



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Balanco de denudação na Depressão Periférica Paulista

Eder Paulo Spatti Junior¹ Fabiano Tomazini da Conceição² Diego de Souza Sardinha³. Alexandre Martins Fernandes⁴

¹Professor Assistente. Departamento de Geografia, Faculdade de Ciência e Tecnologia / Unesp, campus de Presidente Prudente-SP. E-mail: eder.spatti@unesp.br ²Professor Associado. Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental, Instituto de Geociências e Ciências Exatas / Unesp, campus de Rio Claro-SP. E-mail: fabiano.tomazini@unesp.br ³Professor Associado. Departamento de Engenharia Ambiental, Instituto de Ciência e Tecnologia / Unifal, campus de Poços de Caldas-MG. E-mail: diego.sardinha@unifal-mg.edu.br ⁴Autônomo. E-mail: alefernandes1966@yahoo.com.br
Artigo recebido em 05/02/2024 e aceito em 17/07/2024

RESUMO

A determinação do balanço de denudação através das taxas de erosão química (intemperismo das rochas) e mecânica (remoção dos solos) é essencial para o entendimento da evolução geomorfológica em uma bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica do Rio Corumbataí, pertencente a Depressão Periférica Paulista, tem sua geologia composta por rochas sedimentares, principalmente arenitos e argilitos. No intuito de proporcionar novos conhecimentos sobre a atual evolução geomorfológica no estado de São Paulo, o objetivo deste trabalho foi determinar o balanço de denudação na Depressão Periférica Paulista, utilizando dados hidrológicos, hidroquímicos, das rochas e dos solos. Para isso, foram escolhidas duas bacias hidrográficas de pequeno porte com composição litológica predominantemente arenosa e argilosa, ou seja, as bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga, respectivamente. As taxas de erosão química foram de 16,4 m/Ma para a bacia do ribeirão Monjolo Grande e 6,6 m/Ma para a bacia do Ribeirão Jacutinga. As taxas de erosão mecânica foram de 29,2 m/Ma para a bacia do Ribeirão Monjolo Grande e 11,8 m/Ma para a bacia Ribeirão Jacutinga. A diferença das velocidades de formação dos perfis de alteração e remoção dos solos leva a um desequilíbrio no balanço de denudação, com taxas de denudação de 12,8 m/Ma e 5,2 m/Ma para as bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga, respectivamente. Tais valores refletem a influência fundamental da litologia, declividade e clima na evolução geomorfológica. Entretanto, as mudanças atuais no uso da terra podem estar aumentando a erosão mecânica, influenciando diretamente o balanço de denudação.

Palavras-chave: Evolução Geomorfológica; Intemperismo Químico; Remoção dos solos; Mudanças no uso da Terra.

Denudation balance in the Paulista Peripheral Depression

ABSTRACT

Determining the denudation balance through chemical (rock weathering) and mechanical (soil removal) erosion rates is essential for understanding geomorphological evolution. The Corumbataí River basin, which belongs to the Paulista Peripheral Depression, has a geology composed of sedimentary rocks, mainly sandstones and mudstones. In order to provide new knowledge about the current geomorphological evolution in the state of São Paulo, the aim of this study was to determine the denudation balance in the Paulista Peripheral Depression, using hydrological, hydrochemical, rock and soil data. To this end, two small watersheds with a predominantly sandy and muddy lithological composition were chosen, namely the Monjolo Grande and Jacutinga stream basins, respectively. The chemical erosion rates were 16.4 m/My for the Monjolo Grande stream basin and 6.6 m/My for the Jacutinga stream basin. The mechanical erosion rates were 29.2 m/My for the Ribeirão Monjolo Grande basin and 11.8 m/My for the Ribeirão Jacutinga basin. The difference in the formation speeds of the soil alteration and removal profiles leads to an imbalance in the denudation, with denudation rates of 12.8 m/My and 5.2 m/My for the Monjolo Grande and Jacutinga stream basins, respectively. These values reflect the fundamental influence of lithology, slope and climate on geomorphological evolution. However, the current changes in land use may be increasing the mechanical erosion, influencing directly the denudation balance.

Keywords: Geomorphological evolution; Chemical weathering; Soil removal; Land use changes

Introdução

Ao estudar o relevo, parte-se inicialmente da forma. Toda forma de relevo tem sua gênese e evolução ligadas à dinâmica entre produtos (rochas e solos) e processos (intemperismo, pedogênese e erosão) em uma relação sistêmica que se desenvolve através do fluxo de matéria e energia.

Para Bigarella (2007) a evolução das vertentes é consequência da ação dos processos deposicionais, os quais compreendem duas fases distintas: a produção de detritos e sua remoção. Penteado (1974) atribui a evolução das formas ao balanço morfogenético ou balanço de equilíbrio de denudação, baseado na interdependência entre a componente perpendicular, que consiste na alteração da rocha em profundidade através do intemperismo químico e da pedogênese, e a componente paralela, a qual consiste na remoção dos detritos através do escoamento superficial e da erosão hídrica.

Entende-se por intemperismo o conjunto de processos físicos, químicos e bioquímicos associados à desagregação e à decomposição das rochas (Tardy, 1971). O intemperismo químico ocorre quando o equilíbrio do conjunto de átomos, que constitui os minerais, é rompido e ocorrem reações químicas que conduzem este mineral a um arranjo mais estável, sob condições de pressão e temperatura próximas à superfície terrestre (Meybeck, 1987; Summerfield, 1991) originando minerais secundários ou neoformados que, em conjunto com minerais primários residuais, formam o perfil de alteração (Martini e Chesworth, 1992). Com isso, o intemperismo se mostra como um dos principais impulsionadores de vários processos geológicos e geomorfológicos, incluindo o desenvolvimento da topografia, a pedogênese, a regulação de suprimentos de nutrientes terrestres para os oceanos, além de ser parte integrante do ciclo do carbono promovendo o ciclo de elementos entre a atmosfera, a hidrosfera, a litosfera e a biosfera (Adamou, et al. 2021; Li, et al. 2022).

Mortatti (1995) define a erosão como um fator geográfico de elaboração da paisagem e esta deve ser vista como um conjunto de fenômenos mecânicos e químicos, sob influência direta do clima e uso da terra sobre os fatores geológicos e pedológicos, através da ação dos agentes erosivos (água, vento e gelo). Em ambientes tropicais os processos erosivos predominantes ocorrem em função da erosão hídrica (laminar e/ou linear), nivelando o relevo continental, transportando a matéria solúvel e em suspensão das vertentes para os rios e destes para os oceanos (Teixeira et al, 2000). Em um contexto regional, a erosão hídrica

nas vertentes acelera o processo de sedimentação, o qual, segundo Sirqueira et al (2022), abrange a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos, além de seu transporte pelos cursos d'água.

Para Dash (2023) o estudo das taxas de denudação tem sido um tópico crucial nas ciências da Terra, sendo que o entendimento da evolução das paisagens (Conceição et al 2024; Monteiro et al 2022), mudanças climáticas (Heller et al 2022) e transporte de nutrientes para os oceanos (Charbonier, 2022; Gardner, 2023) requerem o conhecimento das taxas de denudação, suas causas e consequências. A compreensão do balanço de denudação tem sua importância relacionada a várias áreas do conhecimento, dentre elas, a engenharia, a geologia, geografia, ecologia, economia, pedologia e agronomia, fornecendo parâmetros necessários a uma melhor orientação da atividade agropecuária, indicando a viabilidade da ocupação humana e suas atividades, podendo ainda contribuir para ações de intervenção em problemas relacionados com a construção de barragens, rodovias e fundações, por exemplo (Conceição e Bonotto, 2000).

Assim, estudos que envolvam como temática o balanço de denudação podem ser executados determinando o fluxo de materiais dissolvidos e em suspensão transportados pelas drenagens em bacias hidrográficas. Como exemplo pioneiro da integração de estudos que avaliaram a composição e concentração de sólidos totais em suspensão (STS) e sólidos totais dissolvidos (STD), destaca-se o estudo de Gibbs (1967) na bacia do Rio Amazonas, o qual revelou que a geoquímica do Rio Amazonas é amplamente controlada pelos processos de intemperismo e erosão mecânica nos Andes. Stallard & Edmond (1983) investigaram a influência da geologia e os processos de intemperismo também na bacia do Rio Amazonas e sugeriram que os rios amazônicos constituem quatro grupos distintos, ou seja, rios que drenam áreas com superfícies intensamente intemperizadas, terrenos com rochas silicáticas relativamente preservadas, regiões com sedimentos marinhos com carbonatos e regiões com evaporitos. Gaillardet et al. (1997) confirmou que a região dos Andes é a maior fonte de materiais detríticos e em suspensão para o Rio Amazonas e planícies de inundações. Mortatti and Probst (2003) também confirmaram a importância do Andes como fonte de sedimentos e mostraram a influência sazonal na química das águas do Rio Amazonas, com valores médios de erosão química e mecânica de 15 e 123 m/Ma, respectivamente.

Conceição et al (2015) em estudos realizados em basaltos na bacia sedimentar do Paraná obtiveram taxas de erosão química de 6m/Ma.

As taxas de denudação derivam da interação água-rocha-solo sobre diferentes condições climáticas, fazendo parte da dinâmica natural do planeta. Segundo Tricart (1977) sistemas naturais ocorrem em interação dinâmica entre seus diversos fatores, tais como as rochas a botânica, a zoologia, os solos e o clima, entretanto, o homem participa desta interação, modificando com alterações permanentes os fluxos de matéria e energia. O atual modelo de uso e ocupação da terra privilegia um uso intensivo dos solos através da adoção em larga escala de monoculturas agrícolas e pecuária extensiva, o que leva a um aumento considerável do escoamento superficial em detrimento da infiltração levando a um desequilíbrio entre a morfogênese, o intemperismo e a pedogênese(Couto Junior, 2016; 2019; Sirqueira et al, 2022). Segundo Gardner et al (2023) a agricultura de larga escala tem levado a perturbações nos ciclos biogeoquímicos globais e impactado seriamente os recursos hídricos. Gomes et al (2021) afirmam que o atual cenário brasileiro de uso e ocupação da terra levam a uma perda de solos agricultáveis da ordem de 600 a 800 milhões de toneladas por ano, o que representa elevados custos tanto do ponto de vista ambiental como econômico.

Diante do cenário apresentado, o trabalho defende a hipótese de que a evolução geomorfológica ocorre em função do balanço morfogenético entre a componente perpendicular (intemperismo/pedogênese) e a componente paralela (escoamento/erosão) e tal balanço possui relação de interdependência entre litologia e clima, entretanto, as atividades humanas vem ampliando a intensidade da componente paralela, levando a

uma aceleração da dedudação do relevo.

Apesar do progresso na quantificação das taxas de erosão química e/ou mecânica no Brasil, compreendendo a interação entre rochas, clima e topografia/tectônica (Conceição et al., 2003, 2004, 2010, 2015, 2022; Sardinha et al., 2010, 2018; Rezende et al 2010; Leão et al, 2012; Fernandes et al., 2016, 2019, 2020a, 2020b; Spatti Júnior et al., 2014, 2019, 2023; Couto Júnior et al., 2016; 2019; Mello et al., 2022; Bonotto, 2022, Felipe et al, 2022, 2024; Gautheron, 2022.), faltam estudos que quantifiquem simultaneamente estas taxas em bacias hidrográficas localizadas em diferentes contextos geológicos/geomorfológicos, sobretudo em áreas compostas por rochas sedimentares.

Assim, com o intuito de proporcionar novos conhecimentos sobre a atual evolução geomorfológica no estado de São Paulo, o objetivo deste trabalho foi determinar o balanço de denudação na Depressão Periférica da Borda Leste da Bacia do Paraná. Para isso, foram escolhidas duas bacias hidrográficas de pequeno porte, ou seja, as bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga, as quais fazem parte da bacia hidrográfica do Rio Corumbataí, localizada na porção centro-ocidental do estado de São Paulo.

Área de estudo

De acordo com Ross (1996), o estado de São Paulo foi dividido em três províncias geomorfológicas: (1) Planaltos e serras do Atlântico leste e sudeste (PA); (2) Depressão periférica da borda leste da Bacia do Paraná, também denominada como Depressão Periférica Paulista (DPP – Almeida, 1964); e (3) Planaltos e chapadas da Bacia do Paraná (PO) (Fig. 1)



Figura 1 - Províncias geomorfológicas do estado de São Paulo no contexto do território brasileiro e indicação da localização geográfica da área de estudos, localizada na Depressão periférica da borda leste da Bacia do Paraná. Fonte: Ross, 1996 (modificado pelos autores)

As bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga localizam-se na bacia do Rio Corumbataí, onde afloram rochas de idades variadas, desde o Paleozoico até o Cenozoico, pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná, a qual é definida como uma bacia intracratônica desenvolvida sobre a plataforma Sul-Americana, abrangendo uma área no estado de São Paulo de aproximadamente 160.000 km² (Zaine, 1994). As litologias que compõem as bacias hidrográficas estudadas encontram-se na Figura 2.

A Formação Corumbataí, de idade Permiana, é constituída por argilitos, siltitos e folhelhos arroxeados e marrom avermelhados, podendo apresentar por vezes coloração

esverdeada (Zanardo *et al.*, 2017). Schneider *et al* (1974) consideram a parte inferior da formação como tendo sido depositado em ambiente marinho de águas rasas em condições climáticas redutoras, sendo sua porção superior depositada em águas rasas em condições oxidantes sob influência de marés. A Formação Corumbataí destaca-se como fornecedora de matéria prima para as indústrias do Polo Cerâmico de Santa Gertrudes, região central do estado de São Paulo (Montibeller *et al.*, 2020). Na bacia do Ribeirão Monjolo Grande, a Formação Corumbataí ocorre ao longo do canal principal, com maior expressão próximo a sua foz. Já na bacia do Ribeirão Jacutinga, a respectiva formação geológica ocupa a maior parte da área.

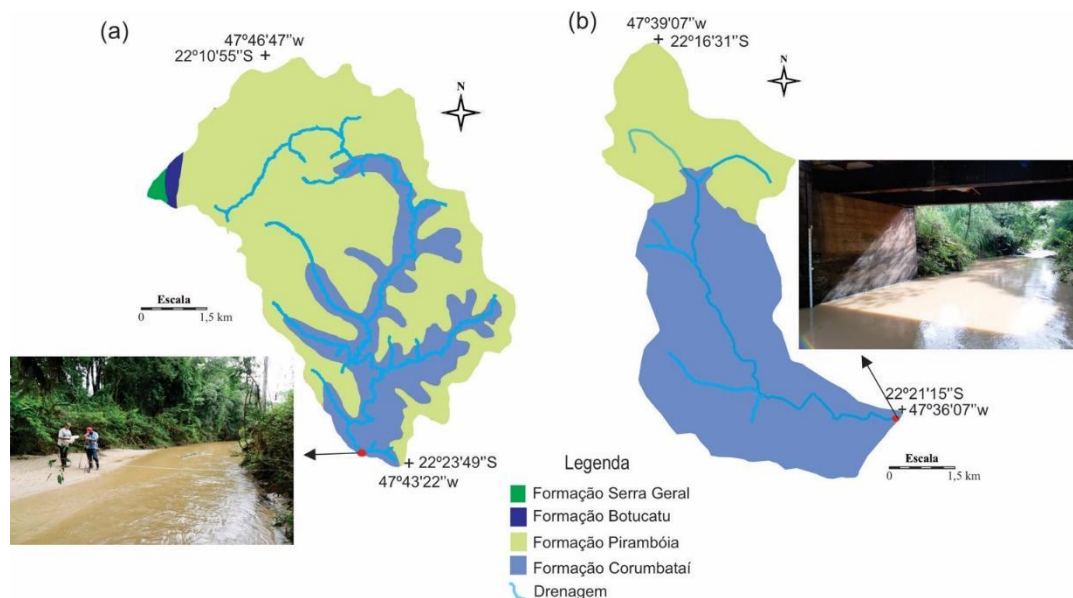


Figura 2. Mapa geológico das bacias hidrográficas dos ribeirões Monjolo Grande (a) e Jacutinga (b), com destaque para os pontos de medição de vazão e amostragem de águas superficiais (pontos em vermelho), junto à foz das bacias hidrográficas.

A Formação Piramboia distribui-se por praticamente toda a bacia do Ribeirão Monjolo Grande, notadamente em seu médio e alto curso. Na bacia do Ribeirão Jacutinga, há presença desta litologia em altitudes mais elevadas, junto às áreas de nascente das drenagens. Esta Formação é caracterizada por arenito de granulação fina a média com coloração esbranquiçada, podendo variar também em matrizes de vermelho e amarelo, tendo estruturas sedimentares com estratificação cruzada de grande e médio porte como elementos característicos desta formação (Zaine, 1994). Soares e Landin (1973) admitem que as rochas desta formação foram geradas em um ambiente de

sedimentação em sistemas fluviais, podendo apresentar por vezes influência eólica.

Ocorrendo exclusivamente na bacia do Ribeirão Monjolo Grande, na sua porção norte, a Formação Botucatu consiste num pacote de arenitos de coloração avermelhada, de granulometria fina a média. Zaine (1994) elenca como característica fundamental desta unidade a presença constante de estratificação cruzada em grandes cunhas, registro de deposição eólica em ambiente desértico. A Formação Serra Geral aflora no extremo noroeste na bacia do Ribeirão Monjolo Grande, sendo composta por basaltos associados à vulcanismo Mesozoico de bacia intracratônica,

coincidente com a abertura do oceano atlântico sul (Schneider *et al.*, 1974).

A área de estudos está inserida na unidade geomorfológica da DDP, a qual consiste em uma área sensivelmente rebaixada pela erosão, entre as terras altas dos Planaltos e serras do Atlântico leste sudeste e as cristas elevadas das Cuestas Basálticas (Almeida, 1964), que marca o limite da unidade dos Planaltos e chapadas da Bacia do Paraná (Ross, 1996). O clima da região é do tipo Aw (Köppen, 1931), clima tropical chuvoso, com chuvas no verão e inverno seco com uma temperatura média mensal em quase todos os meses do ano é superior a 18 °C, sendo que o mês mais quente ultrapassa os 22 °C. A média pluviométrica anual é de aproximadamente 1500 mm, com períodos secos, de abril a setembro, e chuvosos, entre os meses de outubro a março (Spatti Júnior *et al.*, 2019). O Rio

Corumbataí possui uma vazão média anual de 26,45 m³/s (Conceição e Bonotto, 2002).

Em relação ao uso da terra (Tabela 1, 2 e Figura 3), ambas as bacias estão localizadas em áreas rurais, sendo, isentas de interferências diretas de despejos de esgotos domésticos e efluentes industriais. Como ocorreu em praticamente todo o estado de São Paulo, a mata nativa original, neste caso a Mata Atlântica, foi progressivamente dando lugar às monoculturas, inicialmente o café e mais recentemente a cana-de-açúcar. As glebas de cana-de-açúcar situam-se nos interflúvios mais planos em ambas as bacias hidrográficas, com destaque para o Ribeirão Jacutinga. Entretanto, o maior destaque em ambas as áreas de estudo são áreas de pastagens, as quais muitas vezes se encontram em estado degradado, aumentando a quantidade de solo exposto e potencializando a ocorrência de processos erosivos lineares (Spatti Júnior, 2015)

Tabela 1. Classes de uso da terra associadas aos intervalos de declividade na bacia do Ribeirão Monjolo Grande. Fonte: Spatti Junior (2015)

Classes de Uso	Relevo							Área (ha)	%
	P	SO	O		FO	M	E		
	0-3%	3 - 8%	8 - 13%	13 - 20%	20 - 45%	45 - 100%	> 100%		
	Área (ha)								
Cana-de-açúcar	27,07	35,74	82,64	98,44	97,73	0,00	0,00	11,83	
Mata	95,67	24,33	84,94	218,51	461,39	98,94	2,29	34,15	
Pastagem	115,26	105,58	252,32	399,79	461,53	40,48	1,41	47,67	
Silvicultura	5,50	14,03	8,00	2,74	1,21	0,00	0,00	1,09	
Solo Exposto	12,07	9,22	22,22	43,24	58,84	5,98	0,06	5,25	
Total	255,57	188,89	450,13	762,73	1080,70	145,40	3,76	100,00	

P – Plano SO – Suave ondulado O – Ondulado FO – Fortemente ondulado M – Montanhoso E - Escarpado

Tabela 2. Classes de uso da terra associadas aos intervalos de declividade na bacia do Ribeirão Jacutinga. Fonte: Spatti Junior (2015)

Classes de Uso	Relevo							
	P	SO	O		FO	M	E	
	0-3%	3 - 8%	8 - 13%	13 - 20%	20 - 45%	45 - 100%	> 100%	
Área (ha)								
								%
Cana-de-açúcar	36,32	162,50	154,37	82,81	37,17	0,00	0,00	16,34
Mata	42,89	121,54	135,47	146,24	164,92	40,73	10,88	22,89
Pastagem	132,41	478,43	430,46	323,11	177,45	22,81	12,57	54,47

Silvicultura	10,53	43,09	44,82	20,92	4,78	0,00	0,00	4,29
Solo Exposto	0,57	5,47	4,18	6,95	6,28	0,12	0,00	0,81
Total	198,96	785,87	794,63	612,15	409,60	70,63	23,73	100,00
P – Plano SO – Suave ondulado O – Ondulado FO – Fortemente ondulado M – Montanhoso E - Escarpado								

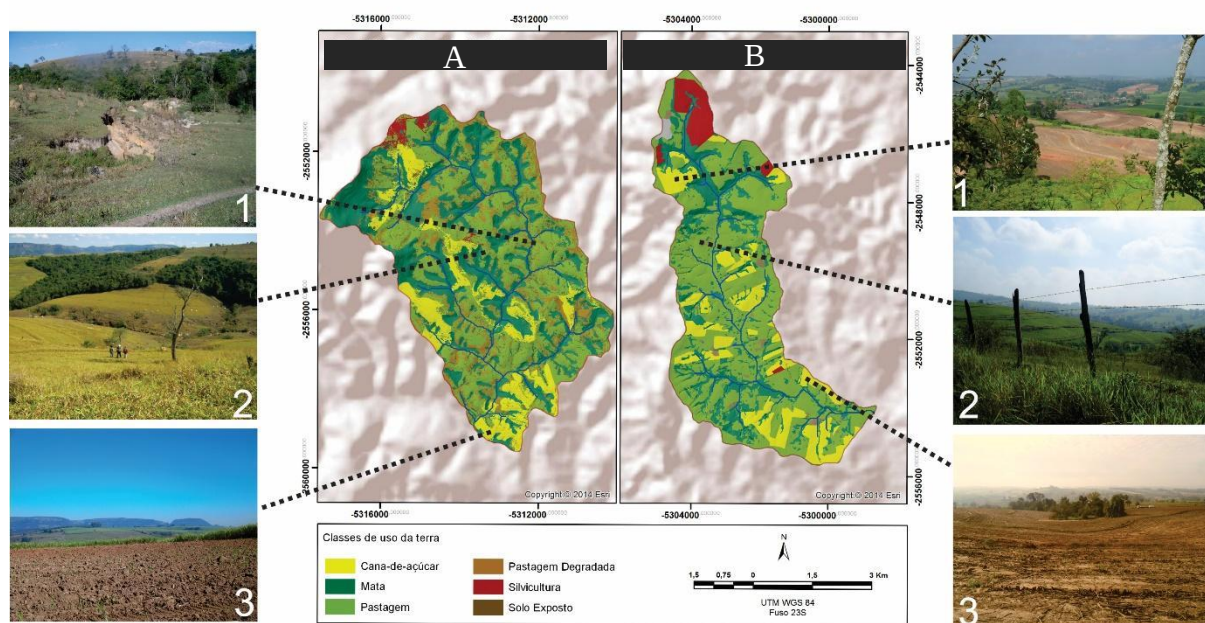


Figura 3 – Mapas de uso e ocupação das bacias hidrográficas dos ribeirões Monjolo Grande (A) e Jacutinga (B) com fotos destacando os usos predominantes. A1: pastagem degradada associada a processos erosivos; A2: pastagens (primeiro plano) e mata ciliar preservada em canais de primeira ordem; A3: solo exposto preparado para plantio de cana-de-açúcar; B1: terreno preparado para plantio de cana de açúcar; B2: pastagem associada a processos erosivos; B3: área com solo exposto devido à colheita de cana-de-açúcar. Fonte: Spatti Junior (2015).

Material e métodos

Amostragem e métodos analíticos

Para avaliar o balanço de denudação das áreas de estudo, foram realizadas coletas mensais ao longo de 1 ano hidrológico completo de águas fluviais em pontos próximos à foz das bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga (Figura 2), nos dias 27/01, 17/02, 20/03, 20/04, 15/05, 25/06, 19/07, 13/08, 24/09, 17/10, 30/11 e 21/12.

As amostras foram armazenadas em frascos de polietileno, previamente lavados com água deionizada, e conduzidas ao Laboratório de Geoquímica Ambiental (LAGEA), da UNESP de Rio Claro.

Para a obtenção da vazão nos pontos de amostragem (figura 2) foi utilizado uma trena para a medição da largura e profundidade do canal próximo à margem direita, próximo ao meio (junto

ao talvegue) e próximo à margem esquerda, obtendo assim a seção hidráulica do canal (em m²). A velocidade foi obtida com um molinete hidrométrico (m/s). A vazão (Q em m³/s) nos dias de amostragem, foi obtida através da Equação 1.

$$Q = A \cdot V \quad (1)$$

Onde: A = área da seção transversal dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga (m²); V = velocidade de fluxo (m/s).

Além da vazão, a cada amostragem foram caracterizados os seguintes parâmetros físicos e químicos nas águas superficiais: potencial

hidrogeniônico (pH), temperatura (Temp - °C), condutividade elétrica (CE – $\mu\text{S}/\text{cm}$), oxigênio dissolvido (OD – mg/L) e sólidos totais dissolvidos (STD – mg/L), utilizando-se sonda multiparamétrica YSI 556, com leitura direta no próprio local de amostragem. O eletrodo de pH é do tipo combinado e os padrões de alta pureza

foram utilizados para calibração de pH 4,00 ($4,01 \pm 0,01$ a $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$) e 7,00 ($7,01 \pm 0,01$ a $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$). Os sólidos totais em suspensão (STS) foram quantificados através do Espectrofotômetro Hach DR 2800 (Método Fotométrico de 5 a 750 ± 1 mg/L), figura 4.



Figura 4 – Amostragem analítica dos parâmetros físico-químicos junto à foz das bacias hidrográficas estudadas (1- ribeirão Monjolo Grande e 2 – ribeirão Jacutinga) e utilização do Espectrofotômetro para quantificação dos Sólidos Totais em Suspensão (3). Fonte: Elaborado pelos autores.

Modelos e equações

Lerman et al. (2007) propôs a dinâmica química de um rio através da Equação 2, a qual permite obter o fluxo anual de material removido pelo intemperismo químico (W_q em $\text{t}/\text{km}^2/\text{ano}$) a partir da concentração de STD e da vazão anual da bacia hidrográfica de estudo (Q_{anual}), descontando-se somente o aporte atmosférico em áreas onde a poluição pontual ou difusa não é significativa, como é o caso das áreas de estudo. O aporte atmosférico pode ser obtido usando a concentração de STD nas águas pluviais e a pluviosidade anual (P_{anual}). As águas pluviais foram coletadas nos mesmos locais de coleta das águas fluviais. Para isso, foram utilizados coletores de polietileno de 30 x 40 cm, cobertos com tela protetora permeável, para a proteção contra a entrada de pequenos animais ou mesmo a queda de folhas, e armazenadas em bombonas de 10L. Os coletores

foram colocados em lugares abertos e isolados, de modo a evitar a coleta de deposição seca excessiva, encontrada próximo a estradas, por exemplo. A coleta das águas pluviais foi realizada após os episódios de chuva. Após a coleta todo o sistema foi desmontado, lavado com água deionizada e montado novamente.

$$W_q = \frac{[STD] \cdot Q_{\text{anual}}}{s} - [STD] \cdot P_{\text{anual}} \quad (2)$$

Com o uso da densidade das rochas (ρ_r em g/cm^3) e o fluxo anual de material removido W_q , a taxa de erosão química das rochas (H_q em m/Ma) em uma bacia hidrográfica pode ser calculada pela Equação 3.

$$H_q = \frac{W_q}{\rho_r} \quad (3)$$

O fluxo anual de remoção dos solos pela erosão hídrica por unidade de área (W_m em $t/km^2/ano$) pode ser determinada pelo uso da Equação 4, considerando a concentração de STS.

$$W_m = \frac{[STS].Q_{anual}}{S} \quad (4)$$

A densidade média dos solos nas bacias hidrográficas estudadas foi calculada pelo método da escavação (BLAKE & HARTGE, 1986), descrito por Stürmer (2008). Esse método consiste na escavação de um buraco de 15 cm de diâmetro por 15 cm de profundidade no horizonte A do solo. O material, de onde o material é retirado, é embalado e pesado em campo e o buraco é preenchido por uma quantidade de reia de densidade padronizada em laboratório ($1,7 g/cm^3$). Uma amostra representativa deste solo foi encaminhada para secagem em estufa a $105^\circ C$ para a determinação da umidade.

Resultados e discussões

Hidroquímica

A tabela 3 e a Figura 5 apresentam os resultados de vazão e dos parâmetros físico-químicos caracterizados nos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga. As menores vazões obtidas neste estudo foram de $0,3 m^3/s$ (setembro) para as bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga. Já os maiores valores de vazões para ambas as bacias hidrográficas foram obtidos no mês de janeiro, com $1,8 m^3/s$ no Ribeirão Monjolo Grande e $1,2 m^3/s$ no Ribeirão Jacutinga, evidenciando que a vazão é diretamente influenciada pela quantidade de chuva na bacia. A vazão média mostrou-se um pouco maior na bacia do Ribeirão Monjolo Grande ($0,9 m^3/s$) em relação ao Ribeirão Jacutinga ($0,6 m^3/s$). Os valores máximos e mínimos de temperatura foram registrados nos meses de janeiro e julho, ou seja, $22,8^\circ C$ e $13,2^\circ C$ para o Ribeirão Monjolo Grande e $23,1^\circ C$ e $16,3^\circ C$ para o Ribeirão Jacutinga, respectivamente. A amplitude

Já a taxa de erosão mecânica (H_m em m/Ma) é obtida pelo uso Equação 5, a qual considera a densidade dos solos (ρ_s em g/cm^3).

$$H_m = \frac{W_m}{\rho_s} \quad (5)$$

térmica encontrada nas águas fluviais das bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga marca a influência das oscilações das diferentes estações do ano. Os valores de pH são próximos à neutralidade durante todo o período de amostragem, com média de 6,5 para ambas as bacias hidrográficas estudadas. Os maiores valores de oxigênio dissolvido foram obtidos na época chuvosa, devido ao aumento da velocidade e turbulência do fluxo fluvial e, conseqüente, aumento na troca de oxigênio na interface água/ar ao longo do curso d'água, com variação entre $8,1 mg/L$ e $6,0 mg/L$ no Ribeirão Monjolo Grande e $7,2 mg/L$ e $6,0 mg/L$ no Ribeirão Jacutinga. A Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) nº 430, de 13 de maio de 2011 alterou a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005 e estabeleceu a classificação para as águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. Os rios das bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga podem ser enquadrados como Classe 2, de acordo com o Decreto Estadual nº 10.755 de 22 de novembro de 1977 (São Paulo, 1977), ou seja, águas doces (salinidade $\leq 0,50 \text{ ‰}$) destinadas ao abastecimento doméstico após tratamento convencional; à proteção de comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho; à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e à aquicultura e a atividade de pesca. De acordo com os resultados de pH e OD, as águas fluviais dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga estão dentro do valor proposto pela Resolução CONAMA nº 430 para águas de Classe 2.

Tabela 3. Vazão, temperatura, parâmetros físico-químicos e concentração de sólidos (totais e dissolvidos) das águas fluviais das bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga

Data de amostragem	Vazão (m^3/s)	Temperatura ($^\circ C$)	pH	Condutividade ($\mu S/cm$)	OD	STD (mg/L)	STS
Ribeirão Monjolo Grande							
27/01/2015	1,8	23,0	6,6	31,0	7,4	40,5	80,0
17/02/2015	1,5	22,8	6,2	37,0	8,1	47,1	40,0
20/03/2015	1,4	20,7	6,1	42,0	7,4	50,4	38,0

20/04/2015	0,8	21,7	6,1	45,0	6,8	62,0	22,0
15/05/2015	0,6	18,5	6,2	45,0	6,7	66,8	8,0
25/06/2015	0,6	17,5	6,8	43,0	6,4	60,8	6,0
19/07/2015	0,4	13,2	6,8	41,0	6,6	69,9	7,0
13/08/2015	0,4	15,4	6,9	52,0	6,0	70,2	7,0
24/09/2015	0,3	17,7	6,6	54,0	6,7	70,9	4,0
17/10/2015	0,8	18,9	6,6	52,0	6,7	61,7	16,0
30/11/2015	0,9	22,0	6,7	41,0	7,4	63,4	37,0
21/12/2015	1,3	22,4	6,1	38,0	8,0	57,9	44,0

Ribeirão Jacutinga							
27/01/2015	1,3	23,1	6,3	56,0	6,5	36,4	52,0
17/02/2015	0,7	21,4	6,1	70,0	6,5	46,8	28,0
20/03/2015	0,6	23,6	6,7	71,0	7,2	45,9	20,0
20/04/2015	0,6	19,5	6,1	63,0	6,1	54,9	9,0
15/05/2015	0,4	16,4	6,2	75,0	7,0	55,5	13,0
25/06/2015	0,6	16,3	6,9	66,0	6,3	55,1	10,0
19/07/2015	0,4	17,1	6,9	59,0	6,4	50,4	5,0
13/08/2015	0,2	17,1	6,7	69,0	6,1	57,4	4,0
24/09/2015	0,2	18,4	6,9	69,0	6,0	67,6	3,0
17/10/2015	0,6	18,8	6,6	63,0	6,5	44,8	12,0
30/11/2015	0,7	21,1	6,5	66,0	7,0	45,8	20,0
21/12/2015	0,9	22,3	6,6	59,0	7,0	43,3	30,0

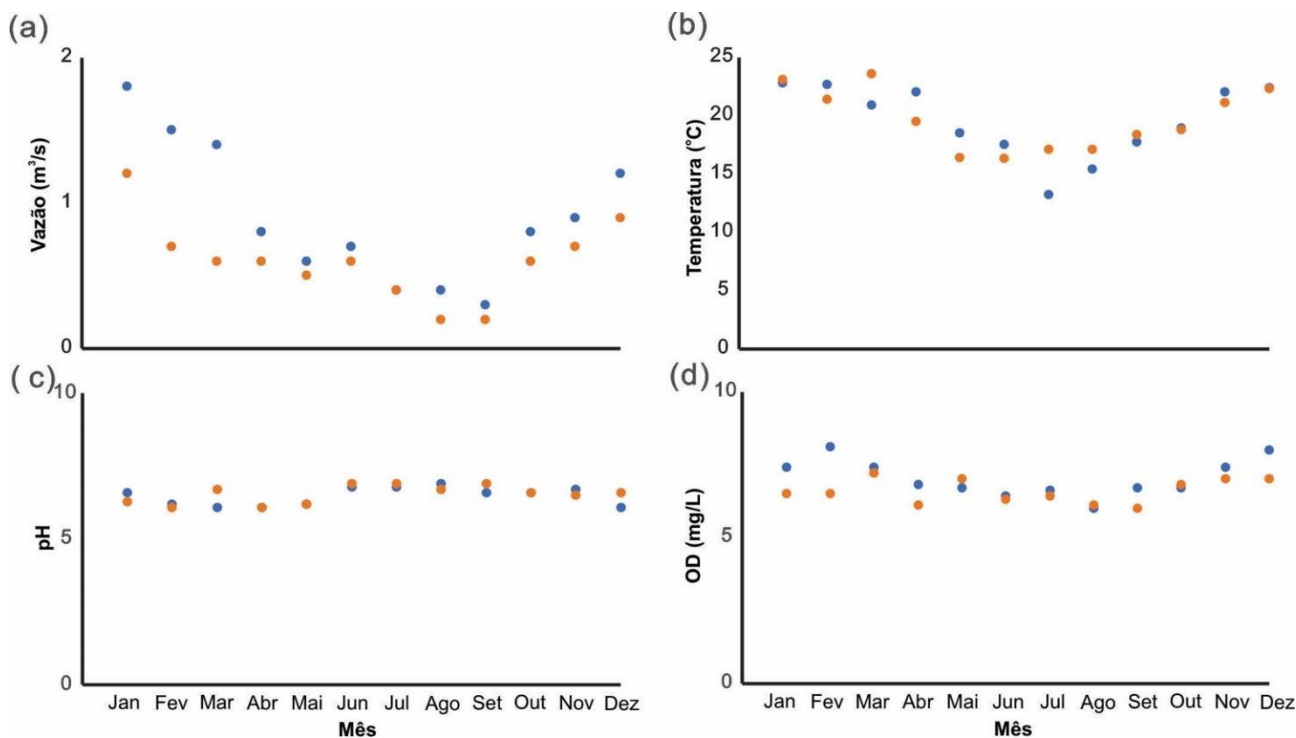


Figura 5. Variação anual da vazão (a), temperatura (b) e dos parâmetros físico-químicos pH (c) e oxigênio dissolvido (d) obtida das águas fluviais das bacias dos ribeirões Monjolo Grande (Pontos Azuis) e Jacutinga (Pontos Laranja).

A Figura 6 ilustra a relação entre Q e [STD] e [STS]. Na bacia do Ribeirão Monjolo Grande, o maior valor da [STD] foi no mês Setembro (70,9 mg/L), no ápice da estação seca. Já no período chuvoso, a menor [STD] foi obtida no mês de janeiro (40,5 mg/L). No Ribeirão Jacutinga a variação foi semelhante, com as maiores e menores [STD] quantificadas nos períodos seco (67,6 mg/L, em setembro) e chuvoso (36,4 mg/L em janeiro), respectivamente. A média ponderada pela vazão da [STD] foi de 55,5 mg/L para o Ribeirão Monjolo Grande e 46,9 mg/L para o Ribeirão Jacutinga. Os maiores valores da [STS] foram obtidos no período chuvoso para ambas as áreas de estudo (78,9 e 53,6 mg/L para as bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga, respectivamente). Na bacia do

Ribeirão Monjolo Grande o valor médio anual ponderado pela vazão de STS foi de 36,3 mg/L, enquanto para a bacia do Ribeirão Jacutinga esse valor foi de 22,1 mg/L. Para verificar a influência da sazonalidade nas [STD] e [STS], foi utilizado o modelo proposto por Godsey et al. (2009), onde $[TDS]$ ou $[TSS] = a.Q^b$, onde a é função das características do soluto e das bacias hidrográficas; b (adimensional) é a inclinação da linha ajustada entre $\{STD\}$ ou $[STS]$. A relação entre Q e $[STD]$ foi inversa (Fig. 5a), representando o processo de diluição das águas fluviais pelas águas pluviais no período chuvoso em ambas as áreas de estudo. A $[TSS]$ esteve diretamente relacionada com a Q devido à erosão hídrica, e consequentemente a remoção do solo, no período de chuvas.

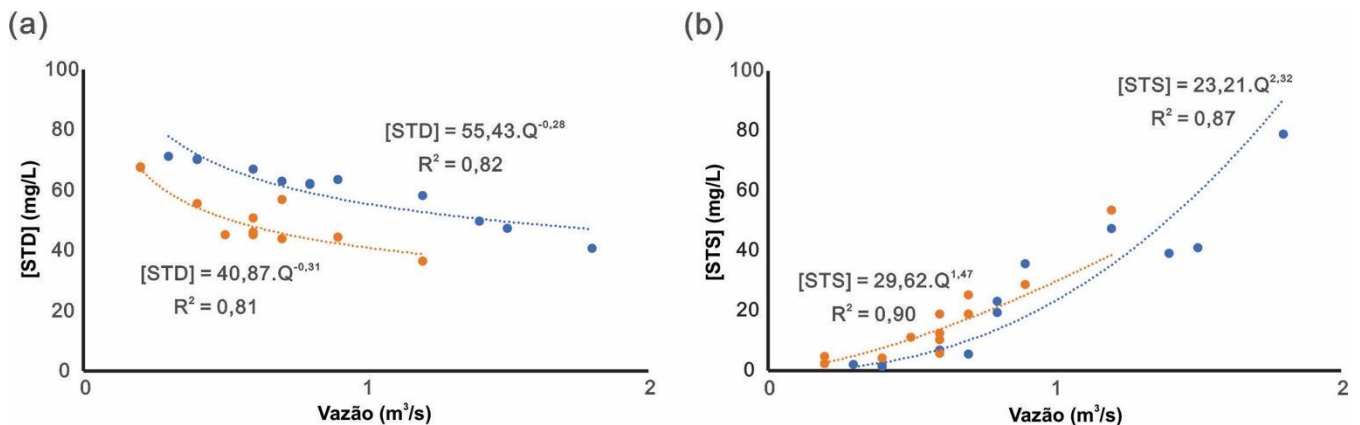


Figura 6. Relação entre vazão (Q) vs. Sólidos Totais Dissolvidos [STD] (a) e vazão Q vs. Sólidos Totais em Suspensão [STS] (b) nas bacias dos ribeirões Monjolo Grande (Pontos Azuis) e Jacutinga (Pontos Laranja).

Balanço de denudação

Segundo Mello (2022) as características das águas fluviais são fortemente influenciadas pelas reações do intemperismo químico das rochas em uma bacia hidrográfica. O fluxo anual de elementos químicos dissolvidos adicionados às águas superficiais através do intemperismo químico calculado de acordo com a Equação 2 foi de 1554 e 876 toneladas para as bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga, respectivamente. Descontando-se o aporte atmosférico (10,1 t/km²/ano para a bacia do Ribeirão Monjolo Grande e 12,7 t/km²/ano para a bacia do Ribeirão Jacutinga, Spatti Júnior, 2015) e dividindo-se pela área de cada bacia (aproximadamente 29 km²), os fluxos específicos anuais correspondem a 43,5 t/km²/ano para a bacia do Ribeirão Monjolo Grande e 17,5 t/km²/ano para a bacia do Ribeirão Jacutinga. Importante salientar que políticas públicas como a proibição da queima da palha da cana-de-açúcar no estado de São Paulo vem diminuindo

consideravelmente os valores de elementos químicos dissolvidos às águas pluviais (sobretudo nitratos) (Lima;Luiz;Neves, 2016).

Em relação ao fluxo específico de elementos dissolvidos fica evidente o papel da litologia. Em rochas alcalinas, Mello (2022) calculou um fluxo específico de 14,0 t/km²/ano. Leão et al (2012) calcularam um fluxo de 0,43 t/km²/ano em rochas quartzíticas na serra do espinhaço em Minas Gerais, já Felipe (2024) em rochas ígneas e metamórficas da bacia do rio Paraíba do Sul utilizando canais de primeira e Segunda ordem chegaram a um valor médio de 1,5 t/Km²/ano.

Usando a Equação 3 e a densidade média das rochas sedimentares de ambas as bacias hidrográficas, a taxa de erosão química é de 16,4 e 6,6 m/Ma para as bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga, respectivamente. De acordo com o Spatti Júnior et al. (2019), os possíveis processos de intemperismo químico de arenitos e argilitos ocorrem pela dissolução do quartzo e

hidrólise parcial (monossilitização) dos minerais primários, como a albita, feldspato potássico e illita, respectivamente. Em trabalho recente, realizado no Planalto Alcalino de Poços de Caldas, Mello (2022) também identificou o processo de monossilitização, em indicando um papel fundamental do clima na hidrólise nos minerais silicáticos presentes em rochas como nefelinas sienitos, tinguaítos e fonólitos.

As taxas obtidas neste estudo para rochas sedimentares clásticas estão em consonância com as taxas de erosão química dos basaltos da Bacia do Paraná no PO (6 m/Ma - Conceição et al., 2015) e para as rochas ígneas e rochas metamórficas da Faixa Ribeira no PA (15 m/Ma - Fernandes et al., 2016), outras importantes unidades geomorfológicas do Estado de São Paulo. Em outras áreas do país, Felipe (2024) trabalhando na bacia do rio Paraíba do Sul no estado de Minas Gerais com rochas metamórficas e ígneas obtiveram um range entre 3,2 e 17,5 m/Ma, já Rezende et al (2012) obtiveram um valor de 9,9 m/Ma para rochas quartzíticas da Serra do Espinhaço, em Minas Gerais.

Utilizando os valores médios anuais de [STS] e das vazões anuais, a partir da Equação 4, foi possível estabelecer um fluxo anual de material em suspensão no Ribeirão Monjolo Grande de 1017 toneladas, enquanto para o Ribeirão Jacutinga este valor foi de 412 toneladas. Ao dividir o valor do fluxo anual pela área das bacias estudadas, foram obtidos os fluxos específicos anuais de 35,1 t/km²/ano para o Ribeirão Monjolo Grande e 14,2 t/km²/ano para Ribeirão Jacutinga. Usando a Equação 5 e a densidade média dos solos de ambas as bacias hidrográficas de 1,2 g/cm³ (Spatti Júnior, 2019), foi possível obter as taxas de erosão mecânica de 29,2 e 11,8 m/Ma para os ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga, respectivamente.

Spatti Júnior et al. (2014) estudaram o balanço entre a erosão química e mecânica na bacia do Ribeirão Monjolo Grande usando resultados hidroquímicos obtidos durante o ano de 2010, obtendo uma taxa de 19 m/Ma para a diminuição da espessura dos perfis de alteração. No mesmo estudo, foram modelados cenários em diferentes

condições climáticas, mostrando a grande variabilidade entre as taxas de denudação, especialmente em cenários mais chuvosos e quentes. Assim, mesmo a taxa de denudação obtida neste trabalho estando dentro dos valores previstos por Spatti Júnior et al. (2014) para a bacia do Ribeirão Monjolo Grande, a diferença nos valores de ambos os estudos pode ser atribuída aos menores valores de precipitação em 2015 em relação à 2010.

Para Penteado (1974), em uma área onde há equilíbrio no balanço de denudação, a espessura do perfil de alteração permanece intocada ao longo do tempo. Com a obtenção das taxas de erosão química e mecânica pode-se indicar se há este possível equilíbrio de denudação ou se a espessura dos perfis de alteração está aumentando ou diminuindo. No caso das bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga, fica evidente que a espessura dos perfis de alteração vem diminuindo em uma taxa de 12,8 e 5,2 m/Ma, respectivamente. A bacia do Ribeirão Jacutinga apresenta aproximadamente 60% de toda sua extensão entre as classes de declividade 3% a 20% (Relevo Suave Ondulado e Ondulado) (Tabela 1 e Figura 7), sendo que neste intervalo 80% dos usos da terra consistem em pastagens (57%), cana-de-açúcar (20%) e silvicultura (5%) além disso, apresenta neste intervalo, pequena quantidade de solos expostos (0,5%), como pode ser observado na tabela 1. Além disso, em função da litologia, os solos desta bacia apresentam maior teor de argila, com destaque para os argissolos. Já a bacia do Ribeirão Monjolo apresenta 60% de toda sua área entre os intervalos entre 13 e 45 % (Relevo Ondulado a Forte Ondulado) (tabela 2 e Figura 7) e, neste intervalo tem seus usos associados à cana-de-açúcar (10%) e principalmente pastagens, dentre as quais 17% encontram-se degradadas, apresentando solo exposto, como pode ser observado na tabela 2. Além disso a bacia possui solos mais arenosos, com destaque para latossolos e neossolos quartzarenicos, apresentando uma maior susceptibilidade à desagregação e consequente erosão mecânica.

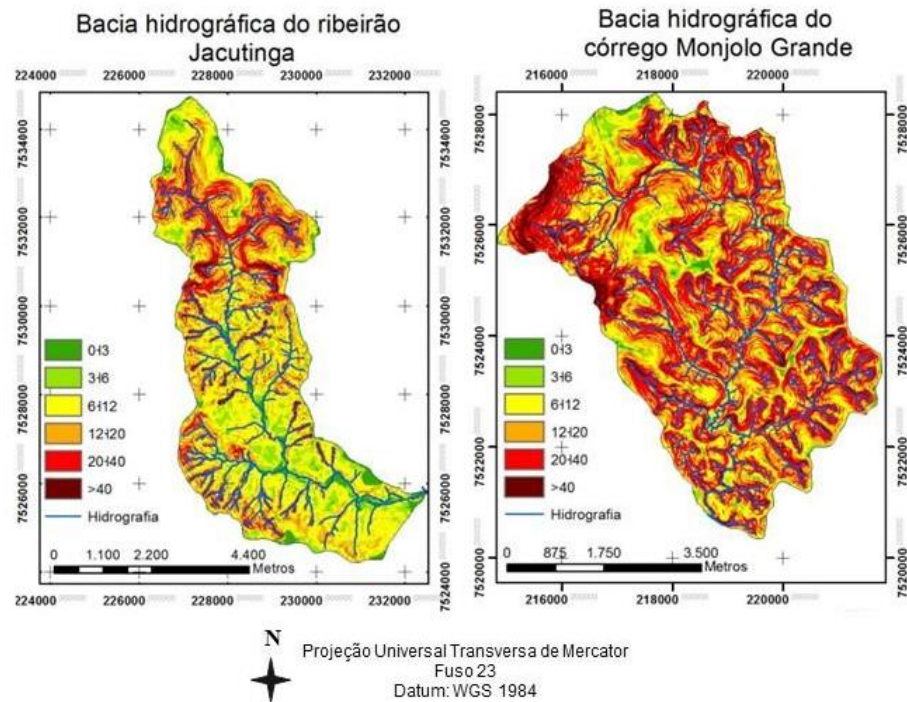


Figura 7: Mapas de declividade das bacias do Ribeirão Monjolo Grande e Jacutinga
Fonte: Corrêa (2016). Modificado pelos autores.

Assim, a associação entre a declividade, solos e as atuais condições de uso da terra demonstra claramente que a bacia do Ribeirão Monjolo Grande tem potencial maior de erosão mecânica que a bacia do Ribeirão Jacutinga, como confirmado pelas taxas observadas, fato que reflete diretamente no balanço de denudação. Além disso, os resultados evidenciam claramente o papel da litologia. Áreas com substrato (arenoso formações geológicas Piramboia e Botucatu), apresentam uma diminuição mais acentuada na espessura dos perfis de alteração em relação as áreas com substrato argiloso (Formação geológica Corumbataí).

Mesmo evidenciando o fundamental papel de fatores geológicos, edáficos e climáticos no balanço de denudação, torna-se imprescindível, atualmente, considerar as mudanças no uso da terra como um fator importante na evolução da paisagem. Particularmente no estado de São Paulo, as mudanças do uso da terra estão associadas à produção de biocombustíveis, responsáveis por 42% da oferta de energia renovável no Brasil (OECD/FAO, 2015). Áreas de vegetação nativa e culturas perenes como o café e os cítricos vem dando lugar às áreas destinadas às pastagens e culturas de cana-de-açúcar devido à crescente demanda por etanol desde que o governo federal brasileiro implementou o Projeto PRO-ALCÓOL iniciado em 1975 (Adami et al., 2012), associado à elevada demanda por carne bovina, tanto no mercado interno quanto externo.

Francisco (2023) em trabalho realizado na unidade geomorfológica dos Planaltos e Chapadas da Bacia do Paraná, no oeste paulista, identificou 1225 focos de erosão linear na Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Pontal do Paranapanema, sendo em sua totalidade localizados em áreas de pastagens e em áreas de produção canavieira. Corrêa et al. (2018b) avaliaram a influência das culturas de cana-de-açúcar nas perdas de solo por erosão hídrica na bacia do Ribeirão Monjolo grande e indicaram que áreas com solos expostos, oriundos de pastagens degradadas, possuem perdas de solos maiores que parcelas onde há culturas de cana-de-açúcar. Posteriormente, um estudo realizado por Couto Júnior et al. (2019) sugeriu que mudanças para culturas de cana-de-açúcar pode aumentar a perda de solo em até 270 % em relação ao uso atual do solo na Depressão Periférica. Assim, a se manter os cenários atuais de uso da terra, as espessuras dos perfis de alteração podem diminuir ainda mais no futuro devido à política energética brasileira, especialmente nas áreas com maior declividade e solos arenosos, o que impactará diretamente nas condições de produção de sedimentos com assoreamento dos cursos d'água, perdas dos solos em quantidade e qualidade (fertilidade) e contaminação da água com a concentração de resíduos sólidos nas áreas degradadas dos fundos de vale.

Considerações Finais

Sistemas geomorfológicos consideram a evolução de relevo como um sistema aberto, com trocas constantes de matéria e energia. O uso da geoquímica fluvial permite avaliar o balanço de denudação em uma bacia hidrográfica, ou seja, determinar as taxas de erosão química (intemperismo químico das rochas) e mecânica (remoção dos horizontes superficiais). Neste estudo, foram selecionadas duas bacias hidrográficas localizadas na bacia do Rio Corumbataí, a qual pertence a Depressão Periférica. As bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga estão sob o mesmo regime climático (precipitação e temperatura), sendo a litologia e a topografia o principal fator de diferenciação entre elas. Em uma área onde há equilíbrio no balanço de denudação, a espessura do perfil de alteração permanece intocada ao longo do tempo, fato que não se observa nas bacias dos ribeirões Monjolo Grande e Jacutinga, ficando evidente que a espessura dos perfis de alteração vem diminuindo em uma taxa de 12,8 e 5,2 m/Ma, respectivamente. Os resultados mostraram, ainda, que o aumento do fluxo sedimentar observado nas drenagens apresenta relação direta com a litologia, sendo os solos quartzarenicos (derivados dos arenitos) altamente sensíveis à perda de massa, quando comparados aos solos derivados de argilitos. Fica evidente neste trabalho que este desbalanço entre a componente paralela e a componente perpendicular, além dos elementos naturais da paisagem, tem no uso da terra um catalizador poderoso aos processos erosivos laminares e lineares, como pode ser observado nos resultados apresentados neste e nos diferentes trabalhos que vem sendo desenvolvidos com a mesma temática em diferentes regiões com metodologias diferentes, comprovando, desta forma, a hipótese de que a evolução geomorfológica ocorre em função do balanço morfogenético entre a componente perpendicular e a componente paralela onde o clima, os solos e a litologia atuam em relação de interdependência, porém as atividades humanas, (sobretudo ligada ao uso da terra, com a adoção crescente de pastagens e pela monocultura açucareira) vem sendo determinantes em taxas de remoção dos solos cada vez maiores. Para além de um dado geomorfológico este impacto da ação humana conduz a um descompasso ambiental, que se processa no nível da bacia hidrográfica e que vai desde a perda de solos agricultáveis, à perda de insumos por lixiviação e erosão (impactando os produtores rurais, sobretudo pequenos produtores),

bem como afeta o ciclo hidrológico, nos segmentos da infiltração e da descarga de água nas nascentes, podendo comprometer a disponibilidade hídrica da bacia. Os dados expostos mostram a necessidade de se incluir o sistema geomorfológico como parte fundamental da gestão das águas e dos recursos naturais como um todo.

Referências

- Adami, M., Rudorff, B.F.T., Freitas, R.M., Aguiar, D.A., Sugawara, L.M., Mello, M.P. 2012. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. *Sustainability* 4, 574–585. <https://doi.org/10.3390/su4040574>
- Adamou, J.M.K.; Tang, S.D.N.; Sabada, E. Onana, V.L. 2021. Weathering profiles developed on gneisses from Batchenga and Doua areas, central Cameroon: Climate and topography controls. *Journal of African Earth Sciences*. V. 184, 104367. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104367>.
- Alves, E.A.C.; Moraes, I.C.; Lupinacci, C.M.; Pinto, S.A.F. 2021. Perdas de solo e distribuição das partículas do material transportado por erosão hídrica sob cultivo de cana-de-açúcar e pastagem. *Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia*, 19, 3, 109-126, 2021. <https://doi.org/10.5016/estgeo.v19i3.16138>
- Almeida, F.F.M. 1964. Fundamentos geológicos do relevo paulista. *Boletim Instituto Geográfico e Geológico*, 41, 167-263, 196.
- Bigarella, J.J. 2007. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Vol.3. Florianópolis: Ed. UFSC.
- Blake, G. R.; Hartge, K. H. Bulk density. 1986. In: Klute, A. *Methods of Soil Analysis – Part 1: Physical and mineralogical methods*. 2nd. ed. Madison: American Society of Agronomy - Soil Science Society of America. p. 363-375 <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>
- Bonotto, D.M. 2023. Hydrochemistry and weathering at Pardo River basin, São Paulo State, Brazil. *Environmental Monitoring Assessment*. V. 195, p.535. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-023-11067-2>
- Charbonier, Q.; Bouchez, J.; Gaillardet, J.; Calmels, D.; Dellinger, M. 2022. The influence of black shale weathering on riverine barium isotopes. *Chemical Geology*. V. 594, 120741. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120741>

- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011. Ministério do Meio Ambiente (S.I.), p.9.
- Conceição, F.T.; Bonotto, D.M. 2000. Anthropogenic influences on the uranium concentration in waters of the Corumbataí River basin (SP), Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 551-553.
- Conceição, F.T.; Bonotto, D. M. 2002. Parâmetros hidrológicos e estatísticos para estimativa de vazão nos rios da bacia do Rio Corumbataí (SP). *Geociências*, 21, 1, 147-157.
- Conceição, F.T.; Bonotto, D.M. 2003. Use of U-isotopes disequilibrium to evaluated the weathering rates and fertilizer-derived uranium at São Paulo State, Brazil. *Environmental Geology*, 44, 4, 408-418. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s00254-003-0775-4>.
- Conceição, F.T.; Bonotto, D.M. 2004. Weathering rates and anthropogenic influences in a sedimentary basin, São Paulo State, Brazil. *Applied Geochemistry*, 19, 4, 575-591, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2003.07.002>
- Conceição, F.T.; Sardinha, D.S.; Souza, A.D.G.; Navarro, G.R.B. 2010. Anthropogenic influences on annual flux of cations and anions at Meio Stream basin, São Paulo State, Brazil. *Water Air and Soil Pollution*, 205, 79-91. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0057-1>.
- Conceição, F.T.; Santos, C.M.; Sardinha, D.S.; Navarro, G.R.B.; Godoy, L.H. 2015 Chemical weathering rate, denudation rate, and atmospheric and soil CO₂ consumption of Paraná flood basalts in São Paulo state, Brazil. *Geomorphology*, 233, 41-51. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.040>
- Conceição, F.T.; Vasconcelos, P.M.; Godoy, L.H.; Navarro, G.R.B.; Montibeller, C.C.; Sardinha, D.S. 2022. Water/rock interactions, chemical weathering and erosion, and supergene enrichment in the Tapira and Catalão I alkaline-carbonatite complexes, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 237, 106999. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.106999>
- Conceição, F.T.; Vasconcelos, P.M.; Navarro, G. R.B.; Farley, K.A. 2024. 40Ar/39Ar and (U-Th)/He constraints on emplacement, exhumation, and weathering of alkaline-carbonatite complexes in the Alto Paranaíba Igneous Province (APIP), Brazil. *Gondwana Research*, V. 130, pp. 116-130. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2024.01.010>
- Corrêa, E.A. 2016. Perdas de solos e índices de vegetação: proposta metodológica para a determinação do fator C (MEUPS) em pastagens e cana-de-açúcar. Tese (doutorado)-Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro.
- Corrêa, E.A.; Moraes, I.C.; Pinto, S.A.F.; Lupinacci, C.M. 2018a Evaluation of water erosion in sugarcane crops using erosion plots and photo comparison technics. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11, 5, 1761-1775. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i2.1303>
- Corrêa, E.A.; Moraes, I.C.; Lupinacci, C.M.; Pinto, S.A.F. 2018 b. Influência do cultivo de cana-de-açúcar nas perdas de solo por erosão hídrica em Cambissolos no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19, 231-243. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i2.1303>
- Couto Junior, A.A.; Conceição, F.T.; Fernandes, A.M.; Cunha, C.M.L.; Spatti Junior, E.P. 2016. Geoquímica fluvial aplicada à avaliação das taxas de intemperismo químico e remoção de solo da formação Rio Claro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17, 451-464. <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i3.1006>
- Couto Junior, A.A.; Conceição, F.T.; Fernandes, A.M.; Spatti Junior, E.P.; Lupinacci, C.M.; Moruzzi, R.B. 2019. Land use changes associated with the expansion of sugar cane crops and their influences on soil removal in a tropical watershed in São Paulo State (Brazil). *Catena*, 172, 313-323. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.001>.
- Dash, C.; Dhal, S.P.; Pati, P.; Agnihotri, R.; Farooqui, A.; Seong, Y.B. 2023. Climate-induced denudation of Eastern Ghat during the Holocene: A multi-proxy study from Chilika Lagoon (India). *Catena*, 221, 106754. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106754>
- Felippe, M.F.; Almeida Neto, J.O.; Magalhães Junior, J.O.; Ferreira, L.L.B. 2024. desnudação geoquímica em microbacias de cabeceira: o papel de nascentes e canais de baixa ordem na evolução do relevo. *Caderno de Geografia*. V. 34, n.77, p.426. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2024v34n77p426>
- Felippe, M.F.; Almeida Neto, Marques, L.O.; Reis, L.A.; Lapa, D.P.; J.O.; Magalhães Junior, J.O. 2022. Dinâmica geoquímica em cabeceiras de drenagem da Depressão do Paraíba do Sul: subsídios à compreensão do papel

- morfodinâmico de nascentes e canais de baixa ordem. *Boletim de Geografia*, V.39, pp. 422-439. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v39.a2021.e61000>
- Fernandes, A.M.; Conceição, F.T.; Spatti Junior, E.P.; Sardinha, D.S.; Mortatti, J. 2016. Chemical weathering rates and atmospheric/soil CO₂ consumption of igneous and metamorphic rocks under tropical climate in southeastern Brazil. *Chemical Geology*, 443, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.008>.
- Fernandes, A.M.; Conceição, F.T.; Spatti Junior, E.P.; Couto Junior, A.A.; Mortatti, J. 2019. Modelagem do controle climático nas taxas de erosão mecânica e de intemperismo químico na bacia do Rio Sorocaba (SP). *Geochimica Brasiliensis*, 33, 50-63. <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2019331050>
- Fernandes, A.M.; Conceição, F.T.; Mortatti, J. 2020a. Hydrochemistry applied to assess the Chemical weathering and soil removal rates in the Sorocaba River basin, São Paulo State. *Brazilian Journal of Geology*, 50, 1, e20190030. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190030>
- Fernandes, A.M.; Conceição, F.T.; Spatti Júnior, E.P.; Couto Júnior, A.A.; Hissler, C.; Mortatti, J. 2020 b. Human influences on the present denudation rates of Paulista Peripheral Depression. *Geomorphology*. 351, 106955. 2020b. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106955>
- Francisco, A.B. 2023. Distribuição geográfica das erosões lineares em áreas de cultivo de cana-de-açúcar em argissolos na bacia do rio Santo Anastácio-SP. *Caderno Prudentino de Geografia*. V.1, n.45, pp.24-38. <https://orcid.org/0000-0001-7632-9249>
- Gaillardet, J.; Dupré, P.; Allègre, B.; Négrel, P. 1997. Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. *Chemical Geology*, 142, 141-173. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00074-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00074-0)
- Gardner, C.B.; Wichterich, C.; Calero, A.E.; Welch, S.A.; Widom, E.; Smith, D.F.; Carey, A.E.; Lyons, B.W. 2023. Carbonate weathering, phosphate fertilizer, and hydrologic controls on dissolved uranium in rivers in the US Corn Belt: Disentangling seasonal geogenic- and fertilizer-derived sources. *Science of The Total Environment*. V. 861, 160455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.160455>
- Gautheron, C.; Sawakuchi, A.O.; Albuquerque, M.F.S.; Cabriolu, C.; Parra, M.; Ribas, C.C.; Pupim, F.N.; Schwartz, S.; Kern, A.K.; Gómez, S.; Almeida, R.P.; Horbe, A.M.C.; Haurine, F.; Miska, S.; Nouet, J.; Findling, N.; Riffel, S.B.; Pinna-Jame, R. 2022. Cenozoic weathering of fluvial terraces and emergence of biogeographic boundaries in Central Amazonia. *Global and Planetary Change*. V. 212, 103815. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103815>
- Gibbs, R.J. 1967. The geochemistry of the Amazon River system: Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geological Society American Bulletin*, 78, 1203-1232. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1967\)78\[1203: TGOTAR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1967)78[1203: TGOTAR]2.0.CO;2).
- Godsey, S.E.; Kirchner, J.W.; Clow, D.W. 2009. Concentration–discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments. *Hydrological Processes*, 23, 1844-1864. <https://doi.org/10.1002/hyp.7315>
- Gomes, D.J.C.; Souza, E.V.S.; Ferreira, N.S.; Lobato, R.R.C.; Ribeiro, B.F.; Dias, G.F.M. 2021. Vulnerabilidade à erosão hídrica do solo, bacia hidrográfica do rio Araguaia. *Revista Brasileira de Geografia Física*. V. 14, n.02, pp. 816-833. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p816-833>
- Heller, B.M.; Riffel, S.B.; Allard, T.; Morin, G.; Roig, J.Y.; Coueffe, R.; Aertgeerts, G.; Derycke, A.; Ansart, C.; Pinna-Jame, R.; Gautheron, C. 2022. Reading the climate signals hidden in bauxite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. V.323, pp. 40-73. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.02.017>
- Köppen, W. 1931. *Climatologia*. México, Fondo de Cultura Econômica.
- Leão, M.R.; Rezende, E.A.; Salgado, A.A.R.; Nalini Júnior, H.A. 2012. Erosão, denudação e evolução do relevo da média serra do espinhaço meridional, Minas Gerais. V13, n.2. <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i2.369>
- Lerman, A.; Wu, L.; Mackenzie, F.T. 2007. CO₂ and H₂SO₄ consumption in weathering and material transport to the ocean, and their role in global carbon balance. *Marine Chemistry*, 106, 326–350. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2006.04.004>
- Li, W.; Liu, X.M.; Hu, Y.; Teng, F.Z.; Chadwick, O.A. Potassium isotope fractionation during chemical weathering in humid and arid Hawaiian regoliths. 2022.

- Geochimica et Cosmochimica Acta, V.33, pp. 39-55.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.07.001>
- Lima, M.A.; Luiz, A.J.B; Neves, M.C. 2016. Gases de efeito estufa da queima de cana-de-açúcar no estado de São Paulo : 1990-2015. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariuna, SP.
- Meybeck, M. 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved load. American Journal of Science 287, 401–428. <https://doi.org/10.2475/ajs.287.5.401>
- Martini, I.P.; Chesworth, W. 1992. Weathering, Soils and Paleosols. Elsevier Science Publications, Amsterdam.
- Mello, R.C.A.; Conceição, F.T.; Sardinha, D.S.; Fernandes, A.M. 2022. Monossialitização como principal processo de intemperismo químico no planalto alcalino de Poços de Caldas (MG). Revista Brasileira de Geomorfologia, 23, 1685-1699. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i3.2133>
- Monteiro, H.S.; Vasconcelos, P.M.; Farley, K.A.; Mello, C.L.; Conceição, F.T. 2022. Long-term vegetation-induced goethite and hematite dissolution-reprecipitation along the Brazilian Atlantic margin. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. V.601, 111137. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2022.111137>
- Montibeller, C.C.; Navarro, G.R.B.; Zanardo, A.; Roveri, C.; Rocha, R.R.; Conceição, F.T.; Leme, T.G. 2020. Geochemistry of siltstones from the Permian Corumbataí Formation from the Paraná Basin (State of São Paulo, Brazil): Insights of provenance, tectonic and climatic settings. Journal of South American Earth Sciences, 102, 102582. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102582>
- Mortatti, J. Erosão na Amazônia: processos, modelos e balanços. 1995. Tese (Livro-Docência) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1995.
- 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, 1-4, 177-196, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00349-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00349-2).
- OECD/FAO. Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico/ Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura. 2015. Agricultural Outlook. OECD Publishing, Paris.
- Penteado, M. M. 1974. Fundamentos de geomorfologia. Biblioteca Geográfica Brasileira. Rio de Janeiro.
- Rezende, E.A.; Leão, M.R.; Salgado, A.A.R.; Oliveira, C.K.R.; Nalini Junior, H.A. 2010. A influência litológica nas taxas de denudação geoquímica do médio espinhaço meridional – MG. Sociedade e Natureza. V.22, n.03, pp. 503-514.
- Ross, J.L.S. 1996. Unidades do Relevo Brasileiro. In Geografia do Brasil, ROSS, J.L.S. (ORG.) pg. 51, 1ª Ed. Edusp. São Paulo.
- SÃO PAULO. Decreto nº 10.755, de 22/11/1977. Dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976 e dá providências correlatas. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/norma/153028#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20o%20enquadramento%20dos,1976%20e%20d%C3%A1%20provid%C3%A2ncias%20correlatas>.
- Sardinha, D. S.; Bonotto, D.M.; Conceição, F.T. 2010. Weathering rates at Sorocaba River basin, Brazil, using U-isotopes and major cations. Environmental Earth Sciences, 61,1025-1036. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0424-7>
- Sardinha, D.S.; Bonotto, D.M.; Godoy, L.H.; Conceição, F.T.; Moreno, M.M.T. 2012. Denudação química e implicações na composição das águas superficiais da bacia do Rio Jaú (SP). Revista Brasileira de Geomorfologia, 13, 337-349. <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i3.284>
- Sardinha, D.S.; Godoy, L.H.; Conceição, F.T.; Spatti Júnior, E. P.; Fernandes, A.M.; Victal, F.A.C.A.; Costa, D.A.T. 2018. Geoquímica fluvial e balanço de denudação em Tinguaitos de Poços de Caldas, Minas Gerais. Geologia USP. Série Científica, 18, 1, 259-272. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-127313>
- Schneider, R. F.; Muhlmann, H. E.; Medeiros, R. A.; Daemon, R. F.; Nogueira, 1974. A.A. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Anais SBG., 1, 28, 41-65. Porto Alegre.
- Sirqueira, E.S.; Almeida, F.T. Souza, A.P., Araújo, Zolin, C.A.; Paulista, R.S.D. 2022. Avaliação das perdas de solo pela MUSLE em uma microbacia hidrográfica no ecótono Cerrado-Amazônia. Revista Brasileira de Geografia Física. V. 15, n.05, pp. 2430-2447. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2430-2447>

- Soares, P.C.; Landim, P.M.B. 1974. Aspectos da estratigrafia da Bacia do Paraná no seu flanco nordeste. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Anais SBG. 1, p. 243-256. Porto Alegre.
- Spatti Junior, E.P. 2023. Avaliação e comparação das taxas de erosão química e mecânica entre arenitos e argilitos: implicações na evolução geomorfológica da bacia do Rio Corumbataí (SP). Editora Atena, 77p. Ponta Grossa-PR.
- Spatti Junior, E.P.; Conceição, F.T.; Guedes Junior, E.; Pinto, S.A.F.; Pereira, L.H. 2014. Balanço entre intemperismo químico e remoção do solo na bacia do Ribeirão Monjolo Grande, Ipeúna (SP), determinado por geoquímica fluvial. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15, 137-1512. <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i1.486>
- Spatti Junior, E.P.; Conceição, F.T.; Fernandes, A.M.; Sardinha, D.S.; Moruzzi, R.B. 2019. Chemical weathering rates of clastic sedimentary rocks from the Paraná Basin in the Paulista Peripheral Depression, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 96, 102369. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102369>
- Stallard R.F.; Edmond, J.M. 1983. 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*, 86, 10, 9844-9858. <https://doi.org/10.1029/JC092iC08p08293>.
- Summerfield, M.A. 1991. *Global geomorphology: an introduction to the study of landforms*. Ed. Routledge, 1ªEd.
- Tardy, Y. 1971. Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of Waters from some European and African crystalline massifs. *Chemical Geology*, 7, 253-271. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(71\)90011-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(71)90011-8).
- Teixeira W.; Toledo M.C.M.; Fairchild T.R.; Taioli F. 2000. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de textos, 1ª edição, 568p.
- Zaine, J. E. Geologia da formação Rio Claro na folha de Rio Claro (SP).1994 Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.90p. (Dissertação de Mestrado). Rio Claro/SP.
- Zanardo, A.; Navarro, G.R.B.; Montibeller, C.C.; Rocha, R.R., Moreno, M.M.T.; Roveri, C.D.; Azzi, A.A.2017. Geoquímica da Formação Corumbataí na Região de Rio Claro/SP. *Geociências*, 36: 30-47.