



INFLUÊNCIAS MORFOTECTÔNICAS NA CONFIGURAÇÃO DO RELEVO E DA REDE DE DRENAGEM DA BACIA DO ALTO E MÉDIO RIO SAPUCAÍ (SP/MG)

Marcelo Augusto Ribeiro Pires¹
Luisa Baptistella Zanete²
Rhian Silva Mendonça³
Sofia Soto Bonassa⁴
Isabella Oliveira Carvalho⁵
Raissa Eduarda da Silva Archanjo⁶
Ronaldo Luiz Mincato⁷
Felipe Gomes Rubira⁸

RESUMO

A integração entre morfoestruturas herdadas de eventos tectônicos pretéritos e padrões fluviais atuais é essencial para a compreensão da evolução geomorfológica em escalas de longo termo, além de subsidiar estratégias de gestão ambiental. Neste contexto, esta pesquisa analisa a influência de heranças e reativações tectônicas na configuração do relevo e da hidrografia da bacia do Alto e Médio rio Sapucaí (MG), inserida na Serra da Mantiqueira Meridional. A metodologia envolveu análises de perfis topográficos, lineamentos estruturais e índices morfométricos, como o fator de simetria topográfica transversa (FSTT), o fator de assimetria de bacia de drenagem (FADB), a densidade hidrográfica (Dh) e a densidade de drenagem (Dd). Os parâmetros foram extraídos do MDE Copernicus GLO-30 (30 m) e processados nos softwares ArcGIS 10.8, PCI Geomática 2016, RockWorks 17 e Global Mapper. Os resultados revelaram alta densidade de lineamentos com orientação preferencial NW–SE (45°–225°), associada a terrenos acidentados compostos por rochas do Ciclo Brasileiro–Pan-Africano. A assimetria da bacia (61,91%) e os desvios do canal principal sugerem reativações pós-orogênicas, corroboradas por cotovelos de drenagem e zonas de cisalhamento. A litologia exerce controle sobre a drenagem, com Dh (1,94 canais/km²) indicando baixa propensão à formação de novos canais em áreas cristalinas, enquanto a Dd (2,17 km/km²) reflete tributários de maior poder erosivo. Conclui-se que a interação entre tectonismo, litologia e dinâmica fluvial condiciona a compartimentação do relevo e a morfodinâmica da paisagem, oferecendo subsídios ao planejamento e à mitigação de riscos.

¹ Graduando do curso de Geografia (licenciatura) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), marcelo.pires@sou.unifal-mg.edu.br;

² Graduanda do curso de Geografia (licenciatura) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), luisa.zanete@sou.unifal-mg.edu.br;

³ Graduando do curso de Geografia (bacharelado) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), rhian.menconca@sou.unifal-mg.edu.br;

⁴ Graduanda do curso de Geografia (bacharelado) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), sofia.bonassa@sou.unifal-mg.edu.br;

⁵ Mestranda do Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), isabella.carvalho@sou.unifal-mg.edu.br;

⁶ Mestranda do Programa de Pós-graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), raissa.archanjo@sou.unifal-mg.edu.br;

⁷ Docente do Instituto Ciências da Natureza (ICN) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br;

⁸ Professor orientador: doutor, docente do Instituto Ciências da Natureza (ICN) da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), felipe.rubira@unifal-mg.edu.br.



INTRODUÇÃO

A organização do relevo e da rede de drenagem reflete os processos geomorfológicos que atuam sobre a paisagem, estando diretamente relacionada aos controles litoestruturais e à dinâmica tectônica (Horton, 1945; Schumm, 1956; Strahler, 1957). Com base nessa relação, estudos recentes têm empregado parâmetros morfométricos como ferramentas para analisar a configuração espacial dos sistemas fluviais e identificar condicionantes estruturais sobre sua morfologia (Nagaraju et al., 2017; Santos; Ladeira; Batezelli, 2019; Peyerl et al., 2023).

As interações entre tectonismo e drenagem tornam-se particularmente evidentes em áreas controladas por falhas e dobras, nas quais os canais frequentemente se alinham a essas estruturas geológicas. Nesses contextos, o sistema fluvial pode ajustar-se progressivamente às condicionantes tectônicas, podendo ocorrer reorganizações como capturas e inversões de fluxo (Hack, 1957). Tais alterações impactam diretamente a conectividade hidrológica, intensificam a erosão remontante e afetam os padrões de sedimentação entre os compartimentos da bacia (Schumm, 1956), além de condicionarem a direção e o encaixe dos canais, a eficiência no transporte de sedimentos e o grau de dissecação do relevo (Santos; Ladeira; Batezelli, 2019).

Nesse sentido, questiona-se de que forma as estruturas tectônicas herdadas e suas possíveis reativações influenciam a assimetria da bacia e a organização da rede de drenagem no Alto e Médio curso do rio Sapucaí. Também se investiga o papel da diversidade litoestratigráfica na definição dos padrões de drenagem e na distribuição da energia erosiva ao longo da paisagem.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo analisar as influências morfotectônicas na configuração do relevo e da rede de drenagem da bacia do Alto e Médio rio Sapucaí (SP/MG), com ênfase na atuação de estruturas herdadas de eventos orogenéticos pretéritos e em possíveis reativações tectônicas. Para tanto, foram analisados perfis topográficos, lineamentos estruturais e aplicados parâmetros morfométricos a fim de identificar os principais controles geológicos sobre a morfodinâmica fluvial regional.

A relevância da pesquisa reside na geração de um conjunto de dados que contribuem para o entendimento da organização geomorfológica da Serra da Mantiqueira Meridional e de seus condicionantes estruturais. Os resultados oferecem subsídios tanto



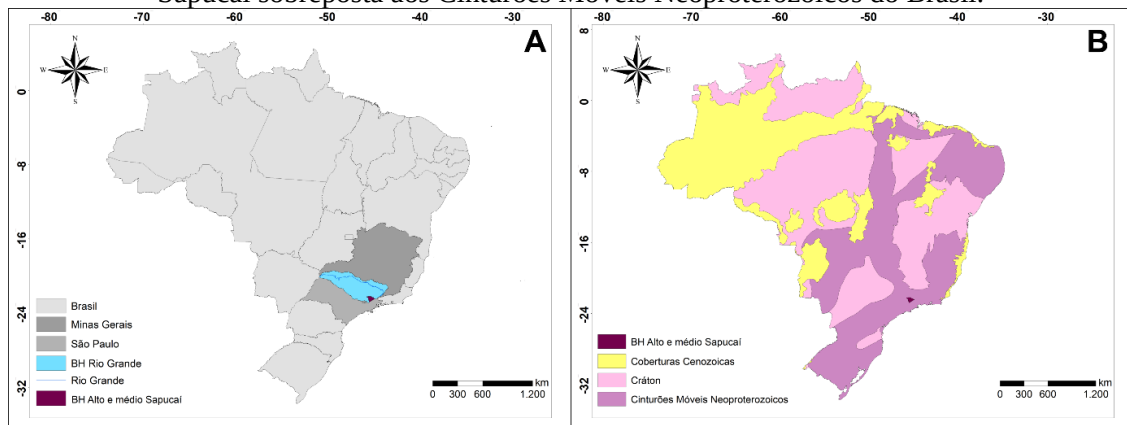
para o avanço das investigações científicas em Geomorfologia Estrutural quanto para o planejamento territorial e a mitigação de riscos associados à dinâmica morfotectônicas.

METODOLOGIA

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

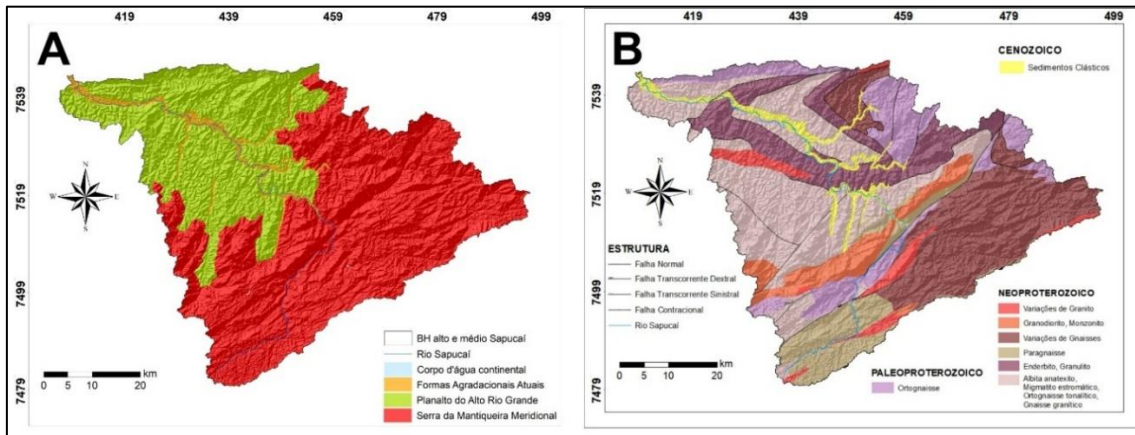
A bacia do Alto e Médio rio Sapucaí está situada na divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, compondo uma sub-bacia do rio Grande (Figura 1A). Seu curso principal nasce em Campos do Jordão (SP) e atravessa municípios como Santo Antônio do Pinhal, São Bento do Sapucaí e Santa Rita do Sapucaí. A partir da confluência com o rio Sapucaí-Mirim, em Pouso Alegre (MG), inicia-se o baixo curso, marcado pelo aumento da vazão com a contribuição desse afluente. A área insere-se em um contexto litológico diversificado, com unidades que vão do Paleoproterozoico ao Cenozoico, associadas aos Cinturões Móveis Neoproterozoicos e à evolução tectono-estrutural do Ciclo Brasileiro (Hasui, 2010) (Figura 1B).

Figura 1: (A) Localização da área de estudo; (B) Bacia hidrográfica do Alto e Médio rio Sapucaí sobreposta aos Cinturões Móveis Neoproterozoicos do Brasil.



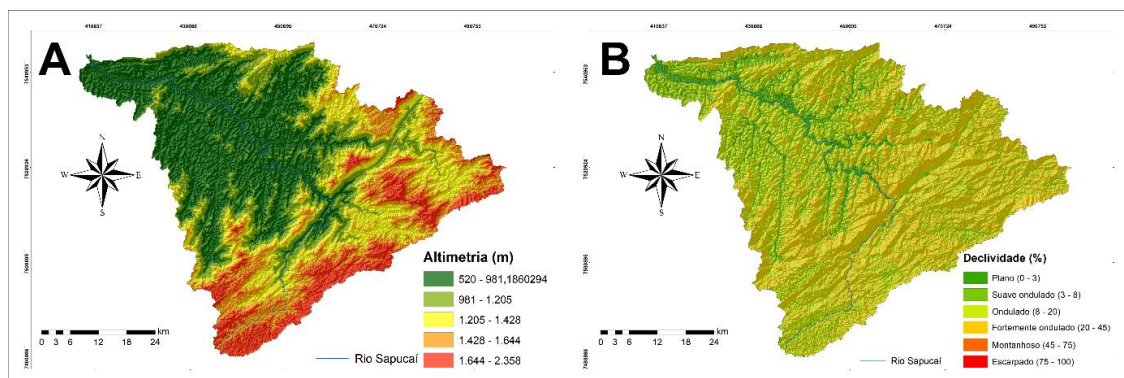
A compartimentação geomorfológica é marcada por feições da Serra da Mantiqueira Meridional e do Planalto do Alto rio Grande (Figura 2A). O embasamento é composto por rochas ígneas e metamórficas neoproterozoicas, como gnaisses, granitos e granulitos, recobertas localmente por depósitos clásticos cenozoicos inconsolidados, que reduzem a ação erosiva direta sobre o substrato (Silva et al., 2020) (Figura 2B).

Figura 2: (A) Compartimentos geomorfológicos (IBGE, 2023); (B) Geologia simplificada.



Destacam-se o Planalto de Campos do Jordão, as Serranias de Delfim Moreira–Carmo de Minas e a Depressão do rio Sapucaí, que configuram, respectivamente, as porções de maior e menor altitude e declividade. Esta última abriga uma extensa planície aluvial composta por sedimentos clásticos recentes, indicando setores de baixa energia fluvial e acúmulo sedimentar (Figuras 3A e 3B).

Figura 3: (A) modelo digital de elevação (MDE); (B) declividade da bacia.



MATERIAIS

A análise foi realizada por meio dos softwares ArcGIS 10.8, PCI Geomática 2016, RockWorks 16, Corel Draw 2021 e Global Mapper 23. As bases de dados incluíram: (1) MDE Copernicus GLO-30, com resolução espacial de 30 m, obtido via plataforma *OpenTopography* (ESA, 2021); (2) *Shapefile* da rede de drenagem, nas escalas 1:100.000 e 1:50.000 da base hidrográfica ottocodificada da bacia do rio Grande (ANA, 2014); (3) *Shapefile* da geologia de Minas Gerais, na escala de 1:1.000.000 (Silva et al., 2020).



MÉTODOS

Para identificar evidências de basculamento tectônico, aplicaram-se os índices de simetria topográfica transversa (FSTT) e de assimetria da bacia de drenagem (FABD), conforme Hare e Gardner (1985) e Cox (1994).

O FSTT foi calculado pela razão entre a distância do canal ao eixo médio da bacia (D_a) e a distância do eixo central até o divisor mais próximo do rio principal (D_d):

$$FSTT = \frac{D_a}{D_d}$$

O FABD foi calculado a partir da razão entre a área à direita do canal principal (A_r) e a área total da bacia (A_t):

$$FABD = 100 \cdot \frac{A_r}{A_t}$$

O geoprocessamento foi realizado no ArcGIS 10.8, utilizando oito camadas vetoriais: (i) limite da bacia; (ii) canal principal; (iii) linhas transversais; (iv) seus pontos médios; (v) eixo médio; (vi) distância ao divisor (D_d); (vii) distância entre o eixo e o canal (D_a); (viii) área à direita da bacia (A_r).

Também foram calculados os índices de densidade de drenagem (D_d) e densidade hidrográfica (D_h), a fim de caracterizar a rede fluvial e investigar possíveis condicionamentos litoestruturais. A D_d foi determinada pela razão entre o comprimento total dos canais (L_t) e a área da bacia (A), conforme Horton (1945):

$$D_d = \frac{L_t}{A}$$

A D_h foi obtida pela razão entre o número de canais (N) e a área da bacia (A), segundo Christofolletti (1969):

$$DH = \frac{N}{A}$$

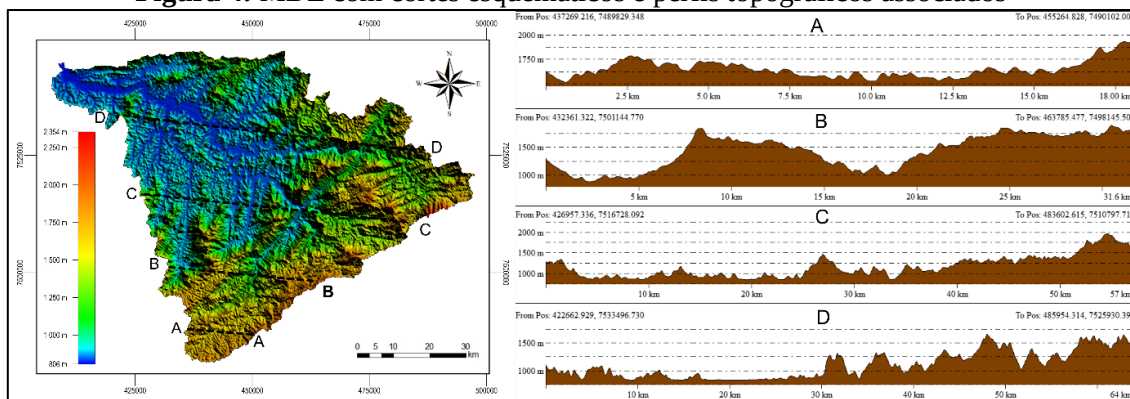
A extração dos lineamentos estruturais seguiu três etapas: (1) o MDE foi submetido a sombreamento multidirecional no ArcGIS 10.8 para realce das feições lineares; (2) os lineamentos foram extraídos automaticamente no PCI Geomática 2016; (3) os vetores resultantes foram reimportados no ArcGIS 10.8, onde foi gerado um mapa de densidade espacial com a ferramenta 'Kernel Density', classificado em cinco classes pelo método quantil. Para a análise direcional, as coordenadas das extremidades dos lineamentos foram exportadas em formato CAD e importadas no RockWorks 16, onde

foi produzido um diagrama de roseta, evidenciando as orientações estruturais predominantes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os perfis topográficos identificaram setores da bacia com maior rugosidade topográfica, os quais se associam às principais zonas de cisalhamento (Figuras 2B e 4). Observa-se que a bacia hidrográfica do Alto e Médio rio Sapucaí é caracterizada pela predominância de relevos colinosos e dissecados, com vertentes íngremes, sobretudo em seu alto curso (Figura 4).

Figura 4: MDE com cortes esquemáticos e perfis topográficos associados

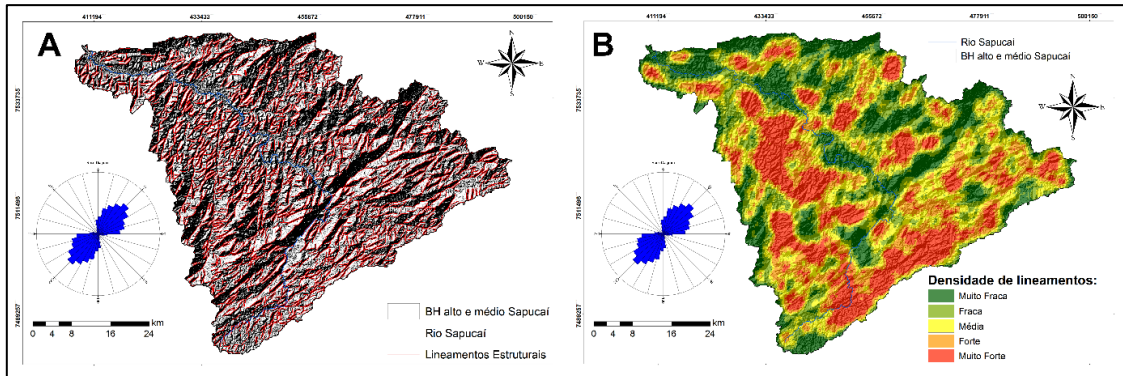


A densidade de lineamentos estruturais (Figura 5A e 5B) é mais elevada no setor montante da bacia, principalmente nas áreas adjacentes à Serra da Mantiqueira Meridional, próximas à nascente do canal principal. Em contraste, os setores jusantes exibem menor densidade de lineamentos, que acompanham o traçado do rio principal e predominam em domínios compostos por sedimentos clásticos cenozoicos.

A elevada densidade de lineamentos nos trechos superiores da bacia sugere influência de reativações tectônicas. Nos setores de baixa densidade, onde predominam declividades suaves, observa-se a ocorrência de zonas remodeladas por erosão, associadas à propagação de energia a montante. Nesses trechos, a dinâmica fluvial favorece a deposição sedimentar, atuando como zonas temporárias de acomodação, ainda que sujeitas à remobilização diante de variações hidrodinâmicas e da resposta da paisagem à energia do sistema (Figuras 5A e 5B). O diagrama de rosetas indica direção preferencial

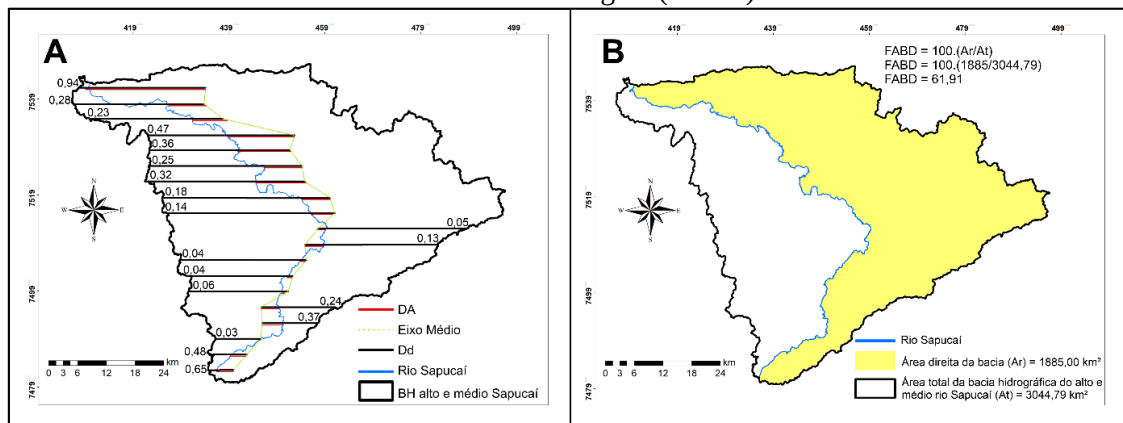
dos lineamentos na faixa SW–NE (45° a 225°), em conformidade com o trend regional, evidenciando a recorrência de valores superiores a 2.000 lineamentos.

Figura 5: (A) Lineamentos estruturais; (B) Densidade de lineamentos estruturais.



Os índices de assimetria topográfica transversa (FSTT) e de assimetria de bacia de drenagem (FABD) sugerem sinais de basculamento tectônico com inclinação preferencial para oeste. Essa assimetria pode ter favorecido uma captura fluvial no alto curso, como indica o acentuado cotovelo de drenagem (Figura 6A e 6B).

Figura 6: (A) Fator de Assimetria Topográfica Transversa (FSTT); e (B) Fator de Assimetria de Bacias de Drenagem (FABD).



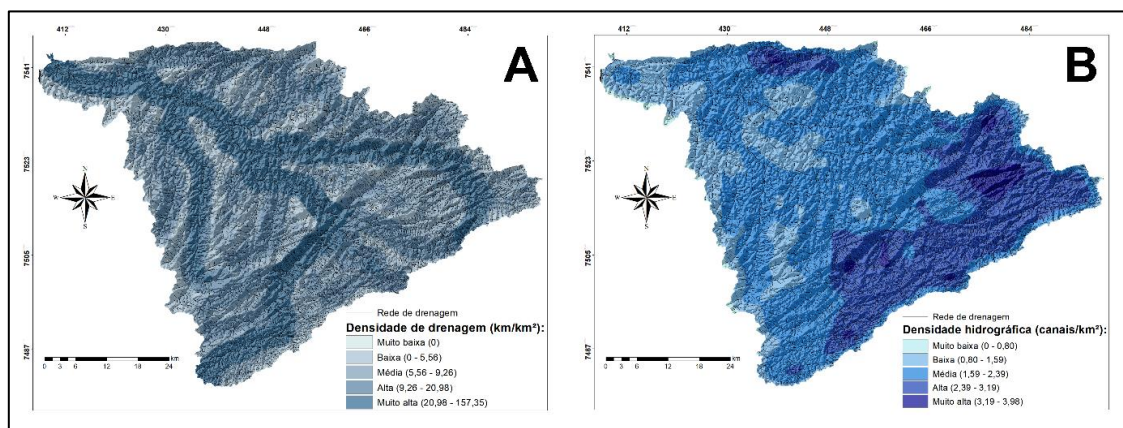
O comportamento do canal também varia ao longo do percurso. No alto curso, o rio está encaixado em leito rochoso e apresenta declividades acentuadas, restringindo o deslocamento lateral do eixo médio da bacia e revelando forte controle estrutural. Nos setores jusantes, em leitos aluviais com planícies amplas, o canal mostra-se mais móvel e sujeito a deslocamentos, devido à menor resistência imposta pelo substrato geológico (Figuras 2B, 6A e 6B).

A análise segmentada do FSTT reforça essa interpretação. Os menores valores observados no alto curso indicam uma menor assimetria em relação ao eixo médio da bacia, sugerindo a atuação de estruturas tectônicas no controle do maior grau de encaixe da drenagem. Essas variações refletem a interação entre controles estruturais e litológicos, além da resposta diferencial dos litotipos aos esforços tectônicos regionais, contribuindo para a modulação da paisagem (Yang et al., 2023).

A densidade de drenagem (Dd) apresenta valor médio de 2,17 km/km², indicando média capacidade de escoamento, sustentada por tributários volumosos em vales controlados por altos estruturais (Cruz et al., 2025). Esses setores demonstram maior eficiência na remoção de material e no transporte de sedimentos (Figura 7A).

A densidade hidrográfica (Dh), por sua vez, foi de 1,94 canais/km², sendo considerada baixa e refletindo limitada tendência à formação de novos canais (Cruz et al., 2025). As maiores concentrações de Dh ocorrem em áreas elevadas com direções estruturais preferenciais EW–N–NW–SW (Figuras 2B e 7B). Nesses setores, predominam rochas maciças de origem ígnea e metamórfica, como granitos, gnaisses e paragneisses que restringem a infiltração, intensificando o escoamento superficial e a formação de canais fluviais com padrões de baixa sinuosidade.

Figura 7: (A) Densidade de drenagem (Dd); (B) Densidade hidrográfica (Dh).



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstraram que a bacia do Alto e Médio Rio Sapucaí apresenta uma forte influência de controles tectônicos e litológicos em sua configuração geomorfológica. A alta densidade de lineamentos na Serra da Mantiqueira Meridional,



associada a rochas do ciclo Brasileiro-Pan-Africano, e evidências de reativações pós-orogênicas reforçam o papel do tectonismo na evolução do relevo. Além disso, a litologia, representada principalmente por granitos e gnaisses neoproterozoicos, condicionou os padrões de drenagem, com baixa infiltração e maior escoamento superficial, intensificando a dissecação nas áreas elevadas.

Conclui-se, portanto, que a interação entre tectonismo, litologia e processos erosivos é fundamental na modelagem da paisagem. Esses achados fornecem subsídios relevantes para a gestão sustentável dos recursos hídricos, o ordenamento territorial e a mitigação de riscos geomorfológicos em regiões com características similares, destacando a importância de estudos geomorfológicos aplicados ao planejamento ambiental.

Palavras-chave: tectonismo, dinâmica fluvial, morfometria, rede hidrográfica, litologia.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o suporte da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por meio da chamada 016/2024, que visa fornecer apoio à participação coletiva em eventos de natureza técnico-científica.

REFERÊNCIAS

ANA. **Base Hidrográfica Ottocodificada da Bacia do Rio Grande. Brasília:** ANA, 2014. Escala 1:50.000. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>. Acesso em: 05 fev. 2024.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 9, n. 18, p. 35–64, 1969.

COX, R. T. Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi embayment. **Geological Society Of America Bulletin**, Memphis, v. 106, n. 5, p. 571-581, 1994.

CRUZ, B. L et al. Reorganization of the drainage network based on morphostructural controls in passive margins. **Geomorphology**, v. 478, 109693, 2025.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Copernicus Global Digital Elevation Model. 2021.**



Available at: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Acesso em: 05 fev. 2024.

HACK, J. T. **Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland**. U.S. Geological Survey Professional Paper, n. 294-B, p. 45-97, 1957.

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.

HARE P. W; GARDNER I. W. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins. Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: MORISAWA M.; HACK J. T (org.) **Tectonic Geomorphology**. Proceedings 15th. Annual Binghamton Geomorphology Simp., 1985. Boston: Unwin, p.76-104.

HORTON, R. E. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins: Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. **Geological Society Of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275–370, 1 mar. 1945.

IBGE. **Base Dados Espacial 1:250.000, Brasil**. Escala 1:250.000. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geomorfologia/vetores/escala_250_mil/versao_2023/. Acesso em: 27 maio. 2024.

NAGARAJU, S.K. et al. Morphometric Evaluation and Sub Basin Analysis in Hanur Watershed, Kollegal Taluk, Chamarajanagar District, Karnataka, India, using Remote Sensing and GIS Techniques. **International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS,Gujarat**, v. 6, p. 2178-2191, 2017.

PEYERL, W. R. L. et al. Identification of morphostructures by utilizing Knickpoint Ranks, a method to avoid the camouflage effect in knickpoint analysis. **Geomorphology**, v. 442, p.108919, 1 dez. 2023.

SANTOS, M.; LADEIRA, F. S. B.; BATEZELLI, A. Indicadores geomórficos aplicados à investigação de deformação tectônica: uma revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 20, n. 2, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i2.1564. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1564>. Acesso em: 01 maio. 2025.

SILVA, M. A. et al. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais. CPRM, 2020**. Escala 1:1.000.000. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/21828?show=full>. Acesso em: 22 fev. 2023.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society Of America Bulletin**, [S.L.], v. 67, n. 5, p. 597, 1956.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, [S.L.], v. 38, n. 6, p. 913-920, dez. 1957.

YANG, C. Y.; HUANG, T. W.; CHANG, C. P.; HSIEH, P. S. Surface deformation of northeastern Taiwan revealed by geomorphic indices. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 34, n. 1, p. 11, 2023.