

DINÂMICA FLUVIAL NA BACIA DO BAIXO CURSO DO RIO SAPUCAÍ: O PAPEL DOS TRIBUTÁRIOS NA CONFIGURAÇÃO DO LEITO ALUVIAL

Isabella de Oliveira Carvalho¹
Rhian Silva Mendonça²
Marcelo Augusto Ribeiro Pires³
Sofia Soto Bonassa⁴
Felipe Gomes Rubira⁵

INTRODUÇÃO

As rupturas de declive de cursos fluviais, conhecidas como *knickpoints*, referem-se a seções subitamente íngremes nos perfis longitudinais dos rios. Para a interpretação da incisão da rede fluvial em paisagens altamente dissecadas, é essencial que a posição e a distribuição desses *knickpoints* sejam analisadas (Phillips et al., 2010; Reis et al., 2023). O estudo da distribuição dos *knickpoints* na bacia hidrográfica torna-se fundamental para que a evolução da paisagem a longo termo seja compreendida (Crosby et al., 2006).

Com os avanços dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), o advento dos Modelos Digitais de Elevação (DEM) e o desenvolvimento de ferramentas especializadas, como o *TopoToobox* (Schwanghart; Scherler, 2014), houve uma evolução nos métodos de análise fluvial, permitindo a obtenção de informações mais rápidas, precisas e menos onerosas sobre a superfície. Além disso, a introdução da teoria de sistemas, de equilíbrio e probabilística fortaleceu o poder de interpretação dos fatos e dinâmicas geomorfológicas, resultando em aplicações importantes para a geomorfologia tectônica, estrutural e fluvial. Esse cenário impulsionou o aumento de pesquisas que buscam analisar fenômenos geomorfológicos em bacias hidrográficas, contribuindo para o desenvolvimento de distintos parâmetros morfométricos (Schumm, 1956; Hack, 1973).

Tais estudos revelaram que os cursos d'água são sensíveis às mudanças tectônicas crustais, reagindo a processos modificados, mesmo em pequenas escalas (Schumm, 1993). No entanto, em setores de baixo curso fluvial com largas planícies e leito plano, a análise geomorfológica associada a modelagens de gradientes fluviais em ambientes remotos enfrenta

¹ Graduanda pelo Curso de Geografia Bacharelado da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, isabella.carvalho@sou.unifal-mg.edu.br;

² Graduando pelo Curso de Geografia Bacharelado da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, rhian.mendonca@sou.unifal-mg.edu.br;

³ Graduando pelo Curso de Geografia Licenciatura da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, marcelo.pires@sou.unifal-mg.edu.br;

⁴ Graduanda pelo Curso de Geografia Bacharelado da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, sofia.bonassa@sou.unifal-mg.edu.br;

⁵ Professor orientador: Prof. Dr. Felipe Gomes Rubira, Instituto de Ciências da Natureza - ICN, Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, felipe.rubira@unifal-mg.edu.br.

desafios. Nessas áreas, caracterizadas pela acomodação de sedimentos em vez de sua exportação, a presença de registros geomorfológicos distintivos, como os *knickpoints*, é escassa ou até mesmo ausente, dificultando a interpretação e compreensão da dinâmica fluvial e das evoluções paisagísticas. Isso ocorre ao utilizar metodologias como o *stream length-gradient* (*SL index*), *normalized steepness index* (k_{sn}) e *Channel-Hillslope Integration* ($chi\ \chi$) (Hack, 1973; Kirby; Whipple, 2012; Perron; Royden, 2013).

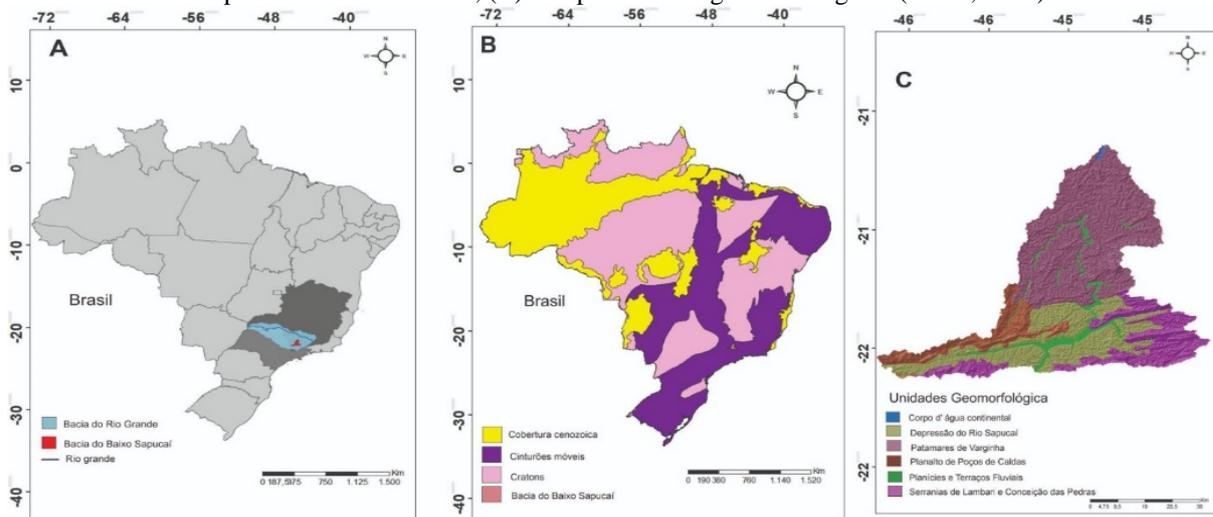
Diante dessas dificuldades, é importante ressaltar que a análise não é impossibilitada, mas requer uma abordagem mais ampla, que leve em consideração a dinâmica erosiva dos tributários. Estes, atuam como importantes agentes na erosão e transporte de sedimentos, justificando, em muitos casos, a configuração do leito aluvial do baixo curso do rio principal. Com base nessas considerações, esta pesquisa objetiva analisar a influência dos tributários na dinâmica do baixo curso fluvial do rio Sapucaí, visando uma compreensão mais abrangente e precisa dos processos geomorfológicos envolvidos. Para essa avaliação, foram analisados perfis longitudinais e utilizados parâmetros morfométricos como hipsometria, declividade, altura de *knickpoints*, densidade de *knickpoints* e o índice de declividade normalizada do canal (k_{sn}).

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

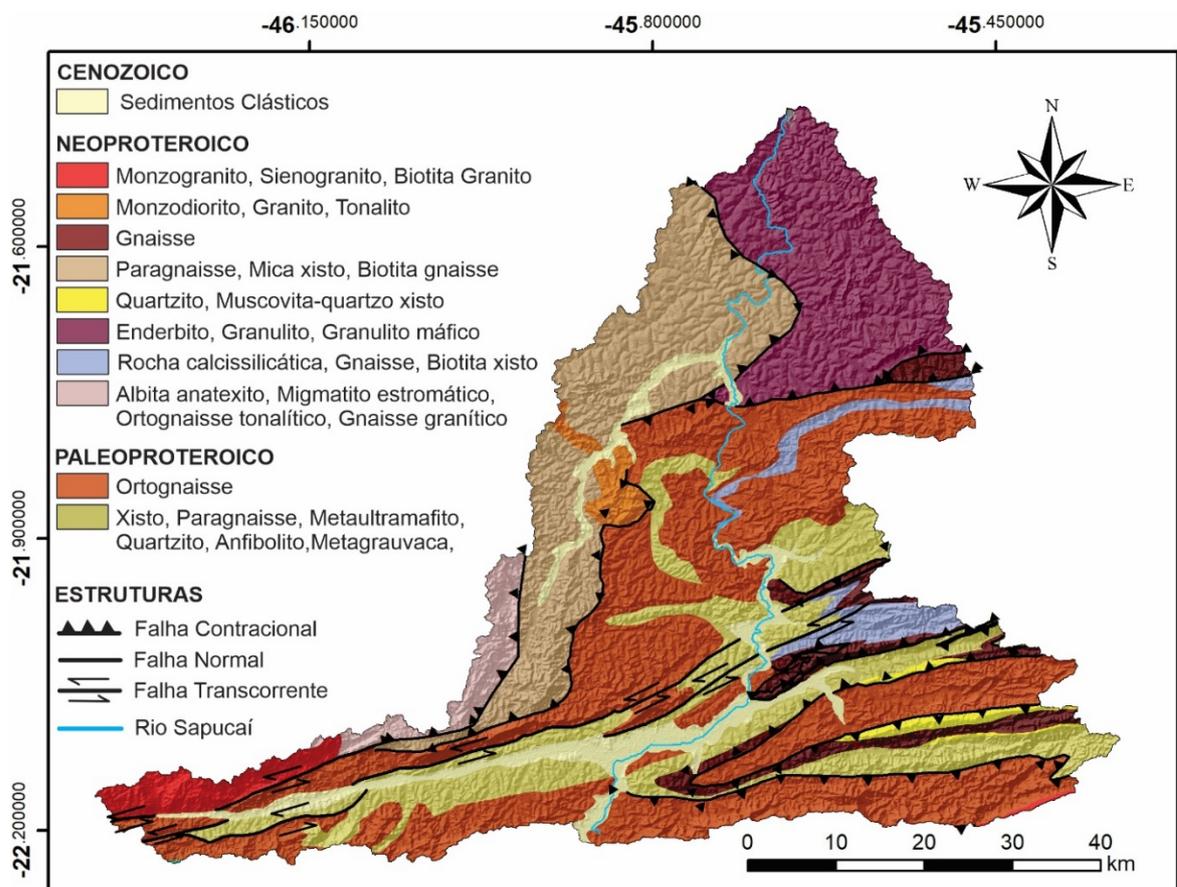
A bacia do baixo Sapucaí integra-se à bacia do rio Grande (Figura 1A). O rio Sapucaí nasce em Campos do Jordão (SP), na Serra da Mantiqueira, e conflui com o rio Sapucaí-Mirim em Pouso Alegre (MG), marcando o início de seu baixo curso. A geologia regional vincula-se ao domínio morfoestrutural dos Cinturões Móveis Neoproterozoicos (Figura 1B).

Figura 1. (A) localização da área de estudo; (B) bacia do baixo rio Sapucaí sobreposta aos Cinturões Móveis Neoproterozoicos do Brasil; (C) compartimentos geomorfológicos (IBGE, 2023).



As regiões geomorfológicas são o Planalto do Alto rio Grande e Planalto de Poços de Caldas, enquanto as unidades geomorfológicas associadas ao primeiro consistem na Serras de Lambari e Conceição das Pedras e no segundo na Depressão do rio Sapucaí (Figura 1C). Localizada em uma região marcada por intensa atividade tectônica durante o neoproterozoico, a bacia foi influenciada pela orogênese Brasileira que formou o Gondwana (Hasui, 2010). Esse evento gerou dobramentos, falhamentos e metamorfismo devido às colisões de blocos crustais, afetando a disposição litológica, constituída principalmente por variações de gnaisses, granitos, quartzitos, xistos e de sedimentos cenozoicos de leitos aluviais (Figura 2) (Silva et al., 2020).

Figura 2: Geologia da bacia do baixo Sapucaí



MATERIAIS

Todos os parâmetros foram processados no pacote de ferramentas *TopoToolbox 2*, hospedado no *software* MATLAB v.2021a (Schwanghart; Scherler, 2014), utilizando o Modelo Digital de Elevação Copernicus (Cop-DEM), com 30 metros de resolução espacial, obtido da plataforma *Open Topography* (<https://opentopography.org/>).

MÉTODOS

O índice de declividade normalizada do canal (k_{sn}) foi usado para avaliar a potência fluvial, calculado a partir de uma função que relaciona a declividade normalizada com a área

de contribuição dos canais a montante (Equação 1). Onde: S é o valor gradiente; A é área da bacia de drenagem a montante e θ é o *índice de concavidade de referência* (Kirby; Whipple, 2012).

$$k_{sn} = SA^{-\theta_{ref}} \text{ (Equação 1)}$$

Em sistemas fluviais, a declividade (S) de um canal é reduzida à medida que a área de drenagem (A) aumenta. A normalização da declividade é realizada para permitir comparações precisas entre canais de diferentes tamanhos de bacias de drenagem. Sem a normalização, a declividade dos canais com grandes áreas de drenagem tende a parecer menor, enquanto a dos canais com pequenas áreas de drenagem parece maior. Isso resulta em comparações injustas e dificulta a identificação de variações causadas por processos tectônicos ou geomorfológicos. Além disso, a ausência de normalização torna difícil distinguir se as variações na declividade são causadas por diferenças na área de drenagem ou por processos como *uplift* tectônico ou variações na resistência do leito rochoso, levando a interpretações errôneas e à subestimação ou superestimação de processos geomorfológicos.

O índice k_{sn} foi aplicado em toda a rede de drenagem utilizando o pacote de ferramentas *TopoToolbox 2* e *Topographic Analysis Kit (TAK)* hospedados no software MATLAB v.2021a (Schwanghart; Scherler, 2014; Forte; Whipple, 2019). Inicialmente, as incertezas inerentes os ruídos do MDE foram eliminadas no *TopoToolbox 2* com a função ‘*Constrained Regularized Smoothing*’. Em seguida a rede de drenagem foi extraída no *TopoToolbox 2* com base em uma área de contribuição mínima de 500 pixels.

Devido as áreas planas (*flat areas*) das largas planícies fluviais do baixo curso do rio Sapucaí, o processo resultou em vários erros, segmentando a drenagem da bacia em diferentes partes. Para resolver o problema, utilizou-se a função “*makeStreams*” do TAK, substituindo valores menores ou iguais a zero do DEM ($DEM_values \leq 0$) e atribuindo os valores modificados de volta ao objeto DEM ($Z = DEM_value$). O parâmetro de força foi definido ($strength = 1$) e as áreas planas foram removidas com a função “*RemoveFlats*” do TAK.

Com a drenagem unificada, retornou-se ao *TopoToolbox 2*, onde foi ajustada através da remoção canais de 1ª ordem menores que 10 km. Posteriormente, o *índice de concavidade* (θ) foi calculado utilizando a função “*slopearea* ($\theta = 0,45$)” e os valores de k_{sn} foram agregados, plotados e suavizados em segmentos de fluxo com as funções ‘*ksn*’, ‘*STREAMObj2mapstruct*’ e ‘*STREAMObj/smooth*’.

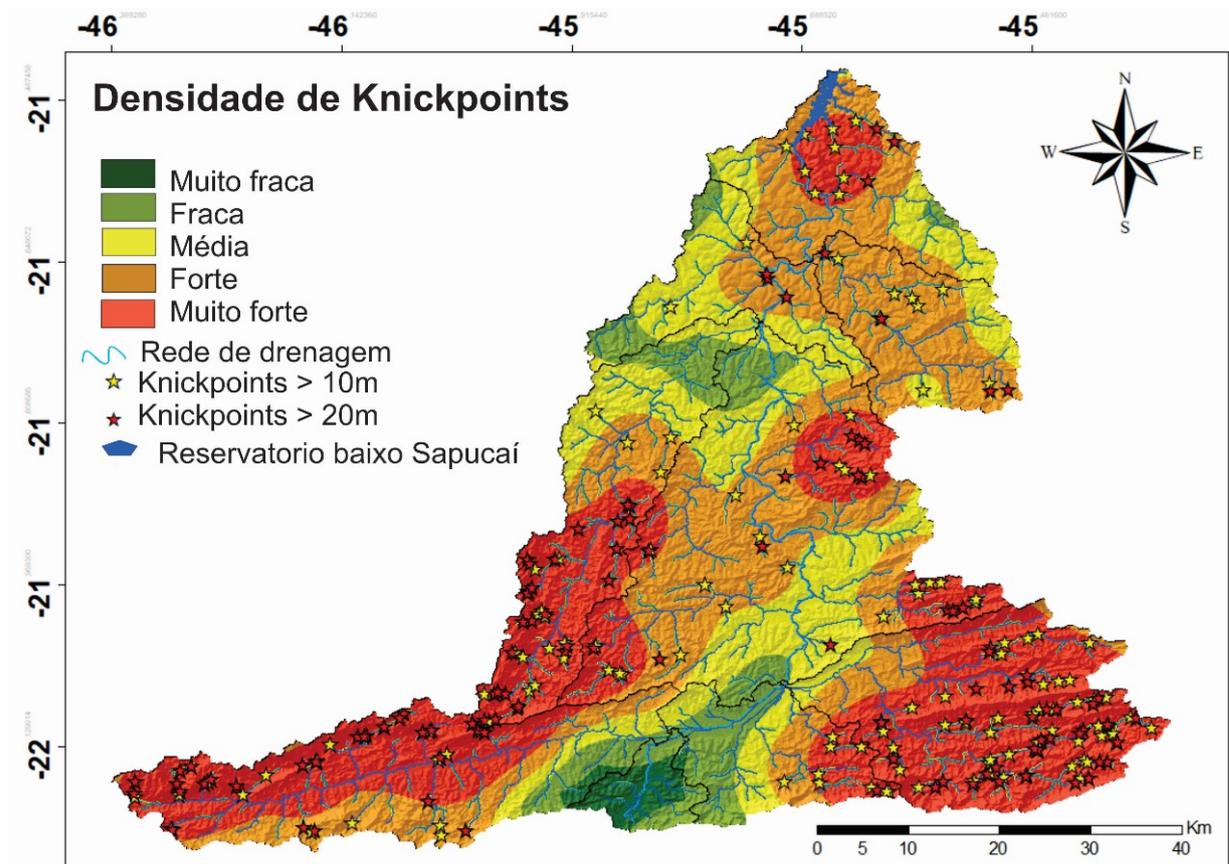
Para a elaboração dos perfis longitudinais, identificação dos *knickpoints*, mensuração de suas alturas e extração das 6 drenagens de interesse, foram utilizadas as funções ‘*plotdz*’, ‘*knickpoint finder*’ e ‘*point pattern on stream networks*’, respectivamente (Schawanghart;

Scherler, 2014). Em seguida, os dados foram exportados no formato “*shapefile*” e manipulados no ArcGIS 10.8.1, onde o mapa de densidade de *knickpoints* foi elaborado por meio da função ‘*Kernel Density*’.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram identificados 248 *knickpoints* com alturas superiores a 10 metros e 116 com alturas superiores a 20 metros na bacia. Apenas 2 *knickpoints* menores que 20 metros estão relacionados ao canal principal (Figura 3). A maior concentração de *knickpoints* está localizada na região do Planalto de Poços de Caldas, Serrania de Lambari e Conceição das Pedras, onde se encontram relevos altamente dissecados (Figura 1C). As menores concentrações ocorrem nas áreas adjacentes ao baixo curso do rio Sapucaí, em zonas que acomodam sedimentos e desenvolvem leitos aluviais que protegem a rocha da erosão.

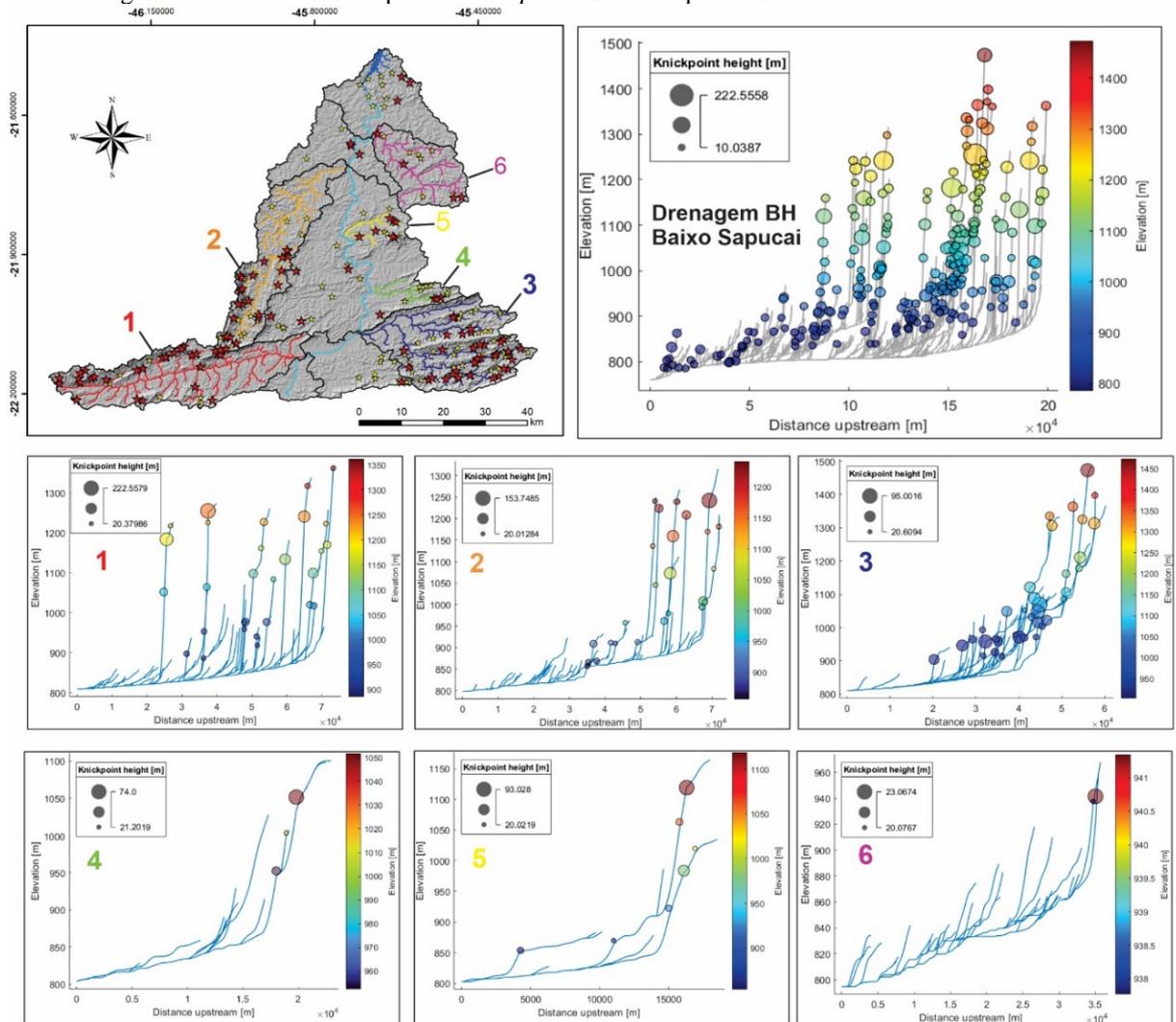
Figura 3: densidade dos *knickpoints* com alturas maiores que 10 metros na bacia do baixo rio Sapucaí



A maior concentração de *knickpoints* na bacia é associada a zonas de cisalhamento contracionais e transcorrentes, onde predominam sucessões de granitos, gnaisses, xistos, ortognaisses e quartzitos (Figuras 2 e 3). As deformações induzidas por essas falhas provocaram alterações na posição e estrutura dessas rochas, originando muitos dos *knickpoints* observados.

A análise da dinâmica erosiva dos tributários identificou os sistemas de drenagem como principais agentes na erosão e no transporte de sedimentos, sendo os que mais contribuem para a formação dos leitos aluviais no baixo curso do rio Sapucaí (Figura 4).

Figura 4: Espacialização das drenagens selecionadas para análise, *knickpoints* maiores que 10 m de toda a drenagem da bacia do baixo Sapucaí e *knickpoints* maiores que 20 m das redes tributárias selecionadas

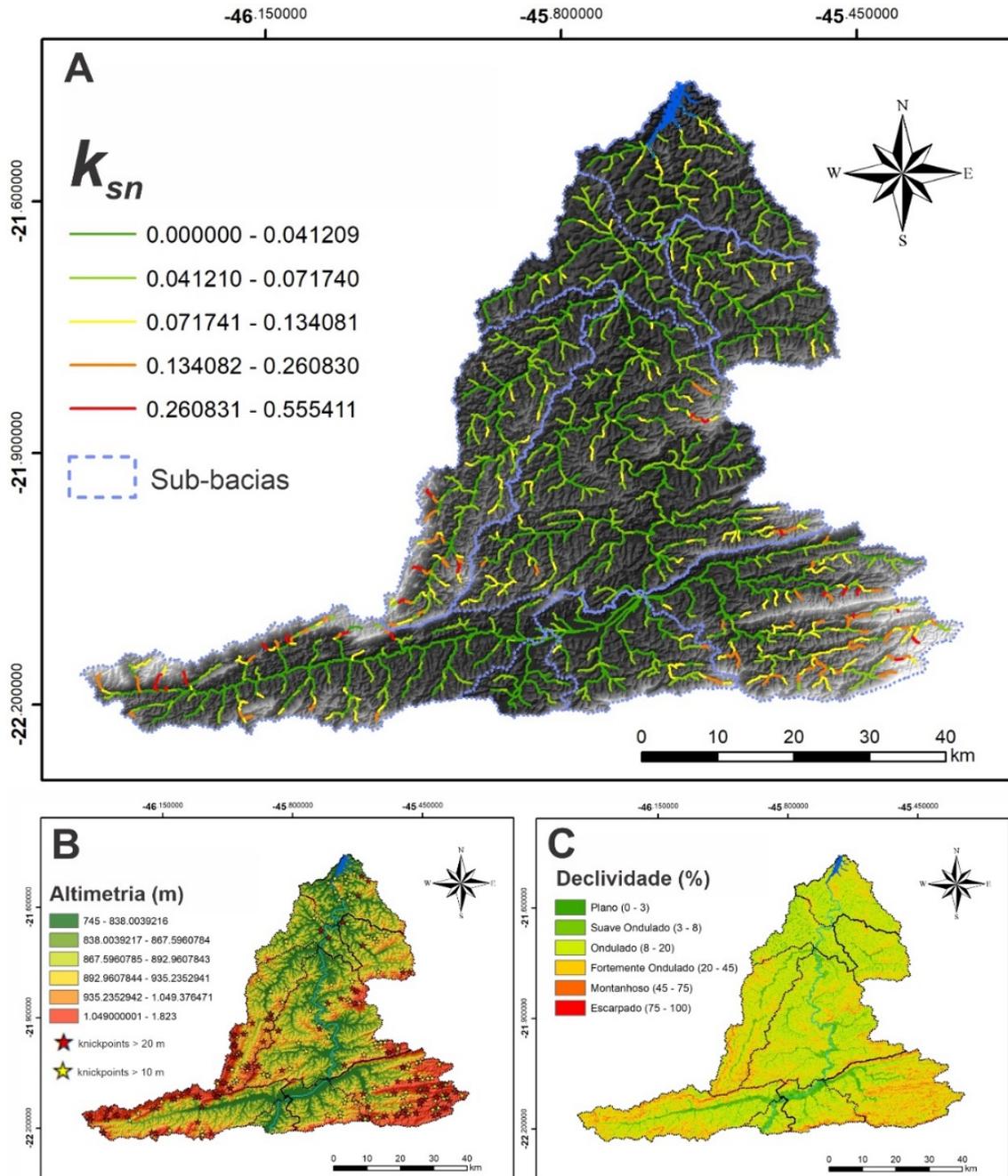


Na análise das drenagens, verificou-se que aquelas com maior concentração de *knickpoints*, próximas a falhas e variações litológicas, foram as mais erosivas (drenagens 1, 2 e 3) (Figuras 2, 3, 4 e 5A). Os maiores valores de k_{sn} na bacia (0.13 a 0.55 m^{0.9}) estão associados às altas concentrações e magnitudes dos *knickpoints* próximos as falhas tectônicas (Figura 5A) e correlacionam-se positivamente com as maiores altitudes e declividades da bacia (Figura 5B e 5C). Dessa forma, os trechos após as confluências das drenagens 1, 2 e 3 são os mais propensos à acomodação de sedimentos e à agradação do leito aluvial do canal principal.

As drenagens 4, 5 e 6, próximas ao canal fluvial e ao reservatório de Furnas, têm os menores valores de k_{sn} na bacia (0.13 a 0.55 m^{0.9}) e as menores concentrações de *knickpoints* em áreas distais dos adensamentos de falhas e variações litológicas (Figuras 2, 3, 4 e 5A). Essas

áreas, com altitudes mais baixas e declividades predominantemente planas, contribuem menos na oferta de sedimentos para os leitos aluviais do baixo curso do rio Sapucaí (Figuras 5B e 5C).

Figura 5: (A) k_{sn} por comprimento fluxo da drenagem; (B) Hipsometria; (C) Declividade



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os *knickpoints* da bacia do baixo Sapucaí indicam áreas com maior atividade erosiva, especialmente em regiões com alta densidade. As drenagens próximas a falhas e variações litológicas favorecem a maior erosão e transporte de sedimentos e a formação dos leitos aluviais no baixo curso do rio Sapucaí. Nas áreas adjacentes ao rio principal e ao reservatório de Furnas, a erosão é menor, resultando em menor aporte de sedimentos para os leitos aluviais.

Externamos nossos agradecimentos à FAPEMIG pelo apoio financeiro para a participação coletiva em eventos e ao CNPQ pelo financiamento da pesquisa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

CROSBY, B. T.; WHIPPLE, K. X. Knickpoint initiation and distribution within fluvial networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand. **Geomorphology, The Hydrology and Geomorphology of Bedrock Rivers**, v. 82, n. 1, p. 16–38, 2006.

FORTE, A. M.; WHIPPLE, K. X. Short communication: The Topographic Analysis Kit (TAK) for TopoToolbox. **Earth Surface Dynamics**, v. 7, n. 1, p. 87–95, 2019.

HACK, J. T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. **Journal of Research of the U.S. Geological Survey**, v. 1, n. 4, p. 421–429, 1973.

HASUI, Y. A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. **Geosciences = Geociências**, v. 29, n. 2, p. 141–169, 2010.

IBGE. **Base Dados Espacial 1:250.000, Brasil**. Escala 1:250.000. <https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais>. Acesso em: 27 maio. 2024.

KIRBY, E.; WHIPPLE, K. X. Expression of active tectonics in erosional landscapes. **Journal of Structural Geology**, v. 44, p. 54–75, 2012.

PERRON, J. T.; ROYDEN, L. An integral approach to bedrock river profile analysis. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 6, p. 570–576, 2013.

PHILLIPS, J. D.; MCCORMACK, S.; DUAN, J.; RUSSO, J. P.; SCHUMACHER, A. M.; TRIPATHI, G. N.; BROCKMAN, R. B.; MAYS, A. B.; PULUGURTHA, S. Origin and interpretation of knickpoints in the Big South Fork River basin, Kentucky–Tennessee. **Geomorphology**, v. 114, n.3, p. 188–198, 2010.

REIS, I. L. et al. Morphometric parameters of the relief and drainage network of a tropical subbasin. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 2, 2023.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at perth amboy, New Jersey. **GSA Bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597–646, 1956.

SCHUMM, S. A. River Response to Baselevel Change: Implications for Sequence Stratigraphy. **The Journal of Geology**, v. 101, n. 2, p. 279–294, 1993.

SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. Short Communication: TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. **Earth Surface Dynamics**, v. 2, n. 1, p. 1–7, 2014.

SILVA, M. A.; PINTO, C. P.; PINHEIRO, M. A. P.; MARINHO, M. S.; LOMBELLO, J. C.; PINHO, J. M. M. P.; GOULART, L. E. A.; MAGALHÃES, J. R. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. CPRM, 2020. Escala 1:1.000.000.