

Modelagem da suscetibilidade morfodinâmica na bacia hidrográfica do rio São Lourenço (Mato Grosso)

Silva, A.N. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS) ; Silveira, R.M.P. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS)

RESUMO

Este estudo apresenta o mapeamento da suscetibilidade a processos morfodinâmicos na bacia hidrográfica do rio São Lourenço (Mato Grosso) desenvolvido a partir da modelagem digital do relevo. Foram setorizadas e quantificadas as áreas com predomínio de erosão (áreas degradacionais) e deposição (áreas agradacionais). O desenvolvimento da pesquisa contemplou três etapas principais: i) cálculo da erosividade climática; ii) cálculo dos atributos geomorfométricos (declividade, índice de posição topográfica, amplitude altimétrica e índice topográfico de umidade) a partir do Modelo Digital de Elevação (Copernicus); iii) modelagem da suscetibilidade morfodinâmica a partir da normalização das variáveis calculadas. Os resultados evidenciaram o maior potencial erosivo a noroeste da bacia, associado sobretudo à transição para o Planalto e Chapada dos Guimarães. Os municípios que tiveram as maiores médias de suscetibilidade foram Tesouro, Primavera do Leste, Poxoréu e Guiratinga.

PALAVRAS CHAVES

Geomorfometria; Modelo Digital de Elevação; Erosão; Mapeamento geomorfológico; Sedimentos

ABSTRACT

This study presents the mapping of susceptibility to morphodynamic processes in the São Lourenço river basin (Mato Grosso) developed from digital terrain modeling. Areas with a predominance of erosion (degradational) and deposition (agradational) were sectorized and quantified. The development of the research included three main stages: i) calculation of climate erosivity; ii) calculation of geomorphometric attributes (slope, topographic position index, altimetric amplitude and topographic wetness index) from the Digital Elevation Model (Copernicus); iii) modeling of the morphodynamic susceptibility from the normalization of the calculated variables. The results showed the greatest erosion potential in the northwest of the basin, mainly associated with the transition to the Planalto and Chapada dos Guimarães. The municipalities that had the highest means of susceptibility were Tesouro, Primavera do Leste, Poxoréu and Guiratinga.

INTRODUÇÃO

Dentre os fatores que condicionam a dinâmica do relevo, há um complexo de interações nas quais se destacam a dinâmica climática e hidrológica, as características geomorfológicas (em interação com a geologia e pedologia) e as variações de uso e cobertura da terra atreladas às atividades antrópicas nas bacias hidrográficas. Há uma estreita interface entre a produção de sedimentos e os eventos pluviométricos intensos que deflagram processos erosivos. A morfodinâmica, definida como o conjunto de processos atuantes no relevo, configura um elo central na interface entre a geomorfologia e o ordenamento territorial em Mato Grosso. Os processos erosivos (laminares e lineares), cuja origem se vincula diretamente à relação entre as características litológicas sob influência do desmatamento e da ineficiência culposa do planejamento ambiental, por exemplo, constituem os desastres mais recorrentes do estado (SILVEIRA, 2023). Na bacia hidrográfica do rio São Lourenço, referente aos processos morfodinâmicos, destacam-se estudos prévios que avaliaram o uso e cobertura da terra (MINGOTI et al. 2009; SOUZA, 2014; CORREIA, 2021) e a modelagem de vazão e transporte de sedimentos (BALDERRAMA, 2019), além dos estudos e produtos temáticos regionais vinculados ao Zoneamento Socioeconômico Ecológico do Estado de Mato Grosso (ZSEE/MT), que subsidiam as discussões e problemáticas inerentes aos processos erosivos no contexto local. O resultado destes processos atuantes no relevo pode ser na forma de movimentos de massa, provocada pela força da gravidade, umidade disponível e declividade da vertente

(CHRISTOPHERSON e BIRKELAND, 2017), por inundações sobre as planícies fluviais e planícies fluviolacustres devido à concentração da água da chuva (IBGE, 2009) ou pelo processo erosivo potencializado por agentes intempéricos que aumentam a energia cinética que entra em contato com a superfície exposta e desencadeiam os processos de erosão (CASSETI, 2005). O uso e ocupação da terra é um outro fator que influi nos processos morfodinâmicos. Considerando que os mapas geomorfológicos devem representar a morfometria, morfografia, morfogênese, morfodinâmica e morfocronologia no relevo (COLTRINARI, 2011; SILVEIRA e SILVEIRA, 2021), esta pesquisa enfatizou a mensuração da suscetibilidade morfodinâmica. Recentemente, com o desenvolvimento da modelagem digital do relevo, muitas técnicas geomorfométricas em ambiente informatizado têm favorecido a extração de parâmetros (atributos geomorfométricos) e objetos (feições ou processos) geomorfológicos (HENGL e REUTER, 2009; SILVEIRA e SILVEIRA, 2020). O objetivo geral do presente trabalho foi mapear a suscetibilidade a processos morfodinâmicos na bacia hidrográfica do rio São Lourenço/MT a partir da modelagem digital do relevo. Os objetivos específicos se ativeram ao cálculo de variáveis climáticas e geomorfológicas e à identificação de áreas com predomínio de erosão (áreas degradacionais) e deposição (áreas agradacionais). Ao individualizar os fatores geomorfológicos que influem no desencadeamento de grandes processos erosivos, os atributos geomorfométricos visam emular a relação entre a morfologia e os condicionantes afins. Considerando os aspectos essenciais aos eventos hidrogeomorfológicos atribuídos por Takahashi (1981), como a combinação crítica entre sedimentos, água e declividade, a modelagem digital do relevo oferece subsídios quantitativos para representar a interação de tais elementos na topografia. A bacia hidrográfica do rio São Lourenço possui área de 25609 km², tem amplitude altimétrica de 750 metros, situa-se no sudeste de Mato Grosso e contempla 14 municípios (Figura 1). Está inserida no contexto morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná e tem como divisores o Planalto dos Guimarães. O rio principal é tributário da margem esquerda da Bacia hidrográfica do Paraguai e é um dos principais contribuidores para a formação das planícies alagadas do Pantanal.

MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento da pesquisa contemplou três etapas principais: i) cálculo da erosividade climática; ii) cálculo dos atributos geomorfométricos a partir do Modelo Digital de Elevação; iii) modelagem da suscetibilidade morfodinâmica a partir da normalização das variáveis calculadas. O processamento e análise dos dados geográficos envolveu os softwares QGIS 3.22 e ArcGIS 10.8. O índice de erosividade climática (CORINE, 1992) tem por finalidade determinar o potencial erosivo a partir da distribuição pluviométrica mensal e da temperatura relativa ao longo do ano. No sentido de desenvolver esse índice para a bacia hidrográfica do rio São Lourenço/MT, foi necessário coletar dados de precipitação pluviométrica e temperatura no banco de dados climáticos do WorldClim (FRICK et al., 2015) e aplicar as fórmulas de Fournier-Arnoldus e Bagnouls-Gausson que, combinadas, resultam no índice de erosividade climática. O índice de Fournier-Arnoldus calcula a agressividade climática, no qual a fórmula se fundamenta no somatório dos meses de (janeiro e dezembro) (Σ), precipitação total do mês em milímetros (P_i) e na média anual da precipitação total em milímetros (P). O índice ombrotérmico de Bagnouls-Gausson (equação 2) calcula o balanço de umidade mensal que mensura a aridez climática. Neste caso, a fórmula inclui a temperatura média do mês em °C (T_i), precipitação total do mês em milímetros (P_i) e a proporção (K_i) do mês em que $\Sigma (2T_i - P_i) > 0$. Os procedimentos vinculados à geomorfometria foram desenvolvidos tendo como base o Modelo digital de elevação (MDE) Copernicus, da Agência Espacial Europeia, disponibilizado em 2020, com resolução espacial de 30 metros e processado a partir dos dados de alta resolução da missão TanDEM-X. A partir do MDE foram computados quatro atributos geomorfométricos: i) amplitude altimétrica; ii) declividade; iii) índice topográfico de umidade; iv) índice de posição topográfica. A amplitude altimétrica foi calculada a partir de um raio de análise de vizinhança de 1 km. A declividade, que mensura a inclinação da superfície, e o relevo sombreado, que representa a iluminação hipotética de uma superfície, foram calculados a partir das variáveis direcionais de Horn (1981). O índice topográfico de umidade (ITU), de acordo com os autores Beven e Kirkby (1979) e Quinn et al (1991), é composto pela área de contribuição dividida pela tangente da declividade para indicar a tendência de acumulação da água no relevo. O índice de posição topográfica (IPT) teve como fundamento a proposta de Wilson e Gallant (2000), mensurando a diferença entre o valor

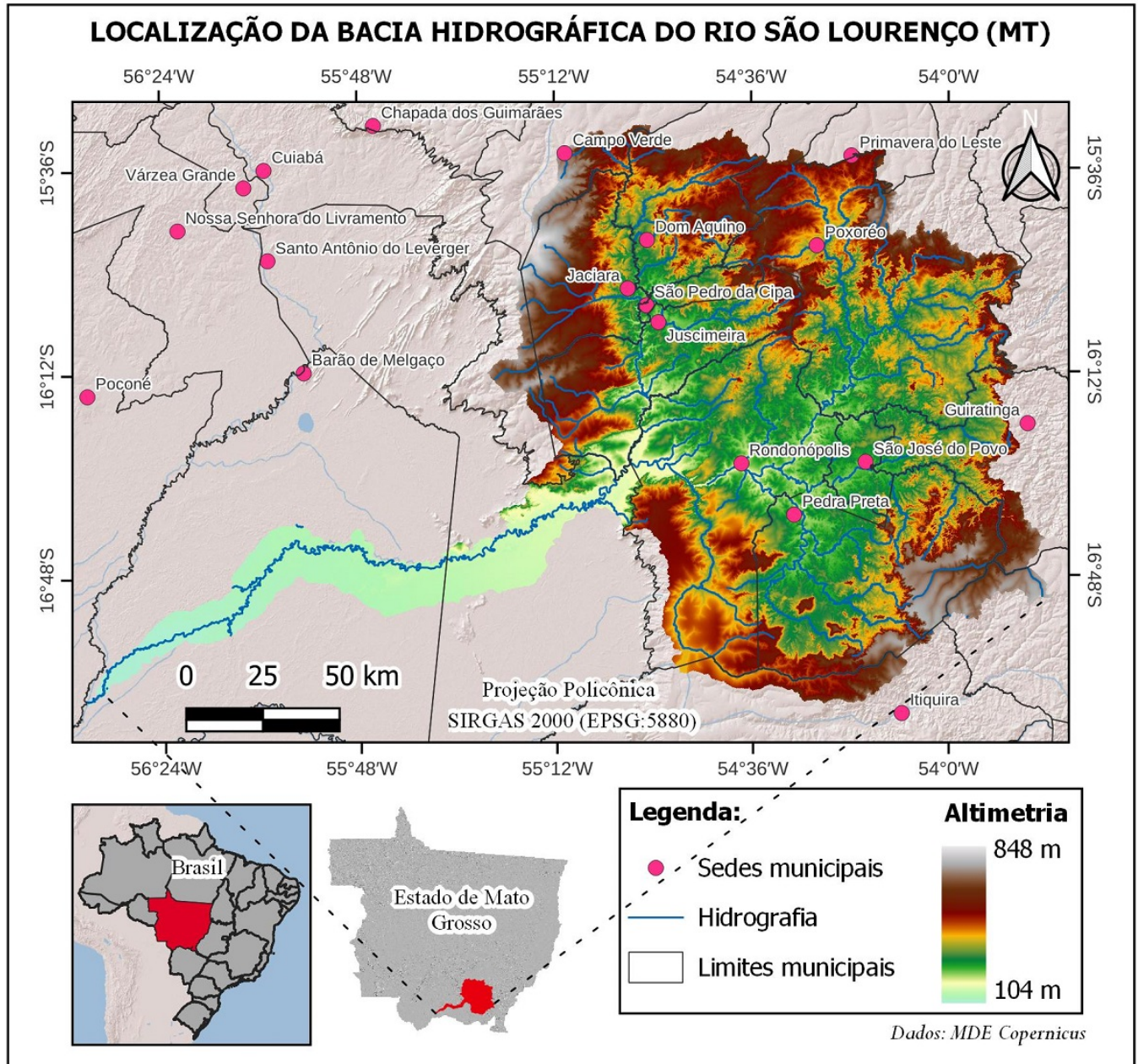
altimétrico de cada pixel e a média altimétrica do seu entorno. Os valores positivos do IPT representam porções que estão mais elevadas que a vizinhança e os valores negativos indicam as áreas mais rebaixadas. No presente trabalho, o IPT foi calculado com raio de 10 km e foi utilizado para setorizar as áreas com predomínio de processos agradacionais (IPT < 0) e degradacionais (IPT > 0), simbolizadas nos produtos cartográficos em tons de azul e laranja, respectivamente. A última etapa foi a modelagem da suscetibilidade morfodinâmica a partir da padronização ((Atributo - Mín) / (Máx - Mín)) dos atributos geomorfométricos e do índice de erosividade climática em uma faixa de variação fixa de 0 (valor mínimo, indicando menor suscetibilidade) a 1 (valor máximo, indicando maior suscetibilidade), computada pela calculadora raster do QGIS 3.22. Na combinação das variáveis padronizadas, o peso maior neste procedimento foi para a declividade e a amplitude altimétrica, já que ambos atributos têm maior influência na deflagração dos processos atuantes. A fórmula utilizada para a computação do produto final foi a seguinte: $((\text{Declividade.P} \times 3) + (\text{Amplitude.P} \times 2) + \text{ITU} + \text{Erosividade climática}) / 7$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da modelagem da suscetibilidade a processos morfodinâmicos, conforme apresentado pelo mapeamento da Figura 2, viabilizaram a setorização e a quantificação dos níveis de exposição do relevo aos condicionantes erosivos e deposicionais. No âmbito político-administrativo, os municípios que tiveram as maiores médias de suscetibilidade (com variação de 0 a 1) foram Tesouro (0,26), Primavera do Leste (0,25), Poxoréu (0,24) e Guiratinga (0,23). Rondonópolis, que concentra a maior população da bacia hidrográfica, teve suscetibilidade média de 0,19. Para toda a bacia do rio São Lourenço, a média da suscetibilidade morfodinâmica foi de 0,21, tanto para as áreas com predomínio de agradação quanto para as áreas de degradação. As porções elevadas e os divisores da bacia hidrográfica a noroeste, que coincidem com a alta erosividade climática, tiveram os maiores valores de suscetibilidade morfodinâmica. O rebordo erosivo do Planalto e Chapada dos Guimarães contém escarpas que incrementam os processos degradacionais e, como consequência, do aporte sedimentar nas adjacências rebaixadas já no contexto do Planalto dos Alcantilados. No reverso das escarpas ou nos topos planos das mesetas, onde a declividade e a amplitude altimétrica são menores, o potencial degradacional reduzido foi corretamente modelado. A Serra da Petrovina, na porção sudeste da bacia, exemplifica esse resultado obtido. A combinação das variáveis padronizadas resultou numa matriz quantitativa, pixel a pixel, enquanto a classificação do índice de posição topográfica objetivou representar duas classes abrangentes que indicam o predomínio de processos agradacionais e degradacionais. Obteve-se, assim, um mapeamento com características geomorfológicas regionais e características mensuráveis locais. A Figura 3 ilustra processos morfodinâmicos representativos da bacia com os respectivos resultados derivados da modelagem. O Morro da Mesa, em Poxoréu (Figura 3A), evidencia a influência das litologias mais resistentes à erosão da bacia sedimentar do Paraná e dos depósitos coluvionares decorrentes da ação destrutiva. Além disso, destaca-se que esse município apresenta histórico de mineração (sobretudo diamantes), onde o solo exposto somado à alta suscetibilidade do relevo potencializam a dinâmica dos processos erosivos e do transporte do material a jusante da bacia. As inundações tiveram valor de suscetibilidade reduzido em relação a processos degradacionais devido às variáveis elencadas como dado de entrada. Os limites dos leitos maiores, todavia, foram identificados a partir do índice topográfico de umidade. Em Rondonópolis, o exemplo da Figura 3B evidencia a comparação do mapeamento com um evento morfodinâmico recente, mesmo sem considerar a influência do contexto urbano como parâmetro da modelagem. Na bacia hidrográfica do rio São Lourenço, os processos de ravinamento e voçorocamento não são tão recorrentes quanto em outras regiões do estado de Mato Grosso, ainda que a modelagem proposta indique as áreas de maior suscetibilidade à erosão linear. A erosão laminar, por sua vez, é contemplada pela ação gravitacional intrínseca ao declive e à amplitude altimétrica. Em propriedades rurais, principalmente com as atividades pecuárias em relevo de maior dissecação, o processo de rastejo abarca correlação com os parâmetros empregados. O front erosivo das escarpas que bordejam os planaltos (residuais ou não) têm registros de rápidos movimentos de massa e quedas de blocos na estação chuvosa, já que o clima da bacia é predominantemente subúmido. Nos rios, a suscetibilidade foi resultado do aprofundamento dos vales, da área de contribuição e da extensão das planícies de inundação, cujas propriedades foram simuladas pelos atributos utilizados. Ressalta-se que uma limitação da proposta

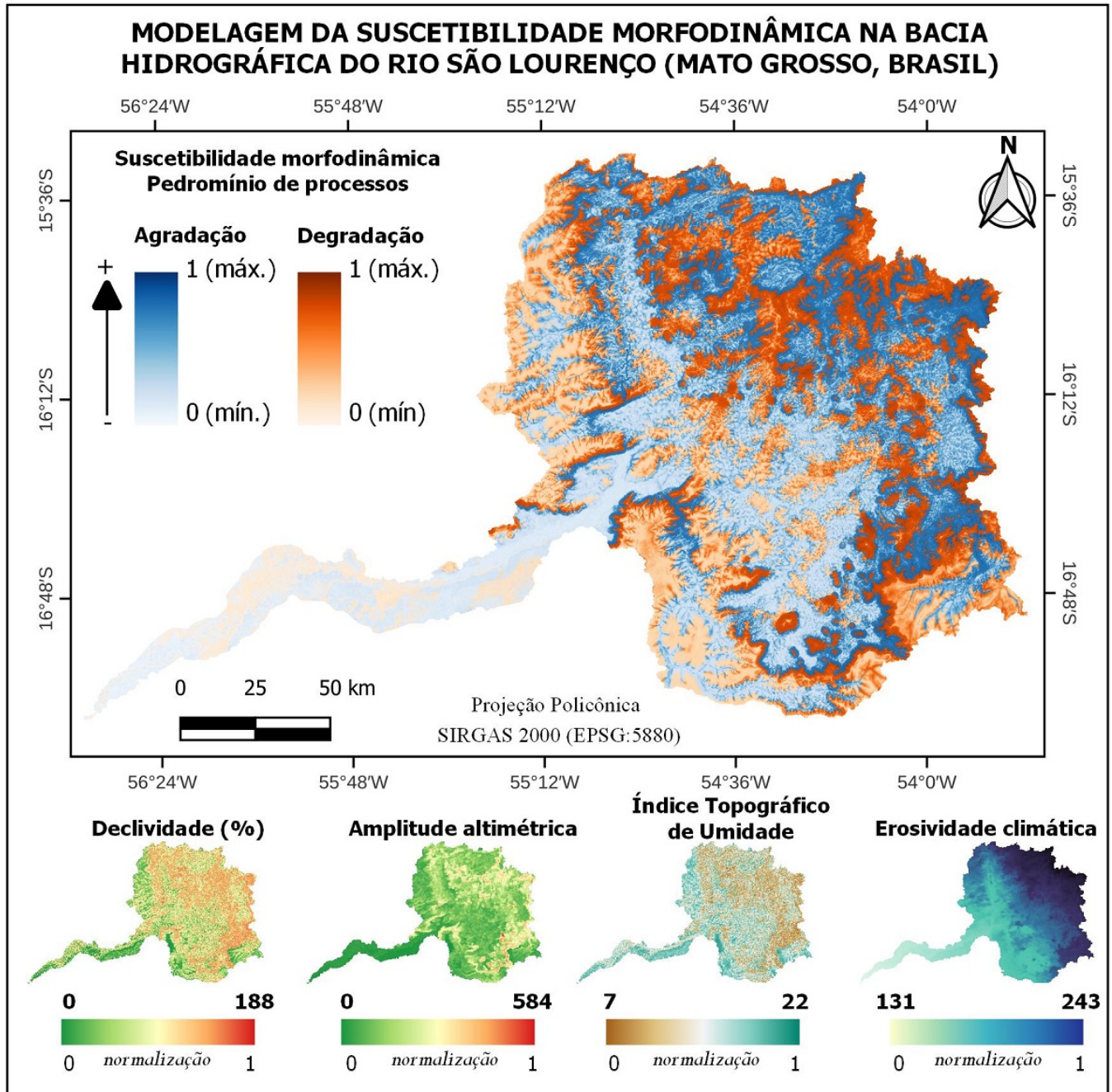
referente à modelagem de processos fluviais por atributos geomorfométricos foi o Modelo Digital de Elevação utilizado. O MDE Copernicus, assim como os demais MDEs globais (SRTM, Tandem, GDEM e outros), é oriundo de sensores que contemplam a elevação de objetos na superfície. As matas ciliares, portanto, criam artefatos que dificultam o mapeamento da conectividade hídrica e da área de contribuição – o que gera ruídos no índice topográfico de umidade. A base planialtimétrica da bacia, disponível apenas na escala 1:100.000, no entanto, inviabiliza a interpolação de MDEs com qualidade superior. Além disso, embora a modelagem tenha apresentado resultados fidedignos e correlação com as características geomorfológicas locais e com os processos erosivos detectados na bacia (sobretudo nos planaltos), o terço inferior do rio São Lourenço está inserido no contexto do Pantanal mato-grossense e essa porção apresenta limitações quanto ao uso de técnicas geomorfométricas devido à baixíssima declividade (variação média de 10 cm/km). Os resultados apresentados podem subsidiar vinculações com variáveis afins que influem na morfodinâmica, visto que a padronização numérica e a facilidade operacional de alterar ou incluir informações torna proposta aberta e flexível. A produção de sedimentos se configura como uma problemática que desafia a gestão ambiental e territorial no contexto das bacias hidrográficas do Centro-Oeste brasileiro e o mapeamento da suscetibilidade, seja com a indicação de níveis hierárquicos ou quantitativos, configura um instrumento essencial ao planejamento e às análises sobre o retrabalhamento do material sedimentar nas áreas de erosão, transporte e deposição. O uso do índice de posição topográfica calculado com raio abrangente (10 km) objetivou representar a macrocompartimentação da morfodinâmica. Sugere-se, para estudos que busquem detalhar a classificação, um IPT calculado com raio de 1 km ou ao comprimento médio das vertentes locais. Ao individualizar os setores com predomínio agradacional ou degradacional, a seleção de atributos geomorfométricos pode ser direcionada a processos específicos. Na bacia do rio São Lourenço, os grabens e as superfícies pediplanadas atribuem um caráter poligenético ao relevo que aumentam a complexidade das áreas de agradação e degradação.

Figura 1



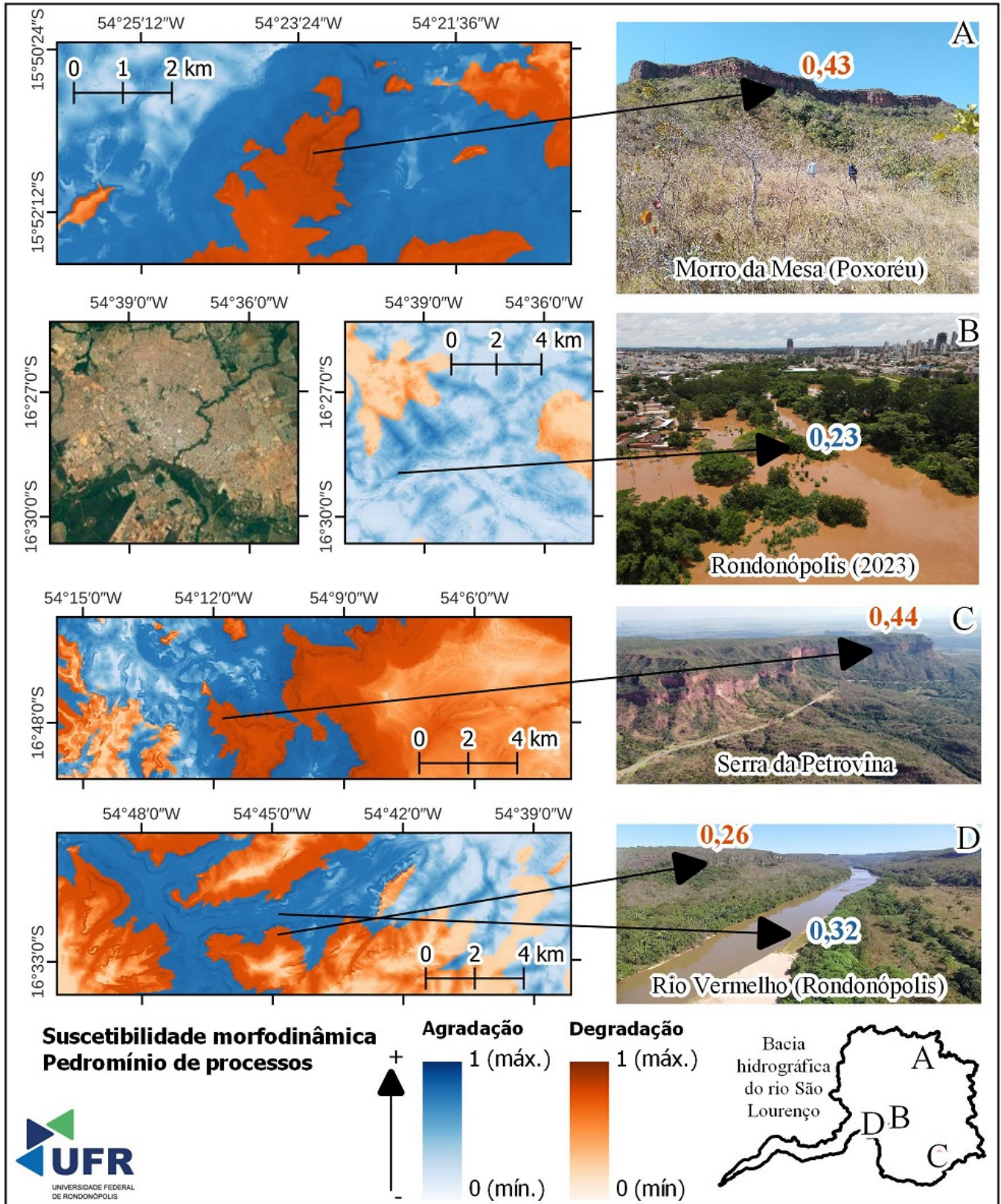
Localização da área de estudo

Figura 2



Resultados da modelagem de suscetibilidade morfodinâmica

Figura 3



Exemplos da modelagem de suscetibilidade morfodinâmica

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta apresentada evidenciou a aplicabilidade da modelagem digital do relevo para

mapeamentos de suscetibilidade a processos morfodinâmicos a partir da combinação de atributos geomorfométricos, cujos valores resultantes indicam maior ou menor pertinência à deflagração de processos sob influência topográfica. A bacia hidrográfica do rio São Lourenço possui uma diversidade geomorfológica que foi contemplada pela quantificação e pelas interpretações do relevo local. A proposta apresentada se ateve à individualização de aspectos geomorfológicos com potencial de iniciação de processos atuantes no relevo. Os modelos previsionais de áreas suscetíveis a processos morfodinâmicos, quando simplificados, enfatizam essencialmente o uso do solo, os litotipos, as classes de solo e o relevo como condicionantes dos processos. Em análises mais complexas e abrangentes, que contemplem outros fatores, é imprescindível considerar os parâmetros geomorfométricos específicos para cada tipo de processo e a relação entre intensidade, duração e frequência e os limiares de chuva crítica que desencadeiam processos erosivos de grande magnitude e podem promover o retrabalhamento de depósitos sedimentares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J., A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24 (1), 43-69, 1979.

BALDERRAMA, V. P. Modelagem da Vazão e Transporte de Sedimentos Suspensos na Bacia Hidrográfica do Rio São Lourenço/MT. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Universidade Federal de Mato Grosso (Cuiabá). 2019.

CASSETI, V. Geomorfologia. [S.l.]: 2005. Disponível em: https://docs.ufpr.br/~santos/Geomorfologia_Geologia/Geomorfologia_ValterCasseti.pdf. Acesso em: 19/03/2023.

CHRISTOPHERSON, R.W; BIRKELAND, G.H. Geossistemas: uma introdução à geografia física. 9 ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

COLTRINARI, L. Cartografia geomorfológica detalhada: a representação gráfica do relevo entre 1950-1970. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.12, n.3, p.121-130, 2011.

CORINE. Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southeastern Regions of the European Community. EUR 13233; Luxemburgo, Bélgica, 1992.

CORREIA, K. P. F. O uso da terra e os processos erosivos na microbacia do Córrego Águas Claras em Juscimeira (MT). Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Universidade Federal de Rondonópolis. 2021.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37 (12), p. 4302-4315, 2017.

HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, 2009.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, n. 69, v.01, p. 14-47, 1981.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Geomorfologia. 2ª ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 175 p., 2009.

MINGOTI, R.; SAIS, I. C. R.; PADOVANI, C. R.; CALHEIROS, D. F.; OLIVEIRA, M. D. Variação da produção de sedimentos entre 1985 e 2017 na bacia do rio São Lourenço. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto SBSR 2019, 2019, Santos/SP. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos: INPE, 2019.

SILVEIRA, R. M. P. Geomorfologia de Mato Grosso. In: NARDES, A. M. M. Mato Grosso: conhecendo os desafios geográficos. Rondonópolis: Editora UFR, 2023.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Método geomorfométrico para mapeamento de topos, cristas e vales. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 21, p. 697-717, 2020.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Análise Temática e Conceitual de Mapas Geomorfológicos: A Transcrição Gráfica da Complexidade do Relevo. Revista Brasileira de Cartografia, v. 73, n. 2, 2021.

SOUZA, A. V. V. Avaliação da influência dos usos e ocupação do solo na qualidade da água do rio Vermelho no sudeste de Mato Grosso. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Universidade Federal de Mato Grosso (Rondonópolis). 2015.

TAKAHASHI, T. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. Journal of Natural Disaster Science 3 (1), p. 57-89, 1981.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). Terrain analysis: principles and applications. New York: John Wiley & Sons, p.1-27, 2000.