

SERRA DA MANTIQUEIRA MERIDIONAL: CONTROLES ESTRUTURAIS NO RELEVO E DRENAGEM DA BACIA DO ALTO E MÉDIO RIO SAPUCAÍ (SP/MG)

Marcelo Augusto Ribeiro Pires ¹
Sofia Soto Bonassa ²
Isabella de Oliveira Carvalho ³
Rhian Silva Mendonça ⁴
Luisa Baptistella Zanete ⁵
Ronaldo Luiz Mincato ⁶
Felipe Gomes Rubira ⁷

INTRODUÇÃO

A morfogênese do relevo é constantemente modificada por processos endógenos e exógenos, e isso sugere que a paisagem morfológica atual representa apenas um momento evolutivo do modelado terrestre (Foster; Kelsey, 2012). A partir de uma compreensão geossistêmica, essa reorganização da paisagem é derivada, principalmente, pela entrada e saída de energia, que atua diretamente na transformação da rocha, clima, relevo, solo, hidrografia e vegetação.

Para avaliar estas relações, vinculadas a evolução da paisagem de longo termo, novos índices morfométricos têm sido desenvolvidos e integrados aos estudos geomorfológicos puros (Kirby; Whipple, 2012; Forte; Whipple, 2018). De acordo com Reis et al. (2023), essas abordagens têm facilitado a identificação de evidências que demonstram a influência de antigas morfoestruturas no desenvolvimento atual da drenagem e do relevo, além de apontarem futuras tendências (Reis et al., 2021). No entanto, também são observadas aplicações voltadas à gestão ambiental na análise de riscos e desastres naturais (Liu, Yao; Li, 2021; Servidoni et al., 2023a; 2023b).

¹ Graduando pelo Curso de Geografia Licenciatura da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, marcelo.pires@sou.unifal-mg.edu.br;

² Graduanda pelo Curso de Geografia Bacharelado da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, sofia.bonassa@sou.unifal-mg.edu.br;

³ Graduanda pelo Curso de Geografia Bacharelado da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, isabella.carvalho@sou.unifal-mg.edu.br;

⁴ Graduando pelo Curso de Geografia Bacharelado da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, rhian.mendonca@sou.unifal-mg.edu.br;

⁵ Graduanda pelo Curso de Geografia Licenciatura da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, luisa.zanete@sou.unifal-mg.edu.br;

⁶ Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato, Instituto de Ciências da Natureza - ICN, Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br;

⁷ 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.

Entre esses parâmetros, destaca-se o índice de declividade normalizada do canal (k_{sn}), uma importante medida da potência fluvial (*stream power*) sobre a erosão de leitos rochosos. O k_{sn} oferece *insights* sobre como as taxas de soerguimento tectônico e erosividade da chuva regulam a variação da energia do fluxo de água e do transporte de sedimentos nas bacias hidrográficas (Kirby; Whipple, 2012).

Diante desse contexto, este trabalho analisa a influência de controles estruturais da Serra da Mantiqueira Meridional no condicionamento do relevo e da drenagem da bacia hidrográfica do Alto e Médio rio Sapucaí (SP/MG). A investigação baseou-se na história de eventos orogênicos antigos que afetaram a região, com atenção especial às variações litoestruturais e às zonas de cisalhamento herdadas por estes episódios de colisão. Para essa avaliação, foram analisados perfis longitudinais e utilizados parâmetros morfométricos como hipsometria, declividade, magnitude de *knickpoints*, densidade de *knickpoints* e o índice de declividade normalizada do canal (k_{sn}).

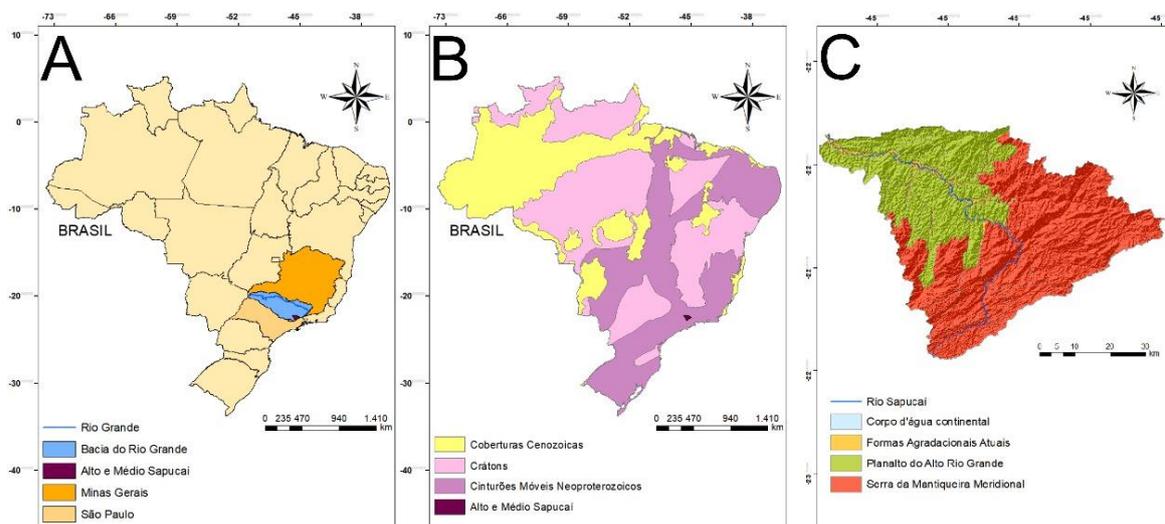
A pesquisa justifica-se pela disponibilização de um novo conjunto de dados, úteis para a gestão ambiental na tomada de decisões. Além disso, esses dados contribuem para novas pesquisas acadêmicas sobre o comportamento hídrico da bacia e para estudos voltados à compreensão dos aspectos evolutivos da área de estudo.

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Alto e Médio rio Sapucaí está localizada na divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, sendo uma sub-bacia do rio Grande (MG) (Figura 1A).

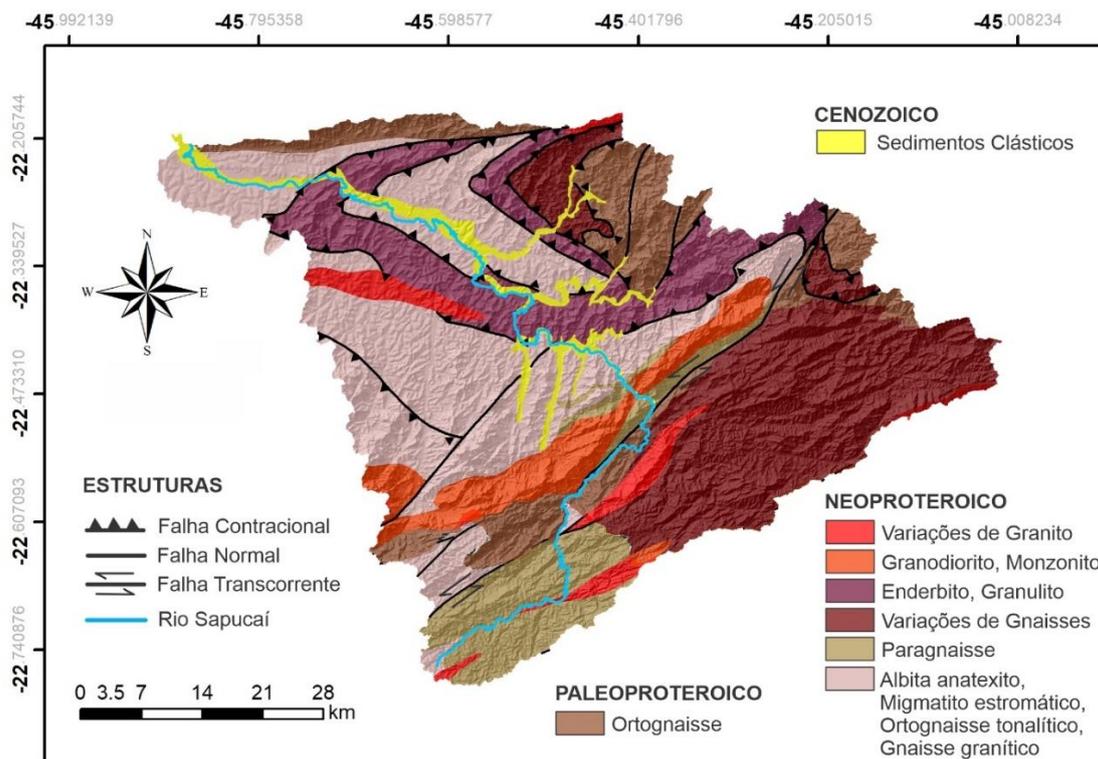
Figura 1. (A) localização da área de estudo; (B) bacia do alto e médio rio Sapucaí sobreposta aos Cinturões Móveis Neoproterozoicos do Brasil; (C) compartimentos geomorfológicos (IBGE, 2023).



O canal principal tem sua nascente em Campos do Jordão (SP) e passa por municípios turísticos como Santo Antônio do Pinhal (SP), São Bento do Sapucaí (SP) e Santa Rita do Sapucaí (MG). A confluência com o rio Sapucaí-Mirim ocorre em Pouso Alegre (MG) e marca o início do seu baixo curso fluvial. A geologia abrange terrenos desde o Paleoproterozoico até o Cenozoico, associados ao domínio morfoestrutural dos Cinturões Móveis Neoproterozoicos (Figura 1B). As regiões geomorfológicas estão ligadas à Serra da Mantiqueira Meridional e ao Planalto do Alto rio Grande (Figura 1C).

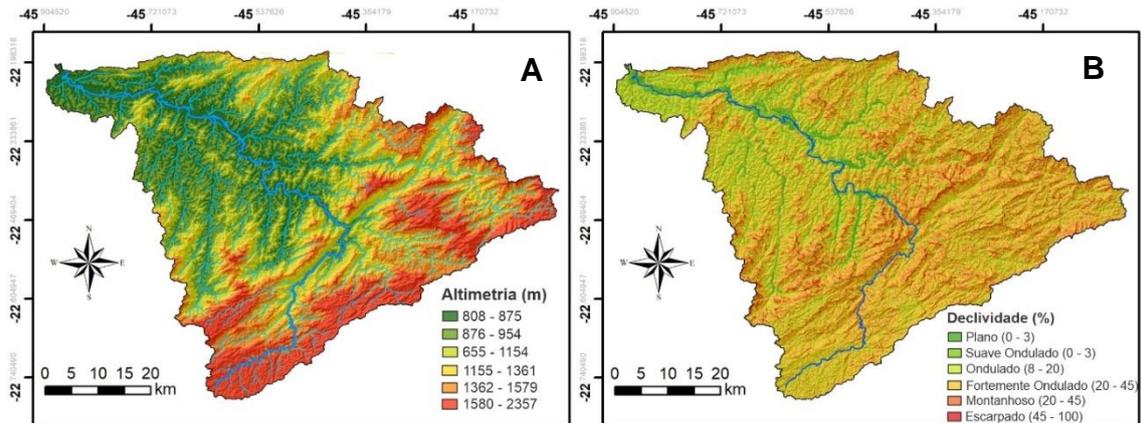
A área é composta majoritariamente por rochas ígneas e metamórficas. Sua formação remonta a eventos tectônicos desde o neoproterozoico, relacionados à formação do supercontinente Gondwana (Hasui, 2010). A bacia é constituída principalmente por variações de gnaisses, granitos e granulitos e de sedimentos clásticos cenozoicos que protegem o leito rochoso da erosão (Figura 2) (Silva et al., 2020).

Figura 2. Geologia simplificada da área de estudo



O relevo da bacia é condicionado por essas morfoestruturas, derivadas do ciclo orogenético Brasileiro Pan Africano. Destacam-se o Planalto de Campos do Jordão, as Serras de Delfim Moreira-Carmo de Minas e a depressão do rio Sapucaí, associadas às maiores e menores altitudes e declividades da bacia, respectivamente (Figuras 3A e 3B). Na área depressionária desenvolve-se uma larga planície aluvial com sedimentos clásticos (Figuras 2 e 3A).

Figura 3. (A) Modelo Digital de Elevação; (B) Mapa de declividade



MATERIAIS

Obtivemos e processamos todos os parâmetros a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus GLO-30 (COP-30), com 30 metros de resolução espacial, extraído da plataforma *Open Topography* (<https://opentopography.org/>) (ESA, 2021).

MÉTODOS

O k_{sn} foi usado para avaliar a potência fluvial (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).

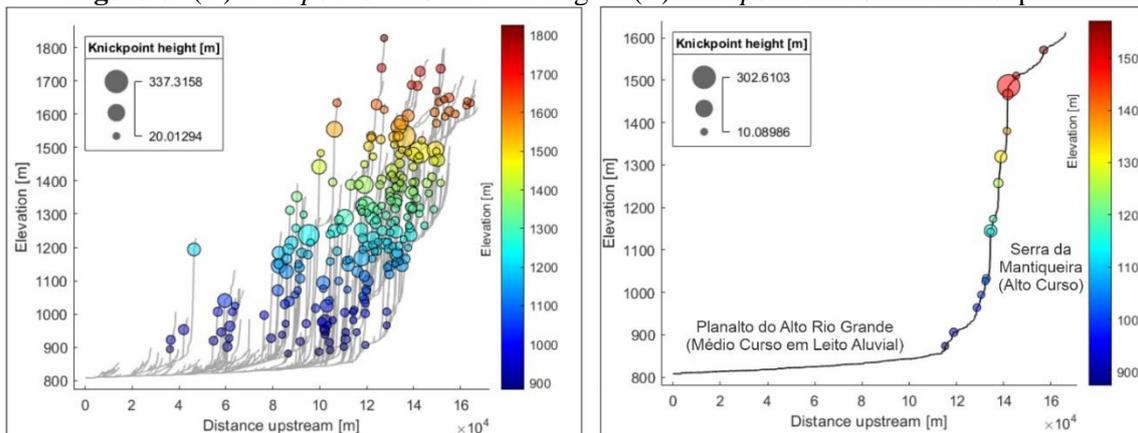
$$k_{sn} = SA^{-\theta_{ref}} \text{ (Equação 1)}$$

As seguintes etapas foram executadas: (1) eliminação dos ruídos do MDE; (2) extração da drenagem com uma área de contribuição mínima de 500 pixels; (3) remoção de canais de 1ª ordem menores que 10 km; (4) elaboração dos perfis longitudinais suavizados; (5) identificação dos *knickpoints* com alturas superiores a 10 metros; (6) mensuração da densidade dos *knickpoints*; (7) cálculo do *índice de concavidade comum* ($\theta = 0,45$); e (8) determinação dos valores de k_{sn} em segmentos de fluxo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

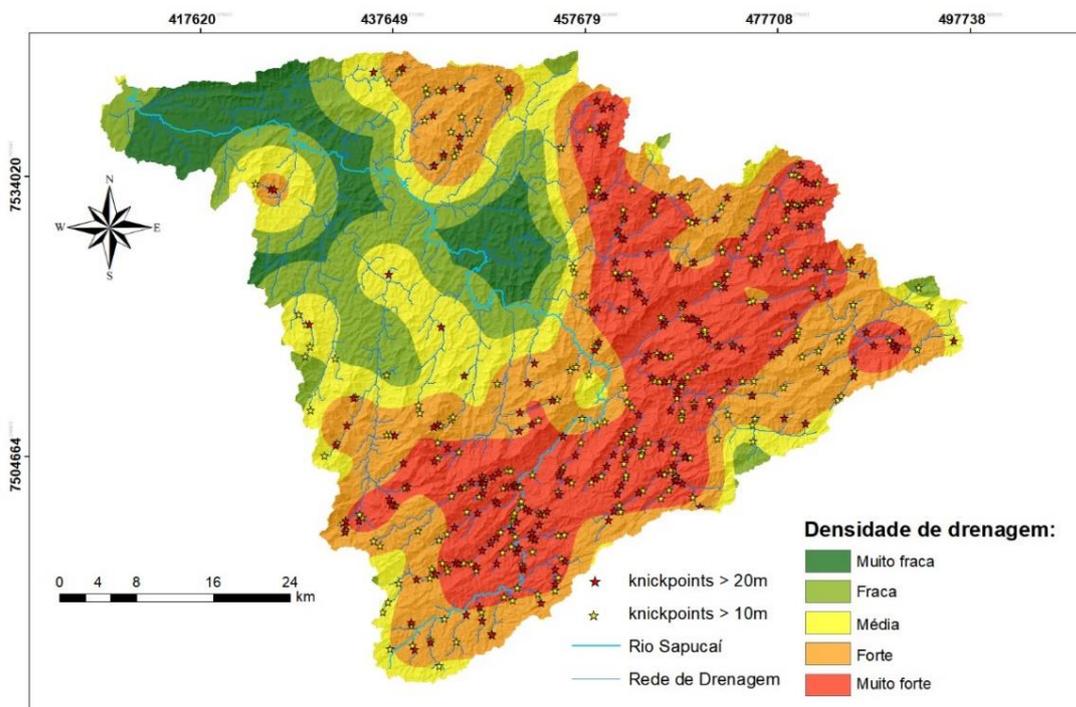
Foram identificados 509 *knickpoints* com alturas superiores a 10 metros, sendo: 280 situados entre 10 e 20 m e 229 entre 20 e 337,31 m (Figura 4A). Dentre estes, 22 estão relacionados ao canal principal: 16 com mais de 10 m de altura e 6 com mais de 20 m (Figura 4B).

Figura 3: (A) *knickpoints* > 20 m da drenagem (B) *knickpoints* > 10 m do rio Sapucaí



As maiores concentrações e magnitudes dos *knickpoints* são encontradas em elevadas altitudes na Serra da Mantiqueira Meridional (Figura 5), diminuindo progressivamente ao longo do Planalto do Alto Rio Grande (Figuras 1C e 4A). Essa tendência também é observada no canal principal, com mais *knickpoints* no alto curso fluvial e ausência deles em zonas de maior equilíbrio, associadas a planícies aluviais compostas por sedimentos clásticos (Figuras 1C e 4B).

Figura 5: Densidade dos *knickpoints* maiores que 10m do alto e médio Sapucaí.



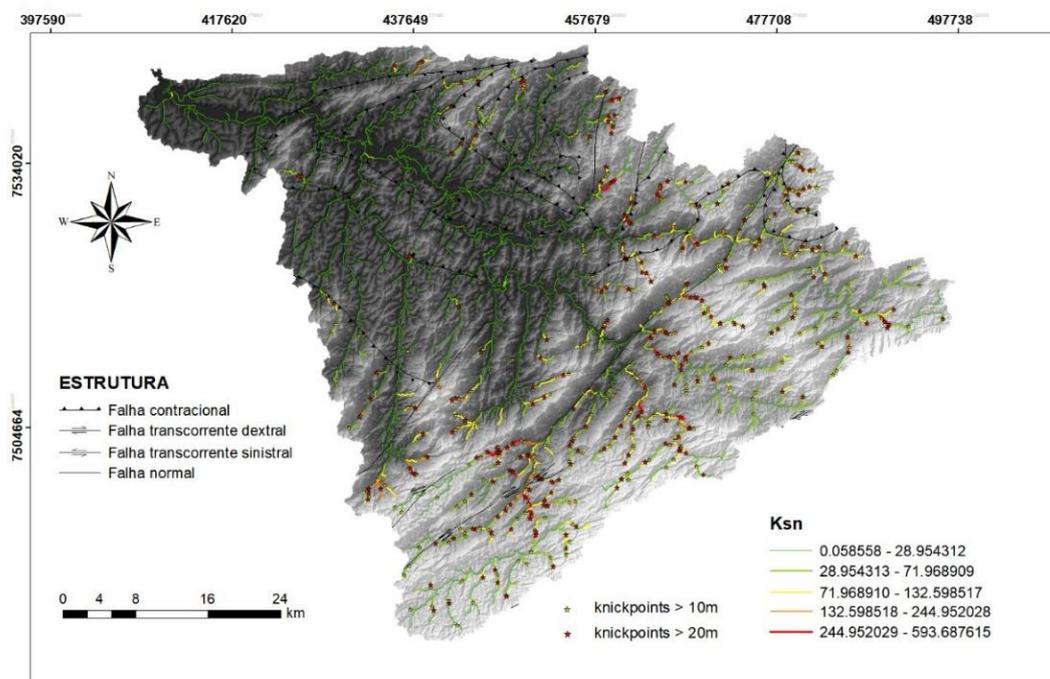
Estas relações evidenciam uma influência morfoestrutural na configuração atual da paisagem, refletindo desequilíbrios fluviais em zonas transientes controladas por falhas e variações litológicas com diferentes resistências à erosão. Destaca-se a influência das zonas de contato entre rochas mais resistentes, como os granodioritos e

granitos, em contraste com as de menor resistência oferecida por albite anatexito, migmatito estromático e variações de gnaisses no setor inferior da bacia (Figuras 2 e 5).

Observa-se que os maiores valores de k_{sn} (132,59 a 593,68 m^{0.9}) estão associados às altas concentrações e magnitudes de *knickpoints* próximos as falhas tectônicas na Serra da Mantiqueira (Figura 6). A maioria desses *knickpoints* possui gênese vinculada aos episódios orogênicos neoproterozoicos que formaram o Gondwana. As colisões desses eventos causaram soerguimentos, dobramentos, falhamentos e metamorfismo que elevaram a província Mantiqueira (Heilbron et al., 2004; Hasui, 2010).

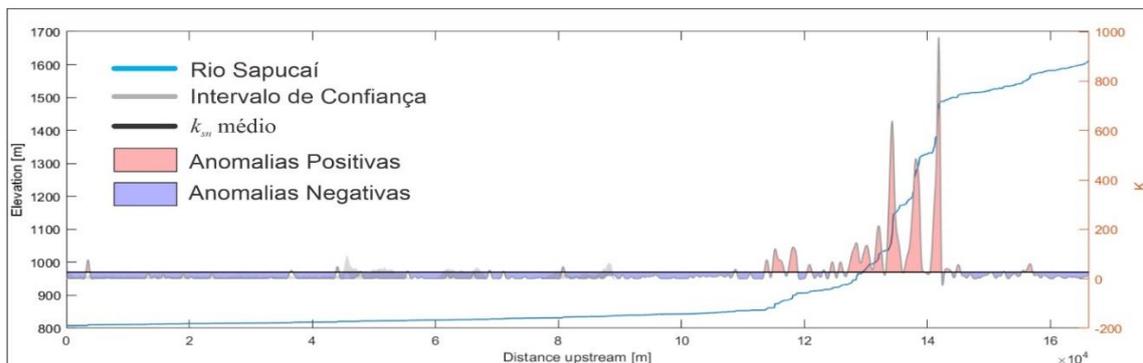
Os resultados indicam que a drenagem, em resposta aos soerguimentos, intensificou a incisão do talvegue pelo aumento da potência fluvial, tentando suavizar as anomalias mapeadas e expondo o leito rochoso à erosão. Essa dinâmica persiste até hoje, sendo observada principalmente nas variações de gnaisses a leste das falhas transcorrentes que cruzam a bacia. Valores reduzidos de k_{sn} (0,05 a 71,96 m^{0.9}) refletem áreas que já passaram por reajustes mais intensos e atualmente encontram-se em estado estacionário, propensas a acomodar sedimentos em vez de exportá-los (Figura 6).

Figura 6: k_{sn} por comprimento fluxo da drenagem da bacia do alto e médio curso rio Sapucaí



Com base no cálculo do k_{sn} médio, o gráfico das anomalias do médio e alto rio Sapucaí foi elaborado (Figura 7). Nele, as anomalias positivas e negativas são identificadas, validando o modelo de *stream power* através do intervalo de confiança de 90% em torno do k_{sn} médio, estreito a montante e a jusante da zona de transição.

Figura 7: Anomalias k_{sn} do alto e médio curso da bacia do rio Sapucaí.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise revelou uma forte influência dos controles estruturais no relevo e na drenagem da bacia do Alto e Médio rio Sapucaí. Os *knickpoints* exibem uma distribuição variada ao longo da drenagem, com as maiores concentrações e magnitudes em áreas de altitudes elevadas da Serra da Mantiqueira. Essas características refletem desequilíbrios fluviais, influenciados por zonas de cisalhamento e variações litológicas, diretamente associadas aos eventos orogênicos neoproterozoicos que formaram o supercontinente Gondwana. Os valores de k_{sn} fornecem *insights* sobre a dinâmica da incisão do talvegue e a erosão fluvial na região. Áreas com valores mais altos de k_{sn} estão ligadas a uma maior incisão, enquanto valores mais baixos indicam áreas em equilíbrio, propensas a acomodar sedimentos em vez de exportá-los.

Os resultados deste estudo têm implicações importantes para a gestão ambiental e o planejamento de recursos hídricos na região, oferecendo informações para a tomada de decisões e contribuindo para o avanço do conhecimento sobre os processos geomorfológicos em bacias hidrográficas montanhosas. A compreensão dos controles estruturais é essencial para a gestão sustentável dos recursos naturais e a mitigação de riscos associados a desastres naturais.

AGRADECIMENTOS

Externamos nossos agradecimentos à FAPEMIG e CAPES, pelo fomento financeiro para participação coletiva em eventos e pesquisa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Copernicus Global Digital Elevation Model**. 2021. Available at: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Accessed 05 fev 2024.

FORTE, A. M.; WHIPPLE, K. X. Criteria and tools for determining drainage divide stability. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 493, p. 102–117, 1 jul. 2018.

FOSTER, M. A.; KELSEY, H. M. Knickpoint and knickzone formation and propagation, South Fork Eel River, northern California. **Geosphere**, v. 8, n. 2, p. 403–416, 1 abr. 2012.

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

HEILBRON, M. et al. Província Mantiqueira. **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, 2004.

IBGE. **Base Dados Espacial 1:250.000, Brasil**. Escala 1:250.000. <https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geomorfologia/vetores/escala_250_mil/versao_2023/>. 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, 1 nov. 2012.

LIU, F.; YAO, X.; LI, L. Applicability of Geomorphic Index for the Potential Slope Instability in the Three River Region, Eastern Tibetan Plateau. **Sensors**, v. 21, n. 19, p. 6505, jan. 2021.

MONTEIRO, C. A. DE F.; ROMARIZ, D. DE A. Métodos em questão: o estudo de geossistemas. **Instituto de Geografia**, n. 16, p. 1–51, 1977.

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, 27 jun. 2023.

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, 15 jan. 2014.

SERVIDONI, L. E. et al. Methodological proposal to remote detection and management of areas that are naturally vulnerable to floods. **Earth Sciences Research Journal**, v. 27, n. 1, p. 59–68, 23 maio 2023a.

SERVIDONI, L. E. et al. Detection of vulnerable areas to the occurrence of floods in tropical regions, from morphometric attributes. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 4, 30 out. 2023b.

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 Available in: <<https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/21828?show=full>>. Access at: 22 feb. 2023