

DIAGNÓSTICO DE PERDAS DE SOLO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS AFLUENTES DO RESERVATÓRIO DE FURNAS

Diagnosis of soil loss in watersheds threads flowing into the Furnas reservoir

Diogo Olivetti

Professor do Instituto de Ciências da Natureza da Universidade Federal de Alfenas, Brasil

diogo.olivetti@unifal-mg.edu.br

André Luiz da Silva Bellini

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Alfenas, Brasil

andre.bellini@sou.unifal-mg.edu.br

Pablo César Serafim

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Alfenas, Brasil

pablo.serafim@sou.unifal-mg.edu.br

Allana Paula Braga

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Alfenas, Brasil

allana.braga@sou.unifal-mg.edu.br

Alexandre Oliveira Soares

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Alfenas, Brasil

alexandre.soares@sou.unifal-mg.edu.br

Pedro Freitas Ramos Grande

Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Alfenas, Brasil

pedro.freitas@sou.unifal-mg.edu.br

Ronaldo Luiz Mincato

Professor do Instituto de Ciências da Natureza da Universidade Federal de Alfenas, Brasil

ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br

Recebido: 25/06/2026

Aceito: 03/09/2026

Resumo

O Reservatório de Furnas é um importante recurso hídrico que atende demandas de uso múltiplo da água. Apesar de sua importância, diante de supostas negligências, tem passado por significativos impactos ambientais, desde sua construção, na década de 1960. Tais impactos ocorrem, principalmente, da degradação de bacias hidrográficas tributárias, que transportam poluentes, principalmente pelo ciclo hidrológico. Frente a esse problema, é importante a aplicação de diagnósticos ambientais nessas bacias de modo a avaliar o nível de degradação e definir áreas prioritárias para conservação ou recuperação. Nesse aspecto, as técnicas de geoprocessamento, por meio de armazenamento e tratamento de dados ambientais georreferenciados, tal como a modelagem, são eficientes ferramentas para amparar esse diagnóstico. Nesse contexto, o presente trabalho teve o objetivo de estimar a perda de solo por erosão hídrica em bacias tributárias do reservatório de Furnas.

Para tanto foi aplicado a tradicional Equação Universal de Perdas de Solo Revisada – RUSLE que considera fatores de climatológicos, pedológicos, topográficos e antrópicos (uso e cobertura do solo e práticas conservacionistas) para estimar a erosão hídrica. Os resultados demonstram a viabilidade do modelo em identificar áreas críticas de perdas de solo com prioridades de conservação, suficientes para um estudo inicial. No entanto, é válido ressaltar que a que o diagnóstico ambiental em questão pode ser aprimorado com o melhoramento nos dados de entrada do modelo RUSLE e mesmo com aplicação de outros modelos que são mais abrangentes no ciclo hidrológico.

Palavras-chave: Erosão Hídrica, Modelagem, RUSLE, Sul de Minas Gerais.

Abstract

The Furnas Reservoir is an important water resource that meets the demands of multiple water uses. Despite its importance, due to alleged negligence, it has suffered significant environmental impacts since its construction in the 1960s. These impacts mainly occur due to the degradation of tributary watersheds, which transport pollutants, primarily through the hydrological cycle. Given this problem, it is important to apply environmental diagnostics to these watersheds in order to assess the level of degradation and define priority areas for conservation or recovery. In this respect, geoprocessing techniques, through the storage and processing of georeferenced environmental data, such as modeling, are efficient tools to support this diagnosis. In this context, the present work aimed to estimate soil loss due to water erosion in tributary watersheds of the Furnas reservoir. To this end, the traditional Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE was applied, which considers climatological, pedological, topographic, and anthropogenic factors (land use and cover, and conservation practices) to estimate water erosion. The results demonstrate the model's viability in identifying critical soil loss areas with conservation priorities, sufficient for an initial study. However, it is worth noting that the environmental diagnosis in question can be improved by refining the input data of the RUSLE model and even by applying other models that are more comprehensive in the hydrological cycle.

Keywords: Water Erosion, Modeling, RUSLE, Southern Minas Gerais.

1. INTRODUÇÃO

O reservatório de Furnas desempenha um papel de significativa importância econômica na região. Mesmo que criado primordialmente para a geração de energia elétrica, na década de 1960, atende a demanda de uso múltiplo da água, como consumo, irrigação agrícola, piscicultura, turismo e lazer (Jorge Godoy, 2017). No entanto, este relevante recurso hídrico tem enfrentado impactos ambientais consideráveis, como a contaminação de esgoto (Leite, 2020) e metais pesados (Cavalcanti *et al.*, 2013) além da alta carga de nutriente que desencadeia na proliferação de algas e macrófitas que geram condições propícias para a eutrofização (Pinheiro, 2019).

Outra questão relevante diz respeito à degradação das bacias hidrográficas que deságuam no reservatório. Essas bacias podem transportar sedimentos e substâncias poluentes, como metais pesados e nutrientes, provenientes de atividades agrícolas por

meio da erosão do solo. Sabe-se que as bacias hidrográficas tributárias do reservatório de Furnas apresentam elevado grau de desmatamento e que vêm passando pelo processo de intensificação de atividades agrícolas, fatores que são potencializadores da perda de solo por erosão hídrica (Olivetti *et al.*, 2025).

As problemáticas apresentadas justificam a importância de monitorar os processos erosivos no entorno do reservatório. As geotecnologias e o geoprocessamento, ao coletar, analisar e interpretar dados geográficos, permite a modelagem de bacias hidrográficas para compreensão de sua dinâmica hidrológica e geomorfológica. Nessa perspectiva, diversos modelos hidrológicos baseados em de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) foram desenvolvidos, vem sendo aplicados (Ketema; Dwarakish, 2019) e podem ser usados para compreender o nível de degradação de bacias hidrográficas e seus impactos nos sistemas hídricos receptores. O modelo de erosão hídrica mais convencional é a Universal Soil Loss Equation (USLE) que foi consolidada por Wischmeier e Smith (1978) e a revisada (RUSLE) por Renard *et al.*, (1997), posteriormente diversos outros modelos foram sendo desenvolvidos (Igwe *et al.*, 2017).

Nesse contexto, objetivo deste trabalho foi realizar um diagnóstico de perdas de solo por meio de modelagem de erosão hídrica em bacias hidrográficas tributárias do reservatório. Ademais, esse monitoramento foi uma capacitação para discentes da disciplina de “Modelagem de Bacias Hidrográficas com Ênfase em Erosão Hídrica e Geoprocessamento” que foi ministrada no primeiro semestre de 2025 no Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) da UNIFAL-MG. Cada discente foi responsável pela aplicação do modelo RUSLE, seguindo a mesma metodologia, nas bacias monitoradas. Aqui, o resultado é a junção desses diagnósticos e considerações sobre as perdas de solo nas bacias em questão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo compreende o conjunto de nove bacias hidrográficas que são diretamente tributárias dos braços sudoeste (Rios Sapucaí e Peixe) do reservatório de Furnas (Figura 1).

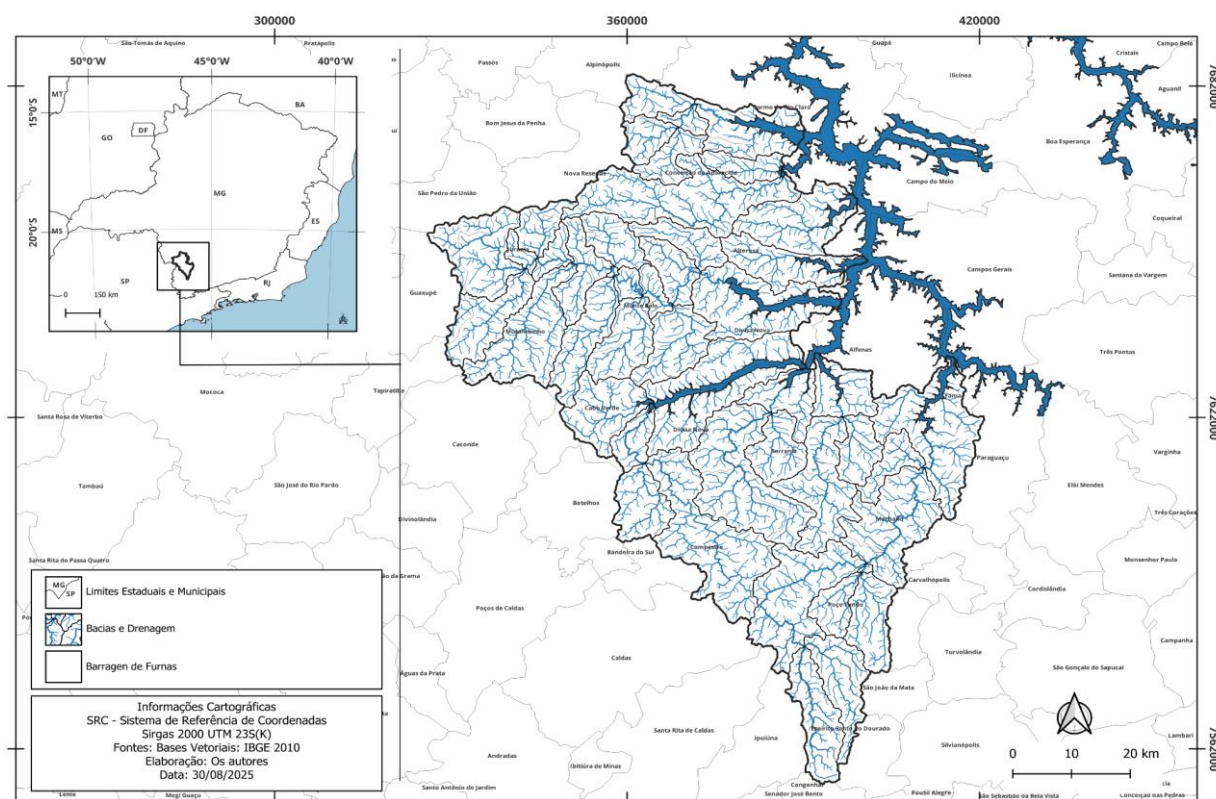


Figura 1 - Mapa das nove bacias tributárias, juntas, que foram escolhidas para o estudo.

Fonte: Autores

A Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) é um modelo empírico amplamente utilizado para estimar a perda média anual de solo por erosão hídrica. O modelo correlaciona os principais fatores que influenciam o processo erosivo, sendo matematicamente expresso pela Equação 1:

$$A: R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Em que: A = perda de solo média anual, em $t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; R = fator erosividade da chuva, em $MJmm \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$; K = fator erodibilidade do solo, em $t \text{ h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$; LS = fator topográfico, adimensional; C = fator uso e manejo do solo, adimensional; P = fator práticas conservacionistas, adimensional. Na Figura 2 é apresentado o fluxograma de aplicação deste modelo em ambiente SIG (QGIS 3.34.6 LTR).

O Fator R foi obtido pelo mapa de erosividade da chuva do sul do estado de Minas Gerais (Aquino *et al.*, 2012). Na área de estudo o valor de R não possui variação, sendo fixo em $6500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

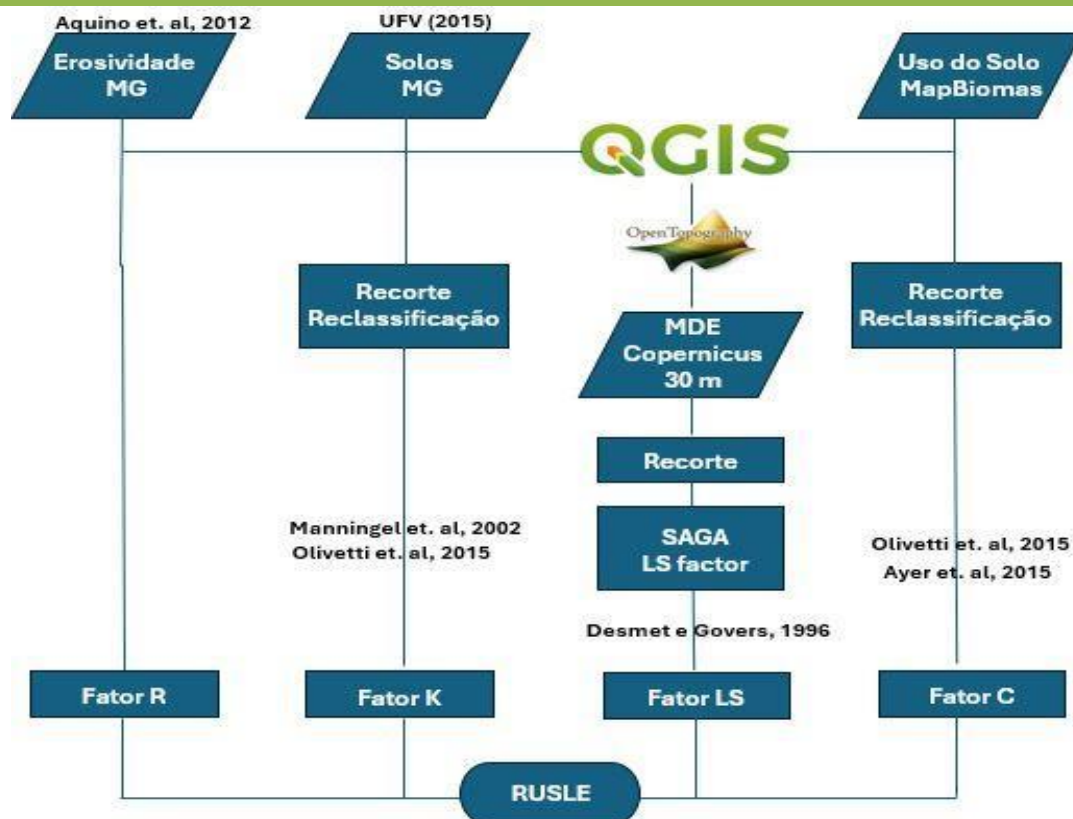


Figura 2 - Fluxograma metodológico para a aplicação do modelo RUSLE em SIG.

Fonte: Adaptado de Olivetti *et al.* (2025).

Para o fator K, foi aplicado valores da literatura que são atribuídos para classes de solo. Assim, foi utilizado como base o mapa de solos de Minas Gerais (UFV, 2015, Figura 3) e os valores da literatura foram obtidos primordialmente de Manningel *et al.* (2002). O recorte da área de estudo e a reclassificação de classes de solo para valores de K também foram feitos em ambiente SIG. Na Tabela 1 são apresentadas as classes de solo da área de estudo e seus respectivos valores de K de acordo com a literatura.

Tabela 1: Valores de K para cada classe de solo da área de estudo.

Classe do solo	Valor de K
Afloramento rochoso	0,001*
Argissolo vermelho	0,0200
Argissolo vermelho-amarelo	0,0466
Cambissolo háplico	0,0340
Cambissolo húmico	0,0433
Gleissolo melânico	0,0043
Latossolo amarelo	0,0570
Latossolo vermelho	0,011**
Latossolo vermelho-amarelo	0,012
Neossolo litólico	0,1448
Nitossolo háplico	0,0030

* Valor hipotético

** Único valor que não foi usado de Manningel *et al.* (2002). Para esta classe de solo o valor de K foi baseado em Olivetti *et al.* (2015) que foi calculado com amostras de solo dentro da área de estudo

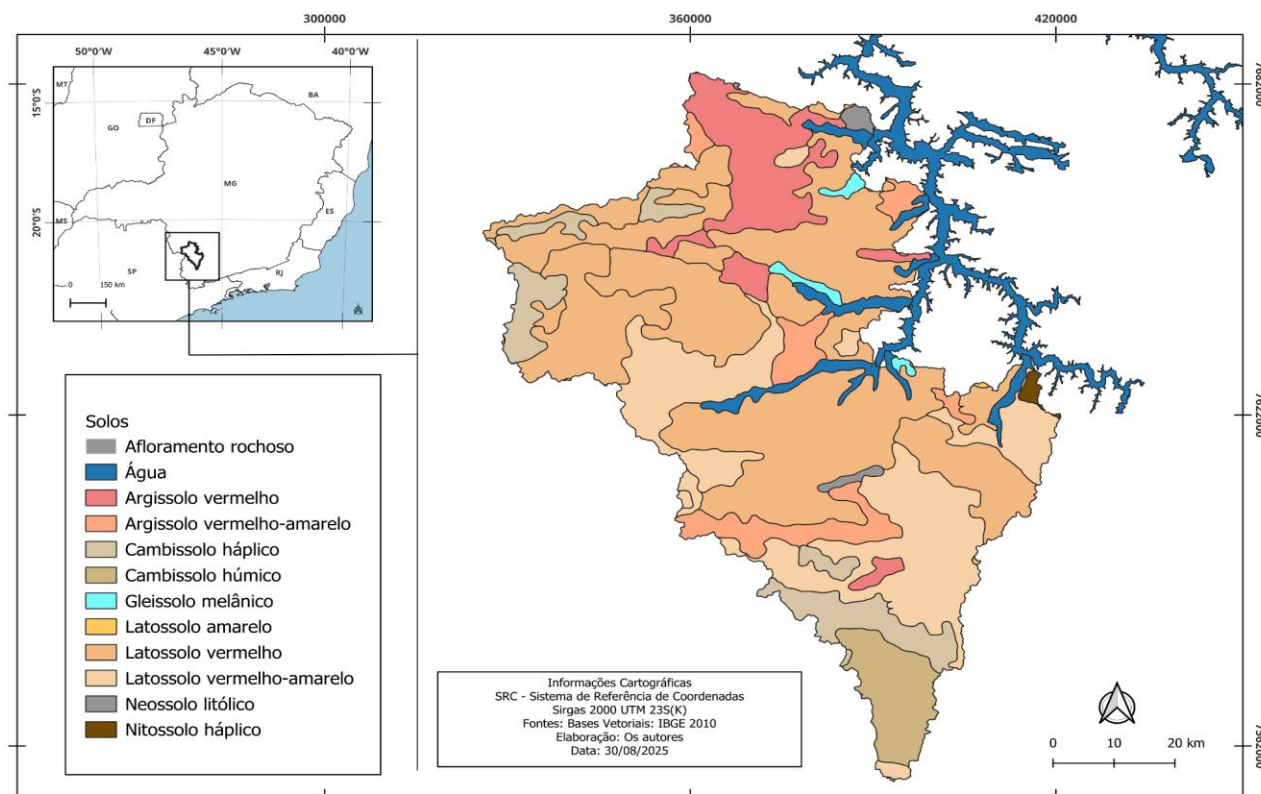


Figura 3 - Mapa de solos da área de estudo. UFV (2015).

Fonte: Autores.

O fator LS foi calculado pelo algoritmo proposto por Desmet e Govers (1996).

$$L_{ij} = \frac{[(A_{ij-in} + D^2)^{m+4} - (A_{ij-in})^{m+1}]}{[D^{m+2} \cdot \frac{m}{x_{ij}} (22,13)^m]}$$

Onde: A ij-in é a área de contribuição na entrada de uma célula de grade com coordenadas (i,j) (m²); D é o tamanho da célula da grade (m); x_{ij} é um fator relacionado à direção do aspecto da célula da grade; m é o expoente do comprimento da rampa.

Para tanto foi aplicado como entrada o Modelo Digital de Elevação Copernicus que foi baixado pela extensão *Open Topography* dentro do QGIS 3.34.6 LTR. Tal modelo foi calculado diretamente da ferramenta “LS Factor” da extensão SAGA do QGIS.

O fator C também foi baseado em estudos da literatura (Tabela 2). Foi utilizado como base a coleção 9 de classificação de uso e cobertura do solo do projeto MapBiomass para o ano de 2023 (Figura 4). Os valores da literatura foram obtidos de Olivetti *et al.* (2015) e Ayer *et al.* (2015). O recorte da área de estudo também foi feito em ambiente SIG.

Tabela 2: Valores de C para as classes de uso e cobertura do solo.

Uso e cobertura do solo	Valor de C*
Formação florestal	0,02
Eucalipto	0,30
Formação Campestre	0,075
Pastagem	0,075
Cana de açúcar	0,10
Mosaico de usos	0,07
Área urbana	0,05
Áreas não vegetadas	1
Mineração	0,9
Água	0
Soja	0,14
Outras culturas temporárias	0,13

*Adaptado de Ayer *et al.* (2015) e Olivetti *et al.* (2015)

O fator P é o mais carente de estudos na literatura, diversos trabalhos que estimam a erosão hídrica a partir da RUSLE/USLE desconsideram esse fator (Bahadur, 2009). Diante desses motivos, o fator P foi desconsiderado neste trabalho.

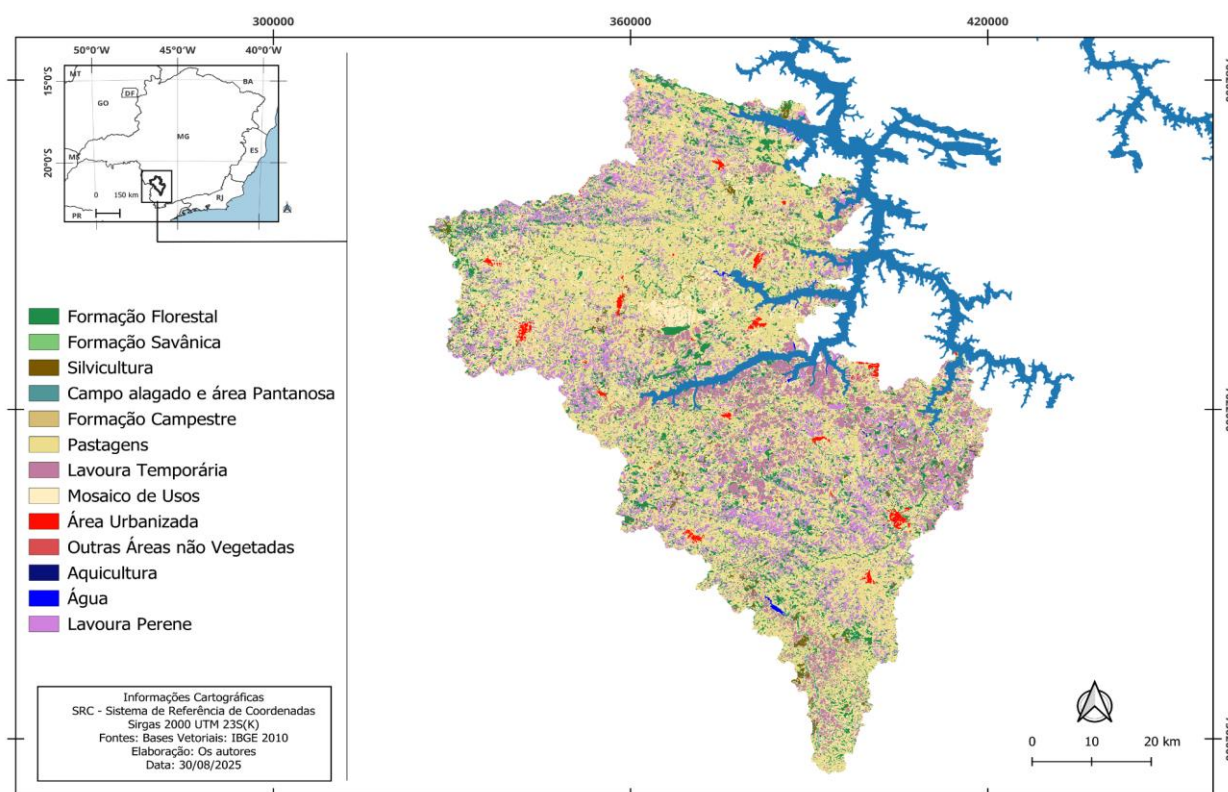


Figura 4: Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo, segundo a coleção 9 do projeto MapBiomias. **Fonte:** Autores (2025).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do modelo RUSLE permitiu uma compreensão da distribuição espacial da dinâmica da perda de solos por erosão hídrica nas bacias monitoradas (Figura 5). Seguindo

a padrão geomorfológico, observa-se uma redução nas taxas de perdas de solo ao longo de transições entre as cabeceiras de drenagem, áreas intermediárias e áreas baixas, próximo ao reservatório de Furnas. Á área mais crítica fica ao sul da área de estudo, que a apresenta maior proporção de áreas com perda de solo $> 40 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, onde os declives são mais acentuados. Ainda cabem destaque para as áreas de extremo leste, também declivosas e, norte, além de declivosas com solo mais susceptíveis à erosão hídrica.

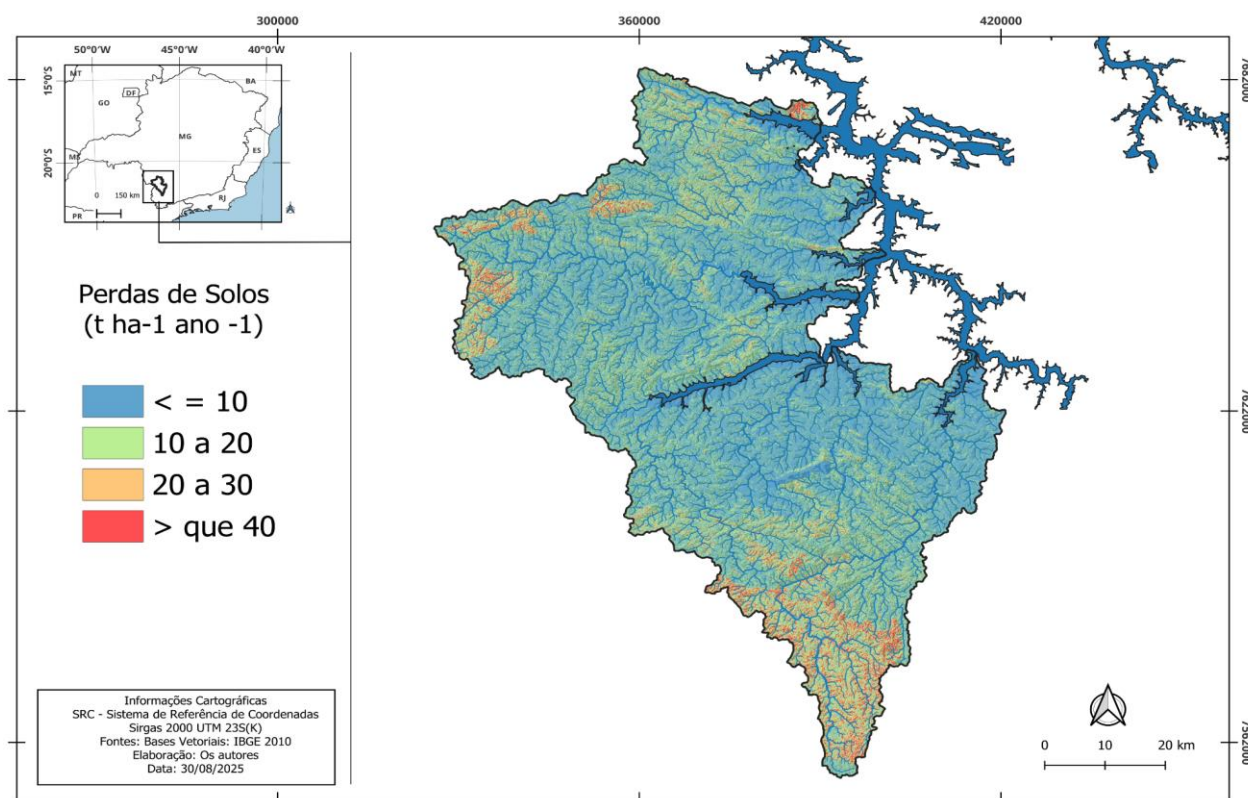


Figura 5 - Mapas de perda de solo, gerado pelo modelo RUSLE sobre a área de estudo.

Fonte: Autores (2025).

O cenário perda de solos observado, como já comentado, reflete o cenário de desmatamento alterações do uso e cobertura do solo que vem ocorrendo na área de estudo. Por exemplo, no estudo conduzido por Olivetti *et al.* (2015), foi observado que em uma pequena bacia hidrográfica tributária do reservatório, a área de mata nativa diminuiu de 14% em 1986 para 11% em 2011, intensificando ainda mais um processo que já havia sido marcado por desmatamento. Resultados semelhantes em bacias próximas também foram encontrados por Leite (2020) que apontou que em 2019, na Bacia hidrográfica do Rio Formiga, a área remanescente de mata nativa era de 11,8%, no Rio Machado era de 9,7%, no Rio São Pedro era de 8,7%, e no caso mais crítico, no Rio Muzambinho, era de apenas 5,25%.

Num estudo mais recente de Olivetti *et al.* (2025), na mesma área de estudo, foi diagnosticado que todas as bacias estudadas têm mais de 70% da área desmatada e de áreas passíveis de APP não conservada. Simulando cenários, foi apontado que se todas essas áreas de APP fossem conservadas, seria reduzido mais de cinco mil toneladas por hectare em um ano. Nesse cenário, certamente seria reduzido a carga de sedimentos que chegam no reservatório de Furnas e causa diversos impactos, como transporte de poluentes adsorvidos, redução da claridade da água e assoreamento com consequente redução da capacidade de armazenamento de água.

Esses processos no entorno do reservatório Furnas refletem a problemática de todo o estado, uma vez que dados recentes do projeto MapBiomias indicam que Minas Gerais liderou o desmatamento da Mata Atlântica em 2022 (SOS Mata Atlântica/INPE, 2023). Esse processo, juntamente com outras alterações no uso da cobertura do solo, como a intensificação do cultivo de cana-de-açúcar, contribuiu para o aumento das taxas de perda de solo ao longo do período analisado.

Apesar dos diagnósticos aqui observados, cabe ainda mencionar que este estudo é prévio e foi realizado de maneira didática, dentro de uma disciplina de Pós-Graduação. É preciso considerar algumas limitações no modelo aplicado, tanto pelos dados de entrada quanto para a o diagnóstico ambiental e definição de áreas prioritárias de conservação.

Sobre o primeiro ponto, vale ressaltar que os fatores R e K foram obtidos em estudos de maior escala, sem especificidade local; no caso do fator K, estimativas mais adequadas demandariam análises físico-químicas de solos, inviáveis até o momento pela extensão da área (Olivetti *et al.*, 2015). Quanto ao fator C, índices de vegetação podem aprimorar sua representação, já que uma mesma classe de cobertura pode apresentar diferentes níveis de vigor vegetativo (Felix *et al.*, 2023).

Quanto ao segundo ponto, a aplicação isolada da RUSLE pode ser limitada para o planejamento de bacias, sobretudo na definição de áreas prioritárias para implementação de serviços ecossistêmicos. Neste caso, existem modelos hidrológicos mais abrangentes, que estimam as taxas de infiltração e evapotranspiração da água e assim conseguem proporcionar melhor a relação do balanço hídrico e definir áreas prioritárias para, além da redução de perda de solo, produção de água e abastecimento do reservatório (Guo *et al.*, 2019).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da RUSLE constitui um importante instrumento de diagnóstico da degradação ambiental em bacias hidrográficas, permitindo identificar áreas prioritárias para conservação, sobretudo em relação às perdas de solo por erosão hídrica. No entanto, a confiabilidade dos resultados, sabendo que não há viabilidade de validação, ainda depende de melhorias na qualidade dos dados de entrada, o que evidencia a necessidade de avanços metodológicos.

Além dos aspectos metodológicos, recomenda-se não apenas o refinamento dos fatores empregados na RUSLE, mas também a adoção de modelos mais abrangentes, capazes de incorporar a dinâmica hidrológica, a produção de água e a avaliação de serviços ecossistêmicos, ampliando assim o potencial de apoio ao planejamento e à gestão ambiental.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AQUINO, R. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; MELLO, C. R.; AVANZI, J. C. Variabilidade espacial da erosividade da chuva na região Sul de Minas Gerais, Brasil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, n. 5, p. 533-542, 2012.
- AYER, J. E. B.; OLIVETTI, D.; MINCATO, R. L.; SILVA, M. L. N. Erosão hídrica latossolos vermelhos distróficos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 2, 2015.
- BAHADUR, K. C. K. Mapping Soil Erosion Susceptibility Using Remote Sensing and GIS: A Case of the Upper Name Wa Watershed, Nan Province, Thailand. **Environmental Geology**, v. 55, n. 1, p. 695–705, 2009.
- CAVALCANTI, P. P.; RODRIGUES, L. C. A.; BEIJO, L. A.; BARBOSA, S.; XAVIER, T. T.; MAGALHÃES, F. Contamination from an affluent of Furnas reservoir by trace metals. **Brazilian Journal of Biology, São Carlos**, v. 74, n. 4, p. 877-885, 2014.
- DESMET, P. J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal Soil Water Conservation**, v. 51, n. 5, p. 427-433, 1996.
- FELIX, F. C.; CÂNDIDO, B. M.; MORAES, J. F. L. How suitable are vegetation indices for estimating the (R)USLE C-factor for croplands? A case study from Southeast Brazil. **ISPRS Open J. Photogramm. Remote Sens.** v. 10, n. 100050, 2023.

GODOY, M. J.; ARAÚJO SOBRINHO, F. L. **The multiple uses of the waters of the reservoir lake of Furnas, Minas Gerais: tourism, electric power generation and conflicts.** 2017. 128p.

GUO, Y.; PENG, C.; ZHU, Q.; WANG, M.; WANG, H.; PENG, S.; HE, H. Modelling the impacts of climate and land use changes on soil water erosion: Model applications, limitations and future challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 250, p. 109403, 2019.

IGWE, P.U.; ONUIGBO, A. A.; CHINEDU, O. C.; EZEAKU, I. I.; MUONEKE, M. M. Soil Erosion: A Review of Models and Applications. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 4, n. 12, 2017.

KETEMA, A.; DWARAKISH, G. S. Water erosion assessment methods: a review of water erosion assessment method: a review. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 01, n. 02, p. 1–8, 2019.

LEITE, A. C. C. **Qualidade da água e uso e cobertura do solo em bacias contribuintes do Lago de Furnas (MG): implicações na balneabilidade.** 2020. 103 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. da (org.). **Geodiversidade do Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2010.

MANNIGEI, A. R.; CARVALHO, M. P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Sci. Agron.** v. 24, p. 1335, 2002.

OLIVETTI, D.; MINCATO, R. L.; AYER, J. E. B.; SILVA, M. L. N.; CURI, N. Spatial and temporal modeling of water erosion in dystrophic red latosol (oxisol) used for farming and cattle raising activities in a sub-basin in the south of Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 39, p. 58-67, 2015.

OLIVETTI, D.; SANTOS, C. A.; SOARES, A. O.; BRAGA, A. P. B. Uso de Modelo Hidrológico Para Definição de Áreas Prioritárias de Reflorestamento no entorno de um Reservatório de Crise Hídrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMORFOLOGIA, 15., 2025. Natal. **Anais...** Natal: 2025.

PINHEIRO, P. L. **Uso do Solo e Suas Relações com a Qualidade da Água em Locais de Implantação de Parques Aquícolas no Reservatório de Furnas (MG).** 2019. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2019.

RENARD K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; McCOOL, D. K.; YODER, D. C. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE).** Washington, DC: USDA, Agriculture handbook n. 703, 1997. 384p.

SOS Mata Atlântica/INPE. **Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica: Período 2021-2022. Relatório técnico.** Disponível em:

<https://educacao.cemaden.gov.br/midiateca/atlas-dos-remanescentes-florestais-da-mata-atlantica/>. Acesso em: 15 abr. 2026.

TROUW, R. A. J.; RIBEIRO, A.; NASCIMENTO, D. B.; BONGIOLO, E. M.; OLIVEIRA, F. N.; COSTA, C. F.; CAPUTO NETO, V.; POLO, H.; TAVARES, F.; VINAGRE, R. **Geologia e Recursos Minerais da Folha Pouso Alegre - SF.23-Y-B-II**: Nota Explicativa. Rio de Janeiro: CPRM/UFRJ, 2020.

UFV – Universidade Federal de Viçosa. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. Viçosa, 2015. Disponível em: <https://dps.ufv.br/software/>. Acesso em: 15 abr. 2026.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning**. Agriculture Handbook, n. 537, U.S. Department of Agriculture, Washington, 1978.

Recebido: 25/06/2026

Aceito: 03/09/2026