12/2009, 16/12/2009, 30/12/2009, 06/01/2010, 15/01/2010, 20/01/2010, 30/01/2010, 01/02/2010, 05/02/2010, 11/02/2010, 19/02/2010, 02/03/2010, 15/03/2010, 21/03/2010, 29/03/2010, 03/04/2010, 04/04/2010, 26/05/2010, 29/05/2010, 11/06/2010, 28/06/2010 e 14/07/2010), quando foram coletadas 37 amostras de deposição total (úmida + seca), sem padrão pré-estabelecido de intervalo de tempo entre as coletas. As amostras coletadas corresponderam a um único evento de precipitação que gerasse um volume mínimo de 250 mL, suficiente para todas as análises químicas. As amostras de água de chuva foram conservadas em geladeira no próprio SAAEDOCO.

O coletor usado é do tipo bulk, sendo composto por uma chapa de aço inoxidável em forma de funil de 1,2 m<sup>2</sup> com um furo ao centro de aproximadamente 5 cm de diâmetro, e uma tubulação de polietileno acoplado a um vasilhame de polietileno de 500 ml, previamente lavado com água destilada, fixado a 1 m do solo. As águas foram caracterizadas quanto ao pH e condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) no próprio local de amostragem, e armazenadas em isopor para transporte e quantificação dos teores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SiO}_2$ .

#### ***4.3 – Quantificação físico-química e química de solos, rochas e águas da bacia***

As amostras de rochas e solos passaram por um processo de cominuição por marreta; posteriormente, no LAGEPE (Laboratório de Preparação de Amostras Geológicas e Pedológicas, do IGCE da Unesp de Rio Claro (SP), passaram por um britador de mandíbula do tipo *DENVER*. Na etapa seguinte, houve a pulverização das amostras em moinho oscilante com panela de tungstênio, até reduzir a granulação até menor que silte fino.

As amostras de rochas e solos já pulverizadas foram encaminhadas para a análise química na “ACME ANALYTICAL LABORATORIES LTD” no Canadá. Foram determinados os principais óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{T}}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), elementos-traço (Ba, Cs, Nb, Th, V, Y e Zr) e terras raras (ETRs) (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu).

Os elementos maiores e elementos-traço foram determinados por Espectrometria de Emissão Atômica Acoplada a Plasma Indutivo (ICP-AES) utilizando fundentes (0,2 g de amostra e metaborato/tetraborato de lítio) e posterior dissolução em ácido nítrico diluído. A perda ao fogo (LOI, “Loss on ignition”) foi medida por diferença de peso após calcinação a 1000°C da amostra seca. Os elementos terras-raras foram determinados por Espectrômetro de

Massa Acoplado a Plasma Indutivo (ICP-MS), também em amostras de 0,2 g, acompanhadas de fusão com metaborato/tetraborato de lítio e dissolução com ácido nítrico diluído.

As medidas de temperatura da água, (pH) e condutividade foram feitas utilizando: termômetro Digital *Pocket CE* da Onda Científica Ltda; medidor de pH da *Hanna Instruments* e condutivímetro *DIST 4* da *Hanna Instruments*. Amostras foram transportadas ao Laboratório de Isótopos e Hidroquímica (LABIDRO) do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) do IGCE da UNESP de Rio Claro (SP), uma parte das alíquotas foram filtradas em membranas *Millipore* 0,45 µm e conservadas com ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e ácido clorídrico (HCl), até atingir um pH ≤ 2,0, outra parte foi utilizada para analisar os teores de sólidos totais e sólidos em suspensão.

Os sólidos totais e sólidos totais suspensos foram analisados pela metodologia gravimétrica (STANDARD METHODS, 1999). Béqueres de 50 mL e membranas *Millipore* de abertura 0,45 µm foram previamente aquecidos em estufa a 105°C durante uma hora para a retirada da umidade; posteriormente, foram colocados em dessecadores para atingir a temperatura ambiente, sendo, por último, pesados em balança semi-analítica com sensibilidade de quatro casas decimais.

Para os sólidos totais, adicionou-se 50 mL de cada amostra nos béqueres, deixando-os na estufa até evaporação total a 105°C. Após isto, foram retirados e colocados em dessecadores, ficando em descanso até atingir a temperatura ambiente e pesados em balança analítica. Para os sólidos em suspensão, as amostras de água foram filtradas num kitassato acoplado a bomba de vácuo, onde os materiais suspensos ficaram aderidos nas membranas *Millipore* 0,45 µm. As membranas foram aquecidas em estufa a 105°C, posteriormente colocadas no dessecador e pesadas após atingir a temperatura ambiente. Para ambos, foi utilizada a equação (2):

$$ST (S) = \frac{(P1 - P2)}{\text{Volume Amostra}} \quad (2)$$

Onde:

*P1*: peso final do béquer (filtro)

*P2*: peso inicial do béquer (filtro)

Uma parte das alíquotas preservadas foi analisada no próprio LABIDRO: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> e SiO<sub>2</sub>. Sulfato (método turbidimétrico do sulfato de bário, de 0 a 70 ± 0,9 mg/L),

fosfato (método do ácido ascórbico, de 0 a  $3 \pm 0,01$  mg/L), nitrato (método de redução de cádmio, de 0 a  $30 \pm 0,8$  mg/L), cloreto (método de tiocianato mercúrico, de 0 a  $20 \pm 0,3$  mg/L) e sílica (método do silício molibdato de 0 a  $100 \pm 0,45$  mg/L), foram quantificados por espectrofotometria com o equipamento DR 2000 da *Hach Company* (HACH, 1992).

Outra parte das alíquotas foi enviada ao Laboratório de Geoquímica (LABOGEO) do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) do IGCE da UNESP de Rio Claro (SP) onde foram analisados os teores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . Potássio, cálcio e magnésio foram quantificados por Espectrometria de Emissão em Plasma Indutivamente Acoplado (ARL 3410). Já a determinação de sódio foi realizada por Espectrofotometria de Absorção Atômica com Chama (FAAS - *GBC 608*).

#### ***4.4 – Análise Mineralógica de solos e rochas da bacia***

As amostras de rochas e solos já pulverizadas foram encaminhadas para a análise mineralógica no Laboratório de Difração de Raios X do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) do IGCE da UNESP de Rio Claro (SP). Aproximadamente 1g de cada amostra foi devidamente acondicionada em porta amostra sendo efetuada a análise da amostra total dos minerais presentes. As análises mineralógicas por Difração de Raios X (DRX) foram realizadas em difratômetro marca Siemens D 5000, medidas com radiação de Cu ( $\text{WL} = 1,542\text{\AA}$ ) e filtro de Ni. A velocidade do goniômetro foi definida com 3 graus por minuto e tempo de exposição de 1 s por cada passo de  $0,05^\circ$ .

O equipamento é constituído por um tubo emissor de raios X, que irradia uma amostra de pó acondicionada em porta amostra ou lâmina de vidro localizada no goniômetro e um detector que recebe os raios difratados. A técnica de ensaio consiste em incidir um feixe de raios X (de comprimento de onda conhecido) sobre uma camada fina de pó (amostra), ocorrendo o espalhamento dos mesmos pelos elétrons dos átomos dos cristais, que difratam segundo a Lei de Bragg (BRAGG, 1913), definida pela equação 3. Como consequência, cada mineral difrata em um conjunto de ângulos que são característicos do retículo cristalino, obtendo-se o correspondente difratograma.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \tag{3}$$

Onde:

*n*: é um número inteiro determinado pela ordem de grandeza;

$\lambda$ : comprimento de onda dos Raios X;

$d$ : espaçamento entre os planos da estrutura atômica (rede cristalina);

$\theta$ : o ângulo entre o raio incidente e o plano de difração.

#### **4.5 – Quantificação de urânio nos solos, rochas e águas por espectrometria alfa**

O teor de urânio foi quantificado de acordo com a realização de várias etapas descritas por BONOTTO (1996 e 2004). Todas as análises foram feitas no Laboratório de Isótopos e Hidroquímica (LABIDRO) do Departamento de Petrologia e Metalogenia do IGCE da UNESP de Rio Claro (SP). Para rochas e solos (horizonte C), foram analisadas três conjuntos (R1 – S1, R2 – S2 e R3 – S3), para águas superficiais foram analisadas duas amostras (ponto P6 período seco e período chuvoso) e para água de chuva foi analisada uma amostra.

#### **4.6 – Etapa de Escritório**

Esta etapa consistiu no tratamento e interpretação dos dados obtidos em campo e laboratório, bem como a elaboração de mapas, figuras e tabelas. Os mapas de localização, uso do solo, geomorfologia, pedologia, geologia e áreas das sub-bacias/pontos de amostragens foram confeccionados a partir das cartas 1:50.000 folha SF-22-Z-B-III-3 Dois Córregos e folha SF-22-Z-B-II-4 Jaú (IBGE, 1973) e dos Mapas do Relatório Zero da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré, São Paulo (FEHIDRO-IPT, 2006). Para isso, além do software ArcGis foram utilizados nesta etapa, Origin v8 (para a confecção de gráficos), Statistica for Windows 4.3TM e MVSP MultiVariate Statistical Package (confecção de dados estatísticos), o pacote de programas do Microsoft Office, o programa Minpet v2.02 (para tratamento dos dados geoquímicos normalizados em base anidra) e a Suíte de Aplicativos Gráficos Corel Draw X3 (para a elaboração de figuras). A interpretação dos difratogramas foi realizada no software X'Pert High Score Plus da Panalytical.

Os dados históricos de chuva e vazão, para a área em estudo, foram adquiridas no Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo (SIGRH, 2009). Os dados atuais de precipitação para a região de Jaú foram adquiridos junto ao Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO, 2011).

## 5 – GEOQUÍMICA DAS ROCHAS E SOLOS DA BACIA

As análises geoquímicas relativas aos principais óxidos, elementos terras raras e elementos traços presentes nas rochas e solos estudados estão apresentadas nas Tabelas 12, 13 e 14, respectivamente.

Tabela 12. Análises químicas dos principais óxidos (% em peso) nas rochas e solos da bacia.

<i>Amostra</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>TiO<sub>2</sub></i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3T</sub></i>	<i>MnO</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	<i>*LOI</i>	<i>Soma</i>
<b>R1</b>	93,08	0,15	2,7	0,72	0,01	0,24	0,11	0,14	1,29	0,03	1,5	99,97
<b>S1</b>	93,76	0,12	2,34	0,51	<0,01	0,26	0,1	0,06	1,14	0,02	1,6	99,91
<b>R2</b>	48,87	3,32	13,06	14,73	0,2	5,25	9,07	2,52	1,24	0,38	1,1	99,74
<b>S2</b>	30,44	6,13	21,86	25,33	0,15	0,36	0,18	0,02	0,08	0,46	14,7	99,71
<b>R3</b>	49,26	3,7	12,54	15,32	0,22	4,39	8,25	2,74	0,95	0,46	1,9	99,73
<b>S3</b>	35,39	5,31	17,11	21,53	0,2	2,06	1,53	0,21	0,34	0,48	15,5	99,66
<b>Erro</b>	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	--	--

\* L.O.I. = perda ao fogo (%)

Tabela 13. Análises químicas dos elementos terras raras (µg/g) nas rochas e solos da bacia.

<i>Amostra</i>	<i>La</i>	<i>Ce</i>	<i>Pr</i>	<i>Nd</i>	<i>Sm</i>	<i>Eu</i>	<i>Gd</i>	<i>Tb</i>	<i>Dy</i>	<i>Ho</i>	<i>Er</i>	<i>Tm</i>	<i>Yb</i>	<i>Lu</i>
<b>R1</b>	4,3	8,9	1,03	4,5	0,79	0,27	0,74	0,13	0,66	0,16	0,47	0,08	0,50	0,08
<b>S1</b>	3,8	7,9	0,93	3,7	0,78	0,28	0,75	0,14	0,90	0,21	0,72	0,12	0,82	0,15
<b>R2</b>	27,7	61,8	7,82	34,8	7,16	2,32	6,73	1,09	5,87	1,14	3,19	0,44	2,62	0,38
<b>S2</b>	23,4	34,2	6,80	29,4	5,75	1,77	5,47	0,97	5,64	1,15	3,42	0,55	3,28	0,49
<b>R3</b>	32,1	72,7	9,46	41,2	8,58	2,80	8,07	1,31	7,02	1,29	3,58	0,51	2,95	0,43
<b>S3</b>	42,7	54,1	13,50	60,5	13,16	4,19	12,12	2,00	10,76	2,05	5,63	0,81	4,73	0,69
<b>Erro</b>	0,1	0,1	0,02	0,3	0,05	0,02	0,05	0,01	0,05	0,02	0,03	0,01	0,05	0,01

Tabela 14. Análises químicas dos elementos traços (µg/g) nas rochas e solos da bacia.

<i>Amostra</i>	<i>Ba</i>	<i>Cs</i>	<i>Nb</i>	<i>Th</i>	<i>V</i>	<i>Y</i>	<i>Zr</i>
<b>R1</b>	267	0,3	9,1	1,4	13	4,4	167,5
<b>S1</b>	286	0,3	3,1	1,0	15	6,1	224,6
<b>R2</b>	391	0,2	21,6	2,8	576	31,5	209,3
<b>S2</b>	715	0,2	38,4	5,3	1022	29,2	378,3
<b>R3</b>	457	0,2	23,9	3,4	547	35,3	252,5
<b>S3</b>	1504	0,4	32,7	4,6	736	47,9	353,8
<b>Erro</b>	1,0	0,1	0,1	0,2	8,0	0,1	0,1

Os resultados obtidos para a concentração de urânio e razão de atividade  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  nas amostras de rochas e solos estudados estão representados na Tabela 15. Eles não indicam que ocorre uma lixiviação preferencial do  $^{234}\text{U}$  em relação ao  $^{238}\text{U}$  (razão de atividade  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} <$

1) quando se consideram as incertezas analíticas associadas à técnica utilizada (espectrometria alfa). Assim, pode-se assumir que há equilíbrio radiativo secular entre  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ .

Tabela 15. Resultados das análises radiométricas nas amostras de rochas e solos.

<i>Amostra</i>	<i>Massa</i> (g)	<i>Concentração</i> $^{238}\text{U}$ (ppm)	<i>Razão atividade</i> $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}^*$
<b>R1</b>	1	0,09	0,96
<b>S1</b>	1	0,11	1,06
<b>R2</b>	1	0,13	1,00
<b>S2</b>	1	0,71	1,04
<b>R3</b>	1	0,27	1,03
<b>S3</b>	1	0,23	0,93

\* Incerteza analítica de  $\pm 10\%$  correspondente ao desvio padrão de  $1\sigma$ .

A amostra de rocha (R1) da Formação Itaqueri e solo (S1) horizonte C, alteração das rochas areníticas Formação Itaqueri, foram coletadas entre os municípios Torrinha (SP) e Dois Córregos (SP), mais precisamente nas coordenadas  $22^{\circ}30'08''$  S e  $48^{\circ}11'54''$  W na altitude de 745 m. A amostra R1 é uma rocha com estratificação cruzada, coloração creme alaranjado (Figura 14a). Já, seu produto de alteração, é um solo arenoso alaranjado a rosado sem estruturação (Figura 14b), espessura variada, blocos rolados e barrancos com evidência de deslizamentos, com uma espessura de aproximadamente 1,0 à 1,5 m. Na base, há presença de rocha sã (horizonte R). O horizonte C apresenta bandamento por diferença de granulometria, areia fina a areia muito fina (sensação aspereza, não plástico e não pegajoso) e estrutura granular. No topo há presença de raízes e matéria orgânica (horizonte A). A semelhança entre as análises químicas é devida a presença alta de quartzo que sofreu pouca alteração, sendo as mudanças principais a alteração do K-f perdendo parte do K (Figuras 24 e 25 e 26).

As amostras (R2) e (S2), basaltos da Formação Serra Geral e seu produto de alteração, respectivamente (Figuras 14c e 14d), foram coletadas nas coordenadas  $22^{\circ}23'35''$  S,  $48^{\circ}27'34''$  W, altitude de 650 m, nas proximidades do município de Mineiros do Tietê (SP). O solo possui aproximadamente 1,0 metro de espessura e apresenta cores alaranjadas, esbranquiçadas e pretas. O horizonte R possui vários blocos de basalto inteiros e alterados. O horizonte C, de cor avermelhada, possui aproximadamente 0,7 m, com porções de basalto mais ou menos alteradas e feições de acebolamento (esfoliação esferoidal). O horizonte A apresenta uma tonalidade marrom com presença de restos vegetais e raízes (matéria orgânica). O solo é quebradiço (torrões), apresenta cerosidade com fraturas horizontais e verticais (estrutura laminar), quando molhado, apresenta sedosidade, plástica e pegajosa, devido ao teor

de caulinita formada por alteração dos minerais primários (Figuras 27, 28 e 31). Observando-se na análise química do solo S2, a alta concentração de óxidos de ferro, alumínio e titânio se deve á mobilização dos elementos alcalinos, alcalino-terrosos e sílica, assim como o aumento da perda ao fogo causada pelos minerais de alteração, que incorporam água na estrutura (oxi-hidróxidos de alumínio, ferro e caulinita principalmente).

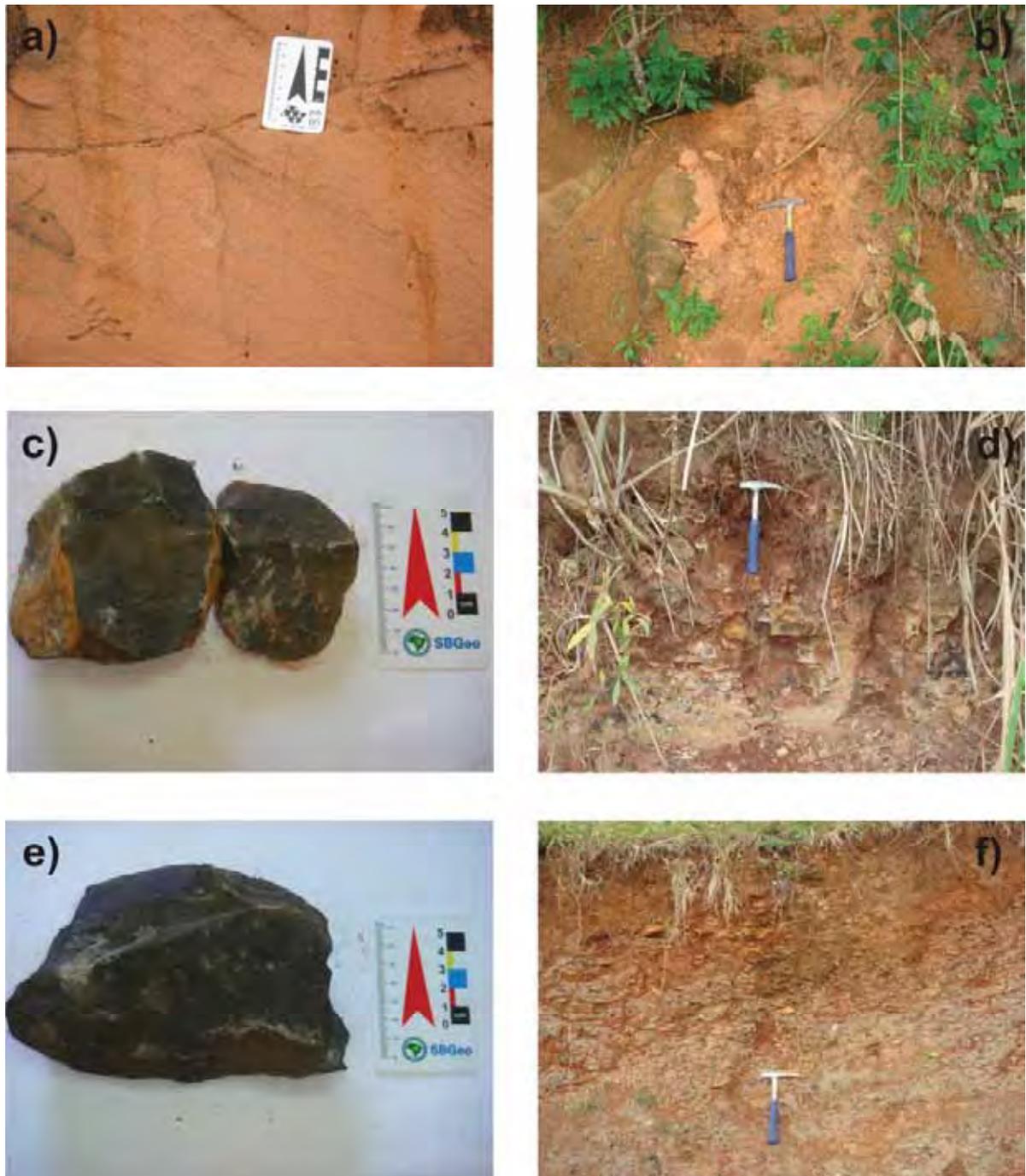


Figura 14. Amostras do arenito da Formação Itaqueri R1 (a) e seu produto de alteração S1 (b). Amostras da Formação Serra Geral R2 (c), R3 (e) e seus produtos de alteração S2 (d) e S3 (f).

As amostras de rocha (R3) e solo (S3) foram coletadas nas proximidades do município de Jaú (SP), nas coordenadas 22°16'40'' S e 48°35'46'' W, altitude 519 m. Neste local, encontram-se basaltos da Formação Serra Geral, juntamente com vários blocos de rochas pouco alteradas e de coloração preta e mais alteradas de coloração esverdeada (Figura 14e e 14f). O solo possui uma espessura de aproximadamente 1,5 m de solo + saprólito com o predomínio da cor cinza. No horizonte R observa-se uma maior quantidade de partículas cinzas e pretas. O horizonte C, de cor cinza alterando a marrom, possui aproximadamente 0,8 m, com porções de basalto alteradas entre a coloração cinza (horizonte R) e escura (horizonte A). No horizonte A observa-se matéria orgânica (gramíneas), e um solo com tonalidade mais escura. Neste local, o solo é quebradiço (torrões), apresenta cerosidade com fraturas horizontais e verticais (estrutura laminar), não possui grande elasticidade quanto ao solo (S2), quando molhado há sensação sedosidade, possui plasticidade, mas não é pegajoso (argila cinza), trata-se de um solo muito mais quebradiço (seco). Nestas amostras, observou-se o mesmo comportamento que o sistema R2-S2, as alterações são intensas ao mesmo tempo a complexidade mineralógica da rocha é maior que o sistema R1-S1 (Figuras 29, 30 e 31).

### *5.1 – Caráter geoquímico das amostras de rochas e solos*

Diagramas de variação foram popularizados após 1909 por Alfred Harker, tratando-se de um tipo particular de diagrama em que  $\text{SiO}_2$  é representado no eixo X; usualmente chamado de Diagrama de Harker (ROLLINSON, 1993). Neste trabalho, foram construídos diagramas de Harker para elementos maiores e traços, visando observar a sua concentração e comportamento quanto ao intemperismo (Figura 15).

Os óxidos de sódio, cálcio, magnésio e potássio costumam ser os primeiros a serem removidos no processo de intemperismo, acompanhando a sílica, o que geralmente não se verifica com os óxidos de alumínio, titânio, fósforo e ferro. Esses elementos são os menos mobilizados, ocorrendo um aumento na sua concentração nos perfis dos solos (S1, S2 e S3), o mesmo ocorrendo com o zircônio, nióbio, tório, bário e ítrio. Os valores de  $\text{SiO}_2$  são maiores para as amostras R1 e S1, o que está de acordo com o caráter mais arenoso destas amostras.

Assim, na projeção para as amostras do sistema R2-S2 e R3-S3 pode-se observar o comportamento em três diferentes grupos; o primeiro com tendências diferentes nos tipos de rocha R2 e R3 (Cs, Y e Ba); o segundo com tendência a aumentar a concentração com a redução de  $\text{SiO}_2$  ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , Zr, Nb e Th); e o terceiro com tendência a diminuir a concentração dos óxidos  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ , e  $\text{MnO}$ . Já a projeção do sistema

R1-S1 mostra comportamento oposto para Nb e Th, sendo pequena a diferença para os outros elementos projetados.

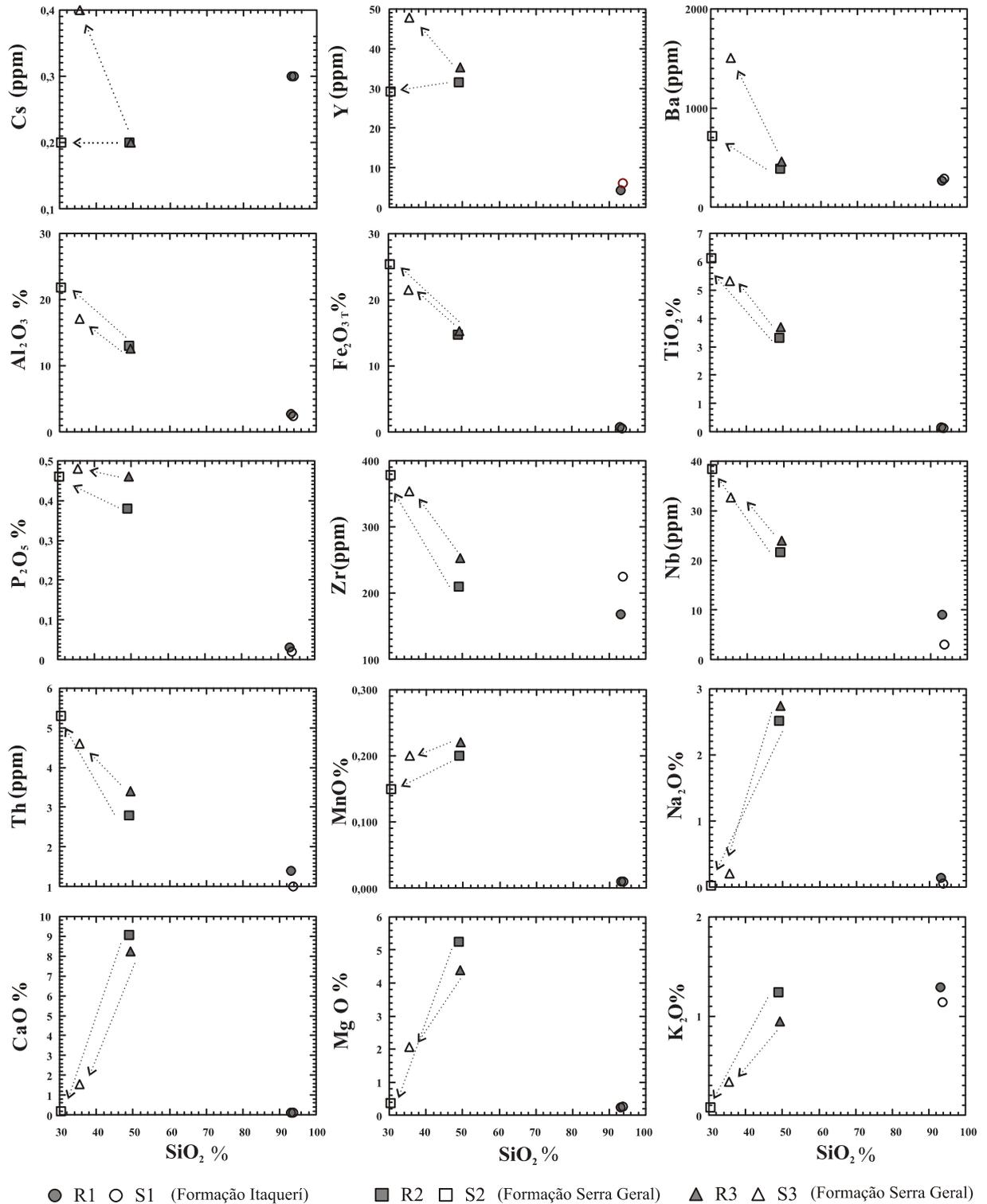


Figura 15. Projeção dos resultados obtidos no diagrama de variação de Harker, para elementos maiores (% em peso) e traços ( $\mu\text{g/g}$ ). As flechas indicam o comportamento da alteração das amostras de rochas para as amostras de solos.

A relação entre a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e a quantidade total de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) é considerada como uma mais importante para a discriminação entre os diferentes tipos de rochas de natureza ígnea, por envolver dois conceitos fundamentais: a acidez e a alcalinidade. Quando as amostras de basalto da Formação Serra Geral (R2 e R3) são lançadas em diagramas deste tipo como o de LEMAITRE (1989), observa-se que as duas amostras apresentam caráter básico, com uma porcentagem de  $\text{SiO}_2$  entre 49,54 % e 50,35 %, respectivamente (Figura 16).

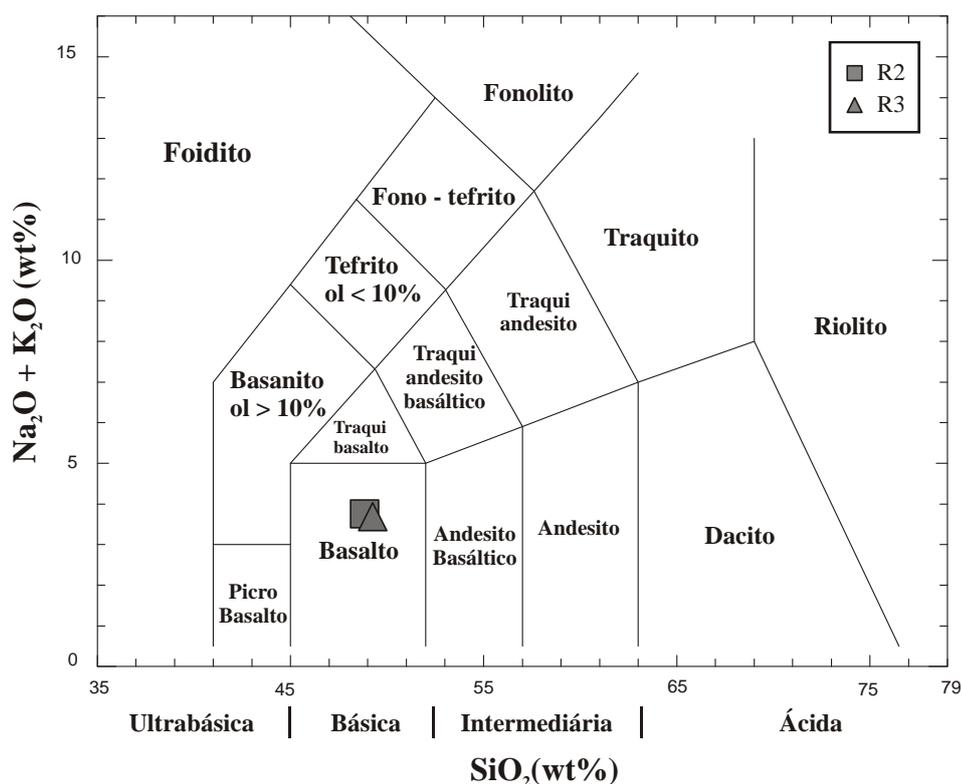


Figura 16. Diagrama tipo TAS (álcalis x sílica), segundo LEMAITRE, 1989.

Com as análises de rocha total das amostras R2 e R3, foi possível identificar a série magmática toleítica de acordo com o diagrama AFM (IRVINE & BARAGAR, 1971). Este diagrama ternário é composto pelos vértices A = ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), F = ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e M = ( $\text{MgO}$ ). Deste modo, as duas amostras coletadas na bacia do Rio Jaú caem no campo das séries toleíticas (Figura 17), esperadas para os basaltos da Formação Serra Geral, de magmatismo intracontinental, conforme citado no capítulo 3 (item 3.4, contexto geológico).

Neste trabalho, para classificar a rocha da Formação Itaquerí (R1), foi utilizado o diagrama de HERRON (1988). O diagrama utiliza  $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$  vs  $\log(\text{Na}_2/\text{K}_2\text{O})$ . No gráfico (Figura 18) foram plotadas as amostras de rocha (R1) e solo (S1). Os resultados

indicam que ambas são classificadas como subarcoseanas, estando à amostra de solo figurada no limite com o quartzo arenito. Os dados corroboram a citação de RICCOMINI (1997) de que arenitos com granulometria variável, de muito fina e siltítica até grossa, são eventualmente silicificados, podendo ser arcoseanos.

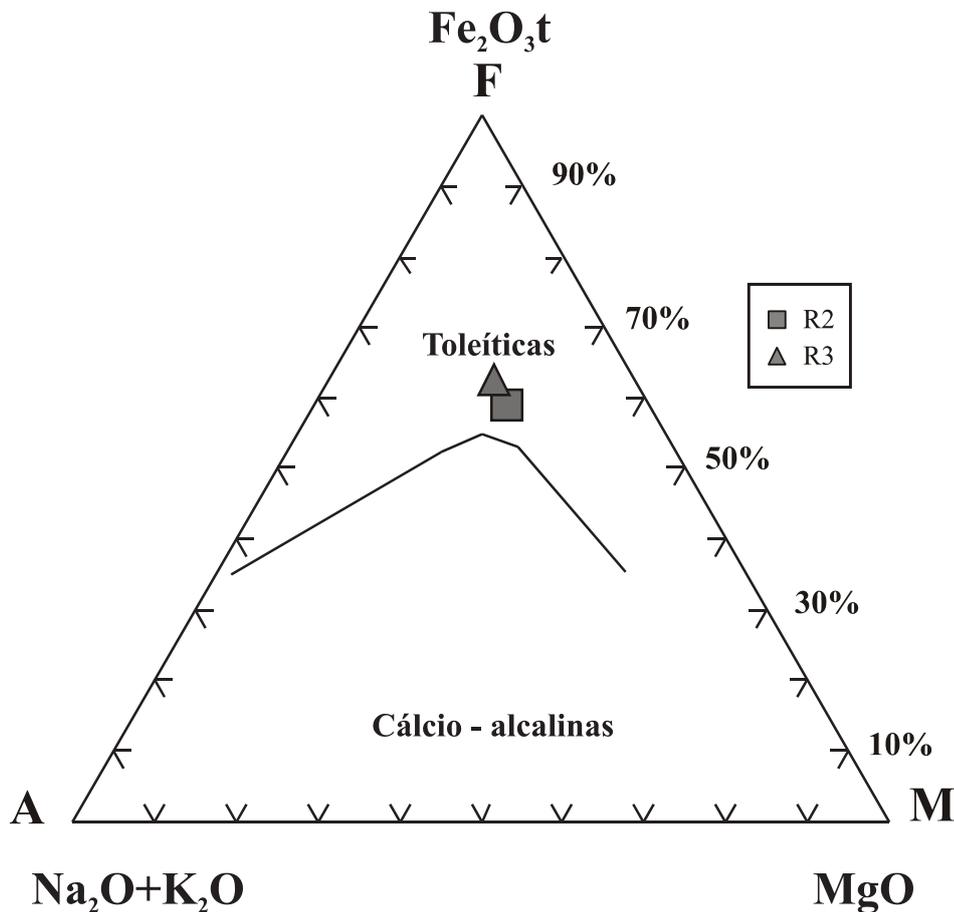


Figura 17. Diagrama AFM elaborado por IRVINE & BARAGAR (1971).

Para a análise da proveniência das amostras de rocha da Formação Itaquerí (R1) foi utilizado o diagrama de ROSER & KORSCH (1988), que classifica assinaturas de suítes areníticas-argilíticas utilizando elementos maiores (óxidos). De acordo com as funções para determinar agrupamentos de fácies ou grupos que ocorrem naturalmente, D1 e D2 ( $D1 = -1,773\text{TiO}_2 + 0,607\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,76\text{Fe}_2\text{O}_3 - 1,5\text{MgO} + 0,616\text{CaO} + 0,509\text{Na}_2\text{O} - 1,224\text{K}_2\text{O} - 9,09$ ;  $D2 = 0,445\text{TiO}_2 + 0,07\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,25\text{Fe}_2\text{O}_3 - 1,142\text{MgO} + 0,438\text{CaO} + 1,475\text{Na}_2\text{O} + 1,426\text{K}_2\text{O} - 6,861$ ) as amostras estudadas (R1 e S1) são classificadas como subarcoseanas, localizando-se no campo das rochas areníticas-argilíticas cuja proveniência é de terrenos retrabalhados, conforme se observa na Figura 19.

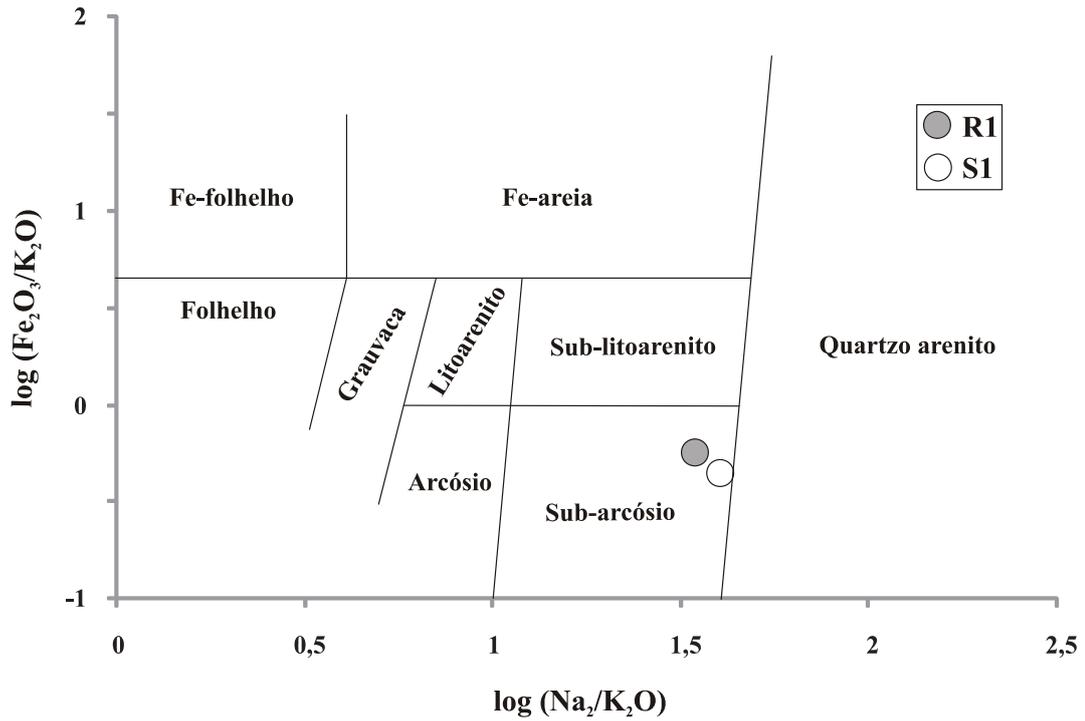


Figura 18. Classificação de arenitos e argilas, utilizando o Diagrama de HERRON, (1988).

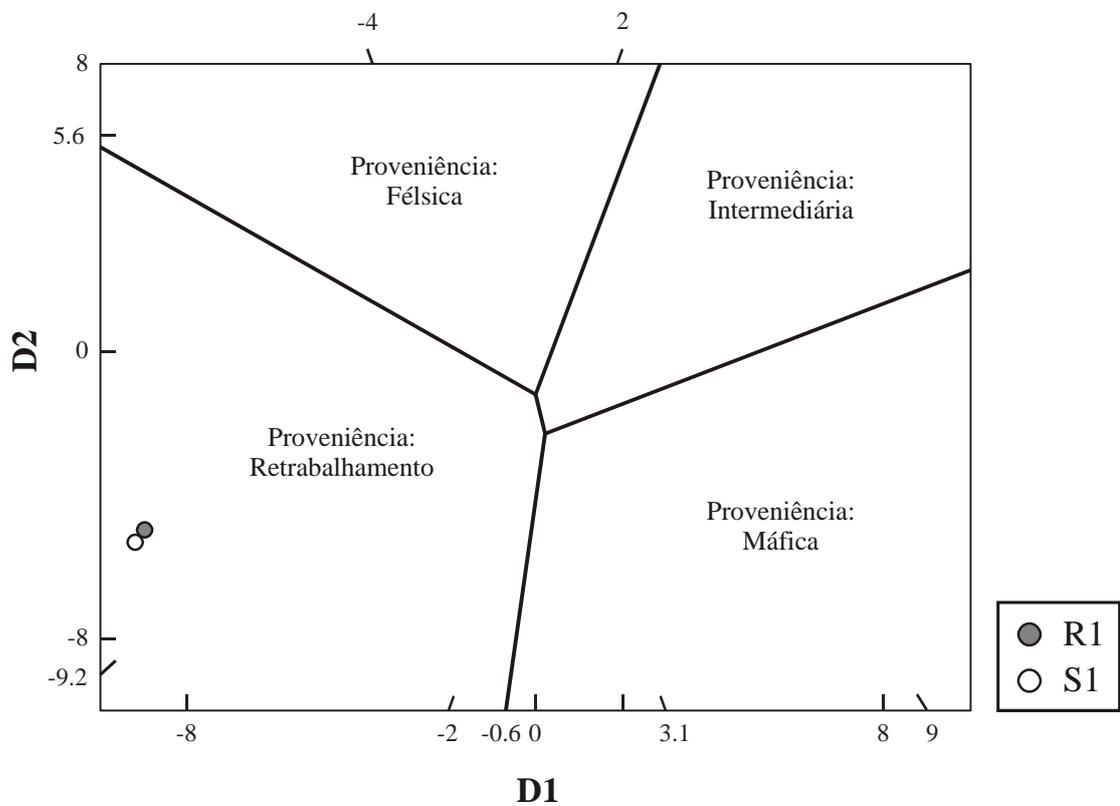


Figura 19. Diagrama discriminante de proveniência de suítes areníticas-argilíticas, ROSER & KORSCH (1988).

Os ETRs são considerados relativamente imóveis durante o metamorfismo de baixo grau, intemperismo e alteração hidrotermal. Entretanto, os ETRs não são totalmente imóveis e deve-se ter cuidado na interpretação dos padrões de ETRs de rochas fortemente alteradas ou metamorfasadas. Contudo, padrões de ETRs, mesmo em rochas levemente alteradas, podem apresentar a composição original da fonte inalterada (ROLLINSON, 1993). Os teores de ETRs (Figura 20) das amostras foram analisados através de diagrama multielementar e normalizados pelo Condrito C1 de EVENSEN et al., (1978, *apud* ROLLINSON, 1993).

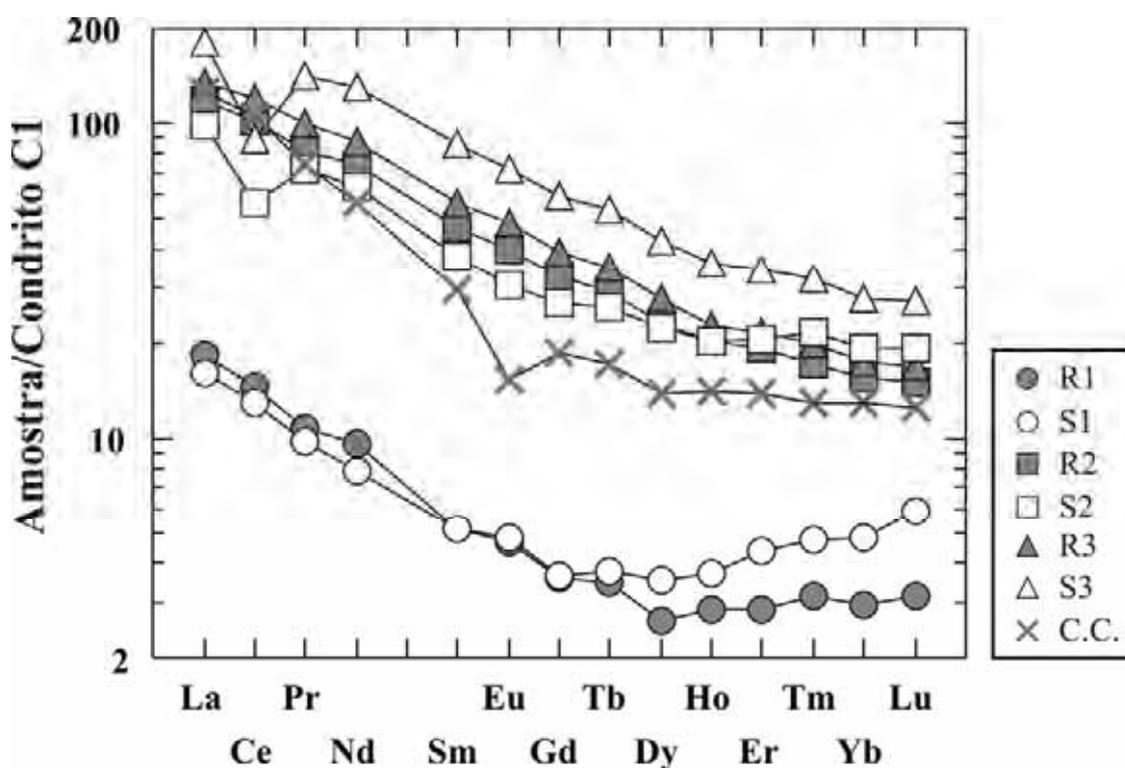


Figura 20. Diagrama multielementar ilustrando o padrão de distribuição de ETRs em relação à média da crosta continental superior (C.C.). Dados normalizados pela média dos Condritos C1 (EVENSEN et al., 1978 *apud* ROLLINSON, 1993).

A amostra normalizada de rocha sedimentar e solo provenientes da Formação Itaquerí (R1 e S1), apresentam uma somatória de ETRs de 22,96 ppm e 21,56 ppm, respectivamente. Exibem padrões regulares/homogêneos caracterizados por um relativo empobrecimento dos ETRs pesados em relação aos ETRs leves, no entanto, há um enriquecimento de ETRs pesados no solo (S1). A razão La/Lu para a rocha (R1) 53,75 e solo (S1) de 25,33 indica o padrão de enriquecimento em terras raras leves em relação às pesadas. Carbonatos e quartzo têm o efeito de diluir os ETRs, significando que ETRs continuam no sedimento, porém

quando outros minerais são movimentados (entrando ou saindo) ocorre diluição ou aumento da concentração.

As amostras normalizadas de rochas ígneas e solos provenientes da Formação Serra Geral (R2 e S2, R3 e S3) apresentam a seguinte concentração total de ETRs, R2 = 165,31 ppm e S2 = 143,85 ppm; R3 = 196,26 ppm e S3 = 269,65 ppm. Exibem um padrão de enriquecimento em terras raras leves em relação às pesadas (La/Lu), que variam de 72,89 para 47,76 nas amostras R2 e S2, e de 74,65 para 61,88 nas amostras R3 e S3. No caso de R2 e S2 ocorre um empobrecimento de ETRs leves e um enriquecimento relativo de ETRs pesados no solo (S2). Nas amostras R3 e S3 ocorre em geral um enriquecimento relativo de ETRs, provavelmente devido à ação de intemperismo da rocha, a qual é submetida à lixiviação de óxidos e traços, acarretando um empobrecimento/enriquecimento relativo de ETRs.

A análise desses dados leva ao reconhecimento dos três sistemas estudados para a análise de intemperismo na bacia do Rio Jaú: o sistema R1-S1 que se apresentam os elementos (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu) mais enriquecidos no solo em relação à rocha fresca, os que estão empobrecidos em relação à rocha fresca (La, Ce, Pr e Nd), os que não apresentam tendência bem marcada, variando apenas ligeiramente (Sm, Eu e Gd); sistema R2-S2 que apresenta enriquecimento no solo de (Er, Tm, Yb e Lu) os que estão nitidamente empobrecidos em relação a rocha fresca (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd e Tb); os que não apresentam tendência bem marcada, variando apenas ligeiramente (Dy e Ho); e o sistema R3-S3 que apresenta anomalia negativa do Ce, mais empobrecido em relação a rocha fresca, sendo os demais elementos analisados, mais enriquecidos no solo em relação à rocha fresca. Os solos das rochas basálticas apresentam anomalia negativa de Ce, isto pode ser devido a oxidação para  $\text{CaO}_2$  e conseqüente movimentação no solo na forma de partículas de tamanho coloidal, não mantendo assim, a mesma concentração que na rocha fresca.

Foi utilizado o diagrama  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO})-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}$  ( NESBIT & YOUNG, 1984, 1989) para se avaliar o comportamento das amostras estudadas frente ao intemperismo (Figura 21). O deslocamento observado no gráfico representa os estágios de intemperismo (degradação) das amostras de rochas (R1, R2 e R3) para as amostras de solos (S1, S2 e S3), confirmando os aspectos vistos em campo.

As amostras de rochas sedimentares da Formação Itaquerí (R1) e S1 (ricas em quartzo) ficam aglutinadas em um campo distante do eixo  $(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ , portanto, na região de menor concentração destes óxidos, provavelmente devido à retirada dos cátions durante o intemperismo e sedimentação da rocha geradora. Já as amostras de rochas ígneas da Formação Serra Geral (R2 e R3) apresentam concentrações maiores de  $\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}$  que a

rocha R1, assim os solos (S2 e S3) evoluem para um estágio mais avançado de intemperismo, com a presença de argilominerais de caulinita (S2) e esmectita (S3) e conseqüente perda dos elementos (Ca e Na).

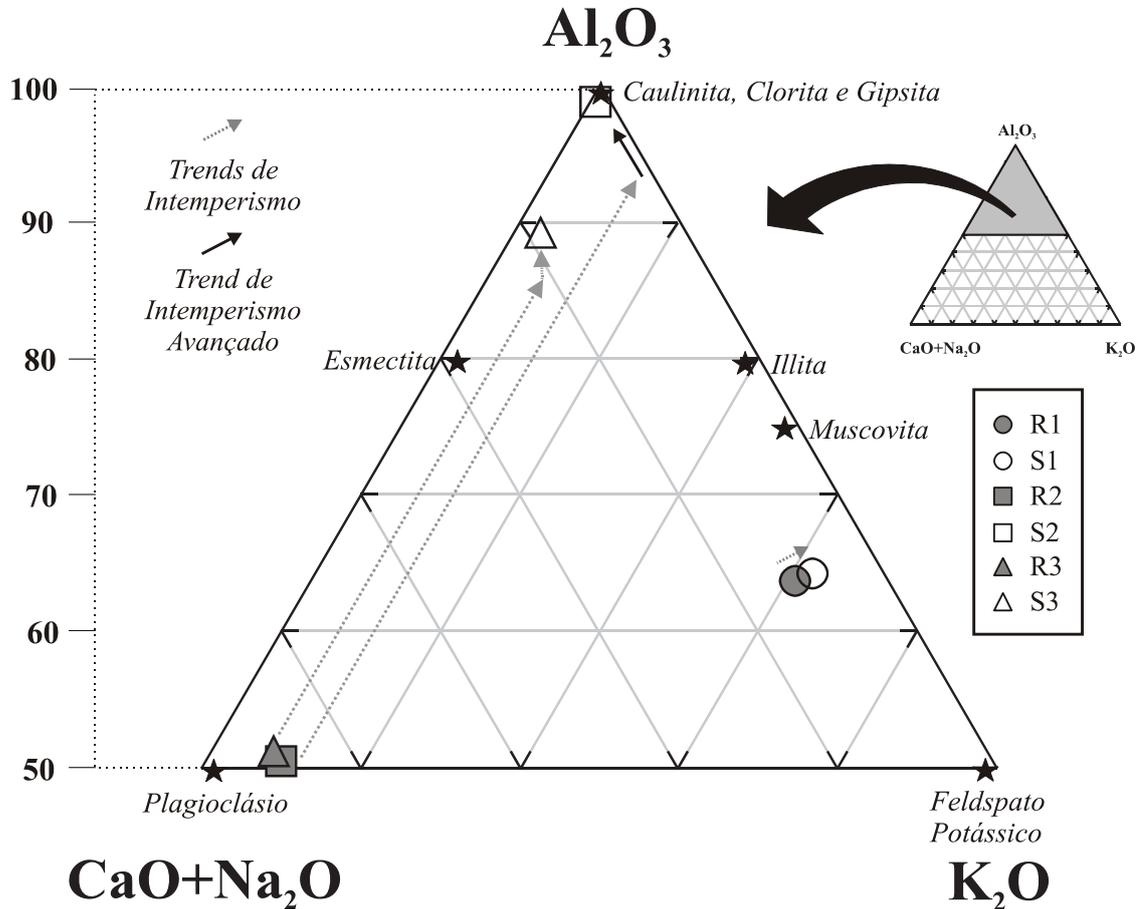


Figura 21. Diagrama com os principais óxidos (Na<sub>2</sub>O+CaO)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>O em proporções moleculares mostrando o comportamento “trends” de intemperismo das amostras de rochas para os solos (NESBITT & YOUNG 1984, 1989).

### 5.2 – Análise mineralógica por Difração de Raios X

A análise mineralógica por Difração de Raios X possibilita a identificação dos minerais presentes, permitindo também estudar as características cristalográficas destes minerais. Na Difração de Raios X a determinação de minerais é possível sempre que estes estejam presentes, geralmente em mais de 5% em volume na amostra e na forma de grãos bem cristalizados (ROVERI, 2010).

Nas Figuras 22 a 29 são apresentados os difratogramas das análises realizadas, referentes às rochas (R1, R2 e R3) e horizontes C de solos (S1, S2 e S3) coletados na bacia do

Rio Jaú. Ao todo, foram analisadas seis amostras. As siglas utilizadas para representar os minerais, em todos os difratogramas, correspondem a: (Q) = Quartzo; (Fk) Feldspato potássico; (Pl) = Plagioclásio; (Px) = Piroxênio; (Sm) = Esmeclita; (K) = Caulinita; (An) = Anortoclásio; (H) = Halosita; (Ma) = Magnetita; (Sa) = Saponita e (He) Hematita.

O difratograma na Figura 22 é referente à amostra de rocha com estratificação cruzada e coloração creme alaranjado da Formação Itaqueri (R1), coletada entre os municípios de Torrinha (SP) e Dois Córregos (SP). Pode-se verificar que os minerais encontrados correspondem à mineralogia básica da unidade, predominantemente composta de quazto (Q) e feldspato potássico (Fk), apresentando ainda alguns níveis de albita (Pl) e caulinita (K).

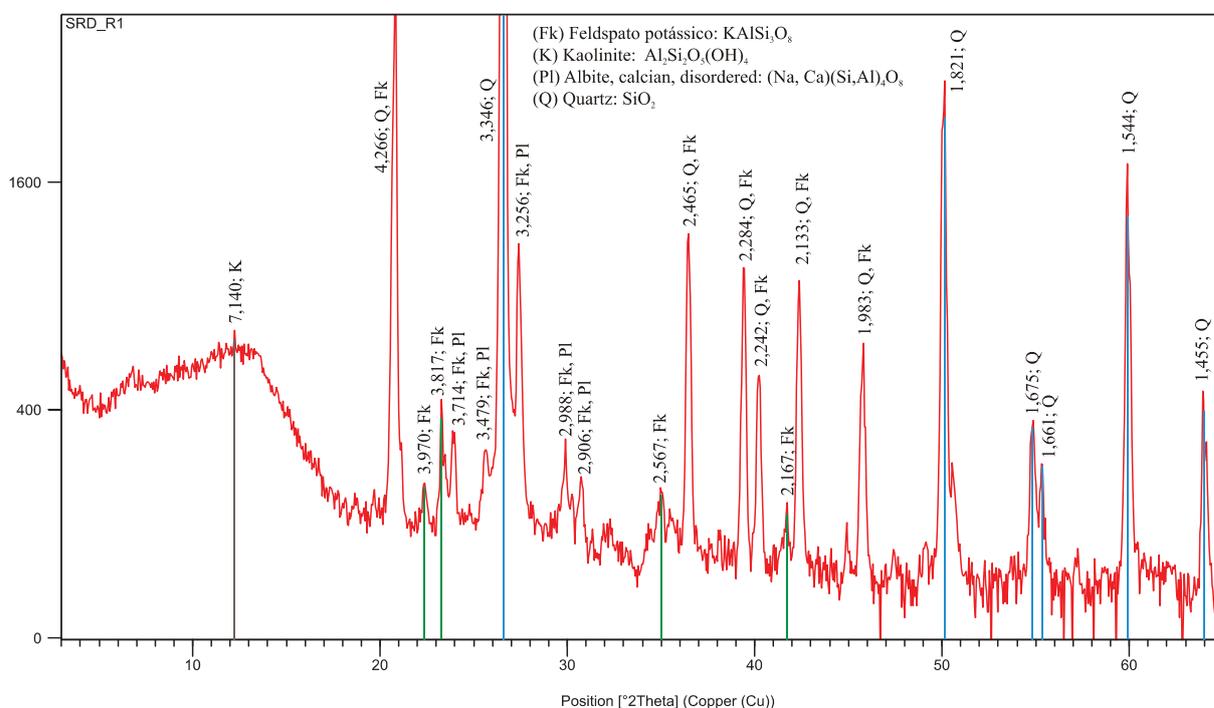


Figura 22. Difratograma da amostra de rocha da Formação Itaqueri (R1).

A Figura 23 mostra o difratograma obtido para a amostra de horizonte C do solo S1, referente à alteração da rocha da Formação Itaqueri (R1) coletada no mesmo local. Observa-se que a amostra também apresenta picos bem marcados referentes ao (Q) quartzo (principalmente o pico de 3,34 Å), mostrando que este mineral ocorre em grande quantidade. Feldspato potássico (Fk) e caulinita (K) são os outros dois principais minerais encontrados na amostra de solo.

A Figura 24 apresenta o difratograma com as duas amostras (R1) e (S1). Nota-se, pelo pico de quartzo (Q) 3,34Å, que provavelmente devido à ação do intemperismo, ocorre no solo (S1) uma concentração relativa de quartzo (Q), pela lixiviação de álcalis ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , etc.)

da rocha (R1). Outro fato observado, entre 6Å e 8 Å, ocorre formação de caulinita (K) ainda mal cristalizada, provavelmente devido a entrada de íons e água que alteram o feldspato da rocha (R1).

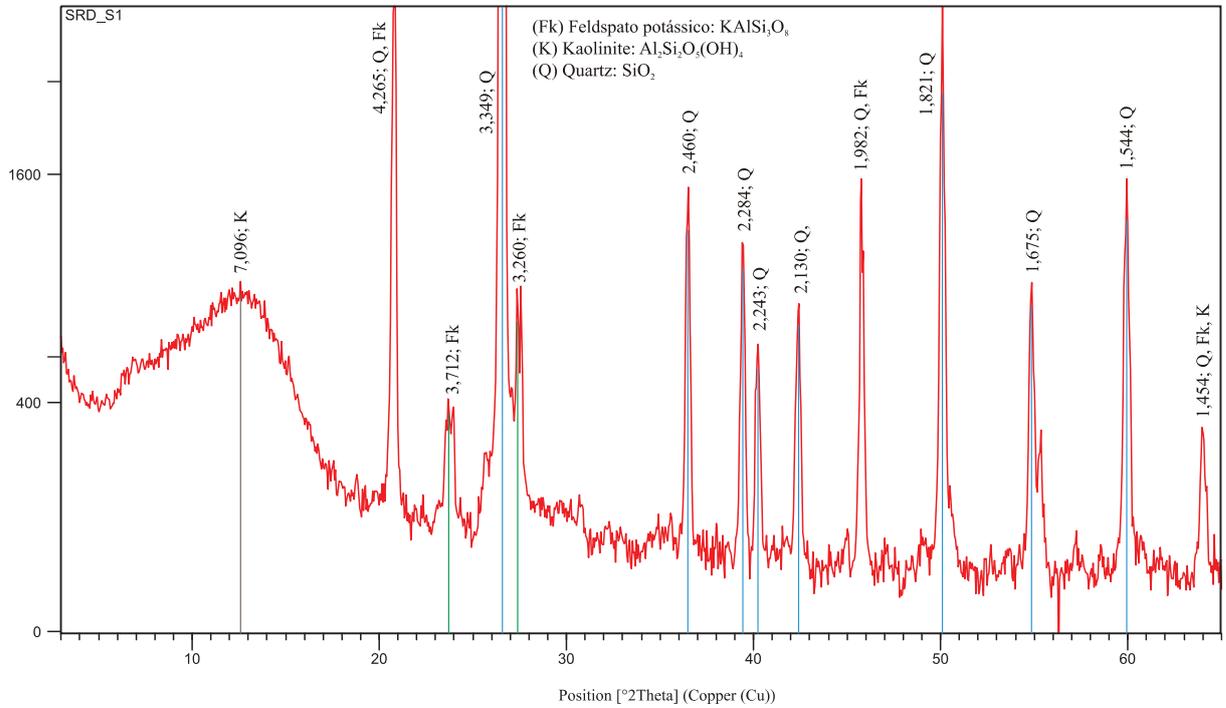


Figura 23. Difratoograma da amostra de solo (S1), horizonte C, resultante da alteração da rocha da Formação Itaquerí (R1).

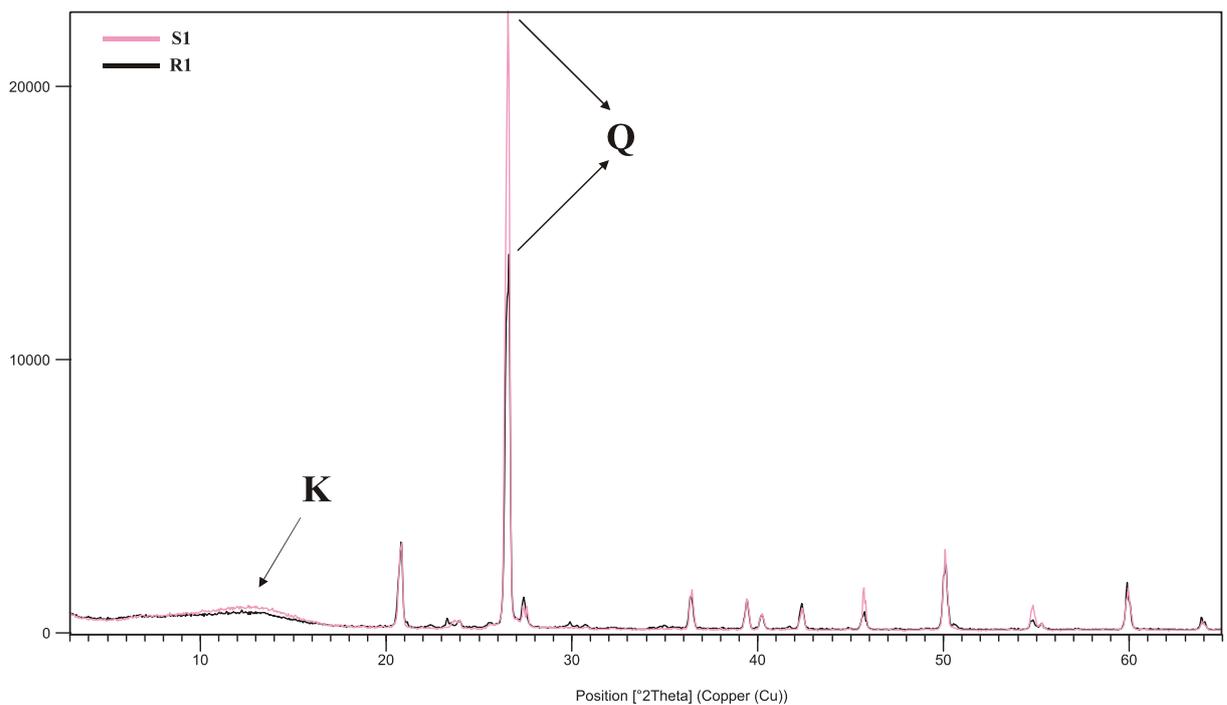


Figura 24. Difratoграмas comparando as amostras de rocha (R1) e solo (S1), horizonte C.

Na Figura 25, amostra proveniente dos basaltos da Formação Serra Geral (R2), coletada nas proximidades do município de Mineiros do Tietê (SP) pode-se observar a ocorrência de anortoclásio, num pico de 3,14 Å, provavelmente encoberto pelo pico de feldspato potássico. Quanto à mineralogia da amostra R2 (Figura 25), feldspato potássico (Fk), anortoclásio (An) e augita (Px) foram os principais minerais identificados, ao passo que esmectita (Sm) e caulinita (K) foram observadas em menores quantidades.

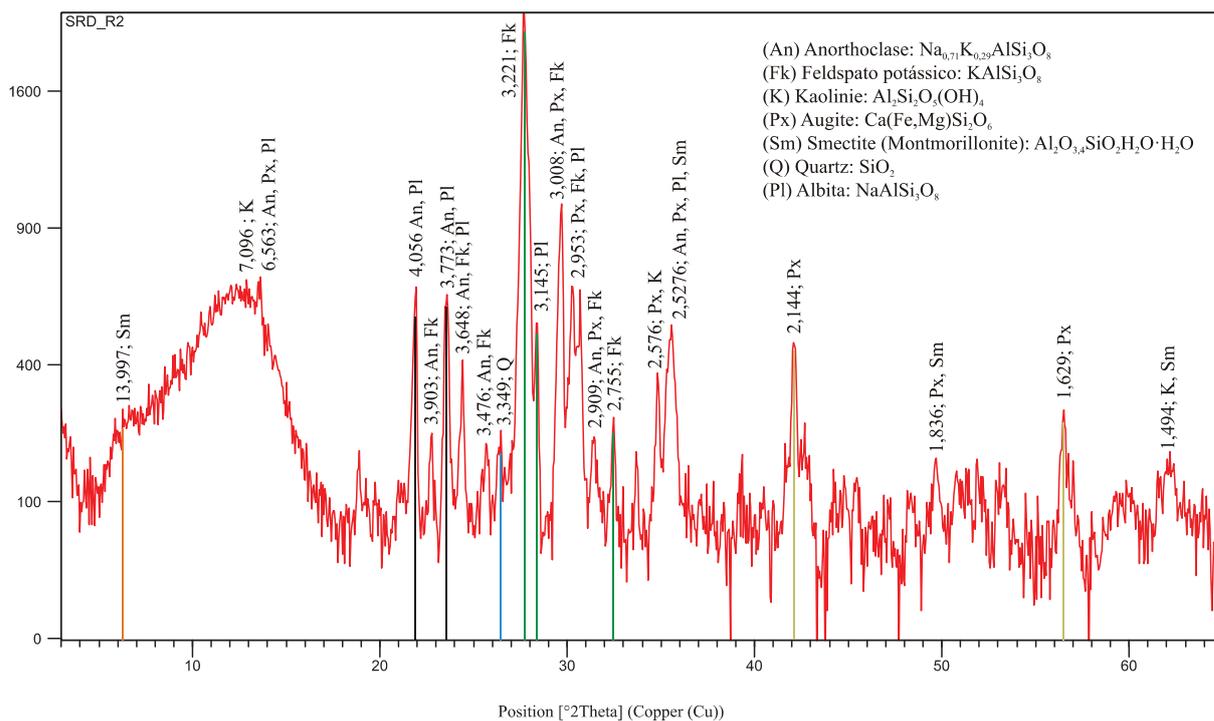


Figura 25. Difratograma da amostra de rocha da Formação Serra Geral (R2).

A amostra de solo (S2), de cor avermelhada, foi coletada junto à amostra de rocha (R2). O difratograma (Figura 26), mostra a ocorrência de argilominerais, relacionadas ao processo de alteração dos principais óxidos ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  - Figura 21), bem como ao grau de alteração do material (ocorrência de picos de caulinita, haloisita e hematita) comumente relacionado à pedogênese.

As amostras de rocha (R3) e solo (S3) foram coletadas nas proximidades do município de Jaú (SP). Neste local, encontram-se basaltos da Formação Serra Geral. O horizonte C, de cor cinza alterando a marrom, possui porções de basalto alteradas entre a coloração cinza e escura. Os difratogramas (Figuras 27 e 28) possuem em comum argilominerais de caulinita (K) e esmectita (Sm). Assim como nas amostras R2 e S2, o difratograma de solo (S3 – Figura 28) apresenta argilominerais (caulinita, haloisita e esmectita), saponita (presente em cavidades

de rochas basálticas, pela alteração de minerais de magnésio) e magnetita (comumente formada pela alteração de minerais que contém óxido de ferro).

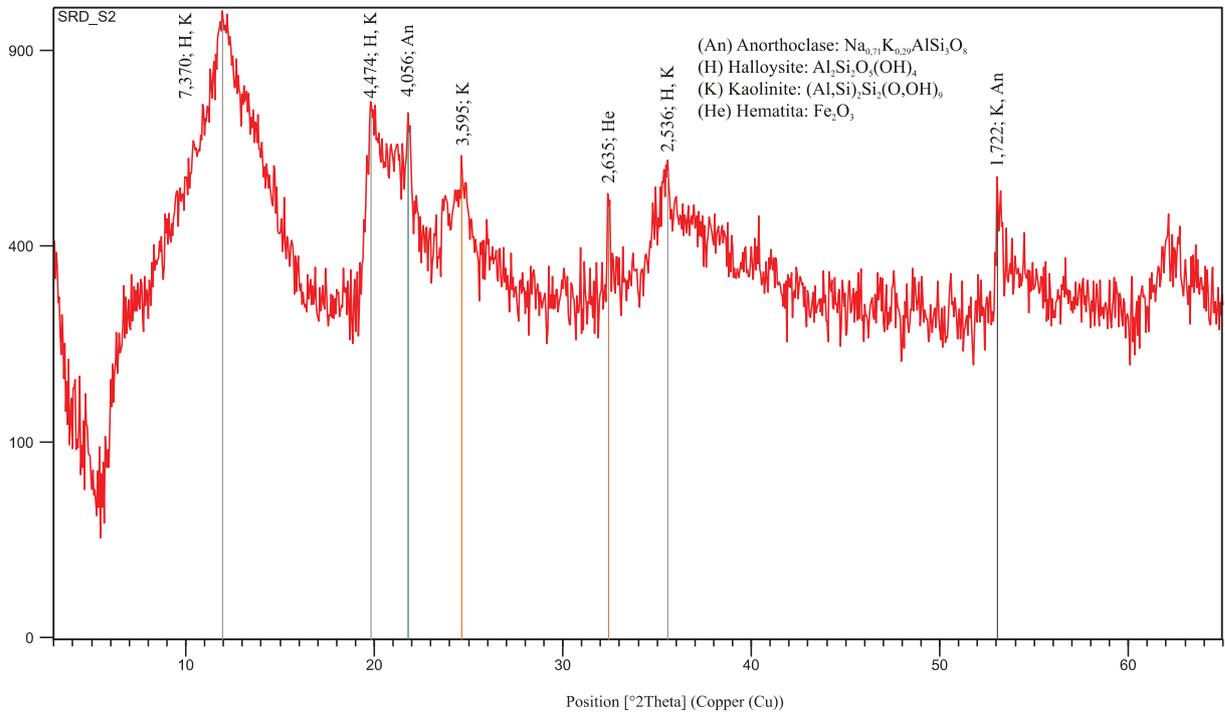


Figura 26. Difratoograma da amostra de solo (S2), horizonte C, resultante da alteração da rocha da Formação Serra Geral (R2).

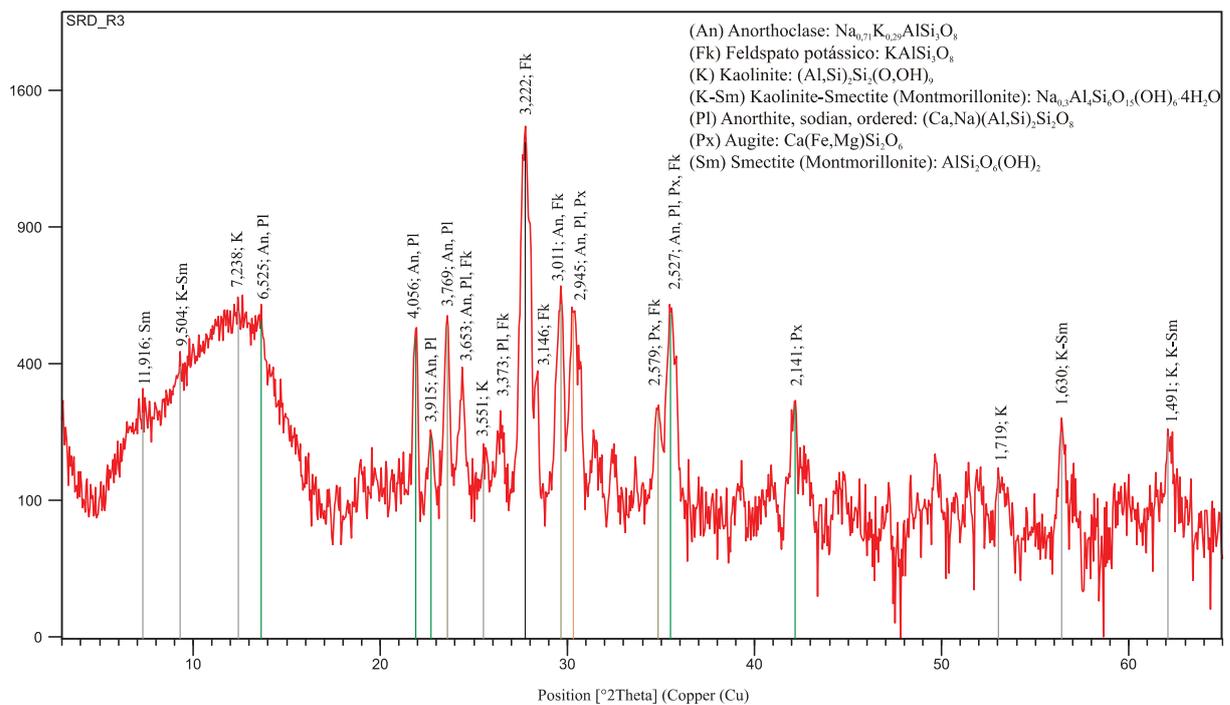


Figura 27. Difratoograma da amostra de rocha da Formação Serra Geral (R3).

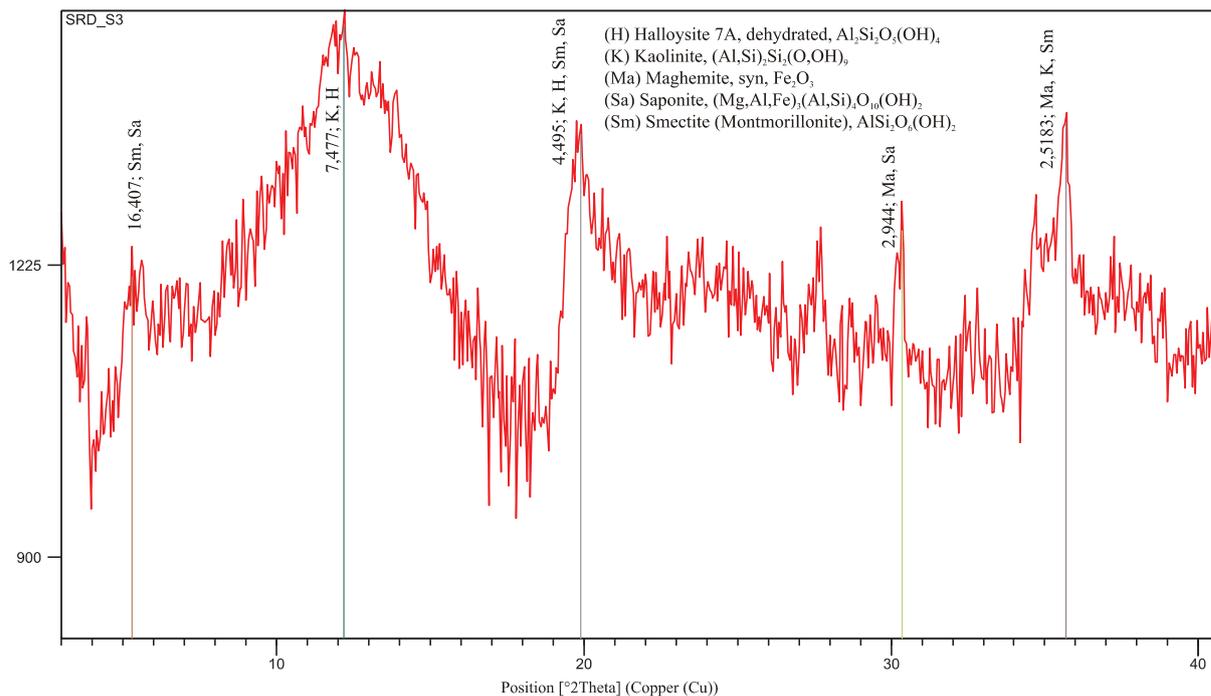


Figura 28. Difratoograma da amostra de solo (S3), horizonte C, resultante da alteração da rocha da Formação Serra Geral (R3).

A Figura 29 apresenta os difratogramas para as duas amostras de rocha (R2 e R3) e solos (S2 e S3). Os picos deslocados para distâncias interplanares maiores (esquerda do difratograma de  $7\text{\AA}$  para  $7,5\text{\AA}$  e de  $14\text{\AA}$  para  $16,5\text{\AA}$ ), significam prováveis zonas fraturadas, onde houve intensa percolação de água na rocha e em zonas superficiais, de alteração intempérica no solo (aumento de caulinita e haloisita e entrada de água na estrutura da esmectita), respectivamente (Figura 29 Sm/Sa e K/H ). Outro fator observado está na diferença entre os dois sistemas de rochas basálticas estudadas. A alteração do sistema R2 – S2 (feldspato – caulinita) ocorreu em um ambiente agitado e de alta lixiviação, bem diferente ao observado para o sistema R3 – S3, onde a alteração se deu provavelmente em um ambiente mais calmo (feldspato – smectita – caulinita), conforme a Figura 21 e 29.

### 5.3 – Balanço geoquímico Rocha x Solo

As concentrações de alguns elementos potencialmente imóveis (Al, Ti, V, Y, Th, Zr e Nb), ou elementos índice/referência (HUDSON, 1988; PRICE & VEBEL, 2003; HASKINS, 2006; FIORENTINO, 2007) foram usados para normalizar a concentração dos elementos móveis em cálculos de balanço de massa geoquímico, conforme a Equação (4) (BRIMHALL

et al., 1991; TEUTSCH et al., 1999; ANDERSON et al., 2002; LASHERAS ADOT et al., 2006).

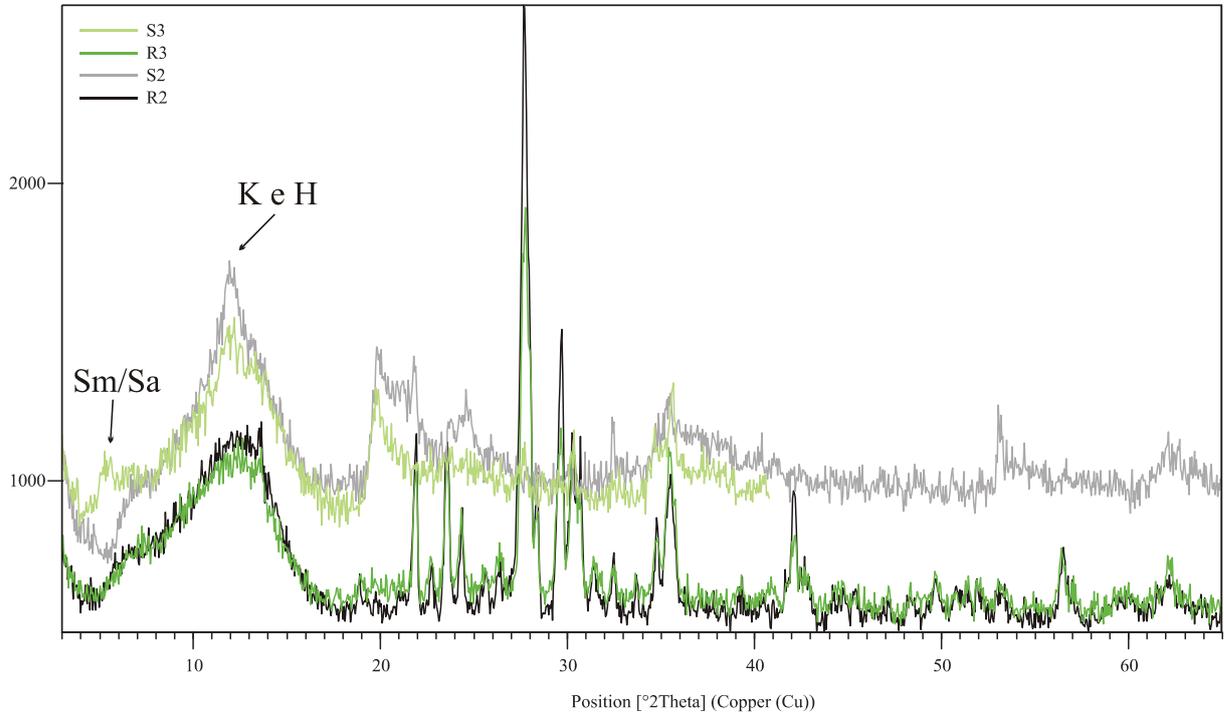


Figura 29. Difratoograma das amostras de rocha (R2 e R3) e solo (S2 e S3).

$$Xn = \left( \frac{Cns}{Cnr} \times \frac{Cir}{Cis} \right) - 1 \quad (4)$$

Onde:

*Xn*: ganho ou perda do elemento

*Cns*: concentração do elemento no solo

*Cnr*: concentração do elemento na rocha

*Cir*: concentração do elemento normalizador ou imóvel na rocha

*Cis*: concentração do elemento normalizador ou imóvel no solo

Na Figura 30 encontram-se os gráficos dos cálculos efetuados com a equação (4), para os elementos (Al, Ti, V, Y, Th, Zr e Nb) e considerando cada um deles imóvel em relação aos demais. O elemento de comportamento mais imóvel no perfil de intemperismo é aquele que mantém uma forte relação com a rocha parental, isto é, apresenta balanço geoquímico próximo de zero, praticamente sem ganho ou perda, em relação à rocha ou aos outros

elementos imóveis considerados (BRIMHALL et al., 1991; TEUTSCH et al., 1999; ANDERSON et al., 2002; LASHERAS ADOT et al., 2006).

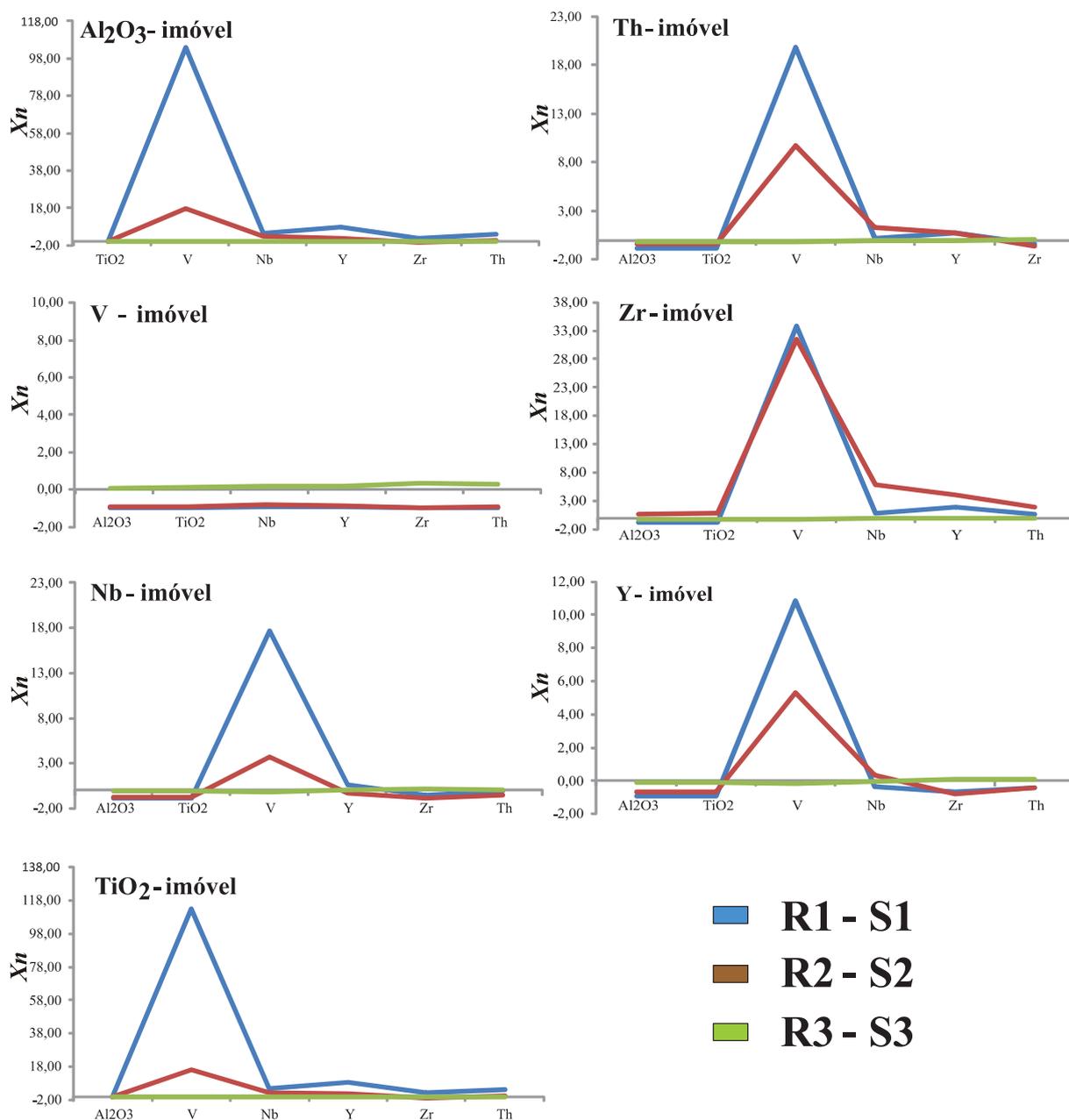


Figura 30. Balanço de massa dos possíveis elementos imóveis normalizados em base anidra, aplicando a equação (4) e considerando como elemento imóvel o indicado no gráfico.

Pelos gráficos da Figura 30, nota-se que os sistemas R1 – S1 e R2 – S2, apresentaram maior mobilidade para os elementos considerados, diferente do sistema R3 – S3 que apresenta um comportamento menos móvel no perfil de intemperismo, conforme visto nas Figuras 15, 21 e 29. Quanto ao enriquecimento/empobrecimento para o sistema R1 – S1 os elementos

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> apresentaram uma variação média de ± 0,7%, enquanto Zr, Th, Nb, Y e V apresentaram uma variação de ± 1,1%, ± 1,8%, ± 2,0 %, ± 3,4% e ± 49,8% respectivamente. O sistema R2 – S2 apresentou um enriquecimento/empobrecimento de ± 0,6% para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, e ± 0,7%, ± 0,9%, ± 1,6%, ± 2,3% e ± 14% para Zr, Th, Y, Nb e V respectivamente. Já o sistema R3 – S3 apresentou uma variação média de enriquecimento/empobrecimento diferente dos outros dois sistemas analisados, ou seja, ± 0,09% para Nb e Y, ± 0,10% para TiO<sub>2</sub>, ± 0,12% para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ± 0,14% para Th, ± 0,16% para V e ± 0,17 para Zr.

PRICE & VELBEL (2003) e HASKINS (2006) discutem vários tipos de índices de intemperismo de rochas (*Weathering potential index* – WPI; *Product index* – PI; *Silica-Alumina Ratio*; *Chemical Index of Alteration* - CIA; *Si-Ti Index*; *Chemical Index of Weathering* – CIW, *Weathering Index of Parker* – WIP, dentre outros), utilizando-se elementos maiores, especialmente metais alcalinos (K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O) e alcalino-terrosos (CaO, MgO), que são removidos do perfil durante o intemperismo. Alguns índices também incluem elementos imóveis como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub>.

Para este trabalho, foi utilizado o *Weathering Index of Parker* (WIP), ou Índice de Intemperismo de Parker, equação (4), por ser mais sensível às variações químicas das rochas silicatadas já nos primeiros estágios de alteração (HUDSON, 1988; PRICE & VELBEL, 2003). O índice WIP é calculado conforme as proporções atômicas (número de moles do óxido = % ÷ peso molecular do óxido), dos metais alcalinos e alcalino-terrosos (sódio, magnésio, potássio e cálcio) e a força de ligação com o oxigênio usado como fato de peso no denominador.

$$WIP = \left[ \left( \frac{2 \times Na_2O}{0,35} \right) + \left( \frac{MgO}{0,90} \right) + \left( \frac{2 \times K_2O}{0,25} \right) + \left( \frac{CaO}{0,70} \right) \right] \times 100 \quad (5)$$

O índice de intemperismo de Parker – WIP (Figura 31) utilizando os elementos maiores, metais alcalinos (K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O) e alcalino-terrosos (CaO, MgO), indicam que aproximadamente 15%, 96% e 75% destes elementos sofreram intemperismo e foram mobilizados das rochas (R1, R2 e R3) em relação aos solos (S1, S2 e S3) respectivamente. Os resultados reforçam as informações obtidas sobre o grau de intemperismo a partir da Figura 21 e difratogramas das Figuras 22 á 24, para as amostras da Formação Itaquerí (R1 - S1); a própria rocha fonte constitui sedimentos já retrabalhados. Já as amostras da Formação Serra Geral, de acordo com a Figura 15, 21 e com os difratogramas das Figuras 25 a 29, indicam um

solo mais intensamente intemperizado. O sistema R2 – S2 ocorreu em um ambiente agitado e de alta lixiviação, já o sistema R3 – S3, em um ambiente mais calmo, conforme a Figura 21, 29 e 31.

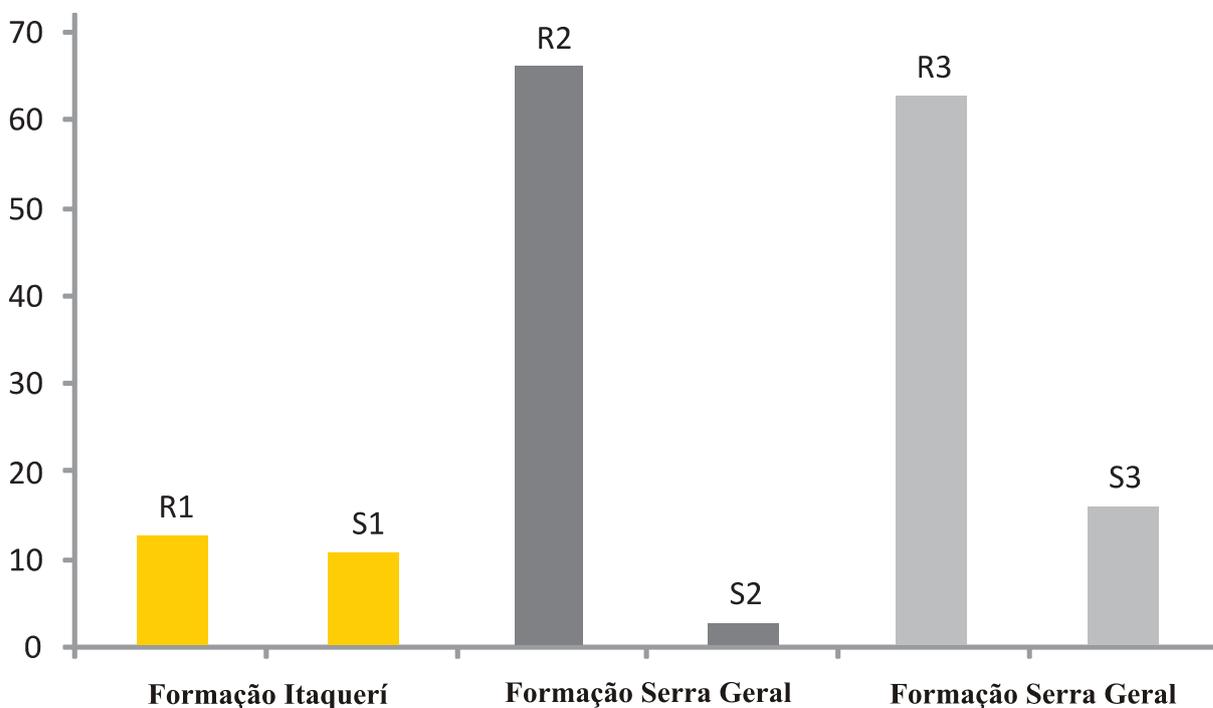


Figura 31. Índice WIP (Índice de Intemperismo de Parker) para as amostras ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $CaO$  e  $MgO$ ) normalizadas em base anidra.

As perdas e ganhos dos elementos são também usados para avaliar a sua mobilidade durante os processos de intemperismo. O balanço geoquímico dos elementos  $SiO_2$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  foi calculado pelas Equações 6 a 8 (FAURE, 1998). Como elemento normalizador na equação (4), para a Formação Itaquerí (R1 – S1) foi utilizado o  $Al_2O_3$  variação média de  $\pm 0,7\%$ , para os basaltos da Formação Serra Geral, sistema R2 – S2 também foi utilizado o  $Al_2O_3$  variação média de  $\pm 0,6\%$  e sistema R3 – S3 o elemento Nb com variação média de  $\pm 0,09\%$ .

$$K = \frac{C_{ir}}{C_{is}} \quad (6)$$

$$Remanescente = C_{ns} \times K \quad (7)$$

$$M_i = \text{Ganho (+) ou perda (-)} = \text{remanescente} - C_{nr} \quad (8)$$

O valor de  $K$  utilizando  $Al_2O_3$  como elemento normalizador para a Formação Itaqueri (R1 – S1) foi de 1,15. Para a Formação Serra Geral, sistema R2 – S2 o valor de  $K$  utilizando  $Al_2O_3$  foi de 0,515 e sistema R3 – S3 utilizando Nb o valor de  $K$  foi de 0,63. Os resultados indicam que a mobilidade dos elementos  $SiO_2$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  ocorrem nos primeiros estágios de alteração dos minerais (feldspato potássico, anortoclásio, augita, albita e anortita) nas rochas da bacia (Figuras 21 á 29), além da seguinte tendência de mobilidade dos elementos  $SiO_2 > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$  nas rochas da bacia do Rio Jaú (Figura 32).

Através dos resultados indicados nas Figuras 15, 21, 30, 31 e 32 identificaram-se os diferentes ambientes e estágios de intemperismo para os sistemas estudados na bacia do Rio Jaú: rochas sedimentares da Formação Itaqueri (R1 – S1), arenitos retrabalhados e menor taxa de alteração, quando comparados com os outros dois sistemas estudados; rochas basálticas da Formação Serra Geral, com ambiente agitado e de alta lixiviação (R2 – S2) e ambiente calmo e de menor alteração (R3 – S3), quando comparado ao sistema R2 – S2 (Figura 32).

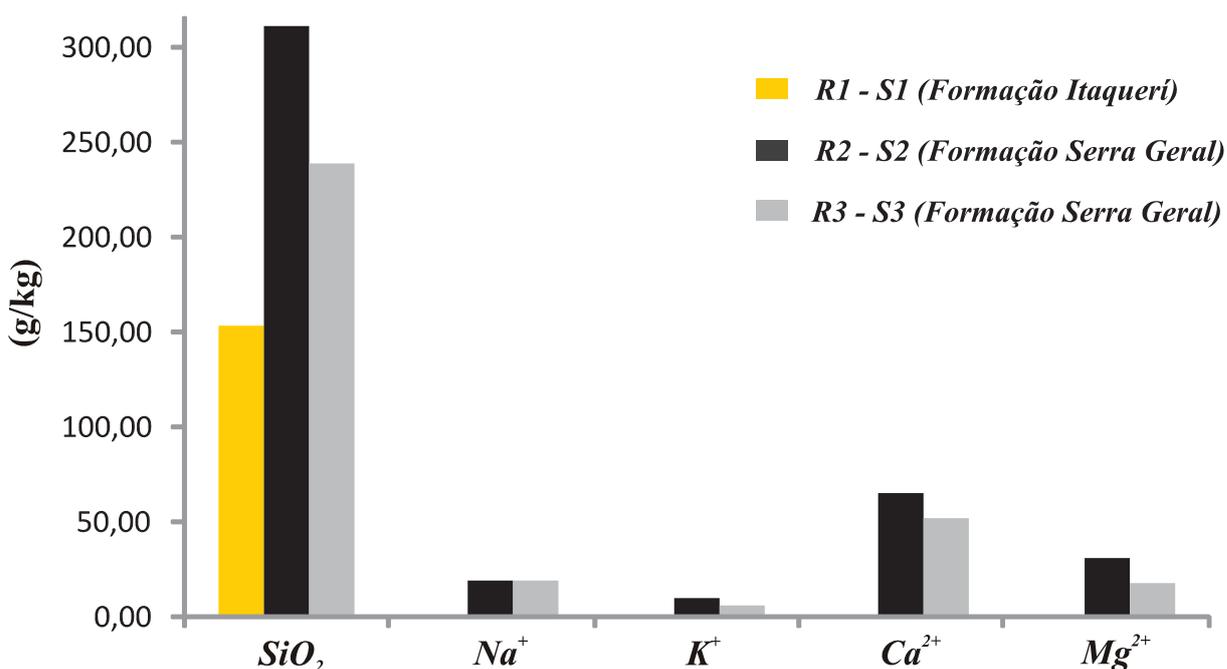


Figura 32. Mobilidade dos elementos  $SiO_2$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , da rocha (R) para o solo (S) normalizados em g/kg.

A área de ocorrência de rochas, a concentração de  $SiO_2$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e a mobilidade dos elementos nas rochas da bacia do Rio Jaú estão representados na Tabela 16. Os dados da concentração média ponderada pela área foram obtidos através da equação (9):

$$W = \sum_{i=1}^n (MiAi)/\Sigma Ai \quad (9)$$

Onde:

$W$  = Concentração média ponderada pela área

$Mi$  = Valor médio da mobilidade de elementos das rochas para o solo

$Ai$  = Área aproximada de ocorrência de rochas

Tabela 16. Concentração média ponderada pela área da mobilidade de  $SiO_2$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  normalizados, em (g/kg), das amostras de rocha para solos da bacia do Rio Jaú.

<i>Descrição</i>	<i>Área (%)</i>	<i>Amostra</i>	<i>Litotipo</i>	<i>Valor médio (g/kg)</i>				
				<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Na<sup>+</sup></i>	<i>K<sup>+</sup></i>	<i>Ca<sup>2+</sup></i>	<i>Mg<sup>2+</sup></i>
Formação Itaquerí	50,2	<b>R1 - S1</b>	Arenito	153,39	0,54	0,21	0,04	0,37
Formação Serra Geral	49,8	<b>R2 - S2</b>	Basalto	311,07	19,04	10,03	64,94	30,78
		<b>R3 - S3</b>	Basalto	239,13	19,80	5,95	52,10	17,78
<b>Concentração média ponderada pela área (W)</b>	<b>100</b>			<b>351,00</b>	<b>19,61</b>	<b>8,07</b>	<b>58,30</b>	<b>24,37</b>

## 6 – QUÍMICA DAS ÁGUAS PLUVIAIS NA BACIA

A distribuição das chuvas no Estado de São Paulo está associada ao domínio das massas tropicais (continental e marítima) e polares, com correntes de sul e leste, a disposição do relevo e a proximidade ou não do mar. Devido a essas características, conforme SANT'ANNA NETO (1995), cerca de 70 a 80% das chuvas no Estado de São Paulo são originadas dos sistemas extratropicais, através da Frente Polar Atlântica.

SANT'ANNA NETO (1995) apresentou uma carta síntese da variação espacial e temporal das chuvas, definindo oito “unidades regionais” e 25 “subunidades homogêneas” para o Estado de São Paulo. Dentre estas unidades, a bacia do Rio Jaú está compreendida na unidade Cuestas Basálticas, que corresponde à região mais elevada do centro oeste paulista, localizada entre a Depressão Periférica e o Planalto Ocidental, com altitudes entre 700 e 900 metros, que apresenta totais de chuvas médias anuais entre 1.500 e 1.800 mm. As chuvas máximas anuais registradas foram de 2.000 mm. Cerca de 40 a 50% das chuvas anuais localizam-se no trimestre mais chuvoso.

REZENDE, (2009) estudou o comportamento das chuvas na bacia do Rio Jaú entre os períodos de 1984 a 1998 e observou no período à existência de anos secos (1984, 1985, 1994 e 1998), anos chuvosos (1991 e 1995) e predominância de anos normais (1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1992, 1993, 1996 e 1997), a bacia apresenta distribuição de chuvas com o trimestre mais chuvoso de dezembro a março e o mais seco junho a agosto. A semelhança dos índices pluviométricos médios mensais e anuais da bacia do Rio Jaú entre os períodos de 1984 a 1998 indicam que a precipitação não é a causa das diferenças encontradas do comportamento fluviológico dos rios da bacia, visto que, a relação entre o coeficiente de escoamento e a variação de precipitação não é linear (REZENDE, 2009).

No período estudado, os valores de precipitação total entre agosto de 2009 e Julho de 2010 foram de 1754,40 mm, valor superior em 17%, 16% e 19% da média histórica anual de Dois Córregos (1986 a 2006), Mineiros do Tietê e Jaú (1986 a 1999) respectivamente (Figura 33). Os meses mais chuvosos foram novembro/2009 (288,90 mm), dezembro/2009 (304,90 mm) e janeiro/2010 (325,40 mm), e os meses mais secos foram maio (25,70 mm), junho (30,40 mm) e julho (45,80 mm) de 2010 (CIIAGRO, 2011).

O balanço hídrico na bacia do Rio Jaú foi calculado para o período de estudo, ou seja, entre agosto de 2009 a julho de 2010. Os resultados da Figura 34 indicam que 63% do total precipitado retornam para a atmosfera por evapotranspiração, e os 37% restantes por escoamento superficial ou percolação (recarga) na bacia do Rio Jaú.

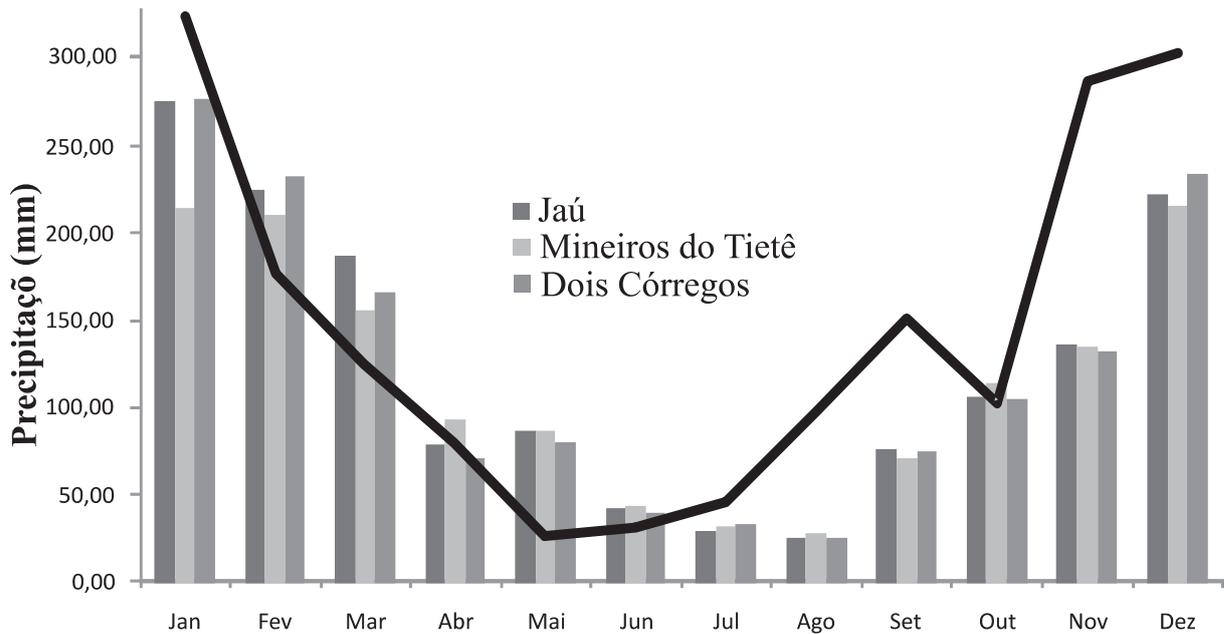


Figura 33. Precipitação média mensal de Jaú, Mineiros do Tietê e Dois Córregos (SIGRH, 2009) e precipitação mensal (agosto/09 a julho/10) na bacia do Rio Jaú (CIAGRO, 2011).

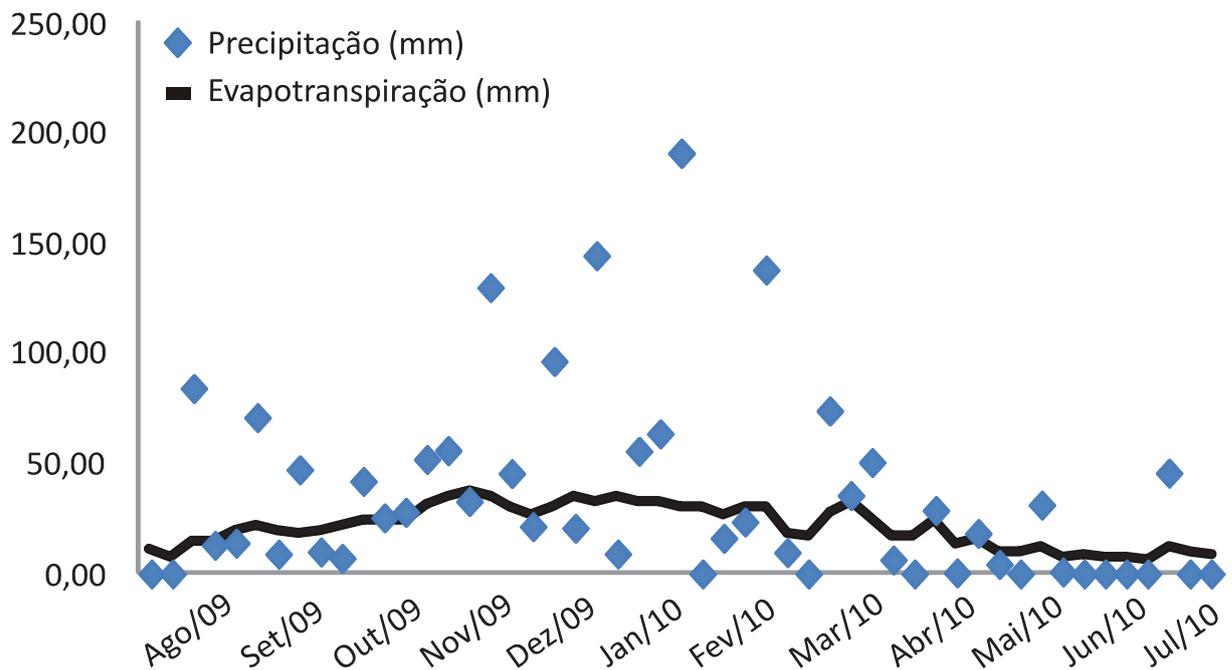


Figura 34. Balanço hídrico na bacia do Rio Jaú para o período em estudo, agosto de 2009 a julho de 2010.

Na Tabela 17 constam os valores de precipitação, pH e os teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{NO}_3^-$  para as trinta e sete amostras analisadas no município de Dois Córregos (SP), bacia do Rio Jaú.

Tabela 17. Resultados das análises das amostras de águas de chuva da bacia (valores em mg/L), exceto pH e precipitação (mm).

Data de coleta	Chuva (mm)	pH	(mg/L)								
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
19/08/2009	40,0	5,83	0,51	0,13	0,17	0,26	1,20	<sup>1</sup> ND	0,32	2,00	0,40
21/08/2009	47,0	5,92	1,99	0,54	0,38	1,31	1,50	0,40	0,32	1,00	0,70
25/08/2009	13,0	6,01	0,27	0,07	0,11	0,12	0,90	0,10	0,66	4,00	0,60
05/09/2009	14,0	6,48	<sup>1</sup> ND	1,28	0,15	0,15	0,80	<sup>1</sup> ND	0,26	1,00	0,70
09/09/2009	62,0	6,45	<sup>1</sup> ND	0,40	0,14	0,12	0,40	<sup>1</sup> ND	0,21	2,00	0,60
24/09/2009	39,0	6,66	<sup>1</sup> ND	2,19	0,19	0,14	0,30	<sup>1</sup> ND	0,22	1,00	0,70
13/10/2009	10,0	5,98	0,61	0,11	0,24	0,30	0,10	0,10	0,27	2,00	7,80
16/10/2009	32,0	6,58	<sup>1</sup> ND	2,35	0,21	0,34	1,30	5,40	0,19	1,00	9,60
19/10/2009	17,5	5,92	0,49	0,11	0,17	0,30	0,20	0,10	0,22	1,00	10,30
22/10/2009	8,0	5,56	0,52	0,16	0,12	0,43	0,90	0,10	0,39	2,00	8,20
09/11/2009	56,0	5,89	0,23	0,05	0,10	0,08	0,60	<sup>1</sup> ND	0,12	1,00	13,20
11/11/2009	3,9	6,08	0,23	0,05	0,09	0,07	1,20	<sup>1</sup> ND	0,15	1,00	9,30
21/11/2009	29,0	6,10	0,23	0,05	0,10	0,09	1,10	3,30	0,29	1,00	13,10
28/11/2009	100,0	6,15	0,30	0,07	0,11	0,08	0,70	<sup>1</sup> ND	0,00	1,00	10,80
11/12/2009	12,8	6,16	0,10	0,02	0,11	0,09	0,50	<sup>1</sup> ND	0,16	2,00	8,40
12/12/2009	21,5	5,56	0,08	0,02	0,14	0,11	0,20	<sup>1</sup> ND	0,35	2,00	11,70
16/12/2009	68,0	5,50	0,15	0,03	0,16	0,13	0,90	<sup>1</sup> ND	0,29	2,00	14,10
30/12/2009	133,5	5,35	0,16	0,03	0,13	0,10	0,20	<sup>1</sup> ND	0,30	1,00	9,20
06/01/2010	11,0	6,19	0,34	0,08	0,19	0,62	0,70	16,40	0,36	2,00	0,40
15/01/2010	51,7	6,08	0,11	0,04	0,10	0,06	2,20	9,80	0,33	2,00	0,20
20/01/2010	43,0	6,16	0,10	0,03	0,23	0,07	0,30	1,10	0,28	<sup>1</sup> ND	0,20
30/01/2010	42,0	6,07	0,14	0,02	0,11	0,03	0,60	17,40	0,10	2,00	0,20
01/02/2010	149,0	6,11	0,02	0,05	0,11	0,06	0,90	<sup>1</sup> ND	0,22	1,00	0,60
05/02/2010	3,0	6,17	0,20	0,03	0,13	0,07	0,10	0,40	0,21	1,00	0,60
11/02/2010	13,2	6,22	0,34	0,07	0,20	0,15	0,60	12,00	0,21	3,00	0,10
19/02/2010	23,6	6,09	0,11	0,02	0,11	0,02	0,30	9,00	0,15	1,00	0,20
02/03/2010	9,7	6,03	0,11	0,03	0,22	0,05	0,10	<sup>1</sup> ND	0,22	1,00	0,10
15/03/2010	69,0	6,01	0,09	0,02	0,12	0,02	0,10	3,30	0,17	2,00	0,50
21/03/2010	5,0	6,04	0,26	0,06	0,25	0,07	0,10	10,60	0,35	3,00	9,60
29/03/2010	6,0	6,05	0,32	0,04	0,23	0,06	0,10	7,60	0,45	1,00	1,50
03/04/2010	44,6	6,09	1,16	0,11	0,20	0,20	0,70	0,20	0,30	2,00	0,10
04/04/2010	6,4	6,03	0,38	0,10	0,30	0,30	1,70	1,10	0,32	2,00	0,30
26/05/2010	4,3	5,98	4,13	0,37	0,20	0,50	2,10	<sup>1</sup> ND	0,44	1,00	0,80
29/05/2010	2,8	6,06	2,81	0,22	0,20	0,10	1,40	0,30	0,27	3,00	0,90
11/06/2010	1,8	6,10	0,41	0,05	0,20	0,20	0,10	<sup>1</sup> ND	0,25	1,00	7,60
28/06/2010	1,9	6,05	7,96	1,75	0,70	3,90	1,70	2,20	1,17	8,00	9,80
14/07/2010	44,4	6,08	1,47	0,40	0,30	0,80	1,30	<sup>1</sup> ND	0,73	2,00	1,10

<sup>1</sup>ND = Não detectado

O valor de pH resultante da ionização parcial do ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) em água pura corresponde a 5,6 (GALLOWAY et al., 1982). Contudo, o limite inferior de pH para as águas de chuva acidificadas por processos naturais corresponde a 5,0 (GALLOWAY et al., 1982). Os valores de pH ficaram abaixo de 7,00 durante todo o período de coleta, com pequena variação entre o valor mínimo de 5,35 (30/12/09) e máximo de 6,66 (24/09/09).

Aportes naturais de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SiO}_2$  podem ser devido à poeira de solos e aerossóis marinhos, sendo que entradas antropogênicas de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$  devem existir devido aos aerossóis lançados para a atmosfera pela poeira de solos agrícolas onde há aplicação de fertilizantes fosfatados e queima da biomassa, conforme constatado no período de seca por CONCEIÇÃO & BONOTTO (2004). A grande maioria dos solos agrícolas brasileiros apresenta alta acidez ( $\text{pH H}_2\text{O} < 5,5$ ); estes solos exigem a aplicação de corretivos para elevar o seu pH, neutralizar os efeitos dos elementos tóxicos, fornecer  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  como nutrientes e aumentar a produtividade das culturas (VELOSO et. al., 1992).

As atividades agrícolas ocupam 82,1% de área na bacia do Rio Jaú, o cultivo da cana-de-açúcar destaca-se como predominante. Segundo MARCHIORI (2004), o plantio da cana-de-açúcar ocorre nos meses de novembro, janeiro, março e maio, e o corte entre os meses de maio, julho, setembro e novembro. Estes fatores podem estar correlacionados com as concentrações que ocorrem com os cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  nas águas de chuva da bacia do Rio Jaú.

Em relação aos ânions, não foram identificados minerais nas rochas da bacia estudada com  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  como um constituinte essencial e, conseqüentemente, pouca entrada natural desses ânions é esperada na composição das águas pluviais. A presença de ânions pode estar relacionada com aportes antropogênicos como tráfego de veículos, queima de combustíveis fósseis queimadas e carvoarias ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{Cl}^-$ ), volatilização de N derivada de fertilizantes fosfatados ( $\text{NO}_3^-$ ) e poeiras de solos agrícolas onde há aplicação de fertilizantes fosfatados ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).

A análise de correlação linear de Pearson é um método estatístico bastante utilizado para identificar o comportamento de uma variável em relação à outra, permitindo verificar se as variáveis são dependentes ou independentes. Na Tabela 18 consta a matriz de correlação envolvendo todos os parâmetros analisados para as amostras de águas pluviais. Alguns valores significativos foram encontrados, tendo como causa provável o aporte por poeiras de solos agrícolas e derivados de minerais silicatados ( $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+ = 0,89$ ), fertilizantes fosfatados ( $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{K}^+ = 0,79$ ), queima de combustíveis fósseis queimadas e carvoarias ( $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-} = 0,74$ ).

Tabela 18. Correlação ( $P \leq 0,01$ ) entre todos os parâmetros obtidos (meq/L) para as águas de pluviais na cidade de Dois Córregos (SP).

	$H^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Na^+$	$K^+$	$SiO_2$	$Cl$	$PO_4^{3-}$	$SO_4^{2-}$	$NO_3^-$
$H^+$	1									
$Ca^{2+}$	-0,16	1								
$Mg^{2+}$	-0,51	0,25	1							
$Na^+$	-0,06	0,46	0,44	1						
$K^+$	0,02	0,54	0,45	0,89	1					
$SiO_2$	-0,04	0,25	0,24	0,29	0,40	1				
$Cl$	-0,20	-0,16	-0,09	-0,04	-0,04	-0,03	1			
$PO_4^{3-}$	0,14	0,42	0,27	0,74	0,79	0,38	-0,07	1		
$SO_4^{2-}$	0,06	0,48	0,22	0,63	0,73	0,28	0,13	0,74	1	
$NO_3^-$	0,41	-0,08	0,03	-0,02	0,12	-0,11	-0,23	-0,02	0,07	1

A técnica de espectrometria alfa também foi empregada para a análise das amostras de águas pluviais, visando determinar a concentração de urânio e razão de atividade  $^{234}U/^{238}U$ . A Tabela 19 indica que a concentração de urânio nas águas de chuva ficou abaixo do limite de detecção para a amostra analisada.

Tabela 19. Resultado da análise radiométrica nas águas pluviais de Dois Córregos.

<i>Amostra</i>	<i>Volume (L)</i>	<i>Concentração <math>^{238}U</math> (ppb)</i>	<i>Razão atividade <math>^{234}U/^{238}U</math></i>
<i>Água pluvial</i>	40	<0,001	ND*

\*ND = Não detectado

### 6.1 – Concentração média ponderada pelo volume (MPV)

A Tabela 20 apresenta a concentração média ponderada pelo volume de chuva calculada segundo a equação (10), que leva em conta o volume de cada evento de precipitação, a concentração dos elementos e o volume total de chuva no local. Como algumas tempestades podem influenciar a composição química das águas de chuva (MOREIRA-NORDEMANN et al., 1997), a concentração média ponderada pelo volume foi utilizada neste trabalho para os cálculos envolvendo o período chuvoso (entre outubro a março) e o seco (entre abril e setembro).

$$MPV = \frac{\sum_{i=1}^n C_i.V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (10)$$

Onde:

*MPV* = Concentração média ponderada pelo volume

*C<sub>i</sub>* = Concentração do elemento (mg/L) medida no evento *i*

*V<sub>i</sub>* = Volume de precipitação (mm) medido no evento *i*

A Tabela 20 indica que Ca<sup>+</sup> (3,65% do total da soma de cátions analisados) e o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (50,57%) são os íons mais abundantes encontrados, com os valores médios ponderados em (mg/L) indicando a seguinte tendência: Ca<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > Na<sup>+</sup> para os cátions e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> para os ânions.

Tabela 20. Composição química das águas pluviais da bacia do Rio Jaú.

Parâmetro	MPV <sup>1</sup>	Mínimo	Máximo	Período seco	Período chuvoso	MPV <sup>1</sup>	Período	Período
							seco	chuvoso
			(mg/L)				(µeq/L)	
<i>pH</i>	5,996	5,350	6,660	6,181	5,931	----	----	----
<i>H<sup>+</sup></i>	----	----	----	----	----	1,29	1,27	1,30
<i>Ca<sup>2+</sup></i>	0,341	0,000	7,960	0,867	0,157	17,06	43,33	7,87
<i>Mg<sup>2+</sup></i>	0,244	0,020	2,350	0,587	0,124	20,33	48,92	10,34
<i>Na<sup>+</sup></i>	0,156	0,090	0,700	0,223	0,133	6,80	9,69	5,79
<i>K<sup>+</sup></i>	0,191	0,020	3,900	0,452	0,100	4,90	11,58	2,57
<i>SiO<sub>2</sub></i>	0,729	0,100	2,200	0,916	0,664	12,16	15,26	11,07
<i>Cl<sup>-</sup></i>	1,998	0,000	17,400	0,128	2,652	56,44	3,61	74,91
<i>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></i>	0,251	0,000	1,170	0,357	0,214	7,91	11,28	6,74
<i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></i>	1,438	0,000	8,000	1,795	1,313	29,95	37,39	27,35
<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	4,726	0,100	14,100	0,699	6,135	75,02	11,09	97,37
<i>Σ de cátions</i>	----	----	----	----	----	49,10	113,52	26,57
<i>Σ de ânions</i>	----	----	----	----	----	169,32	63,38	206,37

<sup>1</sup>Concentração média ponderada pelo volume - MPV.

Os valores da VMP de pH, calculado a partir das concentrações de H<sup>+</sup>, foram de 5,99 indicando uma acidez livre de 1,29 µeq/L. Os valores de pH apresentam-se um pouco maiores que o valor teórico proposto por (BERNER & BERNER, 1996) de 5,7, pois, a média ponderada pelo volume corresponde a 5,99. Na bacia do Rio Piracicaba (SP) LARA et al., (2001) analisaram a composição iônica das águas de chuva e encontraram um pH de 4,4 – 4,5,

bastante inferior ao determinado neste trabalho, no entanto, os resultados foram menores que 6,32 e 6,21 determinados por SARDINHA (2008) na bacia do Alto Sorocaba (SP) e (SANTOS, 2009) na bacia do Ribeirão Preto (SP).

Estudos realizados por MELLO (2001) no Rio de Janeiro (RJ) indicaram que os íons mais abundantes nas águas de chuva foram o  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , provenientes de aerossóis marinhos. A bacia do Rio Jaú está compreendida na unidade Cuestas Basálticas, que corresponde à região do centro oeste paulista, localizada entre a Depressão Periférica e o Planalto Ocidental, distante aproximadamente 350 km do Oceano Atlântico. As altas razões iônicas encontradas neste trabalho ( $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+ = 2,18$ ;  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+ = 1,56$ ;  $\text{K}^+/\text{Na}^+ = 1,22$ ;  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+ = 12,80$ ;  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+ = 9,21$ ; e  $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+ = 30,29$ ) em relação às águas de chuva coletadas próximas do oceano (0,0439, 0,228, 0,0218, 1,16, 0,121, e 0,0062, respectivamente, segundo WILSON, 1975) sugerem uma baixa influência marinha. Estas razões também são bem maiores que as apresentadas por MOREIRA-NORDEMANN et al., (1991) para a composição química marinha de águas de chuva do litoral paulista.

Os valores médios ponderados de  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$  são mais elevados no período seco, sugerindo que não há deposição de maneira significativa pelas águas de chuva devido à dissolução de poeiras do solo originadas pelo intemperismo dos minerais primários encontrados nesta bacia, como observado em outras bacias hidrográficas (CONCEIÇÃO & BONOTTO, 2004; SANTOS, 2009) e que, ao invés disto, são importantes as entradas antrópicas.

Com base nas concentrações MPV, as somas de cátions ( $\Sigma$  de cátions) e de ânions ( $\Sigma$  de ânions) analisados nas águas de chuva foram, respectivamente, 49,10  $\mu\text{eq/L}$  e 169,32  $\mu\text{eq/L}$ . No período seco a soma de cátions 113,52  $\mu\text{eq/L}$  é maior que a soma de ânions 63,38  $\mu\text{eq/L}$  e os cátions  $\text{Mg}^{2+}$  (28%) e  $\text{Ca}^+$  (24%) são os íons mais abundantes encontrados. No período chuvoso a soma de ânions 206,37  $\mu\text{eq/L}$  é maior que a soma de cátions 26,57  $\mu\text{eq/L}$  e os ânions  $\text{NO}_3^-$  (42%) e  $\text{Cl}^-$  (32%) são os íons mais abundantes encontrados. Os valores médios ponderados ( $\mu\text{eq/L}$ ) indicam a seguinte seqüência para todos os íons analisados na bacia do Rio Jaú:  $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{SiO}_2 > \text{PO}_4^{3-} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ \text{ e } \text{H}^+$ .

## ***6.2 – Taxa de deposição anual nas águas pluviais da bacia***

A deposição anual (Figura 35), foi obtida multiplicando-se a concentração média ponderada (mg/L) de cada íon (Tabela 20) pela precipitação ocorrida entre os meses de agosto

de 2009 a julho de 2010, (1754,4 L/m<sup>2</sup>, pois, 1 mm = 1 L/m<sup>2</sup>). A Tabela 21 apresenta a taxa de deposição anual de íons/elementos na bacia estudada, bem como a determinada em outras regiões brasileiras. Os estudos indicados na Tabela 21 são referentes a diferentes anos de amostragem, porém, todos abrangem pelo menos um ano hidrológico. Desse modo, no presente trabalho, foi feita uma análise comparativa dos resultados disponíveis para diferentes regiões.

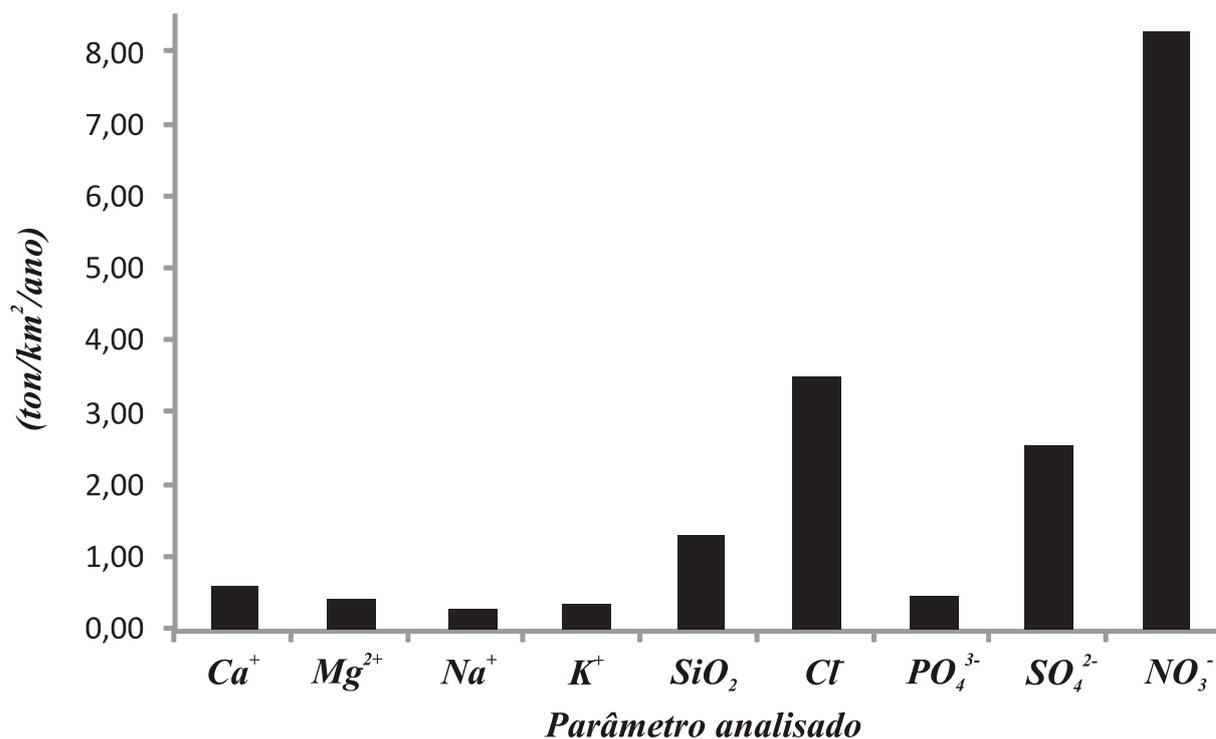


Figura 35. Aporte pluvial de íons (t/km<sup>2</sup>/ano) na bacia do Rio Jaú.

A deposição anual de Ca<sup>2+</sup> em Dois Córregos foi de (0,60 t/km<sup>2</sup>/ano). A primeira explicação para a deposição de Ca<sup>2+</sup> na bacia do Rio Jaú reside na dissolução de minerais CaCO<sub>3</sub> ou CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> proveniente de poeiras de solos, como descrito em outras áreas (MOREIRA-NORDEMANN et al., 1997; LARA et al., 2001; CONCEIÇÃO & BONOTTO, 2004; SARDINHA, 2008; SANTOS, 2009). Na bacia existem grandes áreas de exploração da cana de açúcar e a aplicação de corretivos para elevar o seu pH e fornecer Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> como nutrientes pode, conseqüentemente, liberar material particulado para a atmosfera durante as atividades de aplicação, como ocorre nas cidades de Piracicaba, Tietê, Rio Claro e Ribeirão Preto.

A deposição atmosférica anual de Mg<sup>2+</sup> (0,43 t/km<sup>2</sup>/ano) só foi menor que Rio Claro (SP) e Ribeirão Preto (SP). As entradas naturais/antrópicas de Mg<sup>2+</sup> podem ser devidas a

poeiras de solos pela dissolução de minerais, ou pelos mesmos motivos apresentados para o  $\text{Ca}^{2+}$ . Dentre as cidades apresentadas na Tabela 21, a maior deposição anual de  $\text{K}^+$  acontece em Ribeirão Preto (SP), provavelmente devido a poeiras de solos derivados de silicatos e de poeiras de solos agrícolas, nos quais são aplicados fertilizantes (a região de estudo caracteriza-se por ser agrícola).

Tabela 21. Aporte pluvial de cátions e ânions ( $\text{t}/\text{km}^2/\text{ano}$ ) em diferentes regiões brasileiras.

	<sup>a</sup> Manaus	<sup>b</sup> Rio Claro	<sup>c</sup> Piracicaba	<sup>d</sup> Campo Grande	<sup>e</sup> Cubatão	<sup>f</sup> Ibiúna	<sup>g</sup> Ribeirão Preto	<sup>h</sup> Piracicaba	<sup>i</sup> Tietê	<sup>j</sup> Dois Córregos
$\text{Ca}^{2+}$	0,13	10,42	0,12	0,13	----	5,20	9,29	1,20	1,80	0,60
$\text{Mg}^{2+}$	0,03	1,12	0,03	0,02	----	0,25	0,53	0,20	0,30	0,43
$\text{Na}^+$	0,15	1,52	0,07	0,60	5,06	2,14	2,12	0,40	0,80	0,27
$\text{K}^+$	0,90	0,41	0,13	0,11	----	1,07	1,57	0,20	0,70	0,34
$\text{SiO}_2$	----	----	----	----	----	----	----	0,30	0,50	1,28
$\text{Cl}^-$	0,45	3,46	0,28	0,51	12,39	0,98	0,60	1,10	2,10	3,51
$\text{PO}_4^{3-}$	0,00	0,55	----	----	----	0,24	0,13	--	--	0,44
$\text{SO}_4^{2-}$	0,26	3,46	0,99	0,38	7,54	6,17	3,59	1,70	2,20	2,52
$\text{NO}_3^-$	0,72	7,09	1,11	0,60	1,99	2,20	2,59	0,20	0,30	8,30

<sup>a</sup>WILLIAMS et al. (1997) <sup>b</sup>CONCEIÇÃO & BONOTTO (2004) <sup>c</sup>LARA et al. (2001) <sup>d</sup>MOREIRA-NORDEMANN et al. (1997) <sup>e</sup>DANELON & MOREIRA-NORDEMANN (1991) <sup>f</sup>SARDINHA, 2008 <sup>g</sup>SANTOS, 2009 <sup>h</sup>MORTATTI et al. (2003) <sup>i</sup>MORTATTI et al. (2008) <sup>j</sup>presente estudo.

A deposição anual de  $\text{Na}^+$  através da água de chuva em Cubatão apresentou-se muito maior do que em qualquer outra cidade, conforme esperado, pois, Cubatão localiza-se mais próximo do Oceano Atlântico, sendo o  $\text{Na}^+$  de origem predominantemente marinha. Segundo MOREIRA-NORDEMANN et al. (1997), quanto mais distante do oceano, menor será a influência de alguns íons ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) na atmosfera. Assim, não pode ser desprezada a contribuição desses íons nas águas pluviais na bacia do Rio Jaú oriundas da alteração das rochas e de origem antropogênica.

Em relação a  $\text{SiO}_2$ , os valores de deposição anual ( $1,28 \text{ t}/\text{km}^2/\text{ano}$ ) foram maiores que os valores encontrados por MORTATTI et al., 2003 em Tietê ( $0,50 \text{ t}/\text{km}^2/\text{ano}$ ), e MORTATTI et al., 2008 em Piracicaba ( $0,30 \text{ t}/\text{km}^2/\text{ano}$ ) conforme a Tabela 21. A concentração desse elemento nas águas de chuva provavelmente se deve a poeiras de solos derivados de silicatos.

A deposição anual de  $\text{Cl}^-$  na bacia ( $3,51 \text{ t}/\text{km}^2/\text{ano}$ ) encontra-se apenas menor que a de Cubatão (SP), onde as entradas atmosféricas de  $\text{Cl}^-$  são atribuídas às mesmas fontes de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Além disso, a maior taxa de deposição de  $\text{Cl}^-$  encontrada em Cubatão deve-se também a uma

grande influência marinha deste ânion, como também verificado para o  $\text{Na}^+$  (DANELON & MOREIRA-NORDEMANN, 1991). Os valores encontrados para a deposição anual de  $\text{Cl}^-$  na bacia do Rio Jaú pode ser explicado pelas fontes antrópicas de poluição, como queima de combustível fóssil por veículos, queima de carvão, incineradores, fertilizantes, combustão ou decomposição de compostos organoclorados e indústrias (SANUSI et al., 1996; NÉGREL & ROY, 1998; CONCEIÇÃO & BONOTTO, 2004; SARDINHA, 2008; SANTOS, 2009). Além da contaminação pelo cloro, usado no tratamento de águas para abastecimento público pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Dois Córregos, local de coleta das águas de chuva.

Os valores de deposição anual de  $\text{PO}_4^{3-}$  só são menores que os encontrados para a cidade de Rio Claro, já os valores de  $\text{NO}_3^-$  foram os maiores encontrados em relação às áreas comparadas na Tabela 21. Em Rio Claro, há queima de combustível fóssil e volatilização de derivados de fertilizantes nitrogenados (CONCEIÇÃO & BONOTTO, 2004). As maiores entradas atmosféricas de  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{NO}_3^-$  ocorrem devido à queima de cana-de-açúcar na região de Rio Claro, que corresponde a  $1 \times 10^5$  toneladas de matéria orgânica ou  $5 \times 10^4$  toneladas de C para a atmosfera no período de seca (LARA et al., 2001). Na bacia do Ribeirão Preto também ocorrem grandes queimadas de cana-de-açúcar, podendo os aportes antrópicos ser atribuídas a elas (no período seco) e, principalmente, a poeiras de solos agrícolas onde há aplicação de fertilizantes NPK (SANTOS, 2009). Não foram encontradas correlações entre esses dois ânions na bacia do Rio Jaú, no entanto, as altas concentrações podem estar relacionadas aos mesmos motivos apresentados para Rio Claro, Piracicaba ou Ribeirão Preto.

As deposições atmosféricas anuais de  $\text{SO}_4^{2-}$  na bacia do Rio Jaú foram maiores que Manaus, Piracicaba e Campo Grande. A deposição anual deste ânion se deve principalmente à contribuição marinha e a extensiva queima de combustível fóssil em indústrias (DANELON & MOREIRA-NORDEMANN, 1991), as quais são as principais e permanentes fontes de  $\text{SO}_x$ , que é removido como  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pela água de chuva (CONCEIÇÃO & BONOTTO, 2004). Atividades industriais que queimam combustíveis fósseis quase não ocorrem na bacia do Rio Jaú, sendo as taxas de deposição anual atribuídas às emissões geradas pela queima de biomassa e de combustíveis fósseis, principalmente no período seco.

A utilização de fertilizantes fosfatados, poeiras de solos agrícolas, queima de biomassa e de combustíveis fósseis podem ser os principais fatores que contribuem para explicar a deposição anual dos íons analisados em Dois Córregos (SP) na bacia do Rio Jaú.

## 7 – AS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA

### 7.1 – Avaliação simplificada de impactos ambientais na bacia

Na bacia do Rio Jaú foram avaliados ao todo 15 pontos (Figura 36). Os pontos de 1 a 8 foram avaliados no Ribeirão do Bugio, de 9 à 11 no Ribeirão São João, ambos tributários e formadores do Rio Jaú, onde foram avaliados os pontos de 12 a 15 (Figura 36). A Figura 37 apresenta alguns pontos que foram avaliados durante o presente estudo. Ausência da fauna no entorno do recurso hídrico, impactos na vegetação ciliar, lixo, erosão e turbidez da água são aspectos que fazem parte da paisagem na bacia do Rio Jaú.

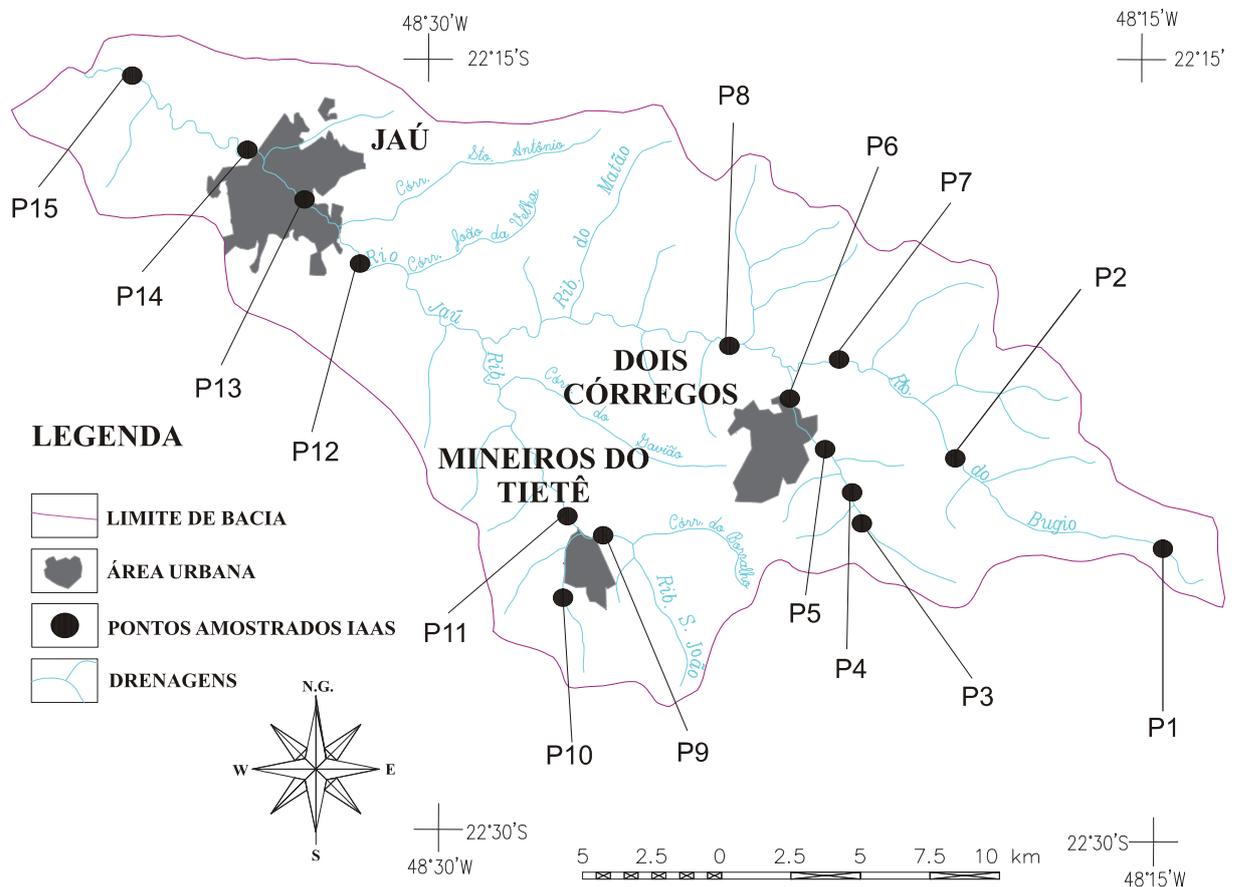


Figura 36. Mapa com os pontos avaliados pelo índice de análise ambiental simplificado.

A partir dos resultados da avaliação realizada na bacia (Tabela 22), constatou-se mínimo ou pouco impacto, sendo apenas os pontos P4, P6, P11, P13 e P14 com impactos moderados, principalmente relacionados à degradação da mata ciliar, erosão, lixo espalhado no entorno do recurso e falta de saneamento.

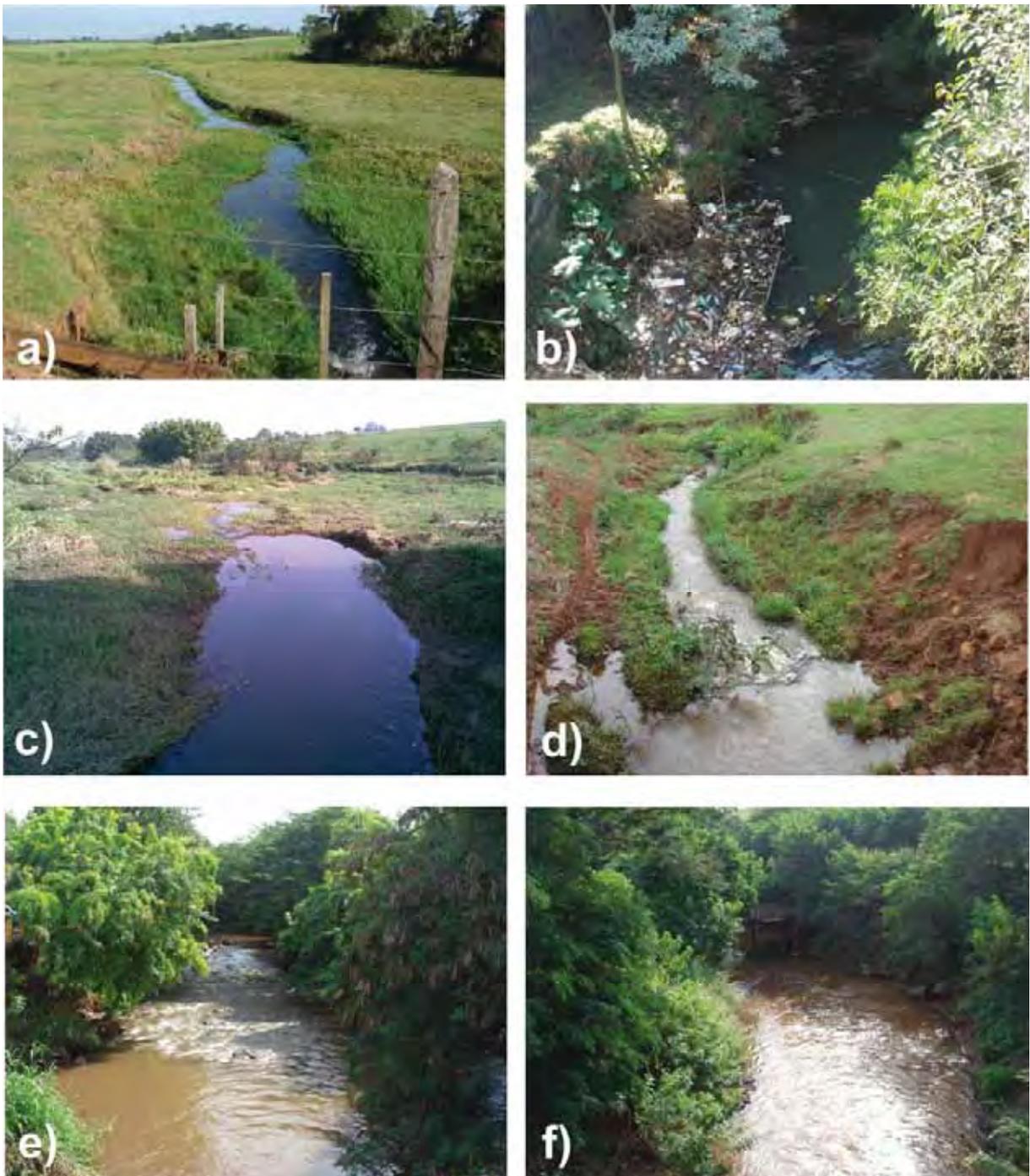


Figura 37. Pontos analisados com a avaliação simplificada de impactos ambientais. (a) e (b) Ribeirão do Bugio, pontos (P1) e (P4). (c) e (d) Ribeirão São João, pontos (P9) e (P11). (e) e (f) Rio Jaú, pontos (P13) e (P14).

Tabela 22. Resultados da aplicação do questionário de avaliação simplificada de impactos ambientais na bacia do Rio Jaú.

Ponto	Impactos na vegetação			Fauna do entorno			Erosão no entorno			Saneamento			Lixo no recurso			Turbidez								
	sem vegetação	menos de 50% vegetação	mais de 50% vegetação	ausência	pouca presença	moderada presença	grande presença	Boçoroca	Erosão de ravinhamento	Sulco/Rovina	Sem erosão	fossa e/ou esgoto	dejetos ou urina	entulhos e lixo	ausente	muito lixo	pouco lixo	lixo em latões	sem lixo	muito alto	alto	baixo	ausente	
P1	X				X				X					X				X					X	
P2		X			X					X				X				X						X
P3	X				X					X				X				X						X
P4		X		X						X		X				X						X		
P5		X			X					X				X				X						X
P6	X			X						X					X						X			
P7		X			X					X		X						X						X
P8		X		X						X				X				X				X		
P9		X			X				X					X				X				X		
P10		X			X					X				X				X						X
P11	X			X				X						X				X		X				
P12		X			X					X		X						X		X				
P13		X				X				X			X			X					X			
P14		X			X					X			X			X					X			
P15		X			X					X				X				X		X				
Ponto	Odor			Óleos			Espumas			Algas/Clorofila			Larvas e vermes			I.A.A.S.								
	muito forte	forte	fraco	ausente	muito alta	baixa	ausente	muito alta	alta	baixa	ausente	muito alto	alto	baixo	ausente	muito alta	alta	baixa	ausente	Tipo de impacto associado				
P1				X			X			X				X				X					Mínimo/pouco	
P2				X			X			X				X				X						Mínimo/pouco
P3				X			X		X				X					X						Mínimo/pouco
P4				X			X		X					X				X						Moderado
P5				X			X			X				X				X						Mínimo/pouco
P6				X		X				X			X					X						Moderado
P7				X			X		X					X				X						Mínimo/pouco
P8				X			X			X			X					X						Mínimo/pouco
P9				X			X			X				X				X						Mínimo/pouco
P10				X			X			X				X				X						Mínimo/pouco
P11			X				X			X			X					X						Moderado
P12				X			X		X					X				X						Mínimo/pouco
P13			X			X			X					X				X						Moderado
P14			X				X			X				X				X						Moderado
P15				X			X			X				X				X						Mínimo/pouco

## 7.2 – Avaliação hidroquímica das águas superficiais da bacia

Este item descreve os resultados do monitoramento conduzido para avaliar a hidroquímica fluvial na bacia do Rio Jaú, levando-se em conta as características físico-químicas e químicas. Utilizando os pontos visitados na bacia do Rio Jaú durante a avaliação ambiental simplificada, determinaram-se os pontos de coleta de amostras para a avaliação da qualidade da água nesta bacia. A Figura 38 apresenta a disposição da rede fluviométrica e as estações de amostragem das águas. A seguinte convenção para os pontos de coleta será utilizada durante o desenvolvimento deste item: P1 e P2 (Ribeirão do Bugio); P3 e P4 (Ribeirão São João); P5 e P6 (Rio Jaú).

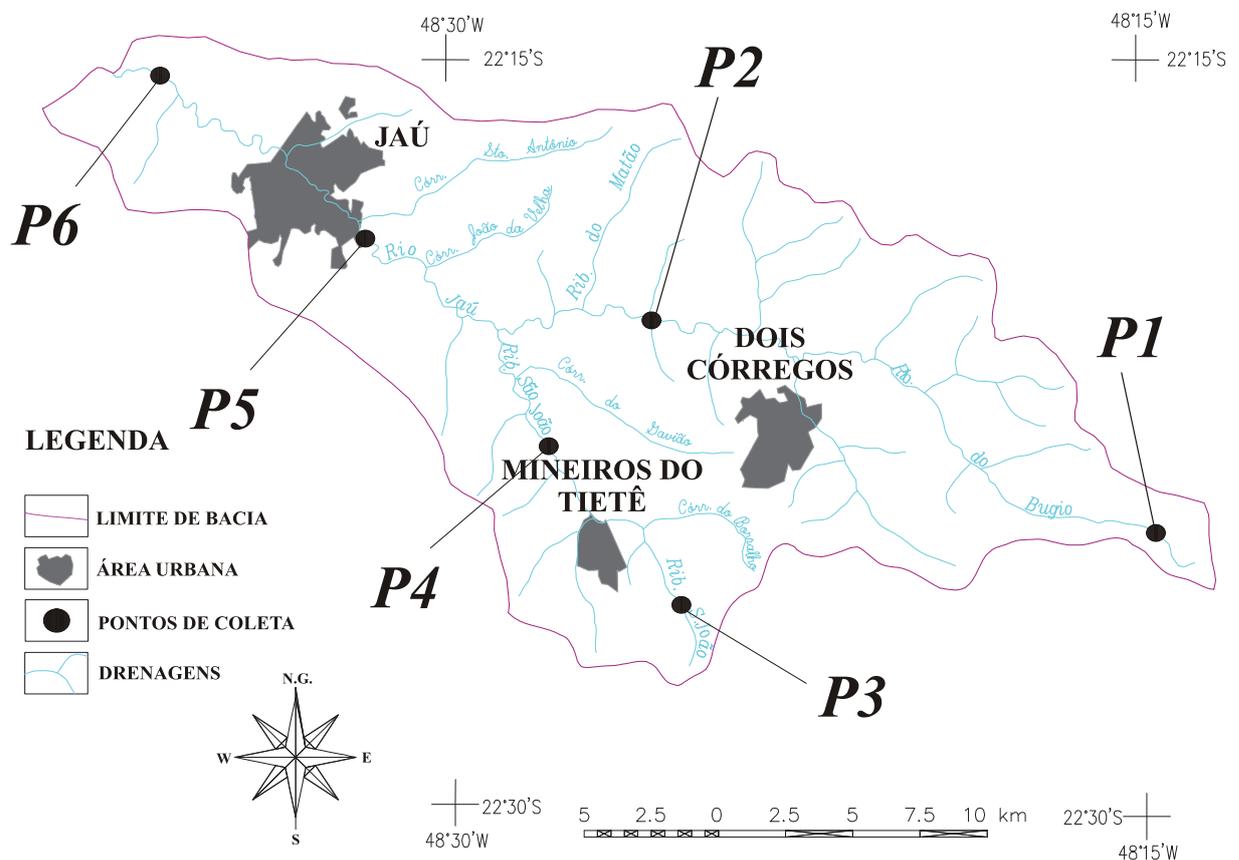


Figura 38. Pontos de coleta de amostras de água superficial na bacia do Rio Jaú. P1 e P2 (Ribeirão do Bugio); P3 e P4 (Ribeirão São João); P5 e P6 (Rio Jaú).

### 7.2.1 – Parâmetros físicos e físico-químicos

Na Tabela 23 constam os resultados obtidos para os parâmetros físicos e físico-químicos das águas fluviais dos seis pontos de amostragem da bacia do Rio Jaú.

Tabela 23. Resultados dos parâmetros físicos e físico-químicos analisados nas águas fluviais da bacia do Rio Jaú.

Data de coleta	pH	T (°C)	<sup>1</sup> ST	<sup>2</sup> STS	<sup>3</sup> STD	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SiO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
(mg/L)														
<b>Ponto 1 - Ribeirão do Bugio</b>														
14/08/09	6,17	19,20	10	6	4	2,27	0,83	0,81	1,06	3,20	0,30	0,19	2,00	7,80
17/09/09	6,09	23,30	10	4	6	2,28	0,89	0,80	1,21	4,40	0,10	0,12	4,00	0,60
17/10/09	6,69	21,60	20	8	12	3,13	1,26	0,76	1,15	2,30	0,00	0,09	3,00	11,10
20/11/09	6,17	26,50	20	6	14	1,30	0,49	0,50	0,57	0,60	0,00	0,12	3,00	1,80
23/12/09	6,47	23,40	20	8	12	2,24	0,84	0,70	0,78	3,60	0,50	0,33	2,00	0,80
12/01/10	6,06	24,10	20	12	8	2,10	0,77	0,70	0,96	1,70	0,30	0,30	5,00	0,60
<b>Ponto 2 - Ribeirão do Bugio</b>														
14/08/09	6,50	20,00	60	22	38	6,37	2,66	3,21	1,72	16,90	1,60	0,56	1,00	8,80
17/09/09	6,51	23,50	30	10	20	8,17	2,89	2,59	1,67	13,00	1,20	0,62	4,00	7,80
17/10/09	6,66	22,10	50	14	36	7,91	3,18	4,15	1,75	13,70	1,20	0,42	1,00	10,50
20/11/09	6,50	26,60	30	12	18	8,91	3,44	5,35	2,04	17,10	1,60	0,30	1,00	1,10
23/12/09	7,37	23,10	40	24	16	7,24	3,07	2,67	1,54	17,30	0,00	0,58	4,00	1,20
12/01/10	6,43	24,00	110	50	60	6,75	2,88	1,91	1,53	13,60	0,50	0,43	2,00	1,70
<b>Ponto 3 - Ribeirão São João</b>														
14/08/09	6,15	17,50	30	8	22	5,21	1,65	1,36	2,40	9,00	1,40	0,63	2,00	0,50
17/09/09	6,10	20,30	50	10	40	5,98	1,93	1,35	2,90	9,10	1,40	0,43	2,00	0,70
17/10/09	6,36	20,50	20	6	14	5,49	2,01	1,35	4,23	8,10	2,20	0,44	2,00	8,70
20/11/09	6,37	23,80	80	22	58	9,04	2,67	1,32	4,16	4,20	1,70	0,87	8,00	2,10
23/12/09	6,56	22,60	70	18	52	6,07	1,92	1,30	3,98	12,30	1,80	0,56	4,00	0,50
12/01/10	6,18	23,70	80	24	56	5,56	1,75	1,35	3,52	2,40	1,70	0,30	2,00	0,80
<b>Ponto 4 - Ribeirão São João</b>														
14/08/09	6,44	21,00	40	10	30	5,31	2,19	3,25	1,46	15,30	1,00	0,84	3,00	1,10
17/09/09	6,26	22,90	50	12	38	5,90	2,48	3,47	1,64	13,20	1,60	0,56	2,00	8,00
17/10/09	6,71	21,70	40	14	26	6,62	2,72	2,56	1,67	1,90	1,90	0,43	2,00	10,80
20/11/09	6,55	25,20	50	18	32	6,25	2,55	2,91	1,65	1,50	1,10	0,32	2,00	1,30
23/12/09	7,18	23,20	70	24	46	6,55	2,79	2,63	1,59	1,60	0,80	0,58	3,00	12,00
12/01/10	6,34	23,80	70	26	44	7,17	2,80	2,54	1,59	2,50	0,80	0,34	4,00	1,20
<b>Ponto 5 - Rio Jaú</b>														
14/08/09	6,34	21,70	20	18	2	7,71	3,08	3,64	1,56	0,60	1,30	0,28	3,00	1,30
17/09/09	6,28	23,40	40	28	12	8,08	3,32	4,00	1,76	0,50	9,40	0,82	3,00	13,60
17/10/09	6,97	23,50	30	26	4	157,14	7,49	3,50	1,91	1,20	0,90	0,40	2,00	9,00
20/11/09	6,48	27,00	70	36	34	147,55	7,50	3,70	1,93	0,70	2,10	0,81	4,00	1,00
23/12/09	7,26	24,60	90	66	24	129,57	7,20	3,45	1,70	2,00	1,50	0,17	4,00	7,50
12/01/10	6,46	24,80	110	98	12	122,05	6,36	2,13	1,42	2,00	0,90	0,24	4,00	1,40
<b>Ponto 6 - Rio Jaú</b>														
14/08/09	6,45	22,00	60	16	44	9,81	3,78	6,28	2,14	1,80	2,60	0,96	5,00	8,20
17/09/09	6,36	25,60	110	30	80	10,85	4,03	4,27	1,98	14,80	1,80	0,43	3,00	10,80
17/10/09	6,99	24,30	70	26	44	10,38	4,06	4,89	2,25	17,50	1,80	0,52	5,00	12,30
20/11/09	6,40	27,90	90	48	42	11,45	4,37	5,85	2,24	1,40	2,40	0,26	4,00	1,60
23/12/09	7,37	26,00	110	72	38	118,64	7,49	4,75	1,93	19,30	2,00	0,28	4,00	9,60
12/01/10	6,53	25,20	130	104	26	10,72	4,16	3,28	1,80	20,20	1,20	0,30	4,00	3,10

<sup>1</sup>ST = Sólidos Totais; <sup>2</sup>STS = Sólidos Totais em Suspensão; <sup>3</sup>STD = Sólidos Totais Dissolvidos (ST - STS).

A Figura 39a apresenta o hidroperíodo e as etapas de pulso (períodos hidrológicos), realizados por REZENDE, (2009) onde  $h_m$  ou  $Q_m$  (altura média ou vazão média), determinado como o limite entre os tempos distintos de potamofase (cheia ou acima da vazão média) e limnofase (estiagem ou abaixo da vazão média). No hidrograma da Figura 39b, observa-se que agosto é o mês de menor vazão, com início dos períodos de chuva entre novembro e dezembro, fim do período de estiagem e a predominância de dias acima ou abaixo da vazão média. A Figura 39c apresenta curva de permanência do Rio Jaú, indicando uma vazão específica garantida de aproximadamente (10 L/s.km) em 70% do tempo ou mais nas águas dos rios da bacia do Rio Jaú (REZENDE, 2009).

*altura/vazão*

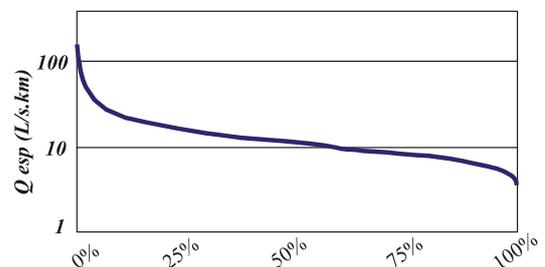
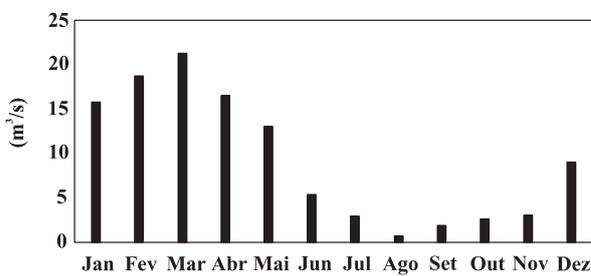
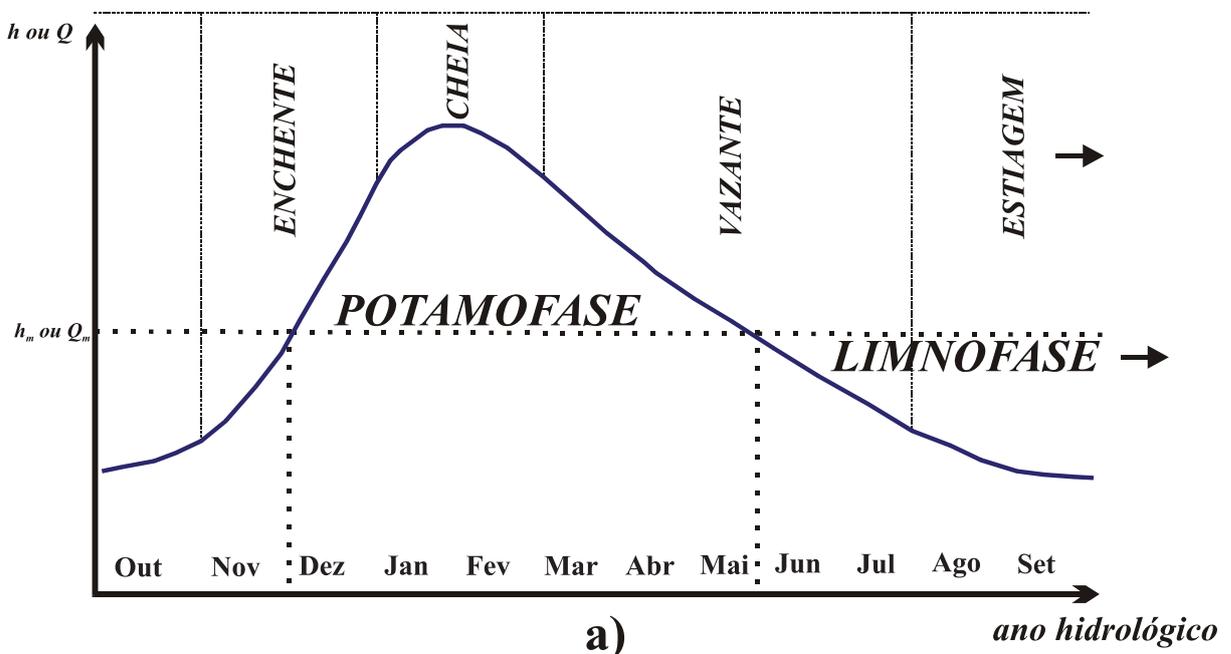


Figura 39. (a) Pulso hidrológico (hidroperíodo) da bacia do Rio Jaú. (b) Hidrograma e frequência das vazões específicas diárias (1984 a 1998) na bacia do Rio Jaú. (c) Curva de permanência do Rio Jaú. Modificados (REZENDE, 2009).

De acordo com TUCCI (2001), há uma maneira de se calcular a vazão das sub-bacias, considerando a existência de dados de vazão, a vazão de cada sub-bacia e a proporção de área entre a bacia de drenagem e cada sub-bacia (Figura 40). Utilizando a área total da bacia do Rio Jaú ( $A_p$ ), os dados de vazão medida em campo no ponto P1( $Q_l$ ) e a área de influência no ponto P1( $A_l$ ), calculou-se através da equação (11), a vazão do exutório da bacia ( $Q_p$ ) para os períodos de amostragem, e conseqüentemente a vazão de contribuição ( $Q_l$ ) de cada ponto de coleta (Tabela 24):

$$Q_l = Q_p \cdot \frac{A_l}{A_p} \quad (11)$$

Onde:

$Q_p$  = vazão do exutório da bacia ( $m^3/s$ ).

$A_p$  = área total da bacia ( $m^2$ ).

$A_l$  = área de cada sub-bacia ( $m^2$ ).

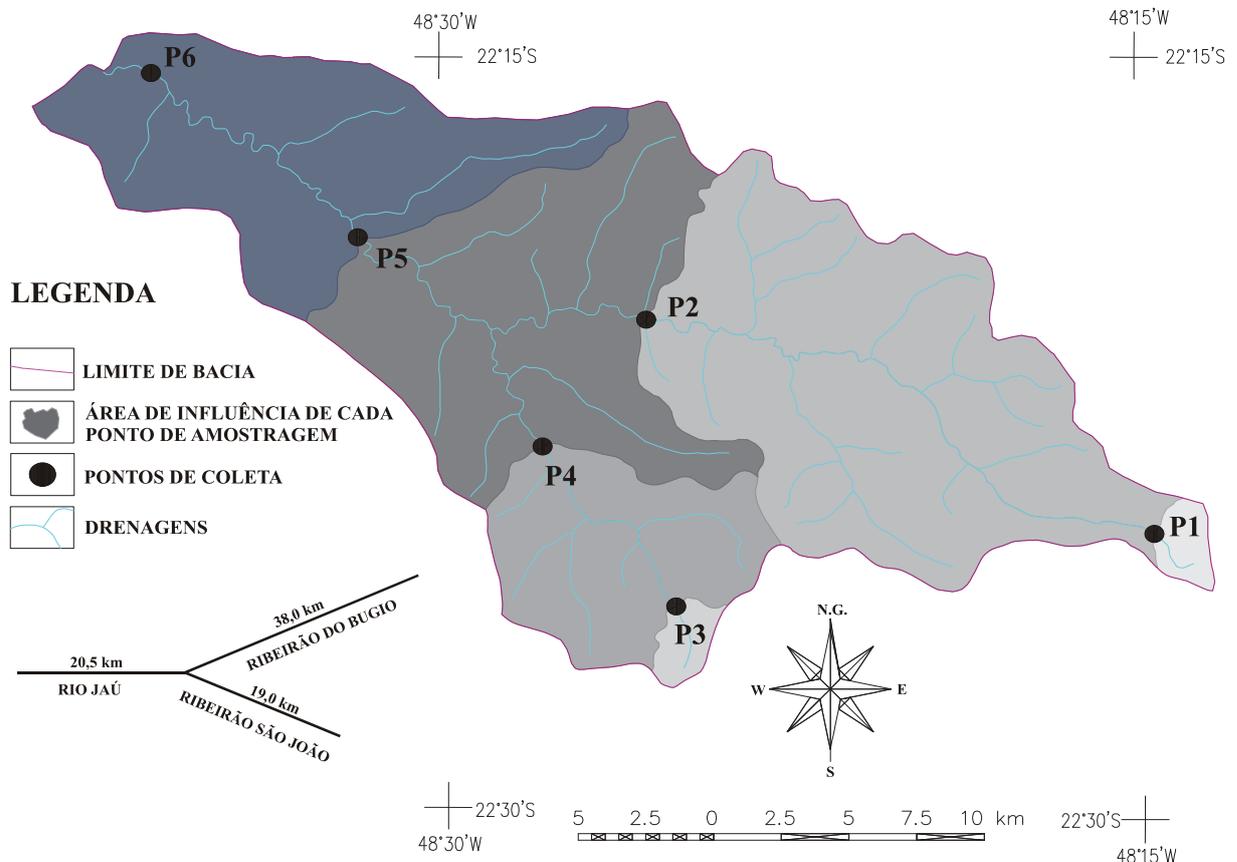


Figura 40. Mapa da bacia do Rio Jaú com a área de influência de cada ponto de amostragem (P1 e P2 = Ribeirão do Bugio; P3 e P4 = Ribeirão São João; P5 e P6 = Rio Jaú).

Os valores apresentados na Tabela 24 indicam que as vazões em todos os pontos da amostragem são mais elevadas nos meses de novembro, dezembro e janeiro do que nos demais meses de amostragem, neste caso agosto, setembro e outubro. Assim, visando abranger os períodos de potamofase e limnofase (Figura 39), foram determinados como período seco (vazante e estiagem) as coletas dos dias 14/08/2009, 17/09/2009, 17/10/2009 e período chuvoso (enchente e cheia) as coletas dos dias 20/11/2009, 23/12/2009 e 12/01/2010.

Tabela 24. Área de influência (km<sup>2</sup>) e vazão (L/s) dos pontos de amostragem da bacia do Rio Jaú.

	Área (km <sup>2</sup> )	Vazão (l/s)						Média
		14/08/09	17/09/09	17/10/09	20/11/09	23/12/09	12/01/10	
<b>P1</b>	6,72	92,21*	92,67*	99,84*	126,18*	140,51*	225,32*	<b>129,46</b>
<b>P2</b>	185,01	2538,65	2551,38	2748,62	3473,95	3868,43	6203,48	<b>3564,08</b>
<b>P3</b>	6,98	95,78	96,26	103,70	131,06	145,95	234,04	<b>134,46</b>
<b>P4</b>	63,04	865,02	869,35	936,56	1183,71	1318,12	2113,76	<b>1214,42</b>
<b>P5</b>	355,18	4873,68	4898,11	5276,76	6669,24	7426,56	11909,36	<b>6842,29</b>
<b>P6</b>	467,16	6410,24	6442,37	6940,41	8771,90	9767,98	15664,11	<b>8999,50</b>

\*Vazão medida em campo de acordo com o Capítulo 4.

A Figura 41 compara os dados de vazão média obtidas nos pontos P5 (Rio Jaú) e P6 (Rio Jaú - exutório), com os dados de vazão média anual obtidos durante os anos de 1982 e 1998 na estação de monitoramento 5D-029 do Rio Jaú, localizada no entroncamento do Ribeirão do Buggio com o Rio Jaú (REZENDE, 2009). Segundo dados do SIGRH (2009) a estação de monitoramento abrange uma área de 417 km<sup>2</sup>, e segundo dados deste trabalho, o entroncamento do Ribeirão do Buggio com o Rio Jaú abrange uma área de 296 km<sup>2</sup>.

Na Tabela 25 consta a média dos parâmetros físicos e a média ponderada dos parâmetros químicos analisados durante todo o período de coleta. A média ponderada foi calculada a partir dos dados apresentados na Tabela 23, utilizando-se a seguinte equação:

$$C_E = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (12)$$

Onde:

$C_E$  = média ponderada do parâmetro (mg/L);

$C_i$  = concentração do parâmetro na  $i$ -ésima amostra (mg/L);

$Q_i$  = vazão do rio durante a coleta da  $i$ -ésima amostra (m<sup>3</sup>/s).



Dentre os pontos estudados, o valor máximo de temperatura da água foi registrado no Rio Jaú, no ponto P6 no dia 20/11/2009 (27,9°C), sendo o menor valor obtido no Ribeirão São João, no ponto P3 (17,5°C) no dia 14/08/2009. Em geral, há uma variação sazonal de temperatura para as águas fluviais da bacia do Rio Jaú, de aproximadamente 9°C entre os meses de agosto e novembro de 2009 (Tabela 23). O aumento de temperatura ao longo do Rio Jaú, também pode estar associado ao despejo de esgotos sanitários.

Os valores de pH obtidos em todos os pontos de amostragem indicam que as águas são geralmente neutras, encontrando-se dentro da faixa de proteção da vida aquática, segundo a Legislação Federal (Resolução CONAMA nº 357/05) e Estadual (Decreto nº 8.468/76) para rios de Classe 2 (Ribeirão do Buggio e São João) e Classe 3 (Rio Jaú), conforme são enquadrados os rios da bacia do Rio Jaú. Os maiores valores de pH ocorreram nos meses de outubro e dezembro de 2009. Além disso, os menores valores de pH foram obtidos nas cabeceiras dos Ribeirões Buggio e São João e os maiores valores de pH foram obtidos no Rio Jaú (P6).

Os valores de sólidos totais (ST), sólidos totais em suspensão (STS) e sólidos totais dissolvidos (STD) tendem a aumentar ao longo dos afluentes do Rio Jaú e no próprio Rio Jaú, exceto (ST e STD) entre os pontos (P3) e (P4) Ribeirão São João (Tabela 25). Os maiores e menores valores destes parâmetros sempre foram encontrados nos pontos P1 e P6, respectivamente. Os valores de ST, STS e STD aumentam na época de verão, da mesma forma que a vazão, indicando uma maior descarga durante esta época, de acordo com a maioria dos rios mundiais (BERNER & BERNER, 1996; MEYBECK, 2006; CONCEIÇÃO & BONOTTO, 2004; CONCEIÇÃO et al., 2007; SARDINHA et al., 2008; CHAKRAPANI et al., 2009). O aumento dos valores de ST na época chuvosa pode ser atribuído ao maior arraste de sedimentos pela erosão laminar, que é muito acentuada neste período.

Na Tabela 26 estão apresentados os valores obtidos para o teor de urânio dissolvido ( $\mu\text{g/L}$ ) e razão de atividade  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  para as amostras analisadas. Os resultados demonstram uma concentração maior no período de chuva, provavelmente devido à erosão laminar, maior nesta época do ano.

Tabela 26. Resultado da análise radiométrica nas águas superficiais.

<i>Amostra</i>	<i>Volume (L)</i>	<i>Concentração <math>^{238}\text{U}^*</math> (ppb)</i>	<i>Razão atividade <math>^{234}\text{U}/^{238}\text{U}^*</math></i>
<b><i>P6 - Chuvoso</i></b>	20	0,04	1,78
<b><i>P6 - Seco</i></b>	20	0,01	1,26

\* Incerteza analítica de  $\pm 10\%$  correspondente ao desvio padrão  $1\sigma$ .

### 7.2.2 – Diagramas e análise estatística dos dados hidroquímicos

O fluxo instantâneo diário pode ser avaliado a partir da concentração de sólidos totais (ST) e da vazão na bacia do Rio Jaú, antes da confluência com o Rio Tietê (P6). Este parâmetro é uma função de descarga, de acordo com a maioria dos rios do mundo, com a maioria da carga de sólidos totais sendo transportados durante os meses mais chuvosos no verão (Figura 42). Utilizando a média ponderada da concentração de sólidos totais (ST = 101,48 mg /L), a vazão média neste mesmo local de coleta (9,0 m<sup>3</sup>/s) e a área da bacia (467,16 km<sup>2</sup>), é possível calcular a média da quantidade de material (ST) removido anualmente, o que corresponde a 28,96 t/km<sup>2</sup>/ano.

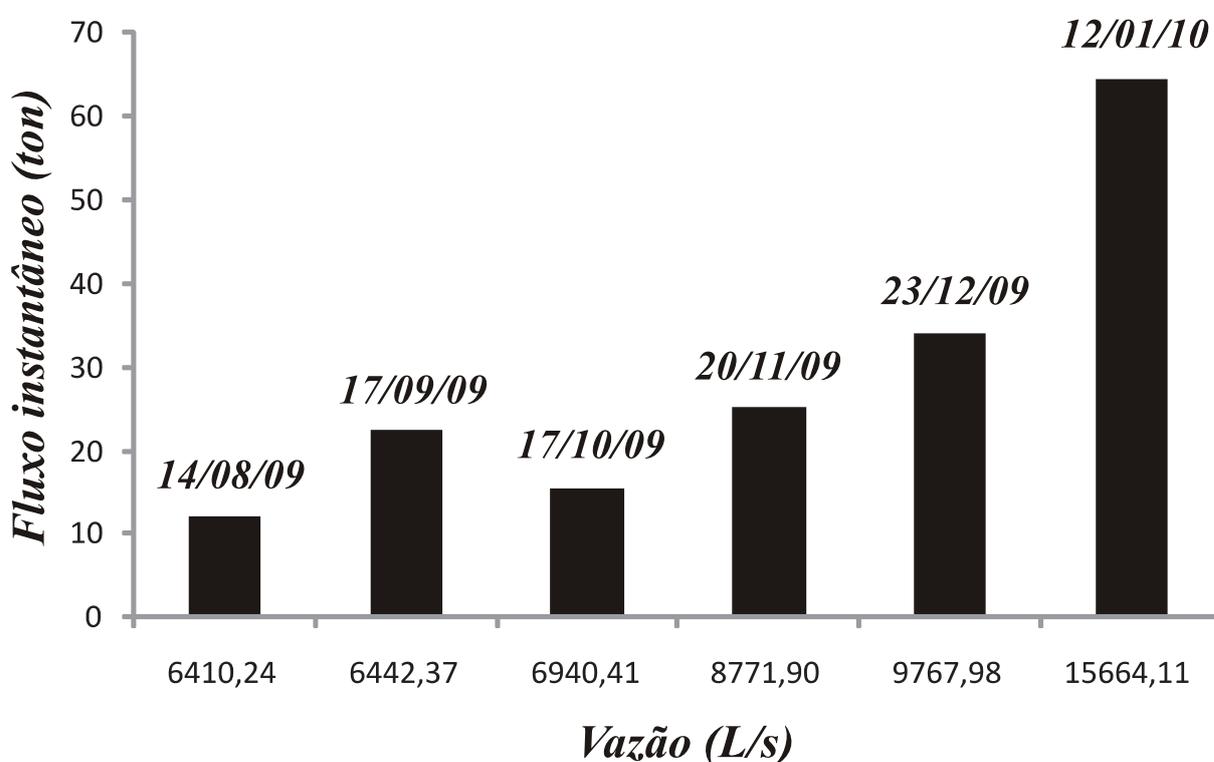


Figura 42. Fluxo instantâneo diário pela vazão nas águas superficiais da bacia do Rio Jaú.

Os valores obtidos para os principais cátions e ânions estão ilustrados na Figura 43, os quais indicam que a tendência  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$  encontrada para os cátions nas águas pluviais é geralmente igual à observada para as águas superficiais. Em relação aos ânions, a tendência nas águas pluviais  $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{PO}_4^{3-}$  não é a mesma que a observada para as águas fluviais  $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{PO}_4^{3-}$  (Figura 43).

Foram encontradas as maiores concentrações dos elementos  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  no ponto (P5), antes da cidade de Jaú. Há aumento da concentração desses elementos na época de

chuva, assim como ocorre para sólidos totais (ST), sólidos totais suspensos (STS), sólidos totais dissolvidos (STD) condutividade e pH, provavelmente maior arraste de sedimentos pela erosão laminar, aumentando, com isso, os valores obtidos de condutividade e pH. O local apresenta alta turbidez da água, ou seja, materiais particulados (colóides) podem ter passado pela etapa de filtração ( $0,45\mu\text{m}$  ou  $4500\text{ \AA}$ ), visto que, o raio iônico do  $\text{Ca}^{2+}$  é de  $1,06\text{ \AA}$ .

Os elementos  $\text{Na}^+$  e  $\text{SiO}_2$  com maiores concentrações na época de seca, tiveram nos pontos (P6) e (P2), respectivamente, os maiores valores encontrados durante o período de coleta. Já o íon  $\text{K}^+$ , maior concentração no ponto (P3), teve pequena variação entre o período seco e chuvoso.

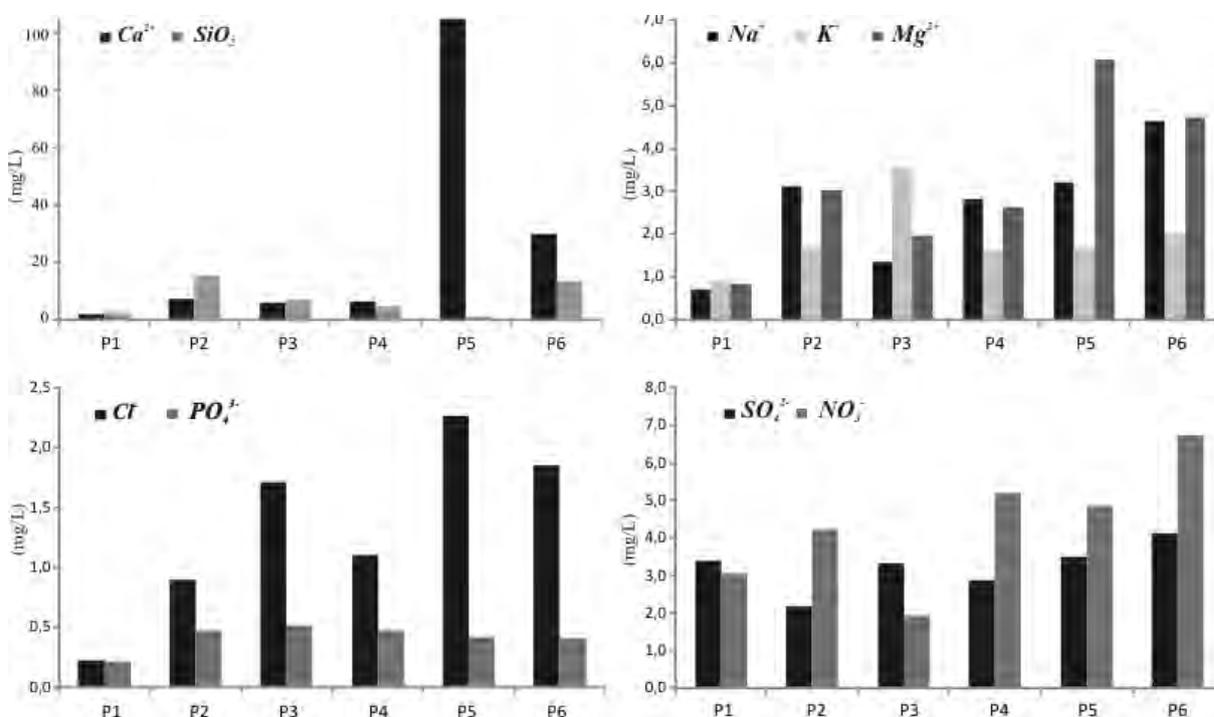


Figura 43. Concentração média ponderada de cátions e ânions (mg/L) para as águas fluviais da bacia do Rio Jaú. P1 e P2 = Ribeirão do Bugio, P3 e P4 = Ribeirão São João, P5 e P6 = Rio Jaú.

Os valores obtidos para  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  são menores que o máximo permitido para águas de Classe 2 e Classe 3 ( $250\text{ mg/L}$ ), segundo a Resolução CONAMA 357/05. Contudo, os valores de  $\text{NO}_3^-$  apresentados na Tabela 23, indicam amostras acima do máximo permitido para a Classe 2 e Classe 3 ( $10,0\text{ mg/L}$ ) como nos pontos P4 e P6. Quanto ao  $\text{PO}_4^{3-}$ , com exceção de três amostras no ponto P1, todas as demais estão acima do máximo permitido para a Classe 2 ( $0,1\text{ mg/L}$ ) e Classe 3 ( $0,15\text{ mg/L}$ ) desta resolução. Os pontos P3 e P1 são os locais

com maior e menor contribuição desse ânion para as águas fluviais da bacia do Rio Jaú, respectivamente.

As correlações lineares de Pearson indicam que a composição química da água é influenciada por componentes geo e antropogênicos (Figura 44). Valores significativos envolvendo  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram encontrados no Ribeirão do Buggio ( $P1 = 0,99$  – Figura 44a e  $P2 = 0,83$ ), Ribeirão São João ( $P3 = 0,96$  e  $P4 = 0,95$ ) e Rio Jaú ( $P5 = 0,99$  e  $P6 = 0,99$ ), cuja provável entrada se deve a poeiras de solos agrícolas, conforme observado nas águas pluviais e dissolução de minerais silicatados como anortita e augita.

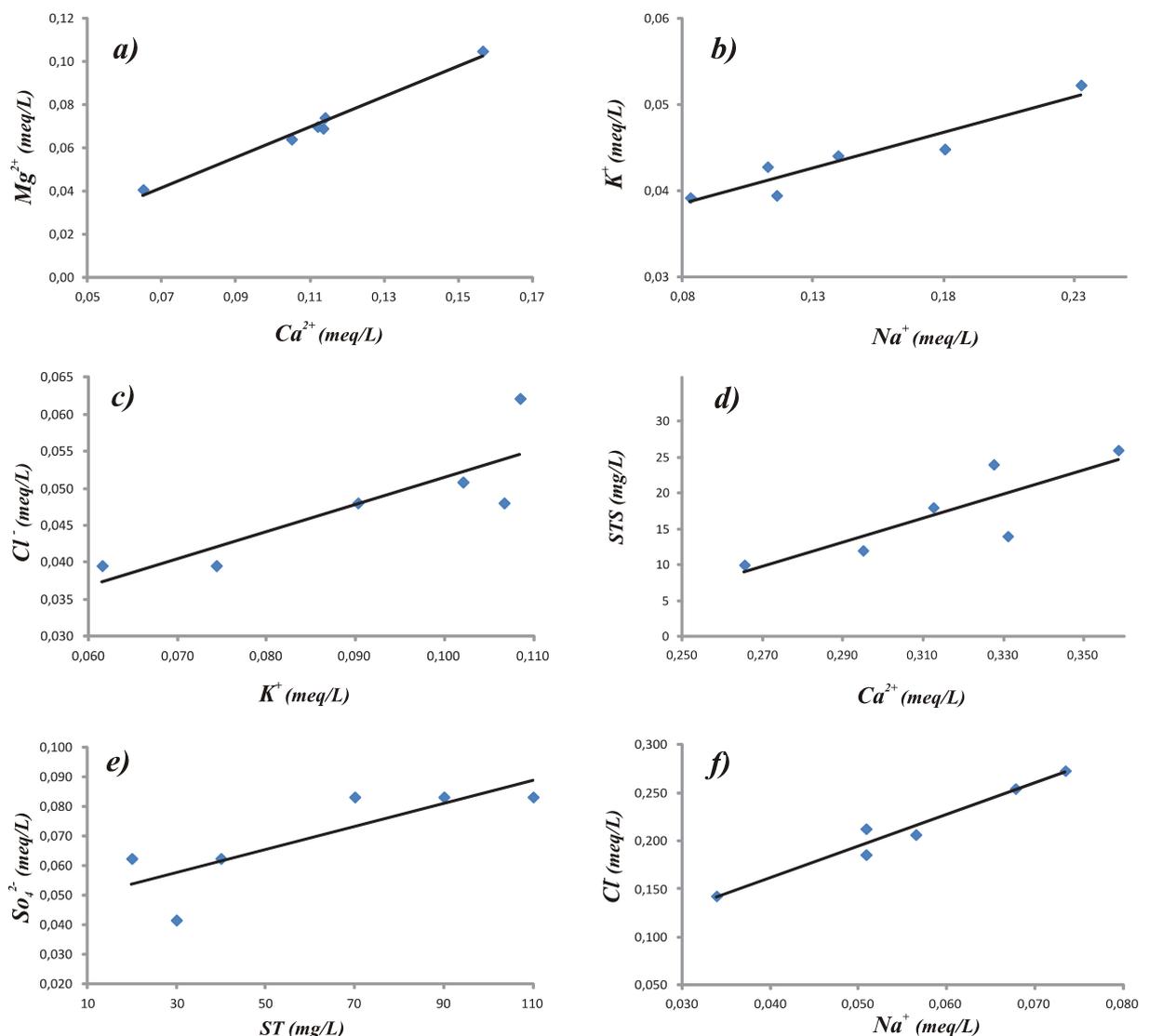


Figura 44. Correlações ( $P \leq 0,01$ ) entre os parâmetros obtidos nas águas superficiais da bacia do Rio Jaú. (a) cálcio e magnésio no ponto (P1). (b) sódio e potássio no ponto (P2). (c) condutividade e fosfato no ponto (P3). (d) sólidos totais suspensos e cálcio no ponto (P4). (e) sólidos totais e sulfato no ponto (P5). (f) sódio e cloreto no ponto (P6).

Correlações entre  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  foram encontradas no Ribeirão do Buggio (P1 = 0,91 e P2 = 0,94 – Figura 44b), provavelmente relacionadas com poeiras de solos derivados de silicatos, como observado para as águas pluviais. Correlação entre  $\text{Cl}^-$  e  $\text{PO}_4^{3-}$  também foi observada no ponto P1 = 0,93; no local próximo ao ponto de coleta, é comum a prática de queima e processamento de eucalipto para fabricação de óleo, conforme observado em campo.

No Ribeirão São João foram observadas algumas correlações no ponto (P3), isto é, entre  $\text{PO}_4^{3-}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,85),  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,97) e  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,91) e entre  $\text{K}^+$  e  $\text{Cl}^-$  (P3 = 0,84 - Figura 44c). A provável origem estaria relacionada como o carreamento de fertilizantes utilizado para as lavouras ou resíduos da queima de combustíveis fósseis. Correlações indicando a entrada de poeiras de solos derivados de silicatos também foram observadas nesta sub-bacia, mais precisamente no ponto P4,  $\text{Na}^+$  e  $\text{SiO}_2$  (0,89), STS e  $\text{Mg}^{2+}$  (0,81) e STS e  $\text{Ca}^{2+}$  (0,83 – Figura 44d). No Rio Jaú (P5) também foram observadas correlações entre ST e  $\text{SiO}_2$  (0,79), STS e  $\text{SiO}_2$  (0,87), STD e  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,73) e ST e  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,82 – Figura 44e). No ponto P6, após a área urbana do município de Jaú, foram observadas correlações entre  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  (0,78),  $\text{K}^+$  e  $\text{Cl}^-$  (0,70) e  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$  (0,98 – Figura 44f).

### 7.3 – Transporte específico de cátions e ânions

O valor do transporte específico de cátions e ânions ( $\text{t}/\text{km}^2/\text{ano}$ ) em uma bacia hidrográfica está relacionado com a média ponderada de cátions e ânions, a área e a vazão média de cada ponto de amostragem (MOREIRA-NORDEMANN, 1980, 1984). Os dados relevantes neste estudo são: P1 = 6,72  $\text{km}^2$  e 0,13  $\text{m}^3/\text{s}$ , P2 = 185,01  $\text{km}^2$  e 3,56  $\text{m}^3/\text{s}$ , P3 = 6,98  $\text{km}^2$  e 0,13  $\text{m}^3/\text{s}$ , P4 = 63,04  $\text{km}^2$  e 1,21  $\text{m}^3/\text{s}$ , P5 = 355,18  $\text{km}^2$  e 6,84  $\text{m}^3/\text{s}$  e P6 = 467,16  $\text{km}^2$  e 9,0  $\text{m}^3/\text{s}$ . Quando estes valores e as concentrações médias ponderadas (Tabela 25) são utilizadas, então, é possível estimar as taxas representadas na Tabela 27 e ilustradas na Figura 45.

Os pontos P1 e P3 estão situados em regiões com menor presença de poluição, por isso, seriam esperados menores valores em relação aos encontrados para os demais pontos quanto aos parâmetros apresentados na Tabela 27 e Figura 45. Com exceção do sulfato, isto é bastante evidente quando se consideram os pontos P1 e P2 no Ribeirão do Bugio. O mesmo não pode ser notado quando se comparam os pontos P3 e P4 no Ribeirão São João e P5 e P6 no Rio Jaú, onde as diferenças encontradas não são tão pronunciadas quanto aquelas verificadas nos pontos P1 e P2.

Tabela 27. Valores de transporte específico (t/km<sup>2</sup>/ano) para os principais cátions e ânions nas águas fluviais da bacia do Rio Jaú.

<i>Ponto</i>	<i>Q média</i> (m <sup>3</sup> /s)	<i>Área</i> (km <sup>2</sup> )	<i>Ca<sup>2+</sup></i>	<i>Mg<sup>2+</sup></i>	<i>Na<sup>+</sup></i>	<i>K<sup>+</sup></i>	<i>t/km<sup>2</sup>/ano</i>				
							<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Cl</i>	<i>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></i>	<i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>
<b>P1</b>	0,13	6,72	1,32	0,50	0,43	0,57	1,48	0,14	0,13	2,07	1,84
<b>P2</b>	3,56	185,01	4,53	1,83	1,90	1,02	9,22	0,54	0,29	1,33	2,56
<b>P3</b>	0,13	6,98	3,78	1,20	0,81	2,18	4,13	1,04	0,31	2,03	1,17
<b>P4</b>	1,21	63,04	3,93	1,60	1,71	0,97	2,97	0,67	0,29	1,75	3,16
<b>P5</b>	6,84	355,18	63,72	3,70	1,95	1,02	0,81	1,38	0,25	2,13	2,95
<b>P6</b>	9,00	467,16	18,36	2,87	2,82	1,22	8,39	1,13	0,25	2,51	4,09

Quando a comparação é efetuada entre os dois tributários do Rio Jaú, verifica-se que os parâmetros cálcio, magnésio e nitrato possuem um comportamento semelhante, ou seja, aumentam da montante (P1 e P3) para jusante (P2 e P4). Com exceção do sulfato, a mesma dinâmica ocorre no Ribeirão do Bugio para todos os outros parâmetros (K<sup>+</sup>, SiO<sub>2</sub>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). Fato inverso ocorre no Ribeirão São João, isto é, maior concentração a montante e menor a jusante, contrariamente ao esperado. No Rio Jaú (P5 e P6), com exceção de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Cl<sup>-</sup> todos os outros parâmetros analisados possuem uma concentração maior no ponto (P6), próximo à foz com o Rio Tietê. No entanto, a soma total de transporte específico (t/km<sup>2</sup>/ano) é maior no ponto (P5), devido à alta concentração de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> neste local.

Assim, é difícil justificar que os valores obtidos para os pontos P1 e P3 próximos às duas nascentes do Ribeirão do Bugio e Ribeirão São João, formadores do Rio Jaú, são representativos de características próximas ao comportamento natural de cátions e ânions dissolvidos nas águas da bacia do Rio Jaú. Relativamente a estes dois pontos, no geral, os maiores valores de transporte específico foram obtidos no Ribeirão São João (P3), que flui principalmente sobre o arenito da Formação Itaquerí, composto por quartzo (Q), feldspato potássico (Fk), albita (Pl), e caulinita (K). Relativamente a P3, com exceção de sulfato, os menores valores de transporte específico foram obtidos no Ribeirão do Bugio (P1), que também recebe a contribuição da alteração do arenito da Formação Itaquerí, de mesma composição mineralógica.

Os pontos P2 (Ribeirão do Bugio) e P4 (Ribeirão São João) localizados a jusante dos municípios de Dois Córregos e Mineiros do Tietê, respectivamente, recebem a contribuição do intemperismo dos basaltos da Formação Serra Geral, onde bitownita (Pl), feldspato potássico (Fk), anortoclásio (An), augita (Px), esmectita (Sm) e caulinita (K) fazem parte da composição mineralógica. Aparentemente com a mesma composição mineralógica, com

exceção da anortita (um dos minerais da série dos plagioclásios = Pl) e montmorillonita (argila), os pontos P5 e P6 (Rio Jaú), também recebem a contribuição da alteração dos basaltos da Formação Serra Geral.

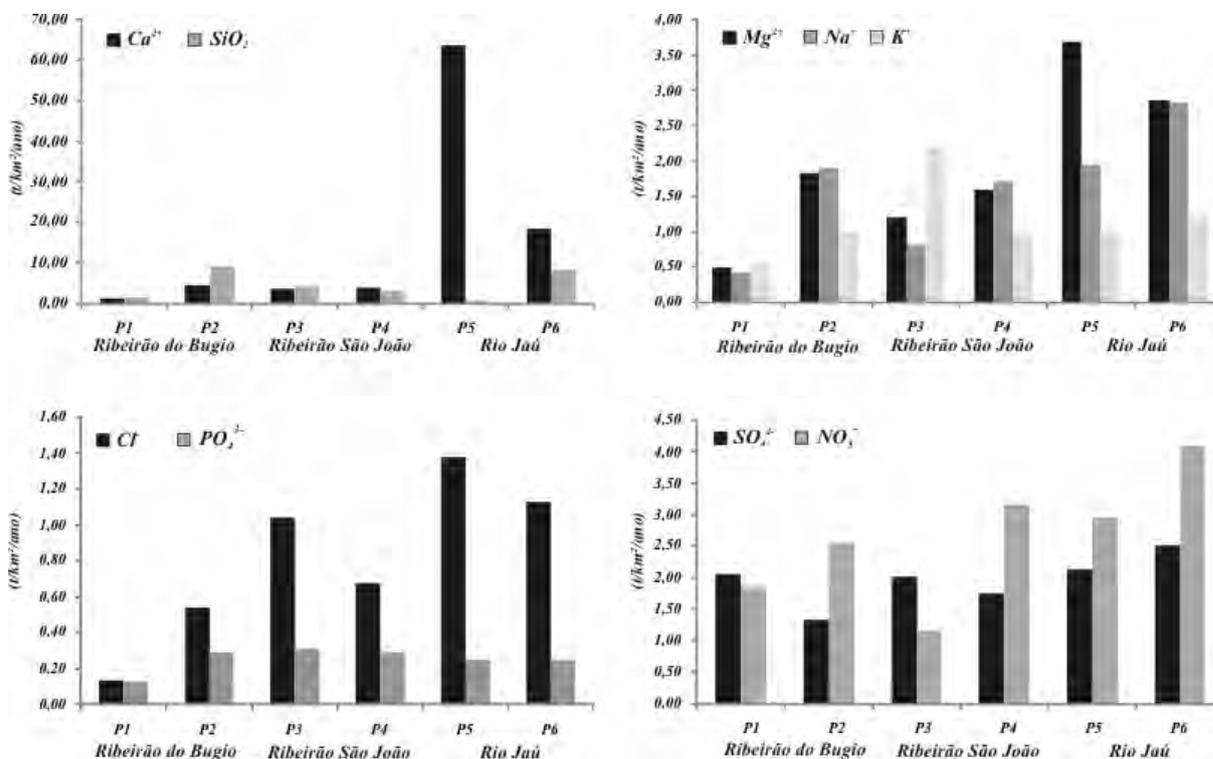


Figura 45. Transporte específico ( $t/km^2/ano$ ) de cátions e ânions na bacia do Rio Jaú. P1 e P2 = Ribeirão do Bugio, P3 e P4 = Ribeirão São João, P5 e P6 = Rio Jaú.

As rochas da bacia do Rio Jaú não possuem minerais portadores de  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$  e  $SO_4^{2-}$  como um constituinte principal, e, conseqüentemente, pouca entrada natural desses elementos/compostos é esperada nas águas devido aos processos de interação água/rocha. Assim, os valores de transporte de  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$  e  $SO_4^{2-}$  nos pontos P1 e P3 poderiam, em princípio, ser atribuídos às entradas atmosféricas na bacia do Rio Jaú. Isto porque, no geral, os resultados de transporte específico indicam um aumento de seus valores ao longo dos afluentes do Rio Jaú. Por exemplo, para o  $Cl^-$ , o valor em P1 é de  $0,14 t/km^2/ano$ , enquanto que em P2 corresponde a  $0,54 t/km^2/ano$ .

A Tabela 28 apresenta a os valores de transporte específico ( $t/km^2/ano$ ) para íons/elementos na bacia estudada, bem como a determinada em outras bacias hidrográficas do estado de São Paulo. Os estudos indicados na Tabela 28 são referentes a diferentes anos de amostragem, litologia e área de abrangência, no entanto, será feita uma análise comparativa dos resultados disponíveis para as diferentes bacias.

Tabela 28. Transporte específico de cátions e ânions (t/km<sup>2</sup>/ano) em diferentes bacias hidrográficas do estado de São Paulo.

<i>Bacia hidrográfica</i>	<i>Ca<sup>2+</sup></i>	<i>Mg<sup>2+</sup></i>	<i>Na<sup>+</sup></i>	<i>K<sup>+</sup></i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Cl<sup>-</sup></i>	<i>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></i>	<i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>
	<i>t/km<sup>2</sup>/ano</i>								
<i>Ribeirão do Meio<sup>a</sup></i>	0,67	0,23	0,50	0,25	--	0,40	0,01	0,00	0,16
<i>Alto Sorocaba<sup>b</sup></i>	5,63	1,79	6,73	2,19	--	6,73	1,01	18,17	2,79
<i>Corumbataí<sup>c</sup></i>	3,52	0,99	0,96	0,55	--	0,66	0,23	5,31	1,85
<i>Piracicaba<sup>d</sup></i>	2,43	0,78	4,98	1,52	1,95	3,16	--	6,01	0,70
<i>Ribeirão Preto<sup>e</sup></i>	13,87	3,01	2,56	3,33	--	2,20	0,16	5,36	5,48
<i>Rio Jaú<sup>f</sup></i>	18,36	2,87	2,82	1,22	8,39	1,13	0,25	2,51	4,09

<sup>a</sup>CONCEIÇÃO et al., 2007 <sup>b</sup>SARDINHA et al., 2008 <sup>c</sup>CONCEIÇÃO & BONOTTO, 2004 <sup>d</sup>MORTATTI et al., 2003 <sup>e</sup>CONCEIÇÃO et al., 2012 <sup>f</sup>presente estudo.

O transporte específico de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, na bacia do Rio Jaú foram de (18,36, 2,87, 2,82 e 4,09 t/km<sup>2</sup>/ano), a primeira explicação reside na dissolução de minerais, nas áreas de exploração de cana de açúcar e na aplicação de fertilizantes e corretivos. A bacia do Ribeirão Preto (346 km<sup>2</sup>) encontra-se em uma região com rochas ígneas e sedimentares e a presença do cultivo de cana-de-açúcar ocupa aproximadamente 76% da área da bacia. As semelhanças podem ser observadas também, pelo transporte específico de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (13,87, 3,01, 2,56 e 5,48 t/km<sup>2</sup>/ano) respectivamente, próximos aos encontrados neste trabalho. O maior valor de transporte específico para K<sup>+</sup> acontece em Ribeirão Preto (SP), provavelmente devido aos mesmos fatos citados anteriormente.

Em relação a SiO<sub>2</sub>, os valores de transporte específico (8,39 t/km<sup>2</sup>/ano) foram maiores que os encontrados por MORTATTI et al., 2008 na bacia do Rio Piracicaba (1,95 t/km<sup>2</sup>/ano). A concentração desse elemento se deve provavelmente a litologia da bacia do Rio Jaú e conseqüente dissolução de minerais silicatos. Quanto aos íons Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a bacia do Alto Sorocaba apresentou os maiores valores de transporte específico, atribuídos às entradas atmosféricas (SARDINHA, et al., 2008), mesmo motivo atribuído a bacia do Rio Jaú.

Assim, vários fatores antropogênicos podem estar afetando os resultados de transporte específico obtidos neste trabalho. O crescimento urbano, sem planejamento, com o descarte de efluentes domésticos e industriais “in natura”, além das áreas rurais onde o uso de fertilizantes e queimadas por parte das propriedades agrícolas, pode ocasionar a liberação de grandes quantidades de macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio).

## 8 – DENUDAÇÃO GEOQUÍMICA NA BACIA DO RIO JAÚ

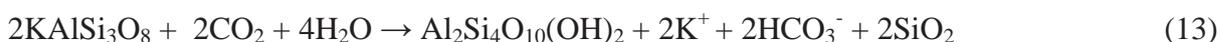
### 8.1 – Reações de intemperismo e hidrólise de minerais silicatados

Parte da origem de cátions e ânions nas águas superficiais da bacia do Rio Jaú é devido ao intemperismo das rochas sedimentares e ígneas das Formações Itaqueri e Serra Geral, segundo a reação: Minerais primários + H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> → minerais secundários (argilas) + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + solução lixiviada.

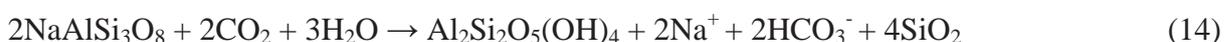
A bacia do Rio Jaú está inserida em uma região onde o clima (pluviosidade de 1755,60 mm /ano e temperatura média de 23° C) causa uma alteração química moderada nos minerais primários (feldspato potássico, anortoclásio, augita, albita e anortita), com a geração de minerais secundários (caulinita, haloisita, saponita e esmectita). Neste sentido, ocorre na bacia do Rio Jaú os processos de monossilatização, geração de argilo minerais 1:1 (caulinita, haloisita e saponita), e bissilicitação com geração de argilo minerais 2:1 (esmectita).

Possíveis reações envolvendo os processos de hidrólise dos minerais primários pela água e gás carbônico, geração de minerais secundários e solução lixiviada na bacia do Rio Jaú são apresentadas na Figura 46. Em geral, as reações liberam Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e SiO<sub>2</sub>, consomem CO<sub>2</sub> da atmosfera, e produzem HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> em solução formando argilominerais (caulinita, haloisita, saponita ou esmectita), permanecendo como produtos secundários em solos, e fixando quantidades variáveis de SiO<sub>2</sub>. Assim, algumas reações de hidrólise na bacia do Rio Jaú são descritas a seguir:

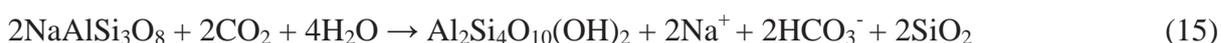
- hidrólise de feldspato potássico liberando 2K<sup>+</sup> e 2SiO<sub>2</sub>:



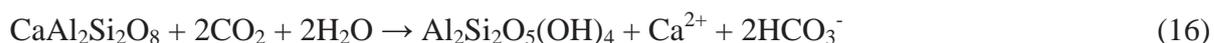
- hidrólise da albita liberando 2Na<sup>+</sup> e 4SiO<sub>2</sub>:



- hidrólise da albita liberando 2Na<sup>+</sup> e 2SiO<sub>2</sub>:



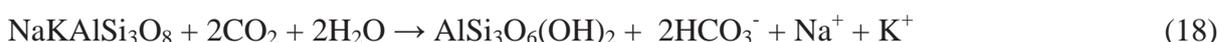
- hidrólise de anortita liberando Ca<sup>2+</sup>:



- hidrólise de augita liberando 2Ca<sup>2+</sup> e 2Mg<sup>2+</sup>:



- hidrólise de anortoclásio liberando Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>:



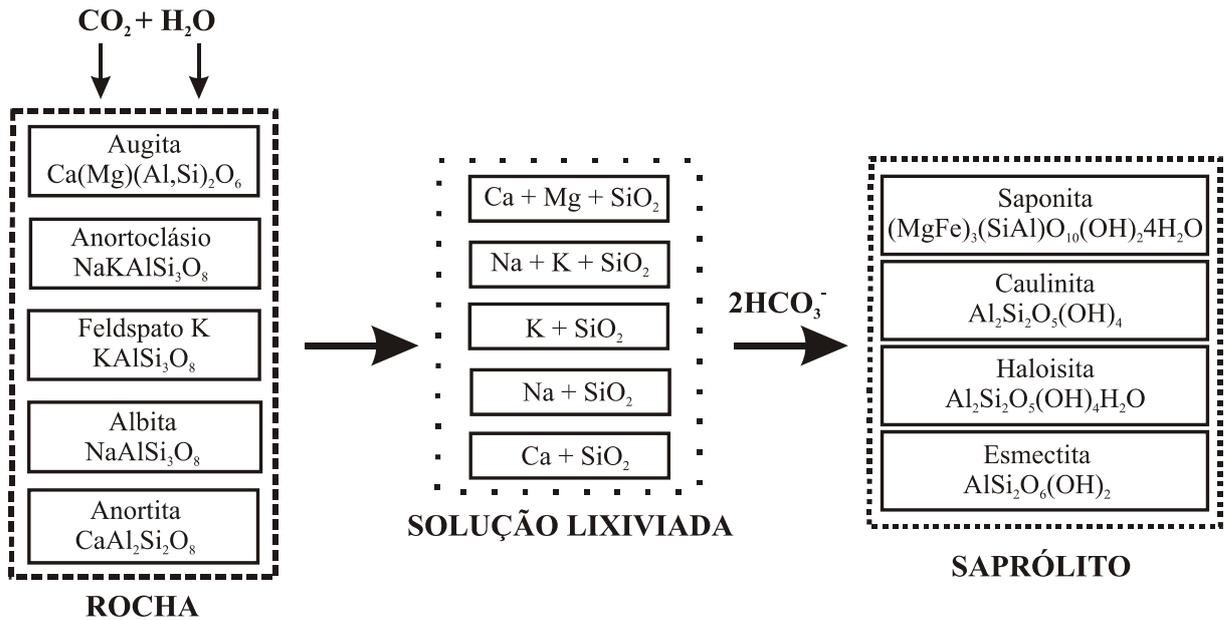


Figura 46. Possíveis reações envolvendo os minerais encontrados nos arenitos da Formação Itaquerí e basaltos da Formação Serra Geral na bacia do Rio Jaú.

### 8.2 – Taxa de remoção de $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ e $\text{SiO}_2$ na bacia

A abundância e proporção relativa de íons dissolvidos em águas superficiais podem ser quantificadas utilizando a equação de balanço de massa desenvolvida por GARRELS & MACKENZIE, (1967). Como a entrada de elementos e/ou componentes pode interferir no cálculo proposto, é necessária a correção para se obter a fração proveniente da dissolução das rochas. Assim, para avaliar a dinâmica geoquímica que ocorre na bacia do Rio Jaú, será utilizada neste trabalho a equação de (WHITE & BLUM, 1995) modificada, sem considerar sólidos dissolvidos a partir de trocas iônicas em argilo minerais e sólidos dissolvidos devido a mudanças na biomassa.

$$F_W = F_{river} - F_{wetfall} - F_{dryfall} - F_{anthropogenic} \quad (19)$$

Onde:

$F_W$  = fluxo anual líquido do elemento nas águas do rio (kg/ano);

$F_{river}$  = fluxo quantificado do elemento nas águas do rio (kg/ano);

$F_{wetfall}$  and  $F_{dryfall}$  = entradas atmosféricas (kg/ano);

$F_{anthropogenic}$  = entradas antropogênicas (kg/ano).

Para o cálculo das entradas atmosféricas na bacia do Rio Jaú, durante o período analisado (agosto de 2009 a julho de 2010), será considerado que, do total precipitado (1754,40 mm), retornam para a atmosfera por evapotranspiração 63% (ou 1108,00 mm), e dos 37% restantes, 2,22% infiltram (recarga de água subterrânea) e 34,63% escoam superficialmente nas águas dos rios na bacia do Rio Jaú. Assim, o valor (1,654) será utilizado como fator de correção dos principais ions dissolvidos analisados nas águas de chuva na bacia (Tabela 29), que também apresenta as concentrações corrigidas nas águas pluviais por intermédio do uso do fator de correção, onde foram adotadas as concentrações médias de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{SiO}_2$  durante as amostragens realizadas (Tabela 17 e 20).

A correção devido a entradas antropogênicas na bacia do Rio Jaú foi efetuada considerando o Rio Jaú (P6) antes de sua foz no Rio Tietê e seus tributários Ribeirão do Bugio (P2) e Ribeirão São João (P4) utilizando a equação de balanço de massa:

$$Q_{RJ}C_{RJ} = Q_{RB}C_{RB} + Q_{RSJ}C_{RSS} \quad (20)$$

Onde:

$Q_{RJ}$  = soma da vazão média dos tributários ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$C_{RJ}$  = concentração corrigida no Rio Jaú ( $\text{mg}/\text{L}$ );

$Q_{RB}$  = vazão média do Ribeirão do Bugio ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$C_{RB}$  = concentração média do elemento no Ribeirão do Bugio ( $\text{mg}/\text{L}$ );

$Q_{RSJ}$  = vazão média no Ribeirão São João ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$C_{RSJ}$  = concentração média do elemento no Ribeirão São João ( $\text{mg}/\text{L}$ ).

Apesar das dificuldades encontradas para justificar que os pontos P2 e P4 representam as condições naturais intempéricas atuando na bacia do Rio Jaú, eles tendem a sofrer menores impactos devido às ações antropogênicas que os pontos P5 e P6. Os pontos P2 e P4 estão localizados após os municípios de Dois Córregos e Mineiros do Tietê, que possuem 23.384 e 11.760 habitantes e tratamento de esgotos com 60% e 100% de coleta e 80% e 74% de eficiência no tratamento, respectivamente. As bacias drenam áreas onde afloram as Formações Itaqueri e Serra Geral, além de áreas com cobertura vegetal nativa, pastagens e atividades agrícolas, porém não drenam grandes áreas industriais ou intensamente urbanizadas, como ocorre no município de Jaú (125.469 habitantes). Por isso, estes foram utilizados na estimativa de remoção de cálcio, magnésio, sódio, potássio e sílica na bacia.

Uma vez que o ponto P6 representa o exutório da bacia, a remoção de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{SiO}_2$  pode ser estimada levando-se em conta a equação (20) que prevê a

contribuição relativa de seus tributários (P2 – Ribeirão do Bugio; P4 – Ribeirão São João). As concentrações médias desses íons obtidas durante as amostragens realizadas (Tabela 25) estão representadas na Tabela 29. Além disso, também constam na Tabela 29 as concentrações corrigidas no ponto P6 por intermédio do uso da equação (20), onde foram adotadas as concentrações médias de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{SiO}_2$  em P2 e P4 durante as amostragens realizadas (Tabela 23 e 25) e a vazão média em cada ponto (Tabela 24).

Tabela 29. Concentrações medidas (valor médio) e corrigidas no Rio Jaú (P6) e nas águas de chuva para os principais íons dissolvidos.

<i>Valor</i>	<i>Concentração (mg/L)</i>				
	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{SiO}_2$
<b><i>Rio Jaú – Ponto P6</i></b>					
<b>Media aritmética</b>	28,64	4,65	4,89	2,06	12,50
<b>Média ponderada</b>	30,22	4,72	4,64	2,01	13,81
<b>Corrigido (equação 20)</b>	7,24	2,91	3,21	1,68	12,91
<b><i>Aporte pluvial</i></b>					
<b>Média aritmética</b>	0,712	0,301	0,187	0,311	0,759
<b>Média ponderada</b>	0,341	0,244	0,156	0,191	0,729
<b>Corrigido (1,654)</b>	0,564	0,404	0,259	0,316	1,206

O fluxo anual líquido de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{SiO}_2$  nas águas superficiais do Rio Jaú é calculado utilizando a equação 19. Para tanto, foram empregados os dados corrigidos para a concentração dos elementos nas águas superficiais em P6 (Tabela 29) e para as águas de chuva pela deposição seca e úmida, corrigidas (Tabela 29). Na estimativa do fluxo quantificado de elementos ( $\text{t}/\text{km}^2/\text{ano}$ ) nas águas do Rio Jaú (P6), foi empregada a vazão média ( $9,00 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e a área ( $467,16 \text{ km}^2$ ) no exutório da bacia do Rio Jaú (P6). O mesmo ocorrendo para o aporte fluvial (entradas atmosféricas), precipitação média anual ( $1754,40 \text{ L}/\text{m}^2$ ) e área total da bacia do Rio Jaú ( $467,16 \text{ km}^2$ ).

Os valores de  $F_w$  podem ser empregados para estimar a quantidade total de material alterado removido por unidade de área e tempo  $W$  ( $\text{t}/\text{km}^2/\text{ano}$ ), através da equação apresentada por MOREIRA-NORDEMANN (1980 e 1984):

$$W = F_w/E_R S \quad (21)$$

Onde:

$F_w$  = fluxo anual do elemento nas águas do rio ( $\text{kg}/\text{ano}$ );

$E_R$  = concentração média do elemento nas rochas ( $\text{kg}/\text{ton}$ );

$S$  = área da bacia ( $\text{km}^2$ ).

Os valores obtidos estão representados na Tabela 30, onde também constam os valores das entradas atmosféricas corrigidas pela evapotranspiração/infiltração (1,654), a concentração média ponderada de mobilidade das rochas para os solos (Capítulo 5 – Tabela 16) e o fluxo anual líquido ( $F_w$ ) nas águas do Rio Jaú.

Tabela 30. Fluxo anual de elementos ( $t/km^2/ano$ ) nas águas do Rio Jaú (P6) e concentração média ponderada de mobilidade dos elementos das rochas para os solos ( $kg/t$ ).

	<i>Unidade</i>	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Na^+$	$K^+$	$SiO_2$
<b>Rio Jaú (P6)</b>	( $t/km^2/ano$ )	4,398	1,768	1,948	1,021	7,844
<b>Chuva</b>	( $t/km^2/ano$ )	0,990	0,708	0,454	0,555	2,116
<b>(<math>F_w</math>) Diferença*</b>	( $t/km^2/ano$ )	3,407	1,060	1,494	0,466	5,728
<b>Teor médio rocha/solo</b>	( $kg/t$ )	58,30	24,37	19,61	8,07	351,00

\*Águas do Rio Jaú corrigidas (P6) - Águas de chuva (deposição seca e úmida corrigida) =  $F_w$

Assim, constata-se que a quantidade de material removido na bacia do Rio Jaú (equação 21), corresponde a aproximadamente  $58,44 t/km^2/ano$  utilizando o cálcio como traçador natural,  $43,50 t/km^2/ano$  utilizando o magnésio, a aproximadamente  $76,17 t/km^2/ano$  utilizando o sódio,  $57,77 t/km^2/ano$  utilizando o potássio e a aproximadamente  $16,32 t/km^2/ano$  utilizando sílica (Tabela 31).

Tabela 31. Quantidade de material solubilizado por unidade de área e tempo (W).

	<i>Total de material alterado removido</i>				
<b>Traçador natural</b>	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Na^+$	$K^+$	$SiO_2$
<b>W (<math>t/km^2/ano</math>)</b>	58,44	43,50	76,17	57,77	16,32

O valor encontrado neste trabalho para as rochas sedimentares da Formação Itaquerí e rochas ígneas básicas da Formação Serra Geral na bacia do Rio Jaú (que pertencem à Bacia Sedimentar do Paraná), utilizando  $K^+$  como traçador é maior que o obtido para as rochas sedimentares da bacia do Rio Corumbataí (SP), isto é  $16,70 t/km^2/ano$  (arenitos e argilitos/siltitos, CONCEIÇÃO & BONOTTO, 2003), que também está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná. A quantidade de material dissolvido removido na bacia do Ribeirão Preto (SP) (rochas ígneas e sedimentares das Formações Serra Geral e Botucatu, bacia Sedimentar do Paraná) corresponde a  $24,48 t/km^2/ano$  utilizando o  $Ca^{2+}$ ,  $99,93 t/km^2/ano$  utilizando o  $Mg^{2+}$  e  $174,43 t/km^2/ano$  utilizando o  $K^+$  como traçadores naturais (SANTOS, 2009). Para as rochas metamórficas (gnaisses migmatíticos e filitos) e ígneas (granitos) da

bacia do Alto Sorocaba (SP) os valores obtidos foram de 110,64 t/km<sup>2</sup>/ano para Mg<sup>2+</sup>, 76,70 t/km<sup>2</sup>/ano para Na<sup>+</sup> e 36,24 t/km<sup>2</sup>/ano para K<sup>+</sup> (SARDINHA, 2008).

A concentração média ponderada de mobilidade de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> e SiO<sub>2</sub> das rochas para os solos da bacia do Rio Jaú é de 58,30 g/kg, 24,37 g/kg, 19,61 g/kg, 8,07 g/kg e 351,00 g/kg, respectivamente. Conseqüentemente, a quantidade de material removido anualmente corresponde a 58,44 t/km<sup>2</sup>/ano, 43,50 t/km<sup>2</sup>/ano, 76,17 t/km<sup>2</sup>/ano, 57,77 t/km<sup>2</sup>/ano e 16,32 t/km<sup>2</sup>/ano, respectivamente. Utilizando esses elementos como traçadores naturais, isto implica em 1,59x10<sup>6</sup> kg de rocha removida a cada ano da bacia utilizando Ca<sup>2+</sup>, 0,49x10<sup>6</sup> kg de rocha removida a cada ano da bacia utilizando Mg<sup>2+</sup>, 0,69x10<sup>6</sup> kg utilizando o Na<sup>+</sup>, 0,21x10<sup>6</sup> kg utilizando K<sup>+</sup> e 2,67x10<sup>6</sup> kg utilizando SiO<sub>2</sub> (Tabela 32).

Considerando a densidade média das rochas da crosta de (2,66 g/cm<sup>3</sup>), como a densidade média das rochas ígneas e sedimentares da bacia do Rio Jaú, a taxa de intemperismo calculada representa um volume de rocha carregada no período de estudo de 598,42 m<sup>3</sup> (ou 1,28 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) utilizando Ca<sup>2+</sup>, 186,16 m<sup>3</sup> (ou 0,39 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) utilizando Mg<sup>2+</sup>, 262,39 m<sup>3</sup> (ou 0,56 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) utilizando o Na<sup>+</sup> e 81,85 m<sup>3</sup> (ou 0,17 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) para K<sup>+</sup>. Para SiO<sub>2</sub> como traçador natural, chega-se a um volume de 1005,92 m<sup>3</sup> (ou 2,15 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) de volume de rocha carregada na bacia do Rio Jaú durante o período de estudo (Tabela 32).

Tabela 32. Quantidade de material removido anualmente na bacia do Rio Jaú, utilizando cálcio, magnésio, sódio, potássio e sílica.

Elemento	Quantidade de rocha removida (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )	Volume/área (m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )
Ca <sup>2+</sup>	1.591.802,05	598,42	1,28
Mg <sup>2+</sup>	495.209,88	186,16	0,39
Na <sup>+</sup>	697.970,98	262,39	0,56
K <sup>+</sup>	217.739,91	81,85	0,17
SiO <sub>2</sub>	2.675.754,98	1005,92	2,15

A estimativa de material removido é bastante variável, dependendo do elemento considerado (Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> e Mg<sup>2+</sup>). O cálcio e o magnésio nas águas de chuva na região da bacia do Rio Jaú, são provenientes, possivelmente, da exploração da cana de açúcar e da aplicação de corretivos para elevar o pH. Assim, os valores encontrados utilizando-se o cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>) como traçadores podem estar associados às influências antrópicas. O K<sup>+</sup> e Mg<sup>2+</sup> são íons utilizados pela biomassa, indispensáveis no ciclo bioquímico da fauna e

da flora; são também utilizados na formação de novos minerais (MOREIRA-NORDEMANN, 1977). O íon sódio é muito móvel, lixiviado rapidamente pela água superficial DEMOLON (1960 *apud* MOREIRA-NORDEMANN, 1984). A rápida perda de cálcio, magnésio, sódio e potássio fazem sentido geoquimicamente, devido à alta mobilidade desses elementos na forma iônica, especialmente em áreas de alta pluviosidade (LEWIS Jr, et al., 1987).

### 8.3 – Estimativa da taxa de intemperismo químico por intermédio de $\text{SiO}_2$

Para um cálculo preciso da taxa de intemperismo químico, é preciso conhecer a composição química da rocha matriz, do saprólito (nome dado à fácies de alteração encontrada na base do perfil de um solo composto principalmente de caulinita neoformada e quartzo residual) e da taxa de escoamento de água (BOEGLIN & PROBST, 1998). A taxa de intemperismo químico  $WR_{ch}$  utilizando a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) como traçador natural pode ser calculada pela equação 22 (BOEGLIN & PROBST, 1998; MORTATTI et al., 2003; MORTATTI & PROBST, 2003), utilizando a razão entre o fluxo de sílica dissolvida ( $F_w$  = Tabela 30) e a quantidade de sílica removida das rochas ( $W$  = Tabela 16 – Capítulo 5 e Tabela 30).

No entanto, segundo BOEGLIN & PROBST, (1998) a validade dos resultados obtidos por este método de cálculo pode ser limitado pelas seguintes condições: o intemperismo da rocha mãe para o saprólito é isovolumétrico (em casos naturais, a taxa de dissolução do quartzo é geralmente baixa); todos os minerais primários, exceto o quartzo, são totalmente transformados em caulinita; toda a sílica exportada pela drenagem das águas se dá pela hidrólise dos minerais silicatados, ocorrendo principalmente abaixo do perfil laterítico; o fluxo de sílica transportado pelo rio é conservativo, por exemplo, não é afetado por nenhum processo biogeoquímico (como precipitação de sílica por diatomáceas).

$$WR_{ch} = F_{\text{SiO}_2} / (S_0 - S_S) \quad (22)$$

Onde:

$F_{\text{SiO}_2}$  = fluxo de sílica dissolvida ( $\text{kg}/\text{km}^2/\text{ano}$ );

$S_0$  = quantidade de  $\text{SiO}_2$  média na rocha matriz ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$S_S$  = quantidade de sílica no saprólito ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$W = S_0 - S_S$  (Tabela 16 – Capítulo 5 e Tabela 30)

O cálculo da taxa de intemperismo químico das rochas ( $WR_{ch}$ ) efetuado para a sílica ( $SiO_2$ ) por meio da equação 22 aplicada à bacia do Rio Jaú foi de 0,00613 mm/ano ou 6,13 m/Ma, portanto, pode-se dizer que seriam necessários aproximadamente 163.000 anos para alterar 1 m de rocha nas condições adotadas neste trabalho (Figura 47), para os cálculos efetuados para a sílica ( $SiO_2$ ) na bacia do Rio Jaú (SP).

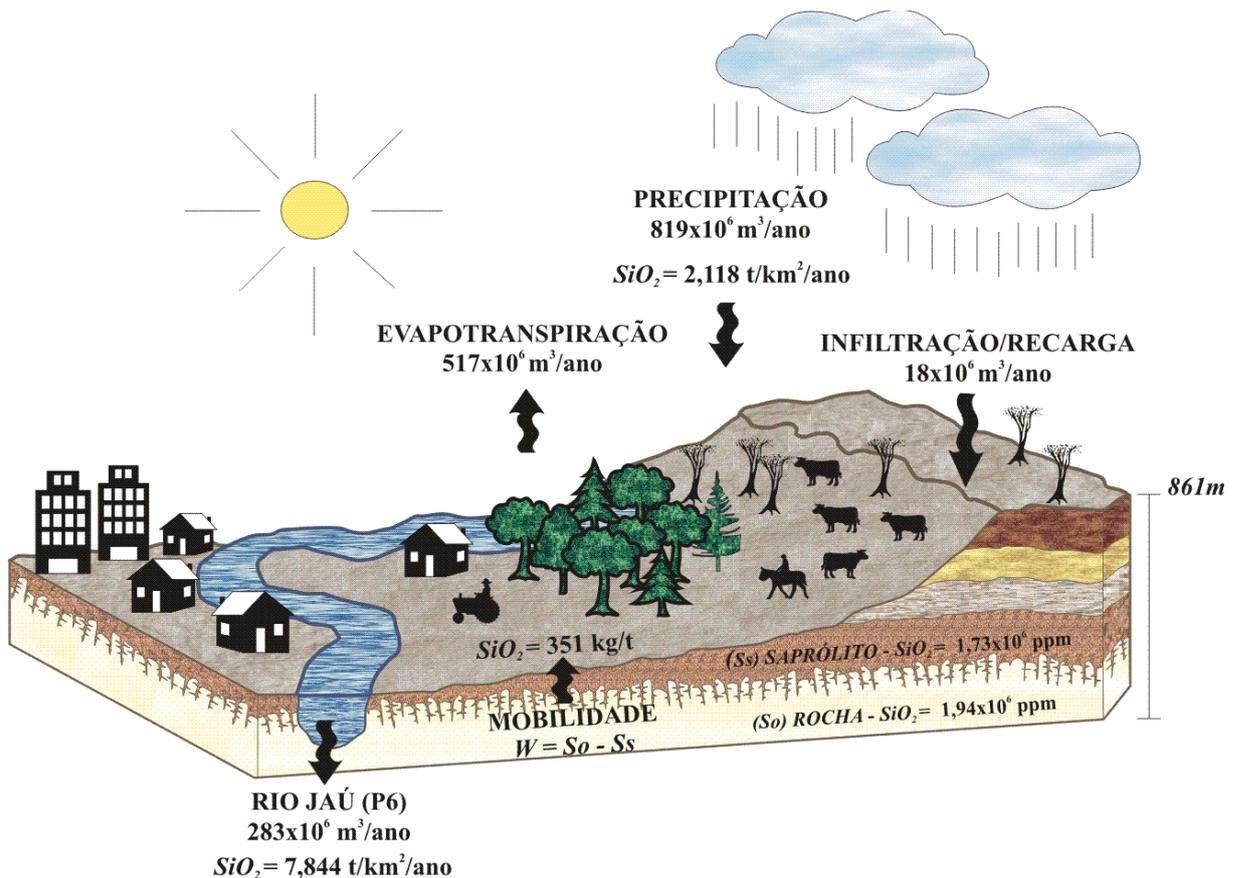


Figura 47. Bloco diagrama esquemático, com as condições adotadas neste trabalho com o fluxo hídrico e de  $SiO_2$  na bacia do Rio Jaú, e com a indicação da altitude atual na cabeceira do Ribeirão do Bugio (861 m).

Para uma dada composição de rochas e um determinado fluxo de sílica dissolvida nos rios, a taxa de intemperismo calculada depende principalmente da composição do saprolito da abundância relativa de quartzo residual e da caulinita neoformada (BOEGLIN & PROBST, 1998). Estes parâmetros foram levados em conta neste estudo pelos difratogramas e cálculo da mobilidade de elementos da rocha para o solo ( $W = S_o - S_s$ ), conforme visto no Capítulo 5 (Figuras 15, 21 a 32). Assim, durante o intemperismo das rochas (R1, R2 e R3), uma parte da sílica derivada da hidrólise dos minerais primários (feldspato potássico, anortoclásio, augita,

albita e anortita) é consumida para a formação de minerais secundários (caulinita, haloisita, saponita ou esmectita) nos solos da bacia (S1, S2 e S3).

A solubilidade do quartzo é menor do que a de outros minerais, assim, a taxa de intemperismo total da rocha será menor levando em conta a sua lixiviação durante o intemperismo das rochas (R1, R2 e R3) para o saprolito (S1, S2 e S3). Isto é importante, pois significa que se o quartzo não é dissolvido, toda a sílica será proveniente da hidrólise de silicatos minerais. Assim, o aumento da alteração destes minerais também aumenta a taxa de intemperismo.

## 9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de estudo, bacia do Rio Jaú, encontra-se inserida na Província Geomorfológica das Cuestas Basálticas. Esta província é dominada por derrames de rochas eruptivas básicas (Formação Serra Geral) e lentes de arenitos eólicos, sobre os basaltos (Formação Itaquerí). Os resultados demonstraram que, quanto à proveniência, as rochas estudadas podem ser classificadas como de sedimentos retrabalhados subarcóseanos (R1), e basaltos toleíticos de caráter básico (R2 e R3).

Os dados comparativos entre as rochas (R1, R2 e R3) e solos (S1, S2 e S3) da bacia do rio Jaú, indicaram que óxidos de sódio, cálcio, magnésio, potássio e manganês são os primeiros elementos a serem mobilizados nos processos de intemperismo. Fato inverso ocorre aos óxidos de alumínio, titânio, fósforo e ferro, os quais são menos removidos, havendo o aumento na sua concentração no perfil dos solos (S1, S2 e S3). O mesmo ocorre com zircônio, nióbio, tório, bário e ítrio.

A análise mineralógica por difração de raios X além de possibilitar a identificação dos minerais primários presentes nas rochas também possibilitou caracterizar os processos de monossilização e bissialitização, geração de argilo minerais pela hidrólise parcial da rocha mãe (R1, R2 e R3), com parte da sílica permanecendo no perfil de alteração (S1, S2 e S3) e sódio, cálcio, potássio e magnésio sendo mobilizados.

Assim, ao se utilizar os principais cátions (cálcio, magnésio, sódio e potássio) com o propósito de investigar a taxa de intemperismo químico e o balanço anual de cátions e ânions na bacia do Rio Jaú (SP), foi possível identificar alguns problemas, provavelmente relacionados com as contribuições antropogênicas ocorrendo neste sistema natural.

Utilizando o modelo da taxa de intemperismo químico por intermédio de  $\text{SiO}_2$ , na bacia do Alto Niger (rochas ígneas e metamórficas), leste da África BOEGLIN & PROBST (1998) chegaram a valores de 0,0047 mm/ano, ou aproximadamente 212.000 anos para alterar 1m de rocha (Tabela 33). PRICE et. al., (2008) utilizaram o método de matriz algébrica na bacia do Rio Brubaker (rochas metamórficas), chegando a um valor aproximado de 0,0055 mm/ano, o que resulta em aproximadamente 182.000 anos para alterar 1 metro de rocha nas condições do clima temperado da Pensilvânia (EUA). Na bacia do Rio Sena, França, utilizando o método *TDScarb* para rochas carbonáticas ROY et. al., (1999) chegaram a um valor de 0,025 mm/ano de rocha alterada por ano, o que resulta em 1 metro de rocha alterada a cada 40.000 anos. Na bacia do Rio Caura, tributário do Rio Orinoco na Venezuela, LEWIS Jr et al., (1987) utilizando a técnica de balanço de massa geoquímico, chegaram a um valor de

0,018 mm/ano ou aproximadamente 56.000 anos para alterar 1 metro de rochas ígneas (granitos pré-cambrianos) e metamórficas (metassedimentares e metavulcânicas). TARDY et al., (2004) determinaram a taxa de intemperismo químico deduzida a partir do fluxo de SiO<sub>2</sub>, vindo de perfis de intemperismo de porções de rochas graníticas, utilizando o método da Taxa de Erosão Química (CWR) e chegaram a uma taxa de 0,00338 mm/ano ou aproximadamente 295.000 anos para alterar 1 metro de rocha (Tabela 33).

Tabela 33. Taxas de intemperismo químico em diferentes locais do Brasil e do mundo.

<i>Local</i>	<i>Área (km<sup>2</sup>)</i>	<i>Litologia</i>	<i>Taxa (m/Ma)</i>
<i>Bacia do Alto Niger</i> <sup>a</sup>	117.000	Granitos, gnaisses, micaxistos, grauvacas e arenitos	4,7
<i>Bacia do Rio Brubaker</i> <sup>b</sup>	2,3	Xistos e Gnaisses	5,5
<i>Bacia do Rio Sena</i> <sup>c</sup>	43.800	Calcários, calcários argilosos e depósitos fluviais	25
<i>Bacia do Rio Caura</i> <sup>d</sup>	47.500	Granitos, arenitos, conglomerados e diques básicos	1,8
<i>Bacia do Alto Niger</i> <sup>e</sup>	117.000	Granitos, gnaisses, micaxistos, grauvacas e arenitos	3,38
<i>Bacia do Alto Sorocaba</i> <sup>f</sup>	929	Granitos e gnaisses	14
<i>Bacia do Rio Corumbataí</i> <sup>g</sup>	1.581	Arenitos, argilitos, conglomerados e basaltos	27
<i>Morro do Ferro</i> <sup>h</sup>	800	Fonólitos, tinguaitos e foiaítos.	15
<i>Bacia do Rio Preto</i> <sup>i</sup>	22.630	Arenitos, granitos e gnaisses	40
<i>Bacia do Rio Salgado</i> <sup>j</sup>	12.216	Granitos, gnaisses, xistos e filitos	13
<i>Bacia do Rio Piracicaba</i> <sup>k</sup>	12.400	Arenitos, basaltos, conglomerados, granitos, gnaisses e filitos	2,8
<i>Bacia do Rio Amazonas</i> <sup>l</sup>	4.619.000	Calcários, calcários argilosos, depósitos fluviais, arenitos, siltitos, argilitos, granitos, xistos e gnaisses	15
<i>Bacia do Rio Jaú</i> <sup>m</sup>	467,16	Arenitos e basaltos	6,13

<sup>a</sup>BOEGLIN & PROBST, 1998 <sup>b</sup>PRICE et. al., 2008 <sup>c</sup>ROY et. al., 1999 <sup>d</sup>LEWIS Jr et al., 1987 <sup>e</sup>TARDY et al., 2004 <sup>f</sup>SARDINHA et. al., 2010 <sup>g</sup>CONCEIÇÃO & NAVARRO, 2008 <sup>h</sup>BONOTTO et al., 2007 <sup>i</sup>MOREIRA-NORDEMANN, 1980 <sup>j</sup>MOREIRA-NORDEMANN, 1984 <sup>k</sup>MORTATTI et al., 2003 <sup>l</sup>MORTATTI & PROBST, 2003 <sup>m</sup>Neste estudo

Utilizando o modelo da taxa de intemperismo químico por intermédio de SiO<sub>2</sub> na bacia do Rio Piracicaba, estado de São Paulo (MORTATTI et al., 2003) determinaram a taxa de intemperismo químico das rochas silicadas (rochas ígneas, metamórficas e sedimentares) em cerca de 2,8 m/Ma ou 357.000 anos para alterar e metro de rocha. Na bacia do Rio Amazonas (MORTATTI & PROBST, 2003) chegaram a uma taxa de 15m/Ma ou

aproximadamente 67.000 anos para alterar 1 metro de rocha ígnea, sedimentar e metamórfica (Tabela 33).

No Brasil, há alguns estudos que utilizam o método do desequilíbrio isotópico do urânio na avaliação da taxa de intemperismo químico. SARDINHA et al., (2010) na bacia do Alto Sorocaba (rochas ígneas e metamórficas) chegaram a um valor 0,014mm/ano ou 72.000 anos para alterar 1 metro de rocha. CONCEIÇÃO & NAVARRO, (2008) para as rochas sedimentares da bacia do Rio Corumbataí chegaram a um valor de 0,027 mm/ano, ou 38.000 anos para alterar 1 metro de rocha. BONOTTO et al., (2007) em trabalho realizado no Morro do Ferro, Minas Gerais, chegaram a um valor de 0,015 mm/ano, ou 67.000 anos para alterar 1 m de rocha. MOREIRA-NORDEMANN (1980) em trabalho realizado na bacia do Rio Preto, Bahia, chegou a um valor de 0,04 mm/ano, ou 25.000 anos para alterar 1 m de rocha. Na bacia do Rio Salgado, Bahia, MOREIRA-NORDEMANN, (1984) encontrou uma taxa de intemperismo de 0,013 mm/ano, ou aproximadamente 77.000 anos para alterar 1 metro de rocha (Tabela 33).

A rocha mãe, clima, topografia, biosfera e tempo são os fatores que controlam os processos de alteração. O clima quente e úmido da bacia do Rio Jaú acelera as taxas de reações químicas e aumentam a remoção de elementos, quando comparado com outros locais do mundo. O cálculo da taxa de intemperismo químico das rochas ( $WR_{ch}$ ) efetuado para a sílica ( $SiO_2$ ) através do modelo proposto foi de 0,00613 mm/ano, portanto, pode-se dizer que seriam necessários aproximadamente 163.000 anos para alterar 1m de rocha nas condições climáticas atuais adotadas neste trabalho. A estimativa da taxa de intemperismo na bacia do Rio Jaú é semelhante à encontrada em outros locais do Brasil e do mundo (Tabela 33), apesar das diferenças litológicas e dos métodos aplicados.

Outra maneira de se comparar as taxas de intemperismo químico na bacia do Rio Jaú, com base em hipótese semelhante, é levar em conta a lixiviação dos cátions  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  durante o processo de alteração da rocha e formação do solo (Tabela 34). Neste sentido, a taxa de intemperismo determinada da mesma maneira como foi para a sílica, utilizando a equação 22, resulta em 0,02197 mm/ano ou 21,97 m/Ma (46.000 anos para alterar 1 m de rocha utilizando o  $Ca^{2+}$  como traçador natural), 0,01635 mm/ano ou 16,35 m/Ma (61.000 anos para alterar 1 m de rocha utilizando o  $Mg^{2+}$  como traçador natural), 0,02863 mm/ano ou 28,63 m/Ma (35.000 anos para alterar 1 m de rocha utilizando o  $Na^+$  como traçador natural) e 0,02171 mm/ano ou 21,71 m/Ma (46.000 anos para alterar 1 m de rocha utilizando o  $K^+$  como traçador natural).

Tabela 34. Taxa de intemperismo químico na bacia do Rio Jaú, levando em conta a lixiviação dos cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e de  $\text{SiO}_2$ .

<i>Elemento</i>	<i>Taxa de intemperismo</i>		
	<i>(mm/ano)</i>	<i>(m/Ma)</i>	<i>Tempo para alterar 1 metro de rocha (anos)</i>
$\text{Ca}^{2+}$	0,0219	21,97	46.000
$\text{Mg}^{2+}$	0,0163	16,35	61.000
$\text{Na}^+$	0,0286	28,63	35.000
$\text{K}^+$	0,0217	21,71	46.000
$\text{SiO}_2$	0,0061	6,13	163.000

## ***10 – CONCLUSÃO***

A abordagem metodológica empregada neste trabalho teve como finalidade realizar estudos de avaliação da taxa de intemperismo químico na bacia do Rio Jaú. O procedimento adotado permitiu proceder à análise das informações e a geração de conhecimentos de forma sistemática, sem prejudicar a especificidade de cada tipo de informação.

Os resultados das análises químicas e mineralógicas nas rochas da bacia do Rio Jaú demonstraram que os principais elementos são os primeiros a serem mobilizados nos processos de alteração. No entanto, a solubilidade do quartzo é menor do que a de outros minerais, acarretando na geração de argilo minerais e quartzo residual nos solos da bacia. Assim, justifica-se o uso da sílica para calcular a taxa de intemperismo químico na bacia do Rio Jaú, por se originar principalmente da hidrólise de silicatos minerais das rochas e dos solos.

Os resultados da investigação visual e hidroquímica conduzida na bacia do Rio Jaú levaram em conta parâmetros que permitiriam avaliar alterações na paisagem e na qualidade das águas fluviais, o que ajudou a identificar que alguns parâmetros não estão em conformidade com os padrões de qualidade estabelecidos pela legislação brasileira. O Ribeirão do Bugio possui condições melhores que o Ribeirão São João, no entanto, após a confluência, no Rio Jaú (P5), a água apresenta características de qualidade intermediária àquela apresentada nos exutórios destes rios. Já os resultados da análise das águas de chuva da bacia do Rio Jaú mostraram que possíveis impactos ambientais acontecem, principalmente relacionados às atividades de uso do solo para atividades agrícolas.

A utilização do sódio, potássio, cálcio e magnésio como traçadores naturais na estimativa de taxas de alteração por intemperismo químico forneceram resultados menos compatíveis com as condições intempéricas. Não foi possível estimar a taxa de intemperismo baseada no modelo isotópico do urânio devido às baixas concentrações encontradas, além da razão de atividade entre solos e rochas estarem próximas a um (1,00). Porém, a sílica se mostrou mais apropriada para a quantificação da taxa de intemperismo químico, possibilitando estimar um valor de 163.000 anos aproximadamente para alterar uma camada de 1 m de rocha (arenitos da Formação Itaqueri e basaltos da Formação Serra Geral) na bacia estudada nas condições climáticas atuais.

O estudo das taxas de intemperismo químico forneceu aproximações úteis de desgaste das rochas, contribuindo assim, para um melhor conhecimento do modelamento do terreno, erosão e evolução de paisagem. Assim, a interação entre a taxa de desgaste das rochas, uso

do solo, águas de chuva e águas superficiais podem contribuir para futuras ações voltadas ao planejamento, desenvolvimento do uso do solo, diminuição da degradação ambiental e gerenciamento integrado da bacia hidrográfica do Rio Jaú.

## 11 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON S.P.; DIETRICH W.E.; BRIMHALL G.H. *Weathering profiles, mass-balance analysis, and rates of solute loss: Linkages between weathering and erosion in a small, steep catchment*. Geological Society of America Bulletin, 2002, vol. 114(9), pp. 1143–1158.

ANDREAE M.O.; TALBOT R.W.; BERRESHEIM H.; BEECHER K.M. *Precipitation chemistry in Central Amazonia*. Journal of Geophysical Research, 1990, vol. 95, pp. 987-999.

BAIN D.C.; ROE M.J.; DUTHIE D.M.L.; THOMSON C.M. *The influence of mineralogy on weathering rates and processes in an acid-sensitive granite catchment*. Applied Geochemistry, 2001, vol. 16, pp. 931-937.

BERNER E.K.; BERNER R.A. *Global environment. Water, air and geochemical cycles*. Prentice Hall, 1996, 367p.

BOEGLIN J.L.; PROBST J.L. *Physical and chemical weathering rates and CO<sub>2</sub> consumption in a tropical lateritic environment: the upper Niger basin*. Chemical Geology, 1998, vol. 148, pp. 137-156.

BONOTTO, D.M. *Comportamento hidrogeoquímico do <sup>222</sup>Rn e isótopos de urânio <sup>238</sup>U e <sup>234</sup>U sob condições controladas de laboratório e em sistemas naturais*. Tese de Livre Docência. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Unesp, Rio Claro, 1996, 203 p.

BONOTTO, D.M. *Radioatividade nas águas: da Inglaterra ao Guarani*. São Paulo: Editora UNESP, 2004, 251p.

BONOTTO D.M.; FUJIMORI K.; MOREIRA-NORDEMANN L.M. *Determination of weathering rate of the Morro do Ferro Th-REEs deposit, Brazil using U-isotope method*. Applied Radiation and Isotopes, 2007, vol. 65, pp. 474–481.

BORTOLETTO JÚNIOR R.M.J.; MORTATTI J.; PROBST J.L. *Erosão Química na Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí (SP)*. Geochimica Brasiliensis, 2002, vol. 16, n. 1, pp. 99-111.

BRAGG W.L. *The Diffraction of Short Electromagnetic Waves by a Crystal, Proc.* Cambridge Phil. Soc., 1913, vol. 17, pp. 43-57.

BRIMHALL G.H.; CHADWICK O. A.; LEWIS C.J.; COMPSTON W.; WILLIAMS I.S.; DANTI K. J.; DIETRICH W.E.; POWER M.E.; HENDRICKS D.; BRATT J. *Deformational Mass Transport and Invasive Processes in Soil Evolution*. Science, 1991, vol. 255, pp. 695-702.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Decreto n° 8.468, de 8 de setembro de 1976**. Aprova o regulamento da Lei n° 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e Controle da Poluição do Meio Ambiente. Disponível em [http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/portugues\\_leis\\_dec.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/portugues_leis_dec.asp). Acesso em 26/10/2010.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo**. São Paulo, CETESB, 2011, 298p.

CHAKRAPANI G.J.; SAINI R.K.; YADAV S.K. **Chemical weathering rates in the Alaknanda–Bhagirathi river basins in Himalayas, India**. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, Vol. 34, pp. 347–362.

CIIAGRO. Centro integrado de informações agrometeorológicas. **Monitoramento Climatológico: Jaú no período de 01/08/2009 até 01/09/2010**. Disponível em <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Listagens/MonClim/LMCLimLocal.asp>. Acesso em 28/12/2011.

CIIAGRO. Centro integrado de informações agrometeorológicas. **Resenha: Jaú no período de 01/08/2009 até 01/08/2010**. Disponível em <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Listagens/Resenha/LResenhaLocal.asp>. Acesso em 28/12/2011.

CLOW D.W.; DREVER J.I. **Weathering rates as function of flow through an alpine soil**. Applied Geochemistry, 1996, vol. 132, pp. 131-141.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n° 357, de 17 de março de 2005**. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano>. Acesso em 26/10/2010.

CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS - CERH. 1999. **Comitês de Bacia Hidrográfica**. São Paulo. SRHSO/DAEE. 22p.

CONCEIÇÃO F.T.; BONOTTO D. M. **Use of U-isotopes disequilibrium to evaluate the weathering rate and fertilizer-derived uranium at São Paulo State**. Environmental Geology, 2003, vol. 44, pp. 408-418.

CONCEIÇÃO F.T.; BONOTTO D.M. **Weathering rates and anthropogenic influences in a sedimentary basin, São Paulo State, Brazil**. Applied Geochemistry, 2004, vol. 19, pp. 575-591.

CONCEIÇÃO F.T.; SARDINHA D.S.; SOUZA A.D.G.; BONOTTO, D.M. **Hydrochemical Relationships at Meio Stream Watershed, São Paulo State, Brazil**. Revista Brasileira de Geociências, 2007, vol. 37, pp. 389-400.

CONCEIÇÃO F.T.; NAVARRO G.R.B. *The influences of fertilizer-derived uranium on rocks chemical weathering rates*. In: VI South American Symposium on Isotope Geology, Bariloche, 2008, Vol 1, pp. 179 - 180.

CONCEIÇÃO F.T.; SARDINHA D.S.; SANTOS C.M. *Avaliação ambiental simplificada dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Ribeirão Preto, São Paulo*. Olam Ciência & Tecnologia, Rio Claro, 2010, vol. 10, pp. 36-60.

CONCEIÇÃO F.T.; SANTOS C.M.; SOUZA A.D.G.; LIMA V.B.; SARDINHA D.S.; NAVARRO G.R.B. *Avaliação do transporte específico de cátions e ânions na bacia do Ribeirão Preto (SP)*. Geochimica Brasiliensis, 2012, no prelo.

DANELON O.M.; MOREIRA-NORDEMANN L.M. *Ocorrência natural e antropogênica de  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$  e  $SO_4^{2-}$  na bacia do Rio Quilombo (Cubatão - SP)*. Revista Brasileira de Geociências, 1991, vol. 21(1), pp. 96-101.

ERNESTO M.; RAPOSO M.I.B.; MARQUES L.S.; RENNE P.R.; DIOGO L.A.; DE MIN A. *Paleomagnetism, geochemistry and  $^{40}Ar/^{39}Ar$  dating of the North-eastern Paraná magmatic province: tectonic implications*. Journal of Geodynamics, 1999, Vol. 28, pp. 321-340.

FAURE G. *Principles and applications of geochemistry*. New Jersey: Editora Prentice Hall, 2ª edição, 1998, 605p.

FERNANDES L.A. *Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)*. Tese - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo, 1998, 216 p.

FIORENTINO, J.C. *Geoquímica do mercúrio e outros elementos em perfil de solo desenvolvido sobre diabásio, Paulínia - SP*. Dissertação - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. Campinas, 2007, 54p.

FÚLFARO V.J.; BJORNBERG A. *Solos do Interior de São Paulo*. São Paulo: Editora. EDUSP, 1983, pp. 1-39.

GALLOWAY J.N.; LIKENS G.E.; KEENE W.C.; MILLER J.M. *The composition of precipitation in remote areas of the world*. Journal of Geophysical Research, 1982, Vol. 87, pp. 8771-8786.

GARRELS R.M.; MACKENZIE F.T. *Origin of the chemical composition of some springs and lakes*. In: Equilibrium concepts in natural waters systems. American Chemical Society, Advances in Chemistry Series, 1967, 67p.

GRASBY S.E.; HUTCHEON I. *Chemical dynamics and weathering rates of a carbonate basin Bow River, southern Alberta*. Applied Geochemistry, 2000, vol. 15, pp. 67-77.

HACH. *Water Analysis Handbook*. Hach Company, Loveland, Colorado, USA, 2ª edição, 1992, 831p.

HACHIRO J.; COIMBRA A.M.; MATOS S.L.F. *O caráter cronoestratigráfico da unidade Irati*. In: Simpósio sobre cronoestratigrafia da Bacia do Paraná, 1, 1993, Rio Claro: UNESP/SBG. 1993, pp. 72-74.

HASKINS D. *Chemical and mineralogical weathering indices as applied to a granite saprolite in South Africa*. The 10th IAEG International Congress, Nottingham, United Kingdom, 2006, Paper number 465, 14p.

HERMES L.C.; SILVA A. DE S. *Avaliação da qualidade das águas: manual prático*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, 55p.

HERRON M.M. *Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data*. Journal of Sedimentary Petrology, 1988, Vol. 58, pp. 820-829.

HODSON M.E.; LANGAN S.J.; WILSON M.J. *A sensitivity analysis of the PROFILE model in relation to the calculation of soil weathering rates*. Applied Geochemistry, 1996, vol. 11, pp. 835-844.

HODSON M.E. *Comments on "Calculations of weathering rate and soil solution chemistry for forest soils in the Norwegian-Russian border area with the PROFILE model" by G. Koptsik, S. Tevedal, D. Aamlid and K. Venn*. Applied Geochemistry, 2002, vol. 17, pp. 117-121.

HUDSON D.M. *Petcal (version 2.1) an expanded and personal computer compatible basic language program for petrologic calculations*. Nevada Bureau of Mines and Geology, Open File Report 88-3, 1988, 25p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Carta Brasil 1:50.000 folha SF-22-Z-B-III-3 Dois Córregos*. Superintendência em Cartografia, 1973.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Carta Brasil 1:50.000 folha SF-22-Z-B-II-4 Jaú*. Superintendência em Cartografia, 1973.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Banco de dados: o Brasil município por município*. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/cidades>. Acesso em 07/10/2009.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000*. São Paulo: IPT, Vol 2, 1981, série monografias, 5, 180p.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000*. São Paulo: IPT, 1981, Vol. 2, Monografias, 6, 183p.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê Jacaré – CBH – TJ. *Relatório, 40.674*. São Paulo: 2006, FEHIDRO, IPT, 331p.

IRVINE T.N.; BARAGAR W.R.A. *A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks*. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, Vol. 8, pp. 523-548.

JANASI V.; FREITAS V.A.; HEARMAN L.M. *The onset of flood basalt volcanism, northern Paraná Basin, Brazil: a precise U-Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite*. Earth Science Planet Letters, 2011, Vol. 302, pp. 147-153.

KATTAN Z.; GAC J.Y.; 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, 1987, vol., 92, pp. 59-76.

KOPTSİK G.; TEVEDAL S.; AAMLID D.; VENN K. *Calculations of weathering rate and soil solution chemistry for forest soils in the Norwegian-Russian border area with the PROFILE model*. Applied Geochemistry, 1999, vol. 14, pp. 173-185.

LADEIRA F.S.B.; SANTOS M. *O uso de paleossolos e perfis de alteração para a identificação e análise de superfícies geomórficas regionais: o caso da Serra de Itaqueri (SP)*. Revista Brasileira de Geomorfologia, 2005, vol. 2, pp. 03-20.

LAND M.; INGRI J.; ÖHLANDER B. *Past and present weathering rates in northern Sweden*. Applied Geochemistry, 1999, vol. 14, pp. 761-774.

LANGAN S.J.; REYNOLDS B.; BAIN D.C. *The calculation of base cations release from the chemical weathering of soils derived from Paleozoic greywackes and shales in upland U.K.* Geoderma, 1996, vol. 69, pp. 275-285.

LARA L.B.L.S.; ARTAXO P.; MARTINELLI L.A.; VICTORIA R.L.; CAMARGO P.B.; KRUSCHE A.; AYERS G.P.; FERRAZ E.S.B.; BALLESTER M.V. *Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the Piracicaba River basin, Southeast Brazil*. Atmospheric Environment, 2001, vol. 35, pp. 4937-4945.

LASHERAS ADOT E.; PLANO S.C.; REIXACH J.G. VALENCIA D.E. *Geochemical inheritance of soils that develop from volcanic rocks (Navarra, Western Pyrenees)*. Geoderma, 2006, Vol. 135, pp. 38– 48.

LE MAITRE R.W. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell Science Publishing., Oxford, 1989, 193 p.

LEWIS Jr W.M.; HAMILTON S.K.; JONES S.L.; RUNNELS D.D. *Major element chemistry, weathering and element yields for the Caura River drainage, Venezuela*. Biogeochemistry, 1987, Vol. 4, pp. 159-181.

MARCHIORI L.F.S. *Influência da época de plantio e corte na produtividade de cana de açúcar*. Tese – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004, 273p.

MARQUES L.S.; ERNESTO M. *O magmatismo Toleítico da Bacia do Paraná*. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito-Neves (eds.) Livro Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, 2004, SBG-SP, pp. 245-263.

MARTINI I.P.; CHESWORTH W. *Weathering, soils and paleosols*. Elsevier Science Publications, Amsterdam, 1992, Vol 61, pp. 407 – 443.

MARZOLI A.; RENNE P.R.; PICCIRILLO E.M.; ERNESTO M.; BELLINI G.; DE MIN A. *extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the central Atlantic magmatic province*. Science, 1999, Vol. 284, pp. 616-618.

MELFI A.J. *Intemperismo de granitos e diabásios no município de Campinas e arredores*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1967, 166p.

MELFI A.J.; PEDRO G. *Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil. Parte 1 - Caracterização e repartição dos principais tipos de evolução pedogeológica*. Revista Brasileira de Geociências, 1977, vol. 7, pp. 271-286.

MELO M.S. *A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação neocenozóica na Depressão Periférica Paulista*. Tese - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências. São Paulo, 1995, 144p.

MELLO W.Z. *Precipitation Chemistry in the coast of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil*. Environmental Pollution, 2001, Vol. 114, pp. 235-242.

MEYBECK M. *Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*. UNEP/WHO, 1996, 383p.

MILANI E.J. *Intraplate tectonics and the evolution of the Paraná Basin, S Brazil*. In: M. J. De Wit and I. D. Ransome. Inversion tectonics of the Cape Fold Belt, Karoo and

Cretaceous basins of Southern África. A.A. Balkema, Amsterdam, Rotterdam, 1992, pp. 101-108.

MILANI E.J.; FRANÇA A.B.; SCHNEIDER R.L. *Bacia do Paraná*. Boletim de Geociências da Petrobrás. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1994, Vol. 8, n. 1, pp. 69-82.

MILANI E.J. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental*. Tese -Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997, 255 p.

MILANI E.J.; RAMOS V.A. *Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul-Occidental do Gondwana e os Ciclos de Subsidência da Bacia do Paraná*. Revista Brasileira de Geociências, 1998, Vol. 28, pp.473-484.

MILLOT R.; GAILLARDET J.; DUPRÈ B.; ALLÈGRE C.J. *Northern latitude chemical weathering rates: Clues from the Mackenzie River Basin, Canada*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, Vol. 67, pp. 1305–1329.

MINCATO R.L.; ENZWEILER J.; SCHRANK A. *Novas idades  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  e implicações na metalogênese dos depósitos de sulfetos magmáticos de Ni-Cu-EGP na província ígnea continental do Paraná*. In: IX Congresso Brasileiro de Geoquímica, 2003, Belém – PA. Resumos Expandidos, Sociedade Brasileira de Geoquímica – SBGq, v. único, 4p.

MONTANHEIRO T.J.; YAMAMOTO J.K.; KIHARA Y. *Características e propriedades pozolânicas de arenitos opalinos da Serra do Itaquerí*. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 2002, vol. 23(1), pp. 13-24.

MOREIRA-NORDEMANN L. M.; DANELON O. M.; MAGALHÃES A. L.; FERREIRA C.; PANITZ C. M. N.; SANTIAGO M. M.; SIVA FILHO E.; SOUZA, C. F. *Impactos Ambientais na Precipitação da Costa Brasileira*. Proceedings of 3º Congresso Brasileiro de Geoquímica e 1º Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 1991, vol. 1, pp. 406-409.

MOREIRA-NORDEMANN L.M. *Study of the alteration velocity of rocks by the use of uranium as a natural tracer: application to two basins from northeast Brazil*. Ph.D. thesis, University of Paris VI, 1977, 162 pp.

MOREIRA-NORDEMANN L.M. *Use of  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  disequilibrium in measuring chemical weathering rate of rocks*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, vol. 44, pp. 103-108.

MOREIRA-NORDEMANN L.M. *Salinity and weathering rate of rocks in a semi-arid region*. Journal of Hydrology, 1984, vol. 71, pp. 131-147.

MOREIRA-NORDEMANN L.M.; DANELON O.M.; FORTI M.C.; ESPIRITO SANTO C.M.; SARDELA D.D.; LOPES J.C.; FILHO B.M.; ABBAS M.M. *Caracterização química das águas de chuva de Cubatão*. São José dos Campos, INPE, 1986, 63p.

MOREIRA-NORDEMANN L.M.; GIRARD P.; RÉ POPPI N. *Química da precipitação atmosférica na cidade de Campo Grande – MS*. Revista Brasileira de Geofísica, 1997, vol. 15, pp. 35-44.

MOREIRA-NORDEMANN, L. M., DANELON, O. M., MAGALHÃES, A. L., FERREIRA, C., PANITZ C. M. N., SANTIAGO, M. M., SIVA FILHO, E., SOUZA, C. F.. *Impactos Ambientais na Precipitação da Costa Brasileira*. Proceedings of 3º Cong. Bras. De Geoquímica e 1º Cong. De Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 1991, vol. 1, pp. 406-409.

MORTATTI J.; VICTORIA R.L.; TARDY Y. *Balço de alteração e erosão química na Bacia Amazônica*. Geochimica Brasiliensis, 1997, vol. 11, n. 1, pp. 1-13.

MORTATTI J.; PROBST J.L.; BORTOLETTO JUNIOR, M.J. *Piracicaba river basin: mechanical and chemical erosions*. São Paulo, UNESP, Geociências, 2003, vol. 22, n. 1, pp. 75-81.

MORTATTI J.; PROBST J.L. *Silicate rock weathering and atmospheric/soil CO<sub>2</sub> uptake in the Amazon basin estimated from river water geochemistry: seasonal and spatial variations*. Chemical Geology, 2003, vol. 197, pp. 177– 196.

MORTATTI J.; PROBST J.L.; FERNANDES A. M.; MORTATTI B.C.; OLIVEIRA, H. *Influence of discharge on silicate weathering of the Tietê river basin: major cations and dissolved silica approach*. Geochimica Brasiliensis, 2008, vol. 22, pp. 15-26.

NARDY A.J.R. *Geologia e Petrologia do Vulcanismo Mesozóico da Região Central da Bacia do Paraná*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 1996, 316 p.

NARDY A.J.R.; OLIVEIRA M.A.F.; BETANCOURT R.H.S.; VERDUGOS D.R.; MACHADO F.B. *Geologia e Estratigrafia da Formação Serra Geral*. Geociências, 2002, vol. 21(1), pp.15-32.

NARDY A.J.R.; MACHADO F.B.; OLIVEIRA M.A.F. *As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas*. Revista Brasileira de Geociências, 2008, vol. 38 (1) pp. 178-195.

NÉGREL P.; ROY S. *Chemistry of rainwater in the Massif Central (France): a strontium isotope and major element study*. Applied Geochemistry, 1998, Vol. 13, pp. 941-952.

NESBITT H.W.; YOUNG G.M. *Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based upon thermodynamic and kinetic considerations*. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1984, Vol. 48, pp. 1523-1534.

NESBITT H.W.; YOUNG G.M. *Formation and diagenesis of weathering profiles*. *Journal of Geology*, 1989, Vol. 97, pp. 129-147.

NKOUNKOU R.R.; PROBST J.L. *Hydrology and geochemistry of the Congo River System*. SCOPE/UNEP Sonderband Heft 64, 1987, pp. 483-508.

PEDRO G.; SIEFFERMANN G. *Weathering of rocks and formation of soils*. Review in *Modern Problems of Geochemistry*. UNESCO, 1979, pp. 39-55.

PINTO V.M.; HARTMANN L.S.; SANTOS J.O.S.; McNAUGHTON N.J.; WILDNER W. *Zircon U/Pb geochronology from the Paraná bimodal volcanic province support a brief eruptive cycle at ~ 135 Ma*. *Chemical Geology*, 2010, Vol. 28, pp. 93-102.

PRICE J.R.; VELBEL M.A. *Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks*. *Chemical Geology*, 2003, Vol. 202, pp. 397- 416.

PRICE J.R.; HEITMANN N.; HULL J.; SZYMANSKI D. *Long-term average mineral weathering rates from watershed geochemical mass balance methods: Using mineral modal abundances to solve more equations in more unknowns*. *Chemical Geology*, 2008, Vol. 254, pp. 36–51.

PROBST J.L.; TARDY Y. *Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century*. *Journal of Hydrology*, 1987, vol. 94, pp. 289-311.

PROBST J.L.; NKOUNKOU R.R.; KREMPP G.; BRICQUET J.P. THIÉBAUX J.P. OLIVRY J.C. *Dissolved major elements exported by the Congo and the Ubangi rivers during the period 1987-1989*. *Journal of Hydrology*, 1992, vol., 135, pp. 237-257.

PROBST J.L.; MORTATTI J.; TARDY Y. *Carbon river fluxes and weathering CO<sub>2</sub> consumption in the Congo and Amazon river basins*. *Applied Geochemistry*, 1994, vol. 9, pp. 1-13.

RENNE P.R.; ERNESTO M.; PACCA I.G.; COE R.S.; GLEN J.; PRÉVOT M.; PERRIN M. *Rapid eruption of the Paraná flood volcanism, rifting of southern Gondwanaland and the Jurassic-Cretaceous boundary*. *Science*, 1992, Vol. 258, pp. 975-979.

RENNE P.R.; DECKART K.; ERNESTO M.; FÉRAUD G.; PICCIRILLO E.M. *Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications of Paraná flood volcanism*. Earth Planet Science Letters, 1996, Vol. 144, pp. 199-211.

REZENDE J.H. *Análise Fluviológica e Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Jaú – SP*. Tese – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde. São Carlos, 2009, 152p.

RICCOMINI C. *Considerações sobre a posição estratigráfica e tectonismo deformador da Formação Itaquerí na porção centro leste do estado de São Paulo*. Revista do Instituto de Geociências, 1997a, Vol. 18, pp. 41-48.

RICCOMINI, C. *Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no estado de São Paulo*. Revista Brasileira de Geociências, 1997b, Vol. 27, pp. 153-162.

ROLLINSON H. *Using Geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. London: Longman Group, 1993, 352p.

ROSER B.P.; KORSCH R.J. *Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data*. Chemical Geology, 1988, Vol. 67, pp. 119-139.

ROVERI C. D. *Petrologia aplicada da Formação Corumbataí (Região de Rio Claro – SP) e produtos cerâmicos*. Tese - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2010, 200p.

ROY S.; GAILLARDET J.; ALLÉGRE C.J. *Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine river, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, Vol. 63, pp. 1277–1292.

SALLES M.H.D., CONCEIÇÃO F.T.; ANGELUCCI V.A.; SAI R.; PEDRAZZI F.J.M.; CARRA T.A.; MONTEIRO G.F.; SARDINHA D.S.; NAVARRO G.R.B. *Avaliação simplificada de impactos ambientais na bacia do Alto Sorocaba (SP)*. Revista de Estudos Ambientais, 2008, vol. 10, pp. 6-20.

SALOMÃO F.X.T.; ANTUNES F.S. *Solos em pedologia*. In: Oliveira A.M.S & Brito S.N.A. Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1º edição, 1998, 586p.

SANT'ANNA NETO J.L. *As chuvas no Estado de São Paulo: contribuição ao estudo da variabilidade e tendência da pluviosidade na perspectiva da análise geográfica*. Tese – Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia Física. São Paulo, 1995, 200p.

SANTOS C.M. *Avaliação da taxa de remoção de material dissolvido devido ao intemperismo químico da Formação Serra Geral na bacia do Ribeirão Preto*. Dissertação - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2009, 64p.

SANUSI A.; WORTHAM H.; MILLET M; MIRABEL P. *Chemical composition of rainwater in eastern France*. Atmospheric Environment, 1996, Vol. 30, pp. 59-71.

SARDINHA D.S. *Avaliação da qualidade da água e diagnóstico ambiental na bacia hidrográfica do Ribeirão do Meio, Leme (SP)*. Faculdades COC, Ribeirão Preto, 2005, 95p.

SARDINHA D.S.; CONCEIÇÃO F.T.; CARVALHO D.F.; CUNHA R.; SOUZA A.D.G. *Impactos do uso público em atrativos turísticos naturais do município de Altinópolis – SP*. Revista Geociências, Unesp, São Paulo, 2007, vol. 26, pp. 171-172.

SARDINHA D.S. *Avaliação do intemperismo químico e influências antropogênicas na bacia do Alto Sorocaba (SP)*. Dissertação - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2008, 103p.

SARDINHA D.S.; CONCEIÇÃO F.T.; SOUZA A.D.G.; SILVEIRA A.; JÚLIO, M; GONÇALVES J.C.S.I. *Avaliação da qualidade da água e autodepuração do Ribeirão do Meio, Leme (SP)*. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, 2008, vol. 03, pp. 329-338.

SARDINHA D.S.; CONCEIÇÃO F.T.; BONOTTO D.M.; SALLES M.H.D.; ANGELUCCI V.A. *Avaliação de balanço anual de cátions e ânions na bacia do Alto Sorocaba (SP)*. Revista Brasileira de Geociências, 2008, vol, 38, pp. 730-740.

SARDINHA D.S.; BONOTTO D.M. CONCEIÇÃO F.T. *Weathering rates at Alto Sorocaba basin, Brazil, using U-isotopes and major cations*. Environmental Earth Sciences, 2010, Vol. 61, pp. 1025–1036.

SBG. Sociedade Brasileira de Geologia. *Edição comemorativa 100 anos do relatório White*. Publicação do 44º Congresso Brasileiro de Geologia, Curitiba, 2008, 617 p.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE - SMA. *Gestão das águas: 6 anos de percurso*. Secretaria de Estado do Meio Ambiente/Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras. CETESB/DAEE. São Paulo: SMA, 1997, 128 p.

SEMHI K.; SUCHET P.A.; CLAUER N.; PROBST J.L. *Impact of nitrogen fertilizers on the natural weathering-erosion process and fluvial transport in the Garonne basin*. Applied Geochemistry, 2000, vol. 15, pp. 865-878.

SIGRH. Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo. *Banco de dados pluviométrico e fluviométricos do estado de São Paulo*. Disponível em [www.sigrh.sp.gov.br](http://www.sigrh.sp.gov.br). Acesso em 24/07/2009.

SOARES P.C. LANDIM P.M.B.; FÚLFARO, V.J.; SOBREIRO NETO, A.F. *Ensaio de caracterização do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru*. Revista Brasileira de Geociências, 1980, Vol. 10, pp. 177-185.

SQUISATO E. *A Formação Serra Geral na porção centro - norte do estado de São Paulo*. Dissertação - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2008, 63p.

SQUISATO E.; NARDY A.J.R.; MACHADO F.B.; MARQUES L.S.; ROCHA JR E.R.V.; OLIVEIRA M.A.F. *Litogeoquímica e aspectos petrogenéticos dos basaltos da província magmática do Paraná na porção centro-norte do estado de São Paulo*. São Paulo, UNESP, Geociências, 2009, v. 28, n. 1, pp. 27-41.

STALLARD R.F.; EDMOND J.M. *Geochemistry of the amazon 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load*. Journal of Geophysical Research, 1982, vol. 88, pp. 9671-9688.

STANDARD METHODS. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington, 1999, 20° ed., 663p.

SUCHET P.A.; PROBST J.L. *Modelling of atmospheric CO<sub>2</sub> consumption by chemical weathering of rocks: Application to the Garonne, Congo and Amazon basins*. Chemical Geology, 1993, vol. 107, pp. 205-210

SUGUIO K. *Geologia sedimentar*. São Paulo: Edgard Blucher, 1° edição, 2003, 400p.

SVERDRUP H.; WARFVINGE P. *Calculating field weathering rates using a mechanistic geochemical model PROFILE*. Applied Geochemistry, 1993, vol. 8, pp. 272-282.

TARDY Y.; MORTATTI J.; VICTORIA R.; MARTINELLI L.; RIBEIRO A.; CERRI C.; PICCOLO M.; MORAES J.L.; PROBST J.L.; ANDREUX F.; VOLKO B. *Hydroclimatology and biogeochemistry of the Amazon. 1. Erosion*. Chemical Geology, 1993a, vol. 107, pp. 333-336.

TARDY Y.; MORTATTI J.; VICTORIA R.; MARTINELLI L.; RIBEIRO A.; CERRI C.; PICCOLO M.; MORAES J.L.; PROBST J.L.; ANDREUX F.; VOLKO B. *Hydroclimatology and biogeochemistry of the Amazon. 2. Geochemical cycles*. Chemical Geology, 1993b, vol. 107, pp. 411-414.

TARDY Y.; BUSTILLO V.; BOEGLIN J.L. *Geochemistry applied to the watershed survey: hydrograph separation, erosion and soil dynamics. A case study: the basin of the Niger River, Africa*. Applied Geochemistry, 2004, vol. 19, pp. 469-518

TARDY Y.; BUSTILLO V.; ROQUIN C.; MORTATTI J.; VICTORIA R. *The Amazon. Bio-geochemistry applied to river basin management*. Applied Geochemistry, 2005, vol. 20, pp. 1746–1829

TARTAGLIA J.C.; OLIVEIRA O.L. *Modernização e desenvolvimento no interior de São Paulo*. São Paulo: Editora Unesp, 1º edição, 1988, 154p.

TEIXEIRA W.; TOLEDO M.C.M.; FAIRCHILD T.R.; TAIOLI F. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de textos, 1º edição, 2000, 568p.

TEUTSCH N.; EREL Y.; HALICZ L.; CHADWICK O.A. *The influence of rainfall on metal concentration and behavior in the soil*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, vol. 63 (21), pp. 3499–3511.

THIEDE D.S.; VASCONCELOS P.M. *Paraná flood basalts: rapid extrusion hypothesis confirmed by new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  results*. Geology, 2010, Vol. 38, pp. 747-750.

TUCCI C.E.M. *Hidrologia*. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001, pp. 443-484.

TURNER S.; REGELOUS M.; KELLEY S.; HAWKESWORTH C.; MANTOVANI M. *Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology*. Earth Planet Science Letters, 1994, vol. 121, pp. 333-348.

VELOSO C.A.C.; BORGES A.L.; MUNIZ A.S.; VEIGAS I.A.J.M. *Efeito de diferentes materiais no pH do solo*. Scientia Agricola, 1992, Vol. 49, pp. 123 - 128.

VIEIRA B.M; FORTI M.C.; TAVARES M.F.M.; MOREIRA-NORDEMANN L. M. *Na, Ca, K, Mg e Cl atmosféricos na região leste do Estado de São Paulo*. Revista Brasileira de Geofísica, 1988, vol. 6, pp. 17-23.

WHITE A.F.; BLUM A.E. *Effects of climate on chemical weathering in watersheds*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, Vol. 59, pp. 1729-1747.

WHITE I.C. *Edição comemorativa 100 anos do relatório White 1906*. Sociedade Brasileira de Geologia. Publicação do 44º Congresso Brasileiro de Geologia, Curitiba, 2008, 617 p.

WILLIAMS M. R.; FISHER T. R.; MELACK J. M. *Chemical composition and deposition of rain in the central Amazon Brazil*. Atmosphere Environment, 1997, Vol. 31, pp. 207-217.

ZALÁN P.V.; WOLFF S.; ASTOLFI M.A.M.; VIEIRA I.S.; CONCEIÇÃO J.C.J.; APPI V.T.; NETO E.V.S.; CERQUICIRA J.R.; MARQUES A. *The Paraná Basin, Brazil*. In: M. W. Leighton; D. R. Kolata; D. F. Oltz; J. J. Eidel Interior cratonic basins. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1990, Vol. 51, pp. 681-708.

ZANFELICE T.; ETCHEBEHERE M.L.; SAAD A.R. *Avaliação preliminar do potencial turístico do município de Rifaina (SP) e os impactos decorrentes do uso público de seus atrativos paisagísticos*. Revista Geociências, São Paulo, Unesp, 2009, vol. 28, pp. 203-220.