

TAXAS DE MIGRAÇÃO DE DIVISORES EM ESCARPAMENTOS DE MARGEM PASSIVA: O CASO DA REGIÃO DA ESCARPA DEVONIANA, ESTADO DO PARANÁ¹

Willian Bortolini ²
Lionel Siame ³
Claudinei Taborda da Silveira ⁴
Laëtitia Leanni ⁵
Leonardo José Cordeiro dos Santos ⁶

RESUMO

A evolução dos escarpamentos em margens passivas é conduzida geralmente pela concorrência entre os processos erosivos das bacias hidrográficas costeiras e das bacias hidrográficas continentais. Processos como estes vêm sendo estudados em escarpamentos na margem passiva nas regiões Sudeste e Sul do Brasil (ex.: Serra do Mar, Serra da Mantiqueira e Serra Geral). Nesta perspectiva de pesquisa, o presente trabalho teve por objetivo estimar as taxas de migração de divisores de drenagem na região da Escarpa Devoniana e da Serra do Paranapiacaba (situadas na região centro-leste do estado do Paraná). Foram empregadas duas principais abordagens metodológicas: i) emprego de concentrações dos nuclídeos cosmogênicos ¹⁰Be e ²⁶Al produzidos *in-situ* em sedimentos fluviais para cálculo de taxas de denudação Quaternárias; e ii) combinação do uso de métricas geomórficas e das taxas de denudação para o cálculo das taxas de migração de divisores de drenagem. As taxas de denudação obtidas pelas concentrações de ¹⁰Be variaram entre 4,6±0,4 e 19,4±1,5 m/Ma. Por sua vez, as taxas de migração de divisores de drenagem que variaram entre 0,2±0,0 e 357±72 m/Ma. Os resultados obtidos são consistentes com as demais estimativas de migração de divisores de drenagem em escarpamentos em margem passiva ao redor do mundo. Quanto as implicações na evolução do relevo regional, os resultados são consistentes com as evidências de processos de capturas fluviais e mostram que a Escarpa Devoniana e a Serra do Paranapiacaba têm recuado na direção continental. Como conclusão, esta pesquisa foi capaz de evidenciar os principais padrões de denudação na área de estudo e como eles refletem na migração de divisores de drenagem, que por sua vez controlam o recuo dos escarpamentos.

¹ Este trabalho foi vinculado ao convênio de pesquisa Franco-Brasileiro CAPES-CONFECUB (projeto 981/20). Também houve suporte por parte do programa de bolsas de pós-graduação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) e do programa de mobilidade “*Mission de Longue Durée*” do *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD).

² Departamento de Geografia, Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Guarapuava (PR), willianbortolini@gmail.com;

³ Aix-Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence 13545, França, asiame@cerege.fr;

⁴ Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), claudineits@ufpr.br;

⁵ Aix-Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence 13545, França, leanni@cerege.fr;

⁶ Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), santosufpr@gmail.com;

INTRODUÇÃO

A evolução de escarpamentos em margens passivas é conduzida pela concorrência entre os processos erosivos das bacias hidrográficas costeiras e das bacias hidrográficas continentais. Estes processos geram migração de divisores de drenagem, que por sua vez guiam o processo de evolução dos escarpamentos, como já foi observado, por exemplo, no contexto da margem passiva continental no sul do Brasil (ex.: Salgado *et al.*, 2014; Sordi *et al.*, 2018; Haag *et al.*, 2025).

Buscando avançar na base de conhecimento acerca dos processos de migração de divisores na margem passiva brasileira, este trabalho teve como objetivo calcular as taxas de migração em escarpamentos localizados na região leste do estado do Paraná, sul do Brasil (Figura 1A e 1B). Para atingir este objetivo, foram utilizadas concentrações de núclídeos ^{10}Be e ^{26}Al produzidos *in-situ* em sedimentos fluviais para a cálculo e análise das taxas de denudação (Lal, 1991; Brown *et al.*, 1995). Também foram calculadas algumas métricas geomórficas. Por fim, foi empregado a metodologia de Zhou *et al.* (2022), que combinou o uso de taxas de denudação e métricas geomórficas para o cálculo das taxas de migração de divisores de drenagem.

A área de estudo (Figura 1C) é composta por dois escarpamentos: a Escarpa Devoniana (ED), um relevo de “*cuesta*” sustentado por arenitos de idade paleozoica (Almeida, 1949); e a Serra do Paranapiacaba (SP), localizado na borda noroeste do Gráben do Alto Ribeira (Zalán; Oliveira, 2005). Estes escarpamentos marcam o limite entre três compartimentos geomorfológicos: Vale do Alto Ribeira (VAR), a Depressão do Piraí (DP) e o Reverso da Escarpa (RE). A área é marcada pela presença predominante de rochas do embasamento cristalino do pré-cambriano no VAR e na DP, e rochas sedimentares paleozoicas no RE, bem como diques e falhas de direções NW-SE e NW-SE (Mineropar, 2001).

METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, foram empregadas duas principais abordagens metodológicas: i) emprego de concentrações dos núclídeos cosmogênicos ^{10}Be e ^{26}Al

produzidos *in-situ* em sedimentos fluviais para cálculo o de taxas de denudação Quaternárias; e ii) combinação do uso de métricas geomórficas e das taxas de denudação para o cálculo das taxas de migração de divisores de drenagem.

Para o cálculo dos parâmetros de produção dos núclídeos cosmogênicos e das métricas geomórficas, foi utilizado o modelo digital de terreno Forest and Building DEM, que apresenta resolução espacial de 30 metros (Hawker *et al.*, 2022). As métricas geomórficas geradas foram a declividade e o índice χ (Perron; Royden; 2013), calculados no TopotoolBox 2 (Schwanghart; Scherler, 2014) por meio do algoritmo de Forte e Whipple (2018).

- *Cálculo das taxas de denudação Quaternárias*

Foram coletadas amostras de sedimentos fluviais de 22 bacias hidrográficas, representando os diferentes contextos geológicos e geomorfológicos da área de estudo. A partir das concentrações dos núclídeos cosmogênicos ^{10}Be e ^{26}Al ($C(x, t)$) produzidos *in-situ* obtidas, as taxas de denudação das bacias (ε) foram calculadas seguindo a Equação 1 (Lal, 1991; Dunai, 2010).

$$C(x, t) = \frac{P_n}{\lambda + \frac{\rho \cdot \varepsilon}{\Lambda_n}} \cdot e^{\frac{\rho \cdot x}{\Lambda_n}} \cdot \left(1 - e^{-\left(\lambda + \frac{\rho \cdot \varepsilon}{\Lambda_n}\right)t}\right) + \frac{P_{\mu s}}{\lambda + \frac{\rho \cdot \varepsilon}{\Lambda_{\mu s}}} \cdot e^{\frac{\rho \cdot x}{\Lambda_{\mu s}}} \cdot \left(1 - e^{-\left(\lambda + \frac{\rho \cdot \varepsilon}{\Lambda_{\mu s}}\right)t}\right) + \frac{P_{\mu f}}{\lambda + \frac{\rho \cdot \varepsilon}{\Lambda_{\mu f}}} \cdot e^{\frac{\rho \cdot x}{\Lambda_{\mu f}}} \cdot \left(1 - e^{-\left(\lambda + \frac{\rho \cdot \varepsilon}{\Lambda_{\mu f}}\right)t}\right)$$

(Equação 1)

Onde $C(x, t)$ é a concentração *in-situ* de ^{10}Be e ^{26}Al em função da profundidade x (g/cm^2), ε é a taxa de denudação ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{ano}$) e o tempo de exposição t (ano); P_n , $P_{\mu s}$ e $P_{\mu f}$ são as taxas de produção de nêutrons, múons lentos e múons rápidos, respectivamente; Λ_n , $\Lambda_{\mu s}$ e $\Lambda_{\mu f}$ são os comprimentos de atenuação de nêutrons, múons lentos e múons rápidos, respectivamente, em que $\Lambda_n = 160 \text{ g}/\text{cm}^2$, $\Lambda_{\mu s} = 1500 \text{ g}/\text{cm}^2$ e $\Lambda_{\mu f} = 4320 \text{ g}/\text{cm}^2$ (Braucher *et al.*, 2011); λ é a constante de decaimento radioativo do núclídeo cosmogênico (^{10}Be ou ^{26}Al); e ρ é a densidade do regolito.

O tratamento das amostras seguiu as etapas metodológicas de Brown *et al.* (1991) e Merchel e Herpers (1999). Tanto o tratamento das amostras quanto a mensuração das concentrações dos núclídeos cosmogênicos foram realizados Laboratoire National des Nucléides Cosmogéniques (LN2C, CEREGE, Aix-en-Provence, França), que hospeda o espectrômetro de massa por acelerador (AMS – *accelerator mass spectrometry*) ASTER (Arnold *et al.*, 2010).

Para testar a hipótese de estado estacionário das taxas de denudação obtidas (ou seja, se estas taxas foram constantes ao longo do tempo), foram analisadas: i) as razões

entre as concentrações de $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ com o auxílio do uso de *banana-plot*; ii) e as taxas de paleo-erosão calculadas a partir do algoritmo desenvolvido por Blard *et al.* (2019).

- *Cálculo das taxas de migração de divisores de drenagem*

As taxas de migração dos divisores de drenagem (Dmr) foram calculadas a partir da metodologia desenvolvida por Zhou *et al.* (2022). Foram calculados os valores de Dmr para 125 pares de cabeceiras de drenagem que se localizam em lados opostos (α e β) de um mesmo divisor de drenagem. Os pares de cabeceiras foram agrupados em 14 segmentos de divisores de drenagem, nos quais foram calculados seus respectivos valores médios de Dmr .

Para a aplicação da metodologia de Zhou *et al.* (2022) (Equação 2, 3 ou 4), foi necessário conhecer: a taxa de denudação regional ($\bar{\epsilon}$) (Equação 2) ou a taxa de denudação de um dos lados do divisor (ϵ_α ou ϵ_β) (Equação 3 e 4); a diferença entre as taxas de soerguimento entre os dois lados do divisor (ΔU), que neste trabalho foi assumida como 0 devido a baixa atividade tectônica regional; a razão entre o coeficiente de erodibilidade da litologia entre as cabeceiras dos dois lados do divisor (K_α/K_β), que neste trabalho assumida como 1, pois as cabeceiras de cada um dos pares estão localizadas sobre mesma litologia; a razão entre os valores de χ entre pontos de mesma elevação sobre as drenagens das respectivas cabeceiras nos dois lados do divisor (χ_α/χ_β); as tangentes dos ângulos de declividade das cabeceiras de drenagem dos dois lados do divisor ($\tan \alpha$ e $\tan \beta$); e o expoente de declividade n , que neste trabalho foi assumido como 1.

$$Dmr = \frac{2\bar{\epsilon} \frac{K_\alpha/K_\beta - (\chi_\alpha/\chi_\beta)^n}{K_\alpha/K_\beta + (\chi_\alpha/\chi_\beta)^n} - \Delta U}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (\text{Equação 2})$$

$$Dmr = \frac{\epsilon_\alpha \left[1 - \frac{(\chi_\alpha/\chi_\beta)^n}{(K_\alpha/K_\beta)} \right] - \Delta U}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (\text{Equação 3})$$

$$Dmr = \frac{\epsilon_\beta \left[\frac{(K_\alpha/K_\beta)}{(\chi_\alpha/\chi_\beta)^n} - 1 \right] - \Delta U}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (\text{Equação 4})$$

Como resultado, os valores positivos de Dmr significam que o lado α está em migrando em direção ao lado β , e vice-versa.

O índice χ foi calculado a partir de níveis de base elevados, com distância mínima de 1 km do divisor. Foram evitados níveis de base iguais ou inferiores a elevação de áreas planas, com exceção das áreas planas coincidentes com o divisor de drenagem. Para cada par de cabeceiras, foram testados de três a cinco níveis de base distintos, para os quais foram calculados os valores de χ_α/χ_β . A média dos valores de χ_α/χ_β foram empregados nas Equações 2, 3 ou 4 para o cálculo de Dmr , enquanto o desvio padrão foi empregado como a incerteza relativo ao cálculo de χ_α/χ_β .

As incertezas de Dmr (Err_{Dmr}) foram calculadas a partir do método de propagação de erro, considerando as incertezas das taxas de denudação (Err_ϵ) e as incertezas de χ_α/χ_β ($Err_{\chi_\alpha/\chi_\beta}$) (Equação 5).

$$Err_{Dmr} = \sqrt{\left(\frac{Err_\epsilon}{\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{Err_{\chi_\alpha/\chi_\beta}}{\chi_\alpha/\chi_\beta}\right)^2} \quad (\text{Equação 5})$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As taxas de denudação obtidas pelas concentrações de ^{10}Be variaram por compartimento geomorfológico: no Vale do Alto Ribeira, entre $7,5 \pm 0,5$ e $19,4 \pm 1,5$ m/Ma, com média ponderada de $10,6 \pm 0,3$ m/Ma e mediana de 11,5 m/Ma; na Depressão do Piraí, entre $7,5 \pm 0,5$ e $17,8 \pm 1,4$ m/Ma, com média ponderada de $9,1 \pm 0,4$ m/Ma e mediana de 9,4 m/Ma; e no Reverso da Escarpa, entre $4,6 \pm 0,4$ e $8,0 \pm 0,5$ m/Ma, com média ponderada de $6,1 \pm 0,2$ m/Ma e mediana de 6,6 m/Ma (Figura 1C).

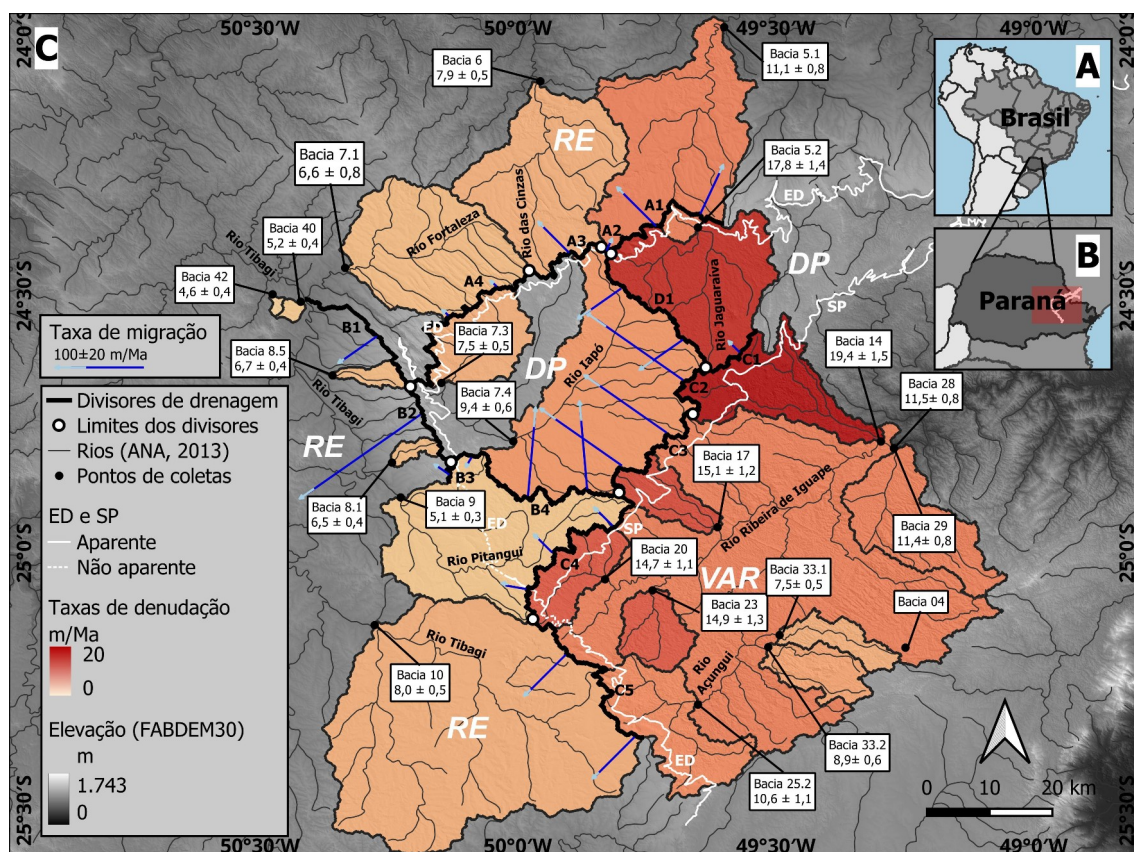


Figura 1: A: Brasil no contexto da América do Sul; B: Área de estudo no contexto do estado do Paraná; C: Mapa das taxas de denudação e direções e taxas de migrações médias. Os polígonos em tons que vão do amarelo ao vermelho representam as bacias hidrográficas amostradas e que tiveram suas taxas de denudação calculadas. As setas azuis indicam a direção da migração dos divisores de drenagem, e seu comprimento representa a intensidade da taxa de migração. A porção azul clara da seta indica a incerteza associada a cada taxa de migração. RE: Reverso da Escarpa. DP: Depressão do Pirai (DP). VAR: Vale do Alto Ribeira (VAR). A Escarpa Devoniana (ED) e a Serra do Paranapiacaba (SP) foram delimitadas, respectivamente, de acordo com Silveira *et al.* (2025) e Sordi, Morais e Biffi (2022).

As taxas de migração de divisores de drenagem, calculadas partir das taxas de denudação, variaram entre $0,2 \pm 0,0$ e 357 ± 72 m/Ma. A Figura 1C mostra as direções e intensidades médias das taxas de migração dos 14 principais divisores da região. Os resultados obtidos vão ao encontro com as demais estimativas de migração de divisores de drenagem em escarpamentos em margem passiva ao redor do mundo, que estão entre 1 e 2.000 m/Ma (He *et al.*, 2024).

A análise das razões entre as concentrações de $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ (Figura 2A), bem como o cálculo das taxas de paleo-erosão (Figura 2B) indicaram que a grande maioria das taxas de denudação obtidas não se apresentam em estado estacionário, ou seja, não foram constantes ao longo do tempo. Isso se deve ao fato do material das amostras terem passado por ao menos um período de soterramento entre o momento da exposição e o

momento da coleta. Devido a isso, as taxas de denudação derivadas das concentrações de ^{10}Be devem ser interpretadas como as taxas máximas de denudação, assim como as taxas de migração de divisores devem ser interpretadas como as taxas máximas de migração de divisores.

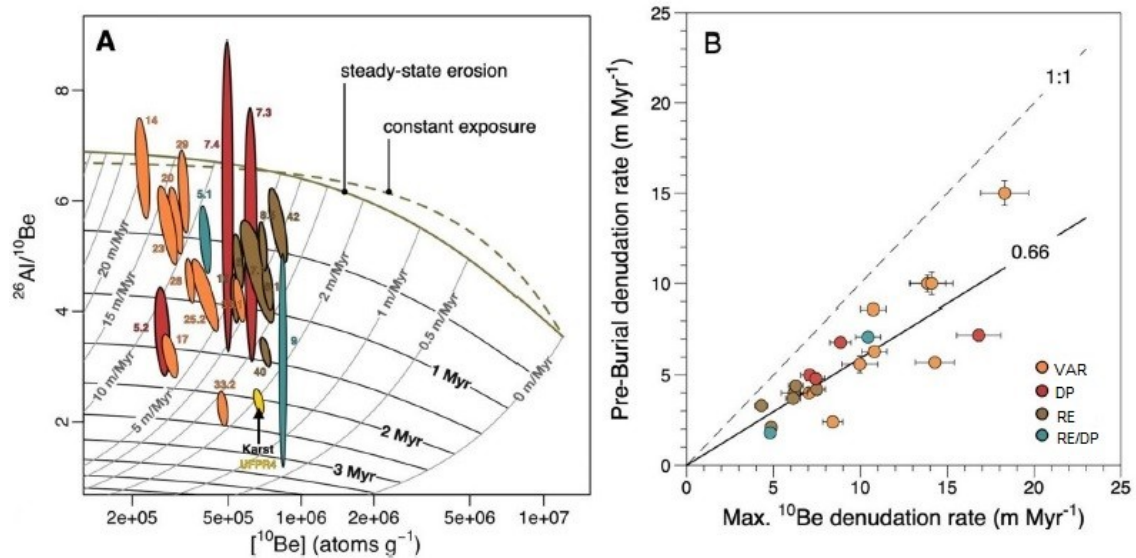


Figura 2: A: *Banana-plot*. Conforme Gosse e Phillips (2001) e Granger (2006), se a amostra está localizada sobre a linha do *constant exposure* sugere que ela esteve continuamente exposta, sem soterramento ou erosão significativa; se a amostra está localizada entre as linhas de *steady-state erosion* e *constant exposure* sugere exposição e erosão contínuas e estáveis; e se a amostra está abaixo da linha de *steady-state erosion* sugere que a amostra foi soterrada por um período significativo, reduzindo assim a razão entre as concentrações de ^{26}Al e ^{10}Be . B: relação entre as taxas de denudação máximas e as taxas de paleo-erosão (*pre-burial denudation*).

Quanto as implicações na evolução do relevo regional, os resultados são consistentes com as evidências de processos de capturas fluviais levantadas em trabalhos pretéritos (ex.: Sordi, Morais e Biffi, 2022). Além disso, eles mostram que a Escarpa Devoniana e a Serra do Paranapiacaba têm recuado na direção continental devido a maior intensidade dos processos erosivos do Vale do Alto Ribeira. Por outro lado, o divisor A4, localizado na Escarpa Devoniana, está em estado de equilíbrio, sendo isso um indício de que esta porção do escarpamento está passando por uma fase de “desmonte erosivo” e não de recuo erosivo. Por fim, fatores como diferença de níveis de base, litologia com diferentes erodibilidades e estruturas geológicas (ex.: diques de diabásio de direção NW-SE e falhas de direção NE-SW) foram identificados como os principais controladores dos processos denudacionais na região.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados e discussões desta pesquisa evidenciaram os principais padrões de denudação na área de estudo e como eles refletem na migração de divisores de drenagem, que por sua vez controlam o recuo dos escarpamentos. Como esperado, os escarpamentos têm recuado, devido principalmente a ação de diferentes níveis de base, litologias e presença de estruturas geológicas.

Além disso, esta pesquisa contribuiu com discussão acerca da análise e interpretação de taxas de denudação calculadas a partir das concentrações de ^{10}Be no Brasil. Em ambientes como o leste paranaense, onde os sedimentos erodidos e transportados pelos sistemas fluviais frequentemente passam por significativos soterramento, estas taxas devem ser interpretadas como taxas máximas de denudação, e não como as taxas médias de denudação.

Palavras-chave: Evolução do relevo em longo-termo; Nuclídeos cosmogênicos, Taxas de denudação; Divisores de drenagem.

AGRADECIMENTOS

Ao convênio Franco-Brasileiro de pesquisa CAPES-CONFECUB (projeto 981/20), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), ao *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná (PPGGEO-UFPR).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. Relevo de "cuestas" na bacia sedimentar do rio Paraná. **Boletim Paulista de Geografia**. n.3, 1949. p. 21-33.
- ARNOLD, M.; MERCHEL, S.; BOURLÈS, D. L.; BRAUCHER, R.; BENEDETTI, L.; FINKEL, R. C.; AUMÂITRE, G.; GOTTDANG, A.; KLEIN, M. The French accelerator mass spectrometry facility ASTER: improved performance and developments. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B**:

Beam Interactions with Materials and Atoms, v. 268, n. 11-12, p. 1954-1959, 2010. DOI: [10.1016/j.nimb.2010.02.107](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.107)

BLARD, P. H.; LUPKER, M.; ROUSSEAU, M.; TESSON, J. Two MATLAB programs for computing paleo-elevations and burial ages from paired-cosmogenic nuclides. **MethodsX**, v. 6, p. 1547-1556, 2019. DOI: [10.1016/j.mex.2019.05.017](https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.05.017)

BRAUCHER, R.; MERCHEL, S.; BORGOMANO, J.; BOURLÈS, D. L. Production of cosmogenic radionuclides at great depth: A multi element approach. **Earth and Planetary Science Letters**. v. 309, n. 1-2, p. 1-9, 2011. DOI: [10.1016/j.epsl.2011.06.036](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.06.036)

BROWN, E. T.; EDMOND, J. M.; RAISBECK, G. M.; YIOU, F.; KURZ, M. D.; BROOK, E. J. Examination of surface exposure ages of Antarctic moraines using in situ produced ^{10}Be and ^{26}Al . **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 55, n. 8, p. 2269-2283, 1991. DOI: [10.1016/0016-7037\(91\)90103-C](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90103-C)

BROWN, E. T.; STALLARD, R. F.; LARSEN, M. C.; RAISBECK, G. M.; YIOU, F. Denudation rates determined from the accumulation of in situ-produced ^{10}Be in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. **Earth and Planetary Science Letters**. v. 129, p. 193-202, 1995. DOI: [10.1016/0012-821X\(94\)00249-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)00249-X)

DUNAI, T. J. **Cosmogenic nuclides: principles, concepts and applications in the earth surface sciences**. Cambridge University Press, 2010.

FORTE, A. M.; WHIPPLE, K. X. Criteria and tools for determining drainage divide stability. **Earth and Planetary Science Letters**. v. 493, p. 102-117, 2018. DOI: [10.1016/j.epsl.2018.04.026](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.026)

GOSSE, J. C.; PHILLIPS, F. M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. **Quaternary Science Reviews**. v. 20, p. 1475-1560, 2001. DOI: [10.1016/S0277-3791\(00\)00171-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(00)00171-2)

GRANGER, D. E. **A review of burial dating methods using ^{26}Al and ^{10}Be** . 2006. DOI: [10.1130/2006.2415\(01\)](https://doi.org/10.1130/2006.2415(01))

HAAG, M. B.; SCHOENBOHM, L. M.; JESS, S.; BIERMAN, P.; WOLPERT, J.; CORBERT, L.; SOMMER, C. A. Erosional dynamics and escarpment retreat at the southern end of the South American passive margin escarpment. **Geomorphology**, p. 109885, 2025. DOI: [10.1016/j.geomorph.2025.109885](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109885)

HAWKER, L.; UHE, P.; PAULO, L.; SOSA, J.; SAVAGE, J.; SAMPSON, C.; NEAL, J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 2, p. 024016, 2022. DOI: [10.1088/1748-9326/ac4d4f](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f)

HE, C.; BRAUN, J.; TANG, H.; YUAN, X.; ACEVEDO-TREJOS, E.; OTT, R. F.; STUCKY DE QUAY, G. Drainage divide migration and implications for climate and biodiversity. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 5, n. 3, p. 177-192, 2024. DOI: [10.1038/s43017-023-00511-z](https://doi.org/10.1038/s43017-023-00511-z)

LAL, D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. **Earth and Planetary Science Letters**. v. 104, p. 424-439, 1991. DOI: [10.1016/0012-821X\(91\)90220-C](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90220-C)

MERCHEL, S.; HERPERS, U. An update on radiochemical separation techniques for the determination of long-lived radionuclides via accelerator mass spectrometry. **Radiochimica acta**, v. 84, n. 4, p. 215-220, 1999. DOI: [10.1524/ract.1999.84.4.215](https://doi.org/10.1524/ract.1999.84.4.215)

MINEROPAR – Minerais do Paraná S/A. **Atlas geológico do estado do Paraná**. 116 p. Curitiba, 2001.

PERRON, J.; ROYDEN, L. An integral approach to bedrock river profile analysis. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 38, p. 570-576, 2013. DOI: doi.org/10.1002/esp.3302

SALGADO, A. A. R.; MARENT, B. R.; CHEREM, L. F. S.; BOURLÈS, D.; SANTOS, L. J. C.; BRAUCHER, R.; BARRETO, H. N. Denudation and retreat of the Serra do Mar escarpment in the southern Brazil derived from in situ-produced ¹⁰Be concentration in river sediment. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 39, p. 311-319, 2014. DOI: [10.1002/esp.3448](https://doi.org/10.1002/esp.3448)

SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. 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. DOI: [10.5194/esurf-2-1-2014](https://doi.org/10.5194/esurf-2-1-2014)

SILVEIRA, C. T.; SILVEIRA, R. M. P; BORTOLINI, W.; ALMEIDA, V. P. Geomorphological mapping of the state of Paraná with digital classification method of landform patterns. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 26, n. 1, 2025. DOI: [10.20502/rbg.v26i1.2561](https://doi.org/10.20502/rbg.v26i1.2561)

SORDI, M. V.; MORAIS, E. S.; BIFFI, V. H. R.. Drainage evolution in the Pirai depression (southern Brazil): Evidence for headward erosion in large south american river systems. **Journal of South American Earth Sciences**, p. 104022, 2022. DOI: [10.1016/j.jsames.2022.104022](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104022)

SORDI, M. V.; SALGADO, A. A. R.; SIAME, L.; BOURLÈS, D.; PAISANI, J. C.; LÉANNI, L.; BRAUCHER, R.; COUTO, E. V.; AUMAÎTRE, G.; KEDDADOUCHE, K. Implications of drainage rearrangement for passive margin escarpment evolution in southern Brazil. **Geomorphology**. v. 306, p. 155-169, 2018. DOI: [10.1016/j.geomorph.2018.01.007](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.007)

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *Boletim de Geociencias da PETROBRAS*, v. 13, n. 2, p. 269-300, 2005.

ZHOU, C.; TAN, X.; LIU, Y.; LU, R.; MURPHY, M. A.; HE, H.; HAN, Z.; XU, X. (2022). Ongoing westward migration of drainage divides in eastern Tibet, quantified from topographic analysis. **Geomorphology**, v. 402, p. 108-123, 2022. DOI: [10.1016/j.geomorph.2022.108123](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108123)