XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/110

NDVI e EUPS Aplicados ao Mapeamento da Suscetibilidade à Erosão em Pirapora e Buritizeiro (MG)

Marcus Vinícius Ramos de Souza
Discente em Engenharia Civil , IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, marcusramosdesouza@gmail.com

Breno Alcântara Silva
Docente em Engenharia Civil, IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, breno.silva@ifnmg.edu.br

Áureo da Silva Santos
Docente em Engenharia Civil, IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, aureo.santos@ifnmg.edu.br

Marcos Alves da Silva
Docente em Engenharia Civil, IFNMG, Pirapora - MG, Brasil, marcos.silva@ifnmg.edu.br

RESUMO: As atividades humanas intensificam e condicionam os processos erosivos, tornando essenciais ferramentas de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIG) para identificar áreas suscetíveis e apoiar o planejamento ambiental. Este estudo teve como objetivo mapear a vulnerabilidade à erosão hídrica nos municípios de Pirapora e Buritizeiro, no norte de Minas Gerais, utilizando a combinação de sensoriamento remoto, geoprocessamento e a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS). Para estimar os fatores da EUPS, foram empregados dados de precipitação, informações sobre o solo, modelo digital de elevação e imagens orbitais do Landsat 9. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi especialmente utilizado para determinar o fator de cobertura e manejo do solo. A álgebra de mapas em SIG permitiu a representação espacial da perda potencial de solo e a categorização das áreas de acordo com classes de suscetibilidade à erosão. Os resultados indicaram predominância de áreas com baixa a moderada suscetibilidade, enquanto as classes alta e muito alta concentraram-se em setores com maiores declividades e menor cobertura vegetal.

PALAVRAS-CHAVE: EUPS, NDVI, Erosão, Suscetibilidade, Pirapora, Buritizeiro

ABSTRACT: Human activities intensify and condition erosion processes, making remote sensing tools and geographic information systems (GIS) essential for identifying susceptible areas and supporting environmental planning. This study aimed to map vulnerability to water erosion in the municipalities of Pirapora and Buritizeiro, in northern Minas Gerais, using a combination of remote sensing, geoprocessing, and the Universal Soil Loss Equation (USLE). To estimate the USLS factors, precipitation data, soil information, digital elevation model, and Landsat 9 orbital images were used. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was specifically used to determine the soil cover and management factor. GIS map algebra allowed for the spatial representation of potential soil loss and the categorization of areas according to erosion susceptibility classes. The results indicated a predominance of areas with low to moderate susceptibility, while the high and very high classes were concentrated in sectors with steeper slopes and less vegetation cover.

KEYWORDS: USLE, NDVI, Erosion, Susceptibility, Pirapora, Buritizeiro

1 INTRODUÇÃO

As mudanças impostas ao meio físico pelas atividades humanas têm alterado de forma significativa o equilíbrio dos sistemas naturais, refletindo-se, entre outros aspectos, no comportamento dos processos erosivos. Ainda que a erosão faça parte da dinâmica natural da paisagem, sua intensidade e distribuição

espacial passam a ser fortemente condicionadas pelo uso e ocupação do solo. Diante da complexidade inerente à análise desse fenômeno em grandes extensões territoriais, ferramentas baseadas em modelagem espacial, sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (SIG) assumem papel central na avaliação e compreensão da perda de solo em escala regional (Costa, Filho, Risso, 2007; Silva, Santos, Montenegro, 2012).

A avaliação dos processos erosivos em bacias hidrográficas é essencial para a identificação de áreas com maior suscetibilidade à erosão hídrica, subsidiando o planejamento territorial e a gestão ambiental. No Brasil, esse tipo de análise converge com instrumentos de ordenamento do uso do solo, como o Zoneamento Ecológico-Econômico. Além disso, a intensificação da erosão do solo gera impactos econômicos e ambientais, ao aumentar custos produtivos e estimular a expansão agrícola, reforçando a necessidade de práticas conservacionistas que mantenham as perdas de solo em níveis compatíveis com sua capacidade de regeneração (Matos, 2015; Back, 2023).

A elaboração de mapas de risco de erosão baseia-se, de modo geral, na integração de abordagens quantitativas e qualitativas em ambiente SIG, sendo a primeira fundamentada na Universal Soil Loss Equation, USLE, (Equação Universal de Perda de Solo, EUPS) e a segunda estruturada a partir de matrizes de decisão, que permitem hierarquizar áreas mais suscetíveis e subsidiar o planejamento do uso da terra. A EUPS estima a perda média anual de solo por erosão hídrica a partir da interação de fatores ambientais e antrópicos, em que o fator R representa a erosividade das chuvas, o fator K a erodibilidade do solo, os fatores L e S as características do relevo associadas ao comprimento de rampa e à declividade, o fator C a cobertura e o manejo do solo, e o fator P as práticas conservacionistas adotadas. A análise integrada desses fatores possibilita a avaliação espacial do risco de erosão e a identificação de áreas prioritárias para ações de conservação do solo (Pires et al., 2023; Mata et al., 2007; Oliveira et al., 2010).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos índices espectrais mais consolidados e amplamente utilizados em estudos ambientais, devido à sua simplicidade de cálculo e à ampla disponibilidade das bandas do vermelho e do infravermelho próximo nos sensores orbitais. Na modelagem da erosão hídrica, o NDVI tem sido empregado para a estimativa do fator C da EUPS, por refletir a densidade da cobertura vegetal, assumindo valores próximos a +1 em áreas densamente vegetadas e valores menores em superfícies expostas. Nesse contexto, metodologias baseadas no reescalonamento do NDVI têm sido propostas para obter um fator C ajustado, no qual maiores níveis de cobertura vegetal resultam em valores reduzidos de C, indicando maior proteção do solo, o que tem motivado esforços contínuos de calibração desse fator a partir de índices de vegetação (Giovos et al., 2021; Durigon et al., 2014; Félix, 2023).

Este trabalho teve como objetivo elaborar mapas de suscetibilidade à erosão hídrica nos municípios de Pirapora e Buritizeiro, no estado de Minas Gerais, por meio de NDVI com parâmetros físicos do relevo e do solo, bem como com os componentes da EUPS. Os fatores R, K, P e LS foram empregados como variáveis auxiliares para a caracterização da suscetibilidade natural à erosão, enquanto o NDVI foi utilizado como base para a estimativa espacial do fator C, visando subsidiar o planejamento do uso da terra e a definição de áreas prioritárias para a adoção de práticas de manejo e conservação do solo voltadas à mitigação dos processos erosivos.

.

2 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e natureza descritivo-analítica, fundamentada no uso de SIG e sensoriamento remoto, com aplicação da EUPS para estimar a suscetibilidade à erosão.

2.1 Caracterização dos Municípios

A área analisada abrange os municípios de Pirapora e Buritizeiro, situados no Norte do estado de Minas Gerais, ao longo das margens do rio São Francisco. Simultaneamente, esses municípios possuem uma área territorial de 7.767 km² e uma população de 79.516 habitantes, conforme o último censo demográfico, resultando em uma densidade média de 10,24 hab/km². Ambos constituem um aglomerado urbano contíguo, com expressiva importância regional no contexto estadual. A Figura 1 apresenta a localização geográfica dos municípios abordados.

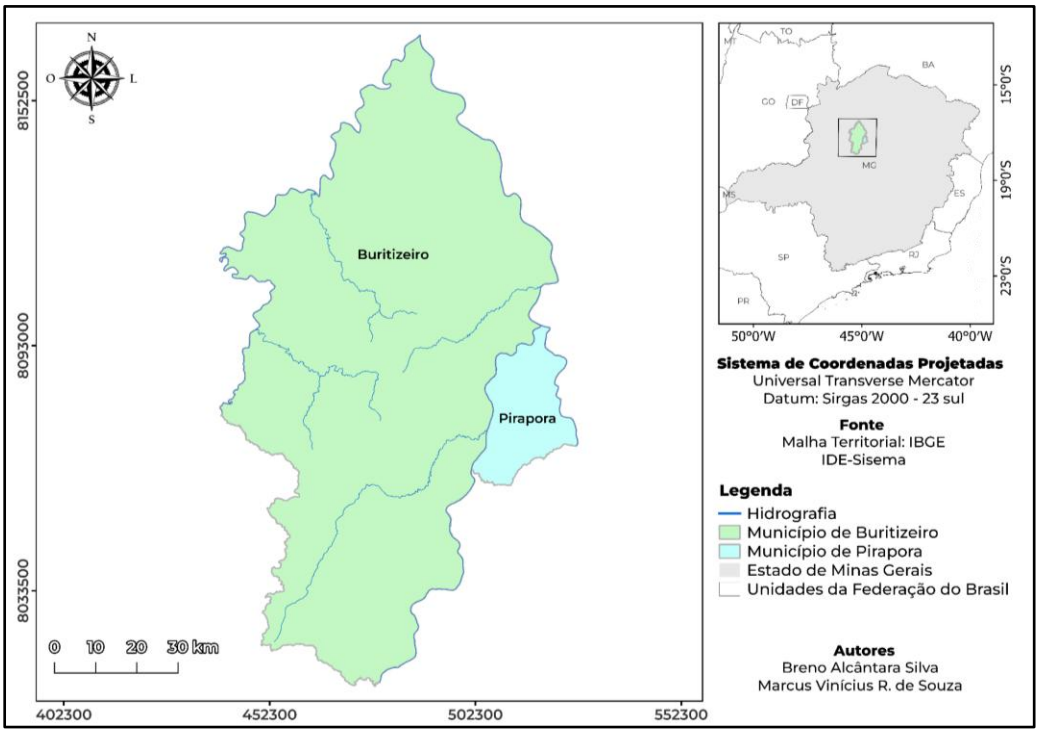


Figura 1. Localização dos municípios abordados no norte de Minas Gerais
Fonte: Autores, 2026

2.2 Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)

A EUPS é um modelo empírico utilizado para estimar a perda média anual de solo por erosão hídrica, a partir da integração dos fatores de erosividade da chuva, erodibilidade do solo, topografia, cobertura e manejo do solo e práticas conservacionistas. A utilização em um ambiente de SIG possibilita a espacialização da propensão à erosão, tornando-se uma ferramenta objetiva para análises ambientais e suporte ao planejamento territorial. A EUPS é representada por $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$, na qual cada fator expressa a contribuição de diferentes condicionantes da erosão hídrica.

2.2.1 Determinação do fator CP a partir da Análise do Índice de Vegetação (NDVI)

O NDVI é empregado por permitir a estimativa da densidade de biomassa vegetal e por reduzir interferências relacionadas à variação de iluminação, especialmente em áreas com relevo irregular. O NDVI foi calculado a partir de imagens dos sensores Landsat 9, obtidas na plataforma EarthExplorer, utilizando a formulação recomendada para esses sensores, conforme apresentado na Equação 1.

$$NDVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4) \quad (1)$$

Os valores obtidos permitiram caracterizar a distribuição da cobertura vegetal e subsidiar a análise da suscetibilidade à erosão, uma vez que áreas mais vegetadas oferecem maior proteção ao solo. O NDVI foi utilizado na estimativa do fator (C) por meio de reescalonamento da cobertura vegetal, conforme metodologia proposta por Durigon et al. (2014), a partir da Equação 2.

$$Cr = (1 - NDVI) / 2 \quad (2)$$

Isso possibilitou a representação espacial do impacto do uso e da cobertura do solo. Levando em conta a falta de práticas de conservação na área de estudo, o fator (P) foi definido com um valor unitário 1,0.

2.2.2 Determinação do fator R (erosividade da chuva)

Segundo Nolêto (2005), a determinação do fator (R) para a microrregião de Sobral (CE) foi realizada a partir de uma relação empírica desenvolvida por Lombardi Neto e Moldenhauer (1980, *apud* Bertoni e Lombardi Neto, 1990), escolhida por demandar apenas dados de precipitação média mensal e anual, o que a torna adequada para áreas com restrição de informações pluviográficas. A partir dessa formulação, procedeu-se ao cálculo da erosividade das chuvas por meio da seguinte equação:

$$EI = \sum_{i=1}^{12} 67{,}355\,(P^2 mi/Pa)^{0,85} \quad (3)$$

em que (EI) é o índice mensal de erosão, (Pmi) indica a incidência mensal em milímetros e (Pa) corresponde à média anual em milímetros. A Tabela 1 apresenta os valores obtidos.

Tabela 1. Média mensal do índice de erosividade

Estações	**Precipitação mês (mm)**												**EI**
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Cachoeira da Manteiga	192,8	122,4	118,5	48,4	13,8	3,8	2,2	4,0	16,4	76,4	161,0	221,5	6262,6
Guaicuí	202,1	118,0	118,4	35,5	13,8	5,4	6,3	3,1	18,9	93,0	157,2	206,5	6180,5
Pirapora Barreiro	222,0	128,5	118,0	52,1	13,5	4,9	8,7	5,2	23,1	116,4	217,3	237,6	7043,2
Pirapora	210,0	100,9	122,0	48,8	12,1	3,1	2,9	4,4	24,1	83,3	200,7	224,7	6625,8
Buritizeiro	215,6	121,3	157,1	52,3	11,3	0,9	0,1	6,4	12,3	83,4	219,8	258,1	7341,2

2.2.3 Determinação do fator K

O fator (K) expressa a suscetibilidade natural do solo à desagregação e ao transporte de partículas pela ação da chuva e do escoamento superficial, estando relacionado às propriedades físicas e químicas do solo. Os valores adotados para esse fator encontram-se na Tabela 2, com base em referências bibliográficas.

Tabela 2. Valores do fator de erodibilidade do solo (K)

Tipo de Solo	**K**
Cambissolo Háplico	0,06
Gleissolo	0,219
Latossolo Vermelho	0,015
Latossolo Vermelho-Amarelo	0,02
Neossolo Flúvico	0,0366
Neossolo Litólico	0,0362
Neossolo Quartzarênico	0,487

Fonte: Adaptado de Oliveira et al., (2023) e Matos, (2015)

2.2.3 Determinação do fator LS

Segundo Oliveira et al. (2010), o fator (L) está associado ao efeito do comprimento da encosta sobre a intensidade dos processos erosivos, considerando a variação da perda de solo ao longo de diferentes extensões de rampa. Com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) elaborado no QGIS, esse fator foi estimado por meio da Equação 4, conforme a metodologia proposto por Desmet e Govers (1996),

$$\boldsymbol{L_{i,j} = [(A_{i,j} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j})^{m+1}]/[X_{i,j}{}^{m} \cdot D^{m+2}(22,13)^{m}]} \quad (4)$$

Para a determinação do expoente $\boldsymbol{m}$, foi adotada a formulação proposta por McCool et al. (1987, 1989), conforme descrito por Foster et al. (1977). O valor de $\boldsymbol{m}$, foi calculado em função do parâmetro β, conforme a Equação 5, a qual estabelece a relação entre esses coeficientes no contexto da modelagem dos processos erosivos.

$$m = \beta/(1+\beta) \quad (5)$$

O parâmetro β representa a relação entre os processos de erosão concentrada em sulcos e a erosão difusa ocorrente entre sulcos, sendo estimado com base na declividade do terreno, de acordo com a formulação apresentada por McCool et al. (1989). A Equação 6 apresenta a formulação.

$$\beta = (sen\theta/0{,}0896)/([3(sen\theta)^{0,8} + 0{,}56] \quad (6)$$

A declividade do terreno (S) foi determinada com base nos procedimentos metodológicos propostos por McCool et al. (1987), utilizando as Equações 7 e 8 apresentadas neste estudo.

$$S = 10{,}8\ sen\theta\ +\ 0{,}03\ (S < 9\%) \quad (7)$$
$$S = 16{,}8\ sen\theta\ -\ 0{,}50\ (S\ \geq\ 9\%) \quad (8)$$

2.3 Cálculo da perda média anual de solo por álgebra de mapas em ambiente SIG

Para estimar a perda média anual de solo (A), obtida pela integração dos fatores R, K, L, S, C e P da EUPS, foram elaborados mapas temáticos de cada fator em ambiente SIG. A álgebra de mapas, realizada por meio da Calculadora Raster do QGIS, possibilitou a integração espacial das variáveis e a geração do mapa final de erosão hídrica, permitindo a identificação das áreas mais suscetíveis nos municípios de Pirapora e Buritizeiro. A Figura 2 apresenta os fatores utilizados na álgebras de mapas.

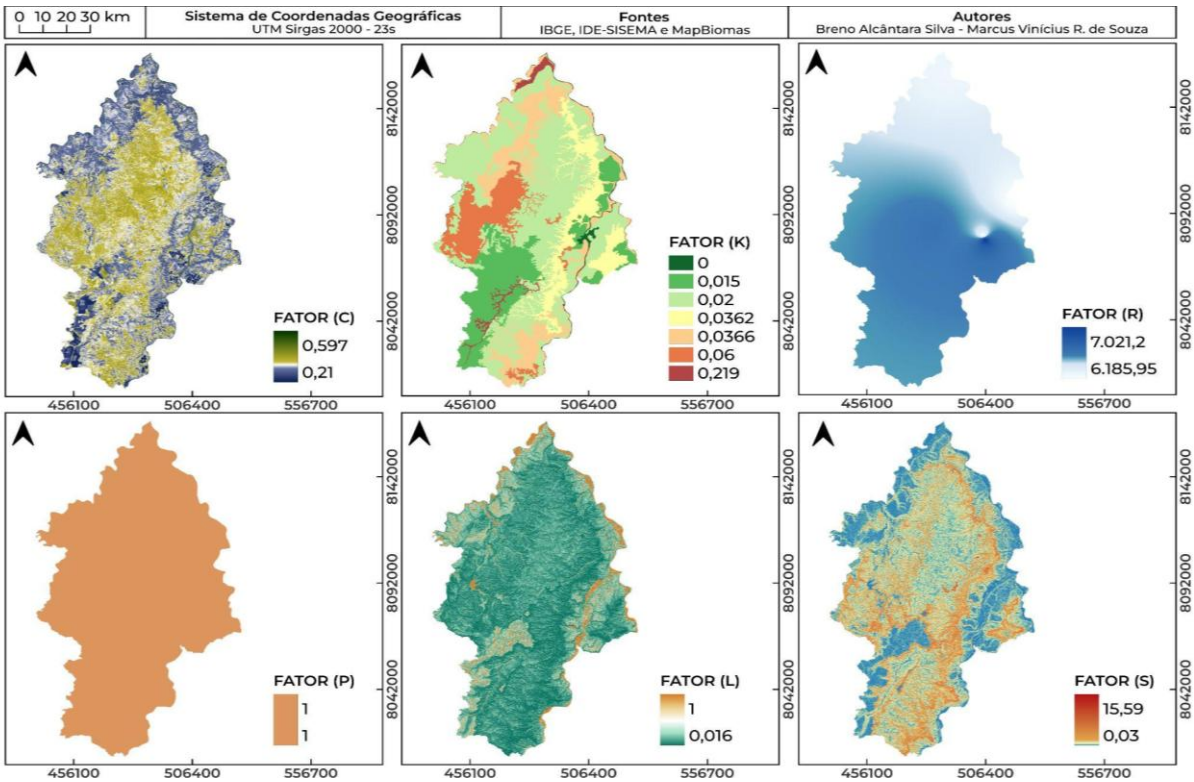


Figura 02. Mapas temáticos dos fatores da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)
Fonte: Autores, 2026

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise do mapa de perda de solo revela uma acentuada variabilidade espacial da suscetibilidade à erosão na área de estudo. Os tons de cinza escuro, predominantes em grande parte do território, indicam

nenhuma ou baixa perda de solo, associada, em geral, a áreas de relevo mais suave, maior estabilidade superficial e presença de cobertura vegetal mais eficiente ou menor concentração do escoamento superficial.

As classes intermediárias, representadas por tons de cinza claro e bege, indicam perda de solo moderada, distribuída de maneira relativamente difusa. Essas áreas ocorrem, em sua maioria, em zonas de transição topográfica, nas quais o aumento gradual da declividade e do comprimento da rampa passa a influenciar de forma mais significativa a dinâmica do escoamento superficial.

Por sua vez, as classes de alta e muito alta perda de solo, destacadas em tons de vermelho, apresentaram padrão espacial mais concentrado e, em muitos casos, linear, estando associadas a encostas com maiores declividades, maiores comprimentos de rampa e proximidade da rede de drenagem. Esses setores evidenciam o forte controle topográfico sobre a erosão hídrica, uma vez que a maior energia do escoamento superficial favorece a desagregação e o transporte de sedimentos.

A predominância dessas classes em áreas de maior altitude e relevo mais acidentado confirma o papel determinante da topografia na distribuição espacial da perda de solo. Em contraste, as áreas de menor altitude e relevo suavizado apresentam menores taxas de erosão, refletindo condições geomorfológicas mais estáveis. A Figura 3 expõe o mapa de perda de solo obtido através da EUPS, reclassificados de acordo com a recomendação da FAO (1967).

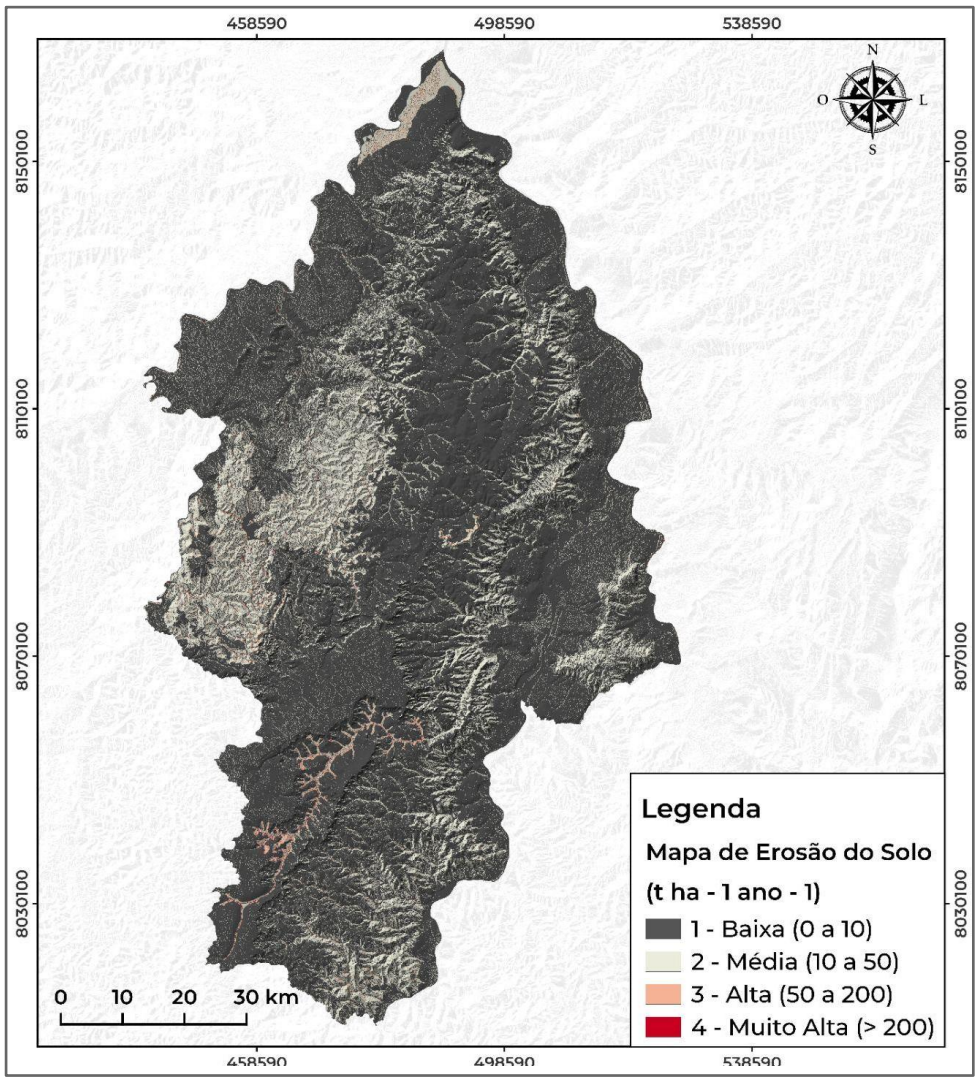


Figura 3. Mapa de Erosão do Solo
Fonte: Autores, 2026

A Tabela 3 apresenta os resultados detalhados do mapa, com os valores correspondentes às áreas em km² e os respectivos percentuais de ocupação.

Tabela 3. Resultados das análises do mapeamento de suscetibilidade a erosão

Suscetibilidade	Área (km²)	% da área
1 - Nenhuma ou ligeira	5824,039	75,28
2 - Moderada	1808,646	23,38
3 - Alta	97,623	1,26
4 - Muito Alta	6,417	0,08
Total	**7736,725**	**100%**

4 CONCLUSÃO

A classificação das terras segundo a suscetibilidade à erosão mostrou-se eficiente como instrumento de apoio ao planejamento ambiental. A integração de técnicas de geoprocessamento possibilitou a delimitação espacial das áreas mais vulneráveis nos municípios de Pirapora e Buritizeiro, a partir da combinação de dados provenientes de múltiplas fontes. Os resultados obtidos por meio do NDVI indicaram setores com menor proteção vegetal, evidenciando a necessidade de análises complementares para orientar a adoção de medidas conservacionistas e o uso sustentável do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Apoio e Desenvolvimento do Ensino Tecnológico (FADETEC) pelo financiamento da pesquisa e ao Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG), campus Pirapora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACK, A. J. Estimativas de perdas de solo por erosão hídrica por meio da Equação Universal de Perdas de Solo. *Boletim Técnico*, *[S. l.]*, n. 210, 2023. Disponível em: https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/BT/article/view/1714. Acesso em: 02 jan. 2026.

COSTA, F. D. S., SOUZA FILHO, C. D., & RISSO, A. (2007). Análise temporal de NDVI e mapas potenciais naturais de erosão na região do Vale do Ribeira, São Paulo. *Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto*, 3833-3839.

DA SILVA, R. M., SANTOS, C. A. S., MONTENEGRO, S. M. G. L. (2013). Identification of critical erosion prone areas and estimation of natural potential for erosion using GIS and remote sensing. *Revista Brasileira de Cartografia.* 65. 881-894.

DE OLIVEIRA, P. T. S., RODRIGUES, D. B. B., SOBRINHO, T. A., PANACHUKI, E. (2010). Estimativa do fator topográfico da USLE a partir de três algoritmos. *Revista Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science: V*, *5*(2). doi:10.4136/ambi-agua.149 Disponível em: https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/1586. Acesso em: 20 de dez. de 2025.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 51, n. 5, p. 427–433, 1996.

DURIGON, V. L., CARVALHO, D. F., ANTUNES, M. A. H., OLIVEIRA, P. T. S., & Fernandes, M. M. (2014). NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International Journal of Remote Sensing*, 35(2), 441–453. https://doi.org/10.1080/01431161.2013.871081

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. La erosión del suelo por el água. Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. *Cuadernos de fomento agropecuário da Organizacion De Las Naciones Unidas*, Roma: FAO, n. 81, 207 p., 1967.

FELIX, F. C., (2023). *Estimativas indiretas do fator uso e manejo (C) da RUSLE em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, a partir de imagens obtidas por sensoriamento remoto orbital e proximal*. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/teses_dissertacoes/Filipe_Castro_Felix.pdf. Acesso em 19 de dez. de 2025.

GIOVOS, R., TASSOPOULOS, D., KALIVAS, D., LOUGKOS, N., & PRIOVOLOU, A. (2021). Índices de vegetação por sensoriamento remoto na viticultura: uma revisão crítica. *Agricultura* , *11* (5), 457. https://doi.org/10.3390/agriculture11050457.

MATA, C. L., CARVALHO JÚNIOR, O. A. de, DE CARVALHO, A. P. F., GOMES, R. A. T., MARTINS, É. de S., GUIMARÃES, R. F. Avaliação Multitemporal da Susceptibilidade Erosiva na Bacia do Rio Urucuia (Mg) Por Meio da Equação Universal de Perda de Solos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, *[S. l.]*, v. 8, n. 2, 2007. DOI: 10.20502/rbg.v8i2.94. Disponível em: https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/94. Acesso em: 29 jan. 2026.

MATOS, T. V. S., (2015). *Determinação de áreas de vulnerabilidade à erosão hídrica com base na equação universal de perda de solo (USLE)*. Universidade Federal de Minas Gerais. https://hdl.handle.net/1843/BUBD-A3FETB.

MCCOOL, D. K.; BROWN, L. C.; FOSTER, G. R. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v. 30, p. 1387–1396, 1987.

MCCOOL, D. K.; FOSTER, G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v. 32, p. 1571–1576, 1989.

NOLÊTO, T. M. S. J. *Suscetibilidade geoambiental das terras secas da microrregião de Sobral – CE à desertificação*. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – PRODEMA-Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

OLIVEIRA, U. C., CIDRAL, W. E de S., SILVA, I. de S., EVANGELISTA, J. P., (2023). Distribuição espacial da perda de solo na bacia hidrográfica do Rio Itacolomi, Ceará, Brasil. *Ciência Geográfica - Bauru - XXVII - Vol. XXVII - (2)*. https://doi.org/10.57243/26755122.XXVII2035

PIRES, F. R.; DE SOUZA, C. M.; MOREAU, M. S.; NARDOTTO JUNIOR, A. O.; DA ROCHA JUNIOR, P. R.; NASCIMENTO, A. L. Determinação do risco de erosão do solo utilizando um sistema de informações geográficas. *Observatório De La Economía Latinoamericana*, *[S. l.]*, v. 21, n. 9, p. 12609–12626, 2023. DOI: 10.55905/oelv21n9-114. Disponível em: https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/1522. Acesso em: 29 jan. 2026.