

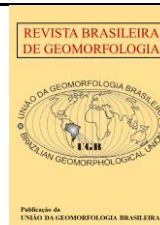


<https://rbgeomorfologia.org.br/rbg>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 23, n° 3 (2022)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i3.2133>



Artigo de Pesquisa

Monossialitização como principal processo de intemperismo químico no planalto alcalino de Poços de Caldas (MG)

Monosialitization as the main chemical weathering process in the Poços de Caldas alkaline plateau (MG)

Rafael Carvalho Alves de Mello ¹, Fabiano Tomazini da Conceição ¹, Alexandre Martins Fernandes¹ e Diego de Souza Sardinha ²

¹ UNESP – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental, Rio Claro, Brasil. E-mail: fabiano.tomazini@unesp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3625-4788>

² UNIFAL – Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciência e Tecnologia, Poços de Caldas, Brasil. E-mail: diego.sardinha@unifal-mg.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5763-0535>

Recebido: 27/05/2021; Aceito: 28/03/2022; Publicado: 01/07/2022

Resumo: As características das águas fluviais são fortemente influenciadas pelos processos de intemperismo químico das rochas em uma bacia hidrográfica. Assim, este trabalho investigou a influência do processo de intemperismo químico na composição das águas superficiais no planalto alcalino de Poços de Caldas, estudando-se a bacia do Córrego Ariranha. Os parâmetros físicos e químicos foram avaliados mensalmente, totalizando doze amostragens ao longo de 2016. Os resultados indicaram que as águas do Córrego Ariranha são constituídas majoritariamente pelos íons dissolvidos HCO_3^- e Na^+ . A descarga dissolvida total foi de 247,6 t/a em 2016, com a maior parte sendo transportada no período úmido (75,6%). O fluxo anual específico de 25,3 t/km²/a é inferior ao quantificado em outras bacias hidrográficas formadas por rochas alcalinas no Brasil e no mundo, independentemente das condições climáticas de cada região. As águas do Córrego Ariranha são controladas pela mistura das águas pluviais e os processos de monossialitização dos minerais silicatos que compõe as rochas alcalinas do planalto de Poços de Caldas.

Palavras-chave: Interação água-rocha/solo; Rochas alcalinas; Erosão química.

Abstract: The characteristics of surface waters are strongly influenced by chemical weathering processes of the rocks in a watershed. Thus, this work investigated the chemical weathering influences on the surface water composition in the Poços de Caldas alkaline plateau, studying the Ariranha Stream basin. The physical and chemical parameters were evaluated monthly, totalizing twelve samples throughout 2016. The results indicated that the Ariranha Stream waters are constituted mainly by HCO_3^- and Na^+ dissolved ions. The dissolved load was 247,6 t/a in 2016, with the majority being transported in the wet period (75,6%). The annual flux of 25,3 t/km²/a is lower than the obtained in other watersheds composed for alkaline rocks in Brazil or elsewhere, independently of the climatic conditions. The Ariranha Stream waters are controlled by a mixed between the rainwaters and the monossialitisation processes of the primary minerals of the Poços de Caldas alkaline plateau.

Keywords: Water-rock interactions ; Alkaline rocks ; Chemical erosion.

1. Introdução

Os sistemas fluviais desempenham um importante papel no processo de denudação continental, transportando os produtos do intemperismo e remoção dos solos de maneira dissolvida e sólida, respectivamente. As mesmas podem ser transferidas para outros rios, lançadas diretamente para o oceano ou então depositadas em lagos interiores, no caso de bacias endorréicas (STEVANUX; LATRUBESSE, 2017). Os processos de intemperismo químico atribuem características físico-químicas às águas fluviais, os quais são fortemente influenciados pelas rochas que compõe a bacia hidrográfica e o clima onde ela está inserida (WHITE; BLUM, 1995; MEYBECK, 2003). De acordo com Gibbs (1970), os sistemas fluviais continentais podem ser classificados em três tipos químicos predominantes, ou seja, (a) rios controlados pela água de chuva, geralmente com baixa concentração de íons dissolvidos; (b) rios controlados pelo processo de intemperismo químico de rochas; (c) rios com predomínio dos processos de evaporação-cristalização, geralmente encontrados em regiões de clima árido e semiárido.

A partir de informações sobre os fluxos de entrada e saída de elementos e/ou compostos químicos em uma bacia hidrográfica é possível obter informações dos processos que controlam a composição química das águas fluviais (GARRELS; MACKENZIE, 1967), além de possibilitar a estimativa da remoção de CO₂ atmosférico e seu impacto no ciclo global do carbono (MARTIN; MEYBECK, 1979; GAILLARDET et al., 1999; DUPRÉ et al., 2003; LERMAN et al., 2007). Diversos estudos envolvendo especificamente bacias hidrográficas compostas por basaltos (LOUVAT; ALLÈGRE, 1997, 1998; DESSERT et al., 2001, 2003; LOUVAT et al., 2008; CONCEIÇÃO et al., 2015) e granitos (WHITE; BLUM, 1995; BOEGLIN; PROBST, 1998; MILLOT et al., 2002; GAILLARDET et al., 2003; OLIVA et al., 2003; FERNANDES et al., 2016) foram realizados em todo o mundo em diferentes condições climáticas, de relevo e uso da terra. No Brasil, somente alguns estudos relacionados às interações água-rocha/solo foram conduzidos em Crátons Pré-Cambrianos (MOREIRA-NORDEMANN 1980, 1984), Cinturões Orogênicos (SARDINHA et al., 2010; FERNANDES et al., 2016) e na Bacia Sedimentar do Paraná (CONCEIÇÃO; BONOTTO, 2003, 2004; CONCEIÇÃO et al., 2015; COUTO JÚNIOR et al., 2016; SPATTI JÚNIOR et al., 2019), sendo a bacia do Rio Amazonas a região mais estudada (GIBBS, 1967; STALLARD; EDMOND, 1981, 1983, 1987; GAILLARDET et al., 1997; MORTATTI; PROBST, 2003; HORBE et al., 2016).

O planalto alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais, exibe feições da Serra Anelar, com picos de 1500 a 1700 m de altitude, enquanto no interior do planalto a altitude média é de aproximadamente 1300 m, sendo o relevo marcado por colinas, morros e morrotes (CAVALCANTI et al., 1979; TINÓS, 2011; DORANTI-TIRITAN et al., 2014). O planalto alcalino é composto por tinguaitos, nefelina sienito e fonólito, associadas ao magmatismo alcalino do Neocretáceo (Turoniano-Coniaciano) que ocorreu por volta de 78,6 Ma (ULBRICH et al., 2002). Também há ocorrências pontuais de rochas máficas e diques ultramáficos alterados hidrotermalmente, além de enclave de arenitos das formações Botucatu e Aquidauana/Pirambóia (GOMES; COMIN-CHIARAMONTI, 2017). A evolução da paisagem regional do Planalto Sul de Minas, onde o maciço alcalino de Poços de Caldas está inserido, foi determinada pelo soerguimento da margem continental (a partir de 70 Ma) e a desconexão com o nível de base geral com taxas de erosão de até 16 m/Ma (SOUZA et al., 2021). Neste planalto alcalino localizam-se atividades de mineração, processamento e disposição de rejeitos de bauxita e fosfato (ANM, 2020), tornando a região um importante polo de mineração brasileiro.

Baseado na geoquímica fluvial, mais especificamente nas concentrações de sólidos totais dissolvidos (STD) e sólidos totais em suspensão (STS), Sardinha et al. (2018) propuseram taxas de intemperismo químico e remoção de solos de 3,6 e 5 m/Ma, respectivamente, indicando um balanço positivo de denudação no planalto alcalino de Poços de Caldas (MG). Contudo, os autores não indicaram os processos de intemperismo químico atuantes nas rochas alcalinas, os quais estão entre os principais responsáveis pela composição química de suas águas superficiais. Procurando preencher essa lacuna, este trabalho visa obter informações sobre os processos de intemperismo químico e sua influência na composição das águas superficiais no planalto alcalino de Poços de Caldas. Tais informações são de grande importância para o entendimento dos processos de intemperismo químico em rochas alcalinas e para a gestão dos recursos hídricos, pois a compreensão das características químicas naturais dessas águas fluviais pode fornecer subsídios para futuros planos de gestão e monitoramento.

2. Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi conduzido na bacia Córrego Ariranha (6,3 km²), localizada na borda noroeste do planalto alcalino de Poços de Caldas (Fig. 1). A vegetação nativa é constituída por floresta tropical semidecidual e campos de altitude, que atualmente estão restritos aos topos de serras e terrenos de difícil acesso. Atualmente, há predominância de áreas rurais relacionadas à agricultura, pastagens e florestas de produção, enquanto as áreas não agrícolas se distribuem ao longo da margem direita do córrego e configuram atividades de baixo adensamento demográfico com predomínio de áreas permeáveis (MELLO, 2020). As atividades antrópicas de maior potencial poluidor ocorrem somente no entorno da área de estudo, com destaque às atividades de mineração, beneficiamento e transbordo de bauxita, indústrias de transformação de alumínio (ALVES, 2011) e produção de fertilizantes termofosfáticos. Esta bacia hidrográfica foi selecionada por possuir mínima atividade urbana ou rural, não sendo necessária correções das atividades antrópicas nos fluxos dissolvidos de íons e sílica.

As rochas predominantes na bacia do Córrego Ariranha são nefelinas sienitos, tinguaítos e fonólitos, ocupando juntas cerca de 70% do território, enquanto rochas piroclásticas representam cerca de 30% (Fig.1). Os fonólitos e tinguaítos são os correspondentes extrusivos e hipoabissais dos nefelinas sienitos, respectivamente, e apresentam composição química e mineralógica semelhante. Caracterizam-se pela presença do feldspato alcalino como principal silicato (ortoclásio – $KAlSi_3O_8$ e sanidina – $(K,Na)(AlSi)_4O_8$), seguido por feldspatóides (nefelina – $(Na,K)AlSiO_4$ e cancrinita – $Na_6Ca_2Al_6Si_6O_{24}(CO_3)_2$) e clinopiroxênios (egirina – $NaFe^{3+}(Si_2O_6)$ e egirina-augita – $(Ca,Na)(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+})(Si_2O_6)$) (MELLO, 2020). A faixa de rochas piroclásticas é composta por brechas, aglomerados e tufo vulcânicos, contêm vesículas, amídalas e fragmentos de fonólitos remanescentes de fluxos de lava, podendo conter fenocristais de ortoclásio e clinopiroxênio, com matriz composta principalmente por clinopiroxênios e nefelina, também podendo ocorrer flogopita ($KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$) de granulação variando de fina a média, além de veios de fluorita (CaF_2) ao longo de fraturas nas brechas (ULBRICH et al., 2005; GOMES; COMIN-CHIARAMONTI, 2017). Os perfis de alteração são espessos e lixiviados em encostas suaves e levemente onduladas, apresentando características bauxíticas ou argilosas dependendo das condições de drenagem do terreno, com predomina a formação de Latossolos. Nas regiões mais acidentadas do dique anelar predomina perfis de alteração delgados com formação de Cambissolos, enquanto nas regiões planas ocorrem solos indiferenciados de várzea, pouco profundos e associados com o encharcamento e/ou deposição de material orgânico e arenoso. No leste da bacia, ocorrem solos de brechas vulcânicas com pedogênese controlada pelo material de origem (VALETON et al, 1997; UFV; CETEC; UFLA; FEAM, 2010; SARDINHA et al, 2018).

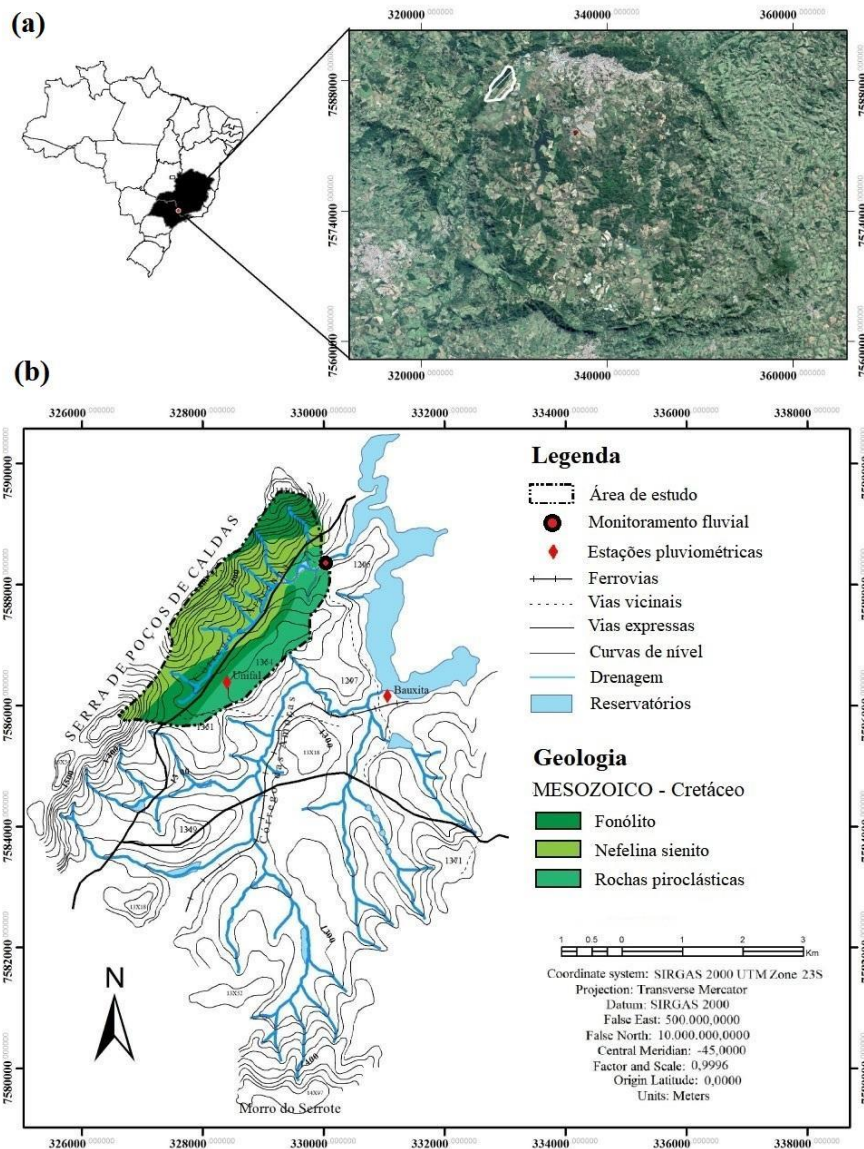


Figura 1. Localização da bacia do Córrego Ariranha no planalto de Poços de Caldas (a) e respectivo mapa geológico (b) (modificado de CODEMIG, 2015; © Google Earth, 2019).

O clima predominante na região é do tipo Cwb, conforme a classificação de Köppen (1948), ou seja, temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente, com precipitação média inferior a 60 mm em pelo menos um mês do inverno e temperatura média do mês mais quente inferior a 22°C e superior a 10°C em pelo menos quatro meses do ano (SÁ JUNIOR, 2009). Na série histórica de 2003 a 2013, a precipitação média anual na área de estudo foi de 1910 mm, conforme registros da estação pluviométrica Bauxita (Fig.1) (SARDINHA et al., 2016). Em 2016, a precipitação anual foi de 1760 mm, de acordo com os dados pluviométricos coletados na estação pluviométrica localizada na Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), Campus Poços de Caldas, sendo o período úmido responsável por 82,4% do total de precipitação do ano de 2016. A Figura 2 mostra a distribuição das chuvas ao longo do período de 2003 a 2013 e no ano de coleta das amostras de águas superficiais, ou seja, 2016.

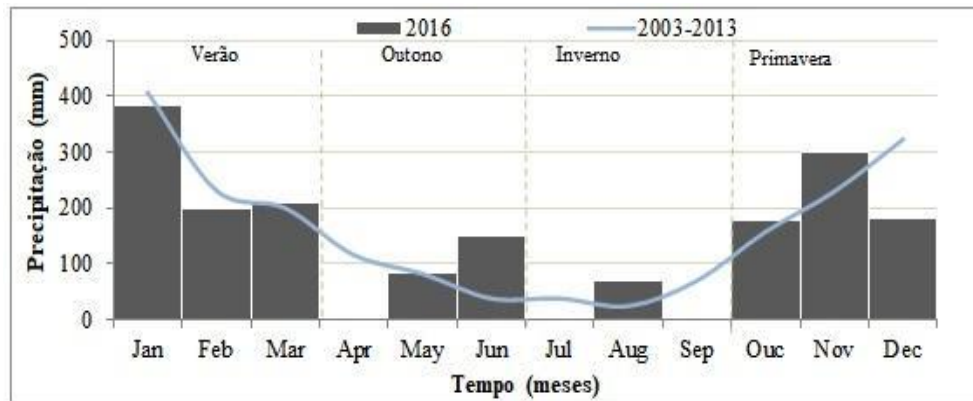


Figura 2. Média mensal de precipitação entre os anos de 2003 e 2013 (SARDINHA et al., 2016) e no ano de coleta de amostras de águas fluviais na bacia do Córrego Ariranha (2016).

3. Materiais e Métodos

A amostragem de águas fluviais foi realizada com frequência mensal durante o ano de 2016, abrangendo os períodos de máxima e mínima precipitação no planalto de Poços de Caldas (Fig. 2) e, conseqüentemente, na vazão do Córrego Ariranha. A rotina de campo consistiu em leituras “in situ” dos parâmetros físico-químicos e coleta de duas amostras de 500 mL, sendo uma alíquota “in natura” e outra preservada com 1 mL de HNO₃. A geometria do canal na seção de monitoramento foi determinada com o auxílio de uma régua limnimétrica e uma trena de aço de 10 m. A velocidade de escoamento fluvial foi determinada com micromolinetes Flow Rate Sensor Vernier (0 a 4,0 m/s ± 0,0012 m/s). Assim, a vazão instantânea (m³/s) foi obtida pela multiplicação da área úmida da seção transversal do canal pela velocidade de escoamento.

Os valores de pH (0,0 a 14,0 ± 0,1), temperatura (T - 0 a 55°C ± 0,3°C) e condutividade elétrica (CE - 0,0 a 100,0 μS/cm ± 0,1 %) foram caracterizados “in situ” através da leitura direta com medidor portátil U-50 Multiparameter Water Quality Checkers da Horiba. Em laboratório, as duas alíquotas de amostras foram filtradas separadamente em membranas de 0,45 μm e encaminhadas para as análises químicas. As amostras preservadas com HNO₃ foram utilizadas na quantificação das concentrações de Al³⁺ (0,01 a 0,80 mg/L ± 0,01 mg/L), Fe³⁺ (1,0 e 100,0 mg/L ± 0,04 mg/L) e SiO₂ (1,0 e 100,0 mg/L ± 0,04 mg/L) dissolvidos empregando um espectrofotômetro Hach DR 2800. Nas amostras filtradas e não acidificadas foram quantificadas as concentrações de Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ e SO₄²⁻ dissolvidos utilizando um cromatógrafo iônico Dionex ICS-90 (limite de detecção de 0,001 mg/L). A concentração de HCO₃⁻ quantificada pelo método da micro-titulação de Gran (EDMOND, 1970) e sólidos totais dissolvidos (STD) pela soma da sílica e os demais íons considerados no estudo. As concentrações médias de cátions, ânions e sílica dissolvidos foram ponderadas pela vazão (Equação 1).

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \cdot Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \tag{1}$$

Onde: C_p = concentração média ponderada pela vazão (mg/L); Q_i = vazão no momento da amostragem (m³/s); C_i = concentração das espécies químicas em cada amostragem (mg/L).

4. Resultados e Discussões

4.1. Hidroquímica

A Tabela 1 apresenta os resultados de vazão, pH, condutividade elétrica (CE) e a concentração de íons, sílica e sólidos totais dissolvidos (STD) nas águas superficiais da bacia do Córrego Ariranha, bem como as concentrações médias ponderadas pela vazão (C_p).

Tabela 1. Resultados de vazão, pH, condutividade elétrica (CE) e concentração de íons, sílica e sólidos totais dissolvidos (STD) nas águas superficiais da bacia do Córrego Ariranha.

| Data | Q (m³/s) | pH | CE (µS/cm) | T (°C) | (mg/L) | | | | | | | | | | | | | | STD |
|----------------------|-------------|-----|---------------|-----------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|------------------|------------------|------|-----|
| | | | | | Na ⁺ | K ⁺ | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | SiO ₂ | HCO ₃ ⁻ | NO ₃ ⁻ | PO ₄ ³⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | F ⁻ | Fe ³⁺ | Al ³⁺ | | |
| 26/01/16 | 0,57 | 6,6 | 33 | 22,7 | 2,8 | 0,6 | 0,6 | 1,7 | 1,1 | 13,3 | 0,4 | 0,2 | 0,9 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 0,2 | 23,6 | |
| 16/02/16 | 0,63 | 6,6 | 31 | 24,3 | 2,3 | 1,5 | 1,0 | 2,6 | 4,4 | 14,5 | 0,3 | 0,1 | 1,7 | 0,4 | 0,6 | 0,2 | 0,1 | 29,7 | |
| 08/03/16 | 0,51 | 6,5 | 27 | 21,9 | 2,5 | 1,6 | 1,3 | 2,8 | 2,4 | 15,8 | 0,4 | 0,2 | 2,4 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | 31,3 | |
| 05/04/16 | 0,20 | 6,5 | 30 | 22,7 | 2,5 | 1,0 | 1,0 | 2,1 | 4,5 | 15,9 | 0,3 | 0,2 | 1,4 | 0,2 | 0,5 | 0,9 | 0,2 | 30,7 | |
| 09/05/16 | 0,07 | 6,9 | 26 | 20,9 | 3,6 | 1,2 | 1,2 | 2,5 | 2,3 | 22,3 | 0,3 | 0,2 | 1,2 | 0,3 | 0,2 | 0,7 | 0,2 | 36,2 | |
| 17/06/16 | 0,08 | 6,7 | 30 | 15,7 | 2,9 | 1,8 | 1,8 | 2,3 | 2,1 | 20,1 | 0,5 | 0,3 | 1,8 | 0,5 | 0,3 | 1,1 | 0,4 | 35,8 | |
| 17/07/16 | 0,09 | 6,7 | 32 | 17,3 | 2,9 | 1,5 | 1,5 | 2,4 | 1,7 | 20,8 | 0,2 | 0,3 | 1,6 | 0,3 | 0,3 | 1,3 | 0,1 | 35,0 | |
| 12/08/16 | 0,05 | 6,6 | 40 | 17,9 | 2,9 | 1,6 | 1,6 | 3,9 | 3,0 | 26,6 | 0,5 | 0,2 | 1,2 | 0,4 | 0,2 | 2,0 | 0,2 | 44,3 | |
| 15/09/16 | 0,15 | 6,8 | 34 | 21,1 | 3,5 | 1,3 | 1,3 | 3,4 | 2,1 | 25,7 | 0,1 | 0,1 | 0,9 | 0,3 | 0,2 | 1,5 | 0,2 | 40,7 | |
| 13/10/16 | 0,12 | 6,4 | 36 | 23,5 | 3,5 | 1,4 | 1,4 | 3,4 | 2,3 | 26,2 | 0,1 | 0,2 | 0,9 | 0,3 | 0,2 | 1,5 | 0,3 | 41,8 | |
| 04/11/16 | 0,21 | 6,6 | 35 | 22,8 | 2,5 | 1,7 | 1,2 | 3,4 | 1,8 | 21,8 | 0,1 | 0,2 | 1,1 | 0,4 | 0,3 | 1,2 | 0,4 | 36,1 | |
| 20/12/16 | 0,31 | 7,0 | 29 | 23,9 | 2,6 | 1,2 | 1,2 | 2,9 | 2,5 | 19,8 | 0,3 | 0,2 | 1,6 | 0,3 | 0,2 | 0,9 | 0,2 | 33,9 | |
| <i>C_p</i> | 0,25 | 6,6 | 32 | 21,2 | 2,7 | 1,3 | 1,1 | 2,6 | 2,6 | 17,4 | 0,3 | 0,2 | 1,5 | 0,4 | 0,5 | 0,8 | 0,2 | 31,5 | |

O balanço de massa iônico foi utilizado para validação de resultados obtidos para águas fluviais, considerando um pressuposto equilíbrio iônico para as águas naturais expresso pela relação entre o somatório de cátions (Σ^+) e de ânions (Σ^-) (PROBST, 1992). Segundo Mosello et al. (1996), o critério adotado para avaliar este equilíbrio é a sua variabilidade iônica (Δ em %, Equação 2), que deve estar entre $\pm 10\%$ (Fig. 3). Assim nenhuma amostra foi descartada para a avaliação dos processos de intemperismo químico das rochas alcalinas de Poços de Caldas.

$$\Delta = \frac{(\Sigma^+ - \Sigma^-)}{(\Sigma^+ + \Sigma^-)} \cdot 100 \tag{2}$$

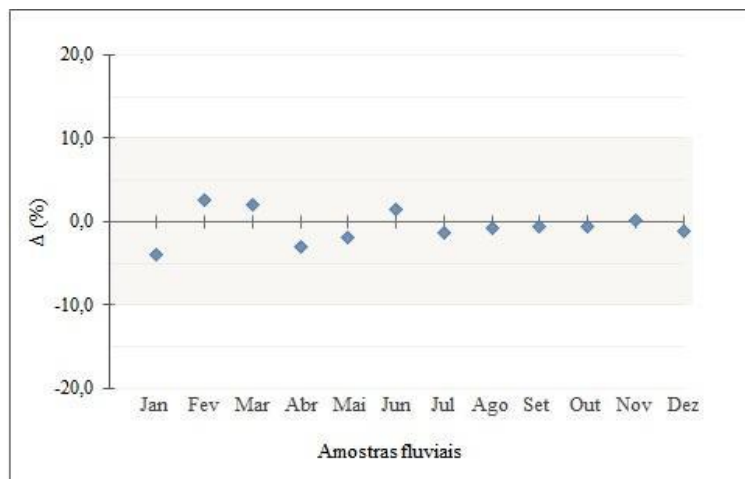


Figura 3. Variabilidade do equilíbrio iônico das espécies químicas dissolvidas nas águas do Córrego Ariranha.

A vazão média foi de 0,28 m³/s, máxima 0,63 m³/s (16/02/2016) e mínima 0,05 m³/s (12/08/2016), com os eventos de maior vazão ocorrendo no período chuvoso. O pH médio foi de 6,6, variando entre 6,4 e 7,0, indicando um caráter próximo a neutralidade nas águas superficiais da bacia do Córrego Ariranha, como já relatado em outros estudos para o planalto alcalino de Poços de Caldas (ALBERTI, 2008; IRD/CNEN, 2009; CNEN, DMA, DMAE e INB, 2012). A temperatura média das águas fluviais foi de 21,2°C, com mínima de 15,7°C e máxima de 24,3°C. A condutividade elétrica apresentou média de 32 µS/cm, variando entre 26 µS/cm e 40 µS/cm.

Quanto ao conteúdo de cátions, ânions e sílica dissolvidos, observou-se uma tendência de aumento das concentrações no período seco (abril a setembro) em relação ao período úmido (janeiro a março e outubro a dezembro). O cátion que apresentou a maior *C_p* foi o Na⁺ (2,7 mg/L), seguido pelo Ca²⁺ (2,6 mg/L), K⁺ (1,3 mg/L) e Mg²⁺ (1,1 mg/L). Já a *C_p* para SiO₂ foi de 2,6 mg/L, variando entre 1,1 e 4,5 mg/L. Os ânions predominantes foram o

HCO₃⁻ e o Cl⁻, com C_p de 17,4 e 1,5 mg/L, respectivamente, com os demais ânions apresentando C_p abaixo de 0,5 mg/L. Para os metais Al³⁺ e Fe³⁺ a C_p foi de 0,2 e 0,8 mg/L, respectivamente, e, para STD 31,5 mg/L, indicando uma variação sazonal com concentração mínima de 23,6 mg/L em janeiro e máxima de 44,3 mg/L em agosto. A Figura 4 apresenta a distribuição percentual de cátions, ânions e sílica em relação aos STD, permitindo identificar o Na⁺ (16,9 %) e a HCO₃⁻ (41,4 %) como os íons predominantes, com a seguinte ordem decrescente HCO₃⁻ > Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > SiO₂ > Cl⁻ > K⁺ > F⁻ > Fe³⁺ > Al³⁺ > NO₃⁻ > SO₄²⁻ > PO₄³⁻.

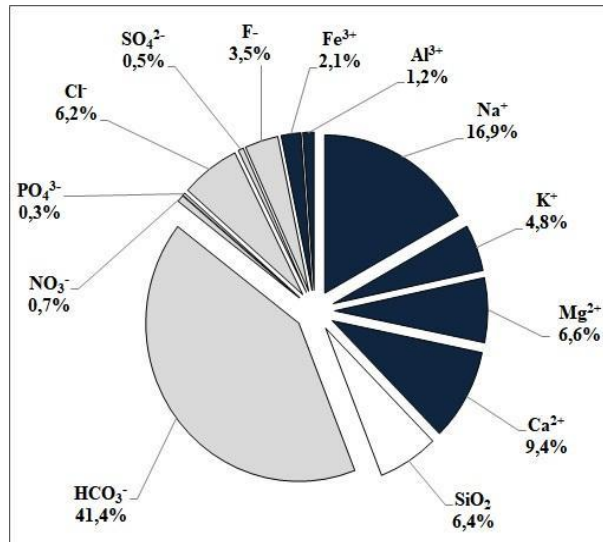


Figura 4. Distribuição percentual das espécies químicas dissolvidas em relação ao STD.

4.2. Relação concentração vs. vazão

O regime hidrológico em uma bacia hidrográfica impõe um caráter dinâmico à composição química de suas águas superficiais, variando consideravelmente em função da vazão, sendo que para a maioria dos rios do mundo, a concentração de espécies químicas dissolvidas apresenta uma tendência de diluição com o aumento da vazão (WALLING; WEBB, 1986). Assim, tem-se adotado um modelo que expressa uma relação inversa entre a concentração de sólidos dissolvidos (C_i) e a vazão (Q), apresentado na Equação 3, onde “a” e “b” são variáveis de ajuste, com o expoente “b” negativo da função matemática configurando o processo de diluição. A Figura 5 apresenta a relação concentração vs. vazão para os íons, sílica e STD.

$$C_i = a \cdot Q^{-b} \tag{3}$$

Para determinar a significância da correlação entre as variáveis concentração vs. vazão em um universo amostral (n) igual a 12, adotou-se o coeficiente de correlação (r) maior que 0,576, considerando o nível de significância de “n-2” e p < 0,05, de maneira que a probabilidade de haver correlação entre as variáveis seja igual ou superior a 95% (LANDIM, 1998). A carga total dissolvida apresentou tendência de diluição, provavelmente devido à precipitação, expressa por uma forte correlação positiva entre STD e vazão (r = 0,77) e coeficiente de diluição “b” igual a -0,15, valor ligeiramente acima da faixa estabelecida de -0,17 a -0,40, após um levantamento de envolvendo 370 rios em todo o mundo (WALLING; WEBB, 1986).

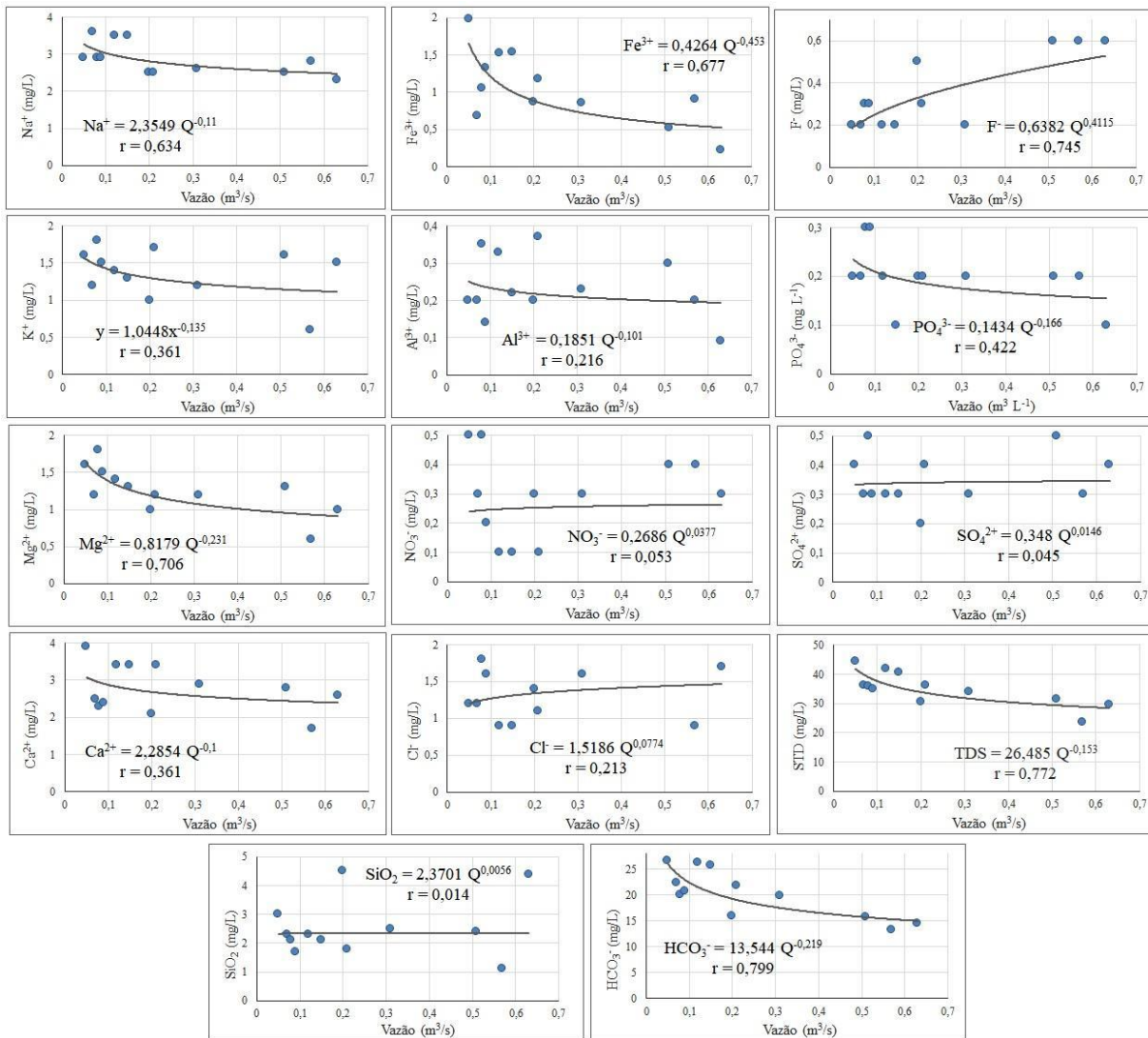


Figura 5. Concentração das espécies químicas dissolvidas nas águas do Córrego Ariranha em relação a vazão.

Os íons Mg^{2+} e Na^+ acompanharam o efeito diluição com o aumento da vazão, assim como, HCO_3^- e Fe^{3+} . Enquanto K^+ , Ca^{2+} , PO_4^{3-} e Al^{3+} não apresentam correlação significativa. O comportamento inverso à diluição foi observado para SiO_2 , F^- , Cl^- , NO_3^- e SO_4^{2-} . Um cenário semelhante foi observado por Vendramini et al. (2014), que registraram o aumento da concentração dos íons K^+ , Cl^- , NO_3^- e SO_4^{2-} junto com a subida do hidrograma de cheia, cujo incremento foi atribuído à perda de macronutrientes pela exposição do solo após o corte raso de florestas plantadas. Para F^- , a entrada deste íon pode estar relacionada com o processo de deposição atmosférica. O ácido fluorídrico (HF) é a principal forma em que o F^- é encontrado na atmosfera, tendo como origem fontes antropogênicas como as fundições de alumínio e a produção de adubos minerais, dentre outras (DOBBS, 1974). A concentração de F^- nas precipitações atmosféricas varia entre 1 a 1.000 mg/L, podendo atingir concentrações de até 10 mg/L em áreas industriais (SMITH; HODGE, 1979).

4.3. Fluxo anual de cátions, ânions e sílica dissolvidos

O fluxo anual de elementos/compostos dissolvidos (F_w) foi calculado pela Equação 4, utilizando-se a C_p e a vazão média anual (Q_m em m^3/s). Dentre as espécies químicas analisadas destaca-se o HCO_3^- (136,7 t/a), seguido por Na^+ (21,0 t/a), SiO_2 (20,8 t/a) e Ca^{2+} (20,4 t/a), e com menores participações de Cl^- (11,8 t/a), K^+ (10,1 t/a), Mg^{2+} (8,6 t/a), Fe^{3+} (6,25 t/a), F^- (3,6 t/a), SO_4^{2-} (2,8 t/a), NO_3^- (2,4 t/a), Al^{3+} (1,71 t/a) e PO_4^{3-} (1,4 t/a). A descarga dissolvida total transportada pelo Córrego Ariranha ao longo do ano de 2016 foi 247,6 t/a.

$$F_w = C_p \cdot Q_m \cdot 31,536 \quad (4)$$

O fluxo anual de STD não se distribuiu de forma homogênea ao longo do período de estudo, conforme ilustrado na Figura 6a, com a maior parte sendo transportada no período úmido (75,6 %). Esse comportamento é comum na maioria dos rios do mundo (BERNER; BERNER, 1996) e para outras bacias hidrográficas brasileiras estudadas em regiões equatoriais (MORTATTI; PROBST, 2003) e tropicais (CONCEIÇÃO; BONOTTO, 2004; SARDINHA et al, 2012; CONCEIÇÃO et al, 2015; FERNANDES et al, 2016; 2020, SPATTI JÚNIOR et al., 2019). A Figura 6b apresenta a correlação entre o fluxo de STD nas datas de amostragem e respectiva vazão, com ajuste ao modelo potencial satisfatória ($r = 0,98$) e expoente “ b ” de 0,847, indicando influência direta da vazão no transporte de material dissolvido no período chuvoso.

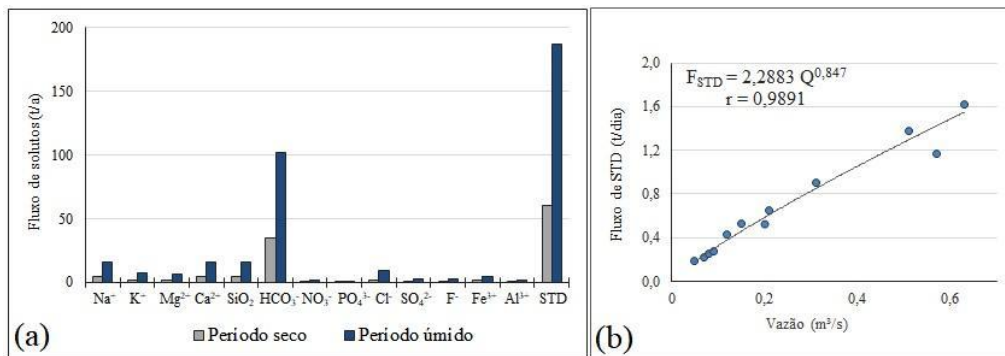


Figura 6. Distribuição do fluxo de espécies químicas dissolvidas no Córrego Ariranha (a). Correlação do fluxo diário de STD e vazão (b).

O fluxo anual específico de espécies químicas dissolvidas foi determinado a partir da descarga total de STD em relação à área de contribuição da bacia hidrográfica. Descontando os valores do fluxo anual específico devido à contribuição das águas pluviais (14,0 t/km²/a, de acordo com MELLO, 2020), obtêm-se um fluxo anual específico relacionado somente aos processos de intemperismo químico de 25,3 t/km²/a, valor superior ao obtido por Sardinha et al. (2018) (15,5 t/km²/a). A diferença nestes valores deve-se à baixa pluviosidade ocorrida entre janeiro de 2014 e fevereiro de 2015 na região Sudeste do Brasil (RODRIGUES et al., 2018), influenciando na vazão média anual considerada nos cálculos de Sardinha et al. Com o valor obtido neste trabalho, é possível fazer análises comparativas com outros sistemas fluviais formados por diferentes rochas alcalinas inseridas em clima tropical no sudeste brasileiro ou em outras condições climáticas ao redor do mundo (Tabela 2), onde temperatura e vazão são os principais parâmetros controlando os fluxos anuais dissolvidos (DESSERT et al., 2001). O valor de 25,3 t/km²/a neste trabalho é próximo aos valores quantificados em áreas com temperatura superior a 15°C e vazão menor que 1000 mm/a (37 t/km²/a - Deccan Traps, 35 t/km²/a - São Miguel e 30 t/km²/a - Paraná CBF - *continental basalt flood*) e em áreas com clima frio (2°C) e vazão de 1883 mm/a (36 t/km²/a - Islândia). Além disso, é muito inferior àqueles obtidos para Réunion (102 t/km²/a e 18,7°C) e Java (326 t/km²/a e 26,6°C), provavelmente devido aos altos valores de vazão caracterizados nestas áreas (2430 e 4050 mm/a, respectivamente).

4.4. Influência geológica na composição das águas superficiais na bacia do Córrego Ariranha

A partir da análise dos resultados apresentados anteriormente, é possível fazer observações sobre o processo de interação água-rocha/solo. De acordo com Meybeck (2003), a soma dos cátions (Σ^+) configura um bom indicador de intemperismo químico e pode ser utilizada para a classificação das águas superficiais, apontando os tipos iônicos dominantes. Sob essa perspectiva, a Σ^+ das águas do Córrego Ariranha, estimada em 0,4 meq/L, indica que se trata de águas diluídas e pouco mineralizadas, com predomínio dos íons Na⁺ e HCO₃⁻.

Gibbs (1970) propôs o uso de um diagrama tipo bumerangue para representar os mecanismos de controle da composição química das águas superficiais ao redor do mundo. A Figura 7a ilustra distribuição no diagrama sugerido por de Gibbs (1970), demonstrando que a composição química das águas superficiais é controlada pela mistura das águas pluviais e os processos de intemperismo químico dos minerais que compõe as rochas alcalinas na bacia do Córrego Ariranha. A influência do intemperismo químico nos minerais silicatos presentes nas rochas

alcalinas do planalto de Poços de Caldas podem ser observados pelas relações molares Ca^{2+}/Na^+ vs. HCO_3^-/Na^+ (Fig. 7b) e Ca^{2+}/Na^+ vs. Mg^{2+}/Na^+ (Fig. 7c) propostas por Gaillardet et al., (1999).

Tabela 2. Fluxo anual devido aos processos de intemperismo em áreas com rochas alcalinas.

| Área | F_w (t/km ² /a) | Temperatur a (°C) | Vazão (mm/a) | Referências |
|--------------|---------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|
| São Miguel | 35 | 16 | 730 | Louvat & Allègre (1998) |
| Deccan Traps | 37 | 25 | 460 | Dessert et al. (2001) |
| Islândia | 36 | 2 | 1883 | Louvat (1997) |
| Java | 326 | 27 | 4050 | Louvat (1997) |
| Réunion | 102 | 19 | 2430 | Louvat & Allègre (1997) |
| Paraná CBF | 30 | 23 | 565 | Conceição et al. (2015) |

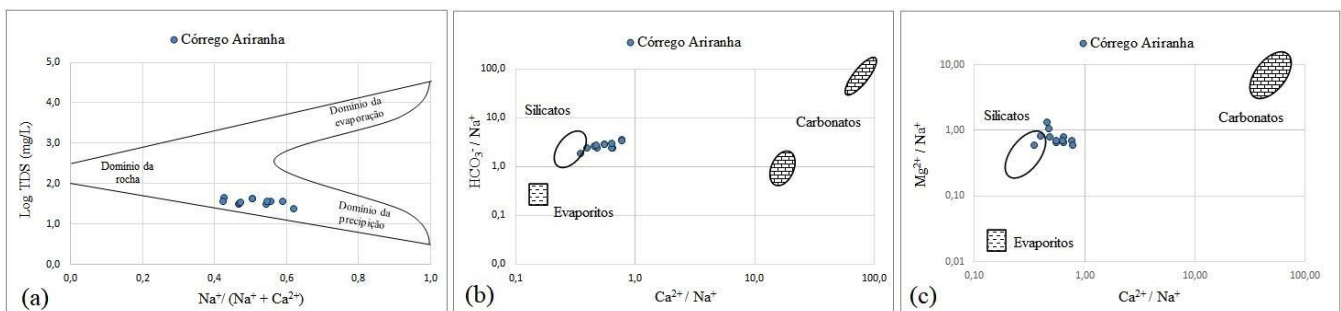


Figura 7. Diagrama de Gibbs (a); Correlação molares entre Ca^{2+}/Na^+ vs. HCO_3^-/Na^+ (b) e Ca^{2+}/Na^+ vs. Mg^{2+}/Na^+ (c) das águas do Córrego Ariranha, com as regiões de influência de carbonatos, silicatos e evaporitos, de acordo com Gaillardet et al. (1999)

A alteração química dos silicatos em ambiente tropical ocorre por meio de reações de hidrólise que produzem argilominerais e liberam SiO_2 e íons em solução para o ambiente, os quais são transportados pelos corpos hídricos de superfície na forma de carga dissolvida (GARRELS; MACKENZIE, 1967; MEYBECK, 2005; MORTATTI; PROBST, 2012). A intensidade da reação química determina o tipo de mineral secundário que será formado, no caso de hidrólise parcial parte da SiO_2 é retida no material intemperizado, formando argilominerais do tipo caulinita e montmorilonita. Já quando ocorre a hidrólise total, a SiO_2 é totalmente lixiviada, com a formação de óxidos e hidróxidos de ferro ou alumínio.

O tipo de intemperismo químico predominante nas rochas foi analisado considerando o índice de intemperismo químico (R_E – Equação 5) proposto por Tardy (1971), cuja versão modificada tem sido bastante empregada na análise hidroquímica (BOEGLIN; PROBST, 1998; MORTATTI, et al., 2008; CONCEIÇÃO et al., 2015; FERNANDES et al., 2016). Quando o R_E for igual à zero, o processo de alteração química predominante é a alitização ou hidrólise total. Com o valor de $R_E = 2$, ocorre o processo de monossilitização, com geração de caulinita. Se o $R_E = 4$, prevalece o processo de bissilitização, originando minerais como a montmorillonita.

$$R_E = \frac{3.FK+3.FNa+2.FCa+1,25.FMg-FSiO_2}{0,5.FK+0,5.FNa+FCa+0,75.FMg} \tag{5}$$

Onde: FK, FNa, FCa, FMg e FSiO₂ = fluxo anual de potássio, sódio, cálcio, magnésio e sílica (mol/a), respectivamente, corrigidos pelo aporte atmosférico calculados por Mello (2020).

A bacia do Córregos Ariranha apresentou valor de R_E de 2,3, revelando que o processo de monossilitização é responsável pelo intemperismo químico das rochas alcalinas no planalto de Poços de Caldas, com remoção parcial de SiO_2 do perfil de intemperismo e lixiviação dos íons Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} , originando caulinitas. Sob essa perspectiva, o conteúdo de Na^+ é proveniente da hidrólise da sanidina, nefelina, cancrinita, egirina e egirina-augita,

K⁺ da hidrólise do ortoclásio, sanidina e nefelina, Ca²⁺ da hidrólise da cancrinita e egrina-augita e Mg²⁺ da hidrólise da egrina-augita. Além disso, não há minerais que contenham concentração significativa dos ânions quantificados neste estudo, conseqüentemente, baixa entrada desses ânions para as águas superficiais é esperada. O resultado aponta que a intensidade de intemperismo químico atual é inferior ao que ocorria no Cretáceo Superior e Terciário Inferior, onde se deu origem aos perfis bauxíticos no planalto alcalino de Poços de Caldas, devido às mudanças nos fatores climáticos ao longo do tempo geológico.

Ainda sob a ótica das condições climáticas atuais, os processos de intemperismo descritos acima e os valores de pH obtidos para águas superficiais, os cátions como o Fe³⁺ e Al³⁺ não deveriam ser lixiviados dos perfis de intemperismo. Estes cátions deveriam ser incorporados em minerais secundários, os quais compõem os perfis de intemperismo, ou seja, goethitas e argilominerais, respectivamente. Contudo, os resultados indicaram um C_p de Al³⁺ e Fe³⁺ de 0,2 e 0,8 mg/L, respectivamente, indicando que o excesso destes cátions pode estar associado a emissões atmosféricas da cadeia produtiva do alumínio, a qual libera para atmosfera quantidades significativas de material particulado (MP) e compostos fluoretados (ALVES, 2011). O Al³⁺ dissolvido é potencialmente tóxico à biota aquática podendo interferir nos processos de respiração branquial e promover eventos de mortalidade de peixes (CRONAN, 2009). Já o ferro cumpre importantes funções em muitas reações bioquímicas essenciais para o funcionamento dos organismos, a deficiência desse metal pode afetar a saúde humana causando anemia e o excesso pode prejudicar a absorção de outros metais (FIGUEREDO, 2000). A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) registrou nos anos de 1983 e 1985 ocorrências de mortalidade de peixes na Represa Bortolan no município de Poços de Caldas, devido ao pH e a presença de metais dissolvidos na água, tais como o Al³⁺, Fe³⁺ e Mn⁴⁺, que podem ter causado efeito tóxico aos organismos (CETESB, 1985).

5. Conclusões

O presente estudo avaliou a influência dos processos de intemperismo químico na caracterização das águas superficiais no planalto alcalino de Poços de Caldas. A variação da vazão sobre a composição química das águas do Córrego Ariranha foi observada na CE e na concentração de STD, indicando um efeito de diluição dos íons com o aumento da vazão. Apenas o F⁻ apresentou correlação significativa entre as variáveis concentração/vazão, indicando que há um incremento com a chegada do escoamento superficial à calha fluvial, cuja proveniência pode ser atribuída, provavelmente, à deposição atmosférica, tais como, a emissão de gases e particulados pela indústria de transformação de alumínio. A descarga dissolvida total ao longo do ano foi de 247,6 t/a, sendo a maior parte no período úmido (75,6%), indicando que o fluxo de material transportado em solução tem relação direta com a vazão conforme o modelo potencial. O valor do fluxo anual específico de 25,3 t/km/a, devido aos processos de intemperismo químico, foi inferior ao quantificados em outras bacias hidrográficas formadas por rochas alcalinas no Brasil e no mundo, independentemente das condições climáticas de cada região. As águas do Córrego Ariranha são diluídas e pouco mineralizadas constituída majoritariamente pelos íons HCO₃⁻ e Na⁺ controladas quimicamente pela mistura das águas pluviais e pelos processos de intemperismo químico dos silicatos, através do mecanismo de monossilitização dos minerais primários com formação de argilominerais do tipo caulinita. Considerando que o Al³⁺ e Fe³⁺ não devem ser lixiviados durante os processos de intemperismo químico descritos, a elevada concentração de Al³⁺ e Fe³⁺ pode estar associado a emissões atmosféricas da cadeia produtiva do alumínio que libera para atmosfera quantidades significativas de material particulado (MP) e compostos fluoretados.

Contribuições dos Autores: Concepção, R.C.A.M e F.T.C.; metodologia, F.T.C. e A.M.F.; pesquisa, R.C.A.M e D.S.S; recursos, F.T.C.; preparação de dados, R.C.A.M. e A.M.F.; escrita do artigo, R.C.A.M, F.T.C., A.M.F. e D.S.S.; revisão, F.T.C. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento externo.

Agradecimentos: Os autores agradecem a UNIFAL, Campus de Poços de Caldas, pela disponibilização de infraestrutura durante a coleta e análises geoquímicas necessárias. Além disso, R.C.A.M. também gostaria de agradecer à CAPES pela bolsa de doutorado concedida.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ALBERTI, H. L. C. **Caracterização fisiográfica e avaliação hidrológica na bacia do Ribeirão das Antas, Planalto de Poços de Caldas, MG.** Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008, 91 p.
2. ALVES, C. G. S. M. **Análise comparativa dos impactos ambientais e dos aspectos tecnológicos da produção de alumínio primário em Minas Gerais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011, 254 p.
3. ANM. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas.** Brasília: ANM, 2020, 30p.
4. BERNER E. K. & BERNER R. A. **The Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles.** 1º Ed. New Jersey: Prentice-Hall, Upper Saddle River. 1996. 376 p.
5. BOEGLIN, J.L., PROBST, J.L. Physical and chemical weathering rates and CO₂ consumption in a tropical lateritic environment: the upper Niger basin. **Chemical Geology.** v. 148, p. 137–156. 1998. DOI: 10.1016/S0009-2541(98)00025-4
6. CAVALCANTE, J.C.; CUNHA, H.C.; CHEREGATI, L.A.; KAEFER, L.Q.; ROCHA, J.M.; DAITX, E.C.; COUTINHO, M.G.N.; HAMA, M.; YAMAMOTO, K.; DRUMOND, J.B.V.; ROSA, D.B.; RAMALHO, R. **Projeto Sapucaí; Estado de Minas Gerais e São Paulo. Relatório Final.** Brasília: DNPM, Série Geologia, 1979.
7. CETESB – **Relatório de atendimento a mortandade de peixes – Represa Bortolan - Poços de Caldas, MG – DMAE.** São Paulo: CETESB, março/1985. 16 p.
8. CNEN; DME; DMAE; INB. **Avaliação da qualidade das águas e sedimento das microbacias do Ribeirão das Antas e do Ribeirão de Caldas no Planalto de Poços de Caldas,** abril, 2012. 52p. Relatório Técnico da Comissão das Águas de Poços de Caldas.
9. CODEMIG. **Projeto fronteiras de Minas: Mapa Geológico Folha Caldas - SF.23-V-D-IV; Folha Poços de Caldas - SF.23-V-C-VI.** CODEMIG, 2015. Escala 1:100.000.
10. CONCEIÇÃO, F.T.; BONOTTO, D. M. Use of U-isotopes disequilibrium to evaluate the weathering rate and fertilizer-derived uranium in São Paulo State, Brazil. **Environmental Geology,** v. 44, p. 408-418, 2003. DOI: 10.1007/s00254-003-0775-4
11. CONCEIÇÃO, F. T., BONOTTO, D. M. Weathering rates anthropogenic influences in a sedimentary basin, São Paulo State, Brazil. **Applied Geochemistry,** v. 19, p. 575 –591, 2004. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2003.07.002
12. CONCEIÇÃO, F. T.; SANTOS, C. M.; SARDINHA, D. S.; NAVARRO, G. R. B, GODOY, L. H. Chemical weathering rate, denudation rate, and atmospheric and soil CO₂ consumption of Paraná flood basalts in São Paulo State, Brazil. **Geomorphology,** v. 233, p. 41–51, 2015. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.10.040
13. COUTO JÚNIOR, A.A., CONCEIÇÃO, F.T., FERNANDES, A.M., LUPINACCI, C.M., SPATTI JÚNIOR, E.P. Geoquímica fluvial aplicada à avaliação das taxas de intemperismo químico e remoção de solo da Formação Rio Claro. **Revista Brasileira de Geomorfologia,** v. 17, p. 451-464, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i3.1006
14. CRONAN, C. S. Major Cations (Ca, Mg, Na, K, Al). **Encyclopedia of Inland Waters,** p. 45–51. 2009. DOI: 10.1016/B978-012370626-3.00093-4
15. DESSERT, C., DUPRÉ, B., FRANÇOIS, L.M., SCHOTT, J., GAILLARDET, J., CHAKRAPANI, G., BAJPAI, S. Erosion of Deccan Traps determined by river geochemistry: impact on the global climate and the 87Sr/86Sr ratio of seawater. **Earth and Planetary Science Letters.** v. 188, p. 459–474, 2001. DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00317-X
16. DESSERT, C., DUPRÉ, B., GAILLARDET, J., FRANÇOIS, L.M., ALLÈGRE, C.J. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. **Chemical Geology.** v. 202, p. 257–273, 2003. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2002.10.001
17. DOBBS, C. G. Fluoride and the environment. **Fluoride.** v. 7(3), p. 123-135, 1974
18. DORANTI-TIRITAN, C.; HACKSPACHER, P. C.; RIBEIRO, M. C. S.; GLASMACHER U. A.; SOUZA D. H. Evolução do relevo da região do planalto de Poços de Caldas (SP/MG) baseado em dados de termocronologia de baixa temperatura e modelagem termocinemática 3D. **Revista Brasileira de Geomorfologia,** v. 15 (2), p. 291-310, 2014.
19. DUPRÉ, B., DESSERT, C., OLIVA, P., GODDÉRIIS, Y., VIERS, J., FRANÇOIS, L., MILLOT, R., GAILLARDET, J. Rivers, chemical weathering and Earth's climate. **Comptes Rendus Geoscience.** v. 335, p. 1141-1160, 2003. DOI: 10.1016/j.crte.2003.09.015

20. EDMOND, T. M. High precision determination of titration alkalinity and total carbon dioxide content of seawater by potentiometric titration. **Deep-Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers**, Oxford, v. 17 (4), p. 737-750, 1970. DOI: 10.1016/0011-7471(70)90038-0
21. FERNANDES, A. M.; CONCEIÇÃO, F. T.; SPATTI JUNIOR, E. P.; COUTO JUNIOR, A. A.; HISSLER, C.; MORTATTI, J.; Human influences on the present denudation rates of the Paulista Peripheral Depression, Brazil. **Geomorphology**, v. 351, p. 106955, 2020. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106955
22. FERNANDES, A. M.; CONCEIÇÃO, F. T.; SPATTI JUNIOR, E. P.; SARDINHA, D. S.; MORTATTI, J. Chemical weathering rates and atmospheric/soil CO₂ consumption of igneous and metamorphic rocks under tropical climate in southeastern Brazil. **Chemical Geology**, v. 443, p. 54–66, 2016. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.09.008
23. FIGUEREDO, B. R. **Minérios e ambiente**. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2000. 400p.
24. GAILLARDET, J., MILLOT, R.; DUPRÉ, B. Chemical denudation rates of the western Canadian orogenic belt: the Stikine terrane. **Chemical Geology**, v. 201(3), p. 257-279, 2003. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2003.07.001
25. GAILLARDET, J., DUPRÉ, B., ALLÈGRE, C.J., NÉGREL, P. Chemical and physical denudation in the Amazon river basin. **Chemical Geology**, v. 142, p. 141-173. 1997. DOI: 10.1016/S0009-2541(97)00074-0
26. GAILLARDET, J.; DUPRÉ, P.; LOUVAT, P.; ALLÈGRE, C.J. Global-silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from large river chemistry. **Chemical Geology**, v. 159, p. 3–30, 1999. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00031-5
27. 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. DOI: 10.1021/ba-1967-0067.ch010
28. GIBBS, R. J. Mechanism controlling world water chemistry. **Science**, v. 170, p. 1088–1090, 1970. DOI: 10.1126/science.170.3962.1088
29. GIBBS, R. J. The geochemistry of the Amazon River System. Part I. The factors that control the salinity and composition and concentration of suspended solids. **Geological Society of American Bulletin**, v. 78, p. 1203-1232, 1967. DOI: 10.1130/0016-7606(1967)78[1203:TGOTAR]2.0.CO;2
30. GOMES, C. B. & COMIN-CHIARAMONTI, P. **Magmatismo alcalino continental da região meridional da plataforma brasileira**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 2017, 608p.
31. HORBE, A.M.C.; LAGES, A.S.; MOQUET, J.S.S.; SANTOS, R.V.; SEYLES, P.; COCHONNEAU, G. Geochemistry of organic-rich river waters in Amazonia: insights on weathering processes of intertropical cratonic terrain. **Appl. Geochem.** v. 65, p. 22-35, 2016. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.10.007
32. IRD/CNEN. **Qualidade das águas do Ribeirão das Antas**. IRD, 2009, 27p. (AIEA - Projeto ARCAL RLA/01/10) Projeto Concluído.
33. KÖPPEN, W.P. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. 1. ed. em Español. México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478p.
34. LANDIM, P.M.B., **Análise estatística de dados geológicos**. 1º Ed. São Paulo: Fundação Editora UNESP, 1998. 226p.
35. LERMAN, A., WU, L., MACKENZIE, F.T. CO₂ and H₂SO₄ consumption in weathering and material transport to the ocean, and their role in the global carbon balance. **Marine Chemistry**, v. 106, p. 326–350, 2007. DOI: 10.1016/j.marchem.2006.04.004
36. LOUVAT, P. **Étude géochimique de l'érosion fluviale d'îles volcaniques à l'aide des bilans d'éléments majeurs et traces**, Thèse de l'Université Paris, 1997, 322 p.,
37. LOUVAT, P. & ALLÈGRE, C. J. Present denudation rates on the island of Réunion determined by river geochemistry: Basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 61, p. 3645–3669, 1997. DOI: 10.1016/S0016-7037(97)00180-4
38. LOUVAT, P., ALLÈGRE, C. J. Riverine erosion rates on Sao Miguel volcanic island, Azores archipelago. **Chemical Geology**, v. 148, p. 177–200, 1998. DOI: 10.1016/S0009-2541(98)00028-X
39. LOUVAT, P., GISLASON, S. R., ALLÈGRE, C. J. Chemical and mechanical erosion rates in Iceland as deduced from river dissolved and solid material. **American Journal of Science**, v. 308, p. 679–726, 2008. DOI: 10.2475/05.2008.02
40. MARTIN, J. M.; MEYBECK, M. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v.7, p.173-206, 1979. DOI: 10.1016/0304-4203(79)90039-2

41. MELLO, R. C. A. **Balço de denudação no planalto alcalino de Poços de Caldas (MG)**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2020, 98 p.
42. MEYBECK, M. Global occurrence of major elements in rivers. **Treatise on Geochemistry**, v. 5, p. 207-223, 2003. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/05164-1
43. MILLOT, R., GAILLARDET, J., DUPRÉ, B., ALLÈGRE, C.J. The global control of silicate weathering rates and the coupling with physical erosion: new insights from rivers of the Canadian Shield. **Earth and Planetary Science Letters**. v. 196, p. 83–98. 2002. DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00599-4
44. MOREIRA-NORDEMANN, L. M. Use of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ disequilibrium in measuring chemical weathering rate of rocks. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. v. 44, p. 103–108, 1980. DOI: 10.1016/0016-7037(80)90180-5
45. MOREIRA-NORDEMANN, L. M. Salinity and weathering rate of rocks in a semi-arid region. **Journal of Hydrology**. v. 71, p. 131–147, 1984. DOI: 10.1016/0022-1694(84)90074-X
46. MORTATTI, J.; PROBST, J. L. **Hidrogeoquímica de bacias de drenagem**. 2º Edição - Série Didática nº 1. Piracicaba, CENA/USP. 2012, 144p.
47. MORTATTI, J. & PROBST, J. L. Silicate rock weathering and atmospheric/soil CO₂ uptake in the Amazon basin estimated from river water geochemistry: seasonal and spatial variations. **Chemical Geology**. v. 197, p. 177-196, 2003. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00349-2
48. MORTATTI, J.; PROBST, J. L.; FERNANDES, A. M.; MORTATTI, B. C.; OLIVEIRA, H. Influence of discharge on silicate weathering dynamics of the Tietê river basin: major cations and dissolved silica approach. **Geochimica Brasiliensis**, v.22, n.1, p.15-26, 2008.
49. MOSELLO, R., BIANCHI, M., GEISS, H., MARCHETTO, A., SERRINI, G., SERINI LANZA, G., TARTARI, G. A., MUNTAU, H. **AQUACON-MedBas Subproject No. 6: acid rain analysis**. Environment Institute: Luxembourg, 1996.
50. OLIVA, P., VIERS, J., DUPRÉ, B. Chemical weathering in granitic environments. **Chemical Geology**. v. 202, p. 225-256, 2003. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2002.08.001
51. PROBST, J.L. Géochimie et hydrologie de l'érosion continentale: mécanismes, bilan global actuel et fluctuations au cours des 500 derniers millions d'années. **Science Géologiques Bulletin**, v. 94, p. 1-161, 1992.
52. SÁ JÚNIOR, A. **Aplicação da classificação de Koppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Lavras, 2009, 101 p. Mestrado.
53. SARDINHA, D.S., BONOTTO, D.M., CONCEIÇÃO, F.T. Weathering rates at Alto Sorocaba basin, Brazil, using U-isotopes and major cations. **Environmental Geology**, v. 61, p. 1025-1036, 2010. DOI: 10.1007/s12665-009-0424-7
54. SARDINHA, D.S., PENA, Y.T.L., TIESSI, R.O., ALMEIDA, M.C.J. Base de dados de desastres naturais no município de Poços de Caldas/MG: ferramenta para o planejamento e gestão territorial. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 8, p. 318-331, 2016.
55. SARDINHA, D. S.; BONOTTO, D. M.; GODOY, L. H.; CONCEIÇÃO, F. T.; MORENO, M. M. T. Denudação química e implicações na qualidade das águas superficiais da bacia do Rio Jaú (SP). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 13, n. 3, p. 337-349, 2012. DOI: 10.20502/rbg.v13i3.284
56. SARDINHA, D. S.; GODOY, L. H.; CONCEIÇÃO, F. T.; SPATTI JUNIOR, E. P.; FERNANDES, A. M.; VICTAL, F. A. C. A.; COSTA, D. A. T. Geoquímica fluvial e balanço de denudação em Tinguaitos de Poço de Caldas, Minas Gerais. **Geologia USP**, v. 18, p. 259-272, 2018. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v18-127313
57. SMITH, F. A.; HODGE, H. C. Airborne fluorides and man: Part 1. **CRC Crit. Rev. Environ. Controle**. v 8 p. 293-372. 1979. DOI: 10.1080/10643387909381666
58. SPATTI JUNIOR, E. P.; CONCEIÇÃO, F. T.; FERNANDES, A. M.; SARDINHA, D. S.; MENEGÁRIO, A. A.; MORUZZI, R. B. Chemical weathering rates of clastic sedimentary rocks from the Paraná Basin in the Paulista Peripheral Depression, Brazil. **Journal of South America Earth Sciences**, v. 96, p. 102369, 2019. DOI: 10.1016/j.jsames.2019.102369
59. STALLARD, R. F.; EDMOND, J. M. Geochemistry of the Amazon, 1. Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge. **Journal of Geophysical Research**. v. 86, p. 9844–9858, 1981. DOI: 10.1029/JC086iC10p09844

60. STALLARD, R. F.; EDMOND, J. M. Geochemistry of the Amazon, 2. The influence of the geology and weathering environment on the dissolved load. **Journal of Geophysical Research**. v. 88, p. 9671–9688, 1983. DOI: 10.1029/JC088iC14p09671
61. STALLARD, R. F.; EDMOND, J. M. Geochemistry of the Amazon, 3. Weathering chemistry and limits to dissolved inputs. **Journal of Geophysical Research**. v. 92, p. 8293–8302, 1987. DOI: 10.1029/JC092iC08p08293
62. STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE E. M. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo, Oficina de Texto. 2017. 336p.
63. TARDY, Y. Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs. **Chemical Geology**, v. 7, p. 253–271. 1971. DOI: 10.1016/0009-2541(71)90011-8
64. TINÓS, T. M. **Mapeamento geológico-geotécnico a partir de metodologia de análise integrada: Ensaio de aplicação no município de Poços de Caldas – MG**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2011, 139 p.
65. UFV; CETEC; UFLA; FEAM. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**, Belo Horizonte, MG, 2010. Escala 1:650.000.
66. ULBRICH, H. H.; VLACH, S. R. F.; ULBRICH, M. N. C.; KAWASHITA, K. Penecontemporaneous syenitic-phonolitic and basic-ultrabasic-carbonatitic rocks at the Poços de Caldas alkaline massif SE Brazil: geologic and geochronologic evidence. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, p. 15–26. 2002. DOI: 10.25249/0375-7536.20023211526
67. ULBRICH, H. H.; VLACH, S. R. F.; DEMAIFFE, D. ULBRICH, M. N. C. Structure and origin of the Poços de Caldas Alkaline Massif, SE, Brazil. In: COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C. B. **Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian platform**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, FAPESP, 2005. 367–418p,
68. VALETON, I.; SCHUMANN, A.; VINX, R.; WIENEKE, M. Supergene alteration since the upper cretaceous on alkaline igneous and metasomatic rocks of on the Poços de Caldas ring complex, Minas Gerais, Brazil. **Applied Geochemistry**, v. 12, p. 133–154, 1997. DOI: 10.1016/S0883-2927(96)00060-1
69. VENDRAMINI, D.; OLIVEIRA, H.; MORTATI, J. Avaliação do comportamento dinâmico da carga dissolvida e particulada fluvial de uma microbacia reflorestada com eucaliptos. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 9 (3), p. 499–525, 2014. DOI: 10.4136/ambi-agua.1384
70. WALLING, D. E. & WEBB, B. W. Solutes in river systems. In: TRUDGILL, S. T. (ed.), **Solute processes**. Chichester: Wiley, 251–327, 1986.
71. WHITE A. F. & BLUM A. E. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 59, p. 1729–1747, 1995. DOI: 10.1016/0016-7037(95)00078-E



obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.