

USO DE GEOTECNOLOGIAS COMO FERRAMENTA DE CARACTERIZAÇÃO E PLANEJAMENTO AMBIENTAL EM UMA UNIDADE HIDROGRÁFICA DO CERRADO DO DF: IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS E DIREITOS DIFUSOS

USE OF GEOTECHNOLOGIES AS A TOOL FOR ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION AND PLANNING IN A HYDROGRAPHIC UNIT OF THE CERRADO OF THE DF: IMPLICATIONS FOR PUBLIC POLICIES AND DIFFUSE RIGHTS

USO DE LAS GEOTECNOLOGÍAS COMO HERRAMIENTA DE CARACTERIZACIÓN Y PLANEACIÓN AMBIENTAL EN UNA UNIDAD HIDROGRÁFICA DEL CERRADO DEL DF: IMPLICACIONES PARA LAS POLÍTICAS PÚBLICAS Y LOS DERECHOS DIFUSOS

 <https://doi.org/10.56238/arev7n7-368>

Data de submissão: 01/07/2025

Data de publicação: 31/07/2025

Carlos Eduardo Pacheco Lima

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Hortaliças
E-mail: carlos.pacheco-lima@embrapa.br

Mariana Rodrigues Fontenelle

Doutora em Microbiologia Agrícola
Instituição: Embrapa Hortaliças
E-mail: mariana.fontenelle@embrapa.br

Marcos Brandão Braga

Doutor em Irrigação e Drenagem
Instituição: Embrapa Hortaliças
E-mail: marcos.braga@embrapa.br

Ítalo Moraes Rocha Guedes

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Hortaliças
E-mail: italo.guedes@embrapa.br

Juscimar da Silva

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Hortaliças
E-mail: juscimar.silva@embrapa.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma abordagem integrada de geotecnologias para a avaliação da susceptibilidade à erosão hídrica e da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos porosos em uma unidade hidrográfica localizada no Cerrado do Distrito Federal. Utilizando ferramentas avançadas como GRASS GIS e modelagem espacial via RUSLE, foram gerados mapas temáticos e indicadores. Os resultados demonstram que, embora grande parte da área apresente baixa susceptibilidade à erosão, feições como bordas de chapada podem apresentar susceptibilidade alta e muito alta. Ainda assim, a

presença de vegetação nativa ou em regeneração como cobertura do solo nessas feições permitiu sua classificação prioritariamente como baixa. A análise da vulnerabilidade aquíferos porosos, associada ao comprometimento muito alto da vazão outorgável para diluição, entretanto, relevou um quadro preocupante em uma área que vem sofrendo forte pressão do processo de urbanização não planejada. Os achados podem subsidiar a elaboração, implementação e execução de políticas públicas e planos de manejo ambiental, ressaltando a necessidade de cumprimento desses últimos. Também se relacionam fortemente com os direitos difusos, especialmente aquele ao meio ambiente equilibrado, e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial os de número 6, 13 e 15.

Palavras-chave: SIG. Cerrado. Erosão Hídrica. Vulnerabilidade à Contaminação de Aquíferos. GRASS. RUSLE. Mudanças Climáticas Globais.

ABSTRACT

This paper presents an integrated geotechnological approach to assessing the susceptibility to water erosion and the vulnerability to contamination of porous aquifers in a hydrographic unit located in the Cerrado region of the Federal District. Using advanced tools such as GRASS GIS and spatial modeling via RUSLE, thematic maps and indicators were generated. The results demonstrate that, although much of the area presents low susceptibility to erosion, features such as plateau edges can present high and very high susceptibility. Nevertheless, the presence of native or regenerating vegetation as land cover in these features allowed them to be classified primarily as low. The analysis of the vulnerability of porous aquifers, coupled with the very high impairment of the flow rate available for dilution, however, revealed a worrying situation in an area that has been under strong pressure from unplanned urbanization. The findings can support the development, implementation, and execution of public policies and environmental management plans, highlighting the need for compliance with these latter. They are also closely related to diffuse rights, especially the right to a balanced environment, and to the Sustainable Development Goals (SDGs), especially numbers 6, 13, and 15.

Keywords: GIS. Cerrado. Water Erosion. Vulnerability to Aquifer Contamination. GRASS. RUSLE. Global Climate Change.

RESUMEN

Este artículo presenta un enfoque geotecnológico integrado para evaluar la susceptibilidad a la erosión hídrica y la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos porosos en una unidad hidrográfica ubicada en la región del Cerrado del Distrito Federal. Utilizando herramientas avanzadas como GRASS GIS y modelado espacial vía RUSLE, se generaron mapas temáticos e indicadores. Los resultados demuestran que, si bien gran parte del área presenta baja susceptibilidad a la erosión, elementos como los bordes de meseta pueden presentar una susceptibilidad alta y muy alta. No obstante, la presencia de vegetación nativa o en regeneración como cobertura del suelo en estos elementos permitió clasificarlos principalmente como bajos. No obstante, el análisis de la vulnerabilidad de los acuíferos porosos, sumado al alto deterioro del caudal disponible para dilución, reveló una situación preocupante en un área que ha estado bajo fuerte presión por la urbanización no planificada. Los hallazgos pueden respaldar el desarrollo, la implementación y la ejecución de políticas públicas y planes de gestión ambiental, destacando la necesidad de su cumplimiento. También están estrechamente relacionados con los derechos difusos, en particular el derecho a un medio ambiente equilibrado, y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en particular los números 6, 13 y 15.

Palabras clave: SIG. Cerrado. Erosión Hídrica. Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos. PASTO. RUSLE. Cambio Climático Global.

1 INTRODUÇÃO

Muitas são as ameaças ambientais recentemente observadas, dentre elas, pode-se citar as mudanças climáticas e a urbanização desordenada. Em especial, bacias hidrográficas situadas em áreas urbanas e periurbanas têm sido muito impactadas, mesmo quando são importantes repositórios de água doce ou para o amortecimento de impactos ambientais negativos. Esse fato compromete a segurança hídrica, prejudicando não apenas o abastecimento para consumo humano, mas também atividades dependentes dos recursos hídricos como, por exemplo, a agricultura (Chelotti & Sano, 2021). Esse fato tem sido comumente observado no Cerrado brasileiro, que é o segundo maior bioma do país e, dada a endemia de suas espécies, um dos hotspots mundiais de biodiversidade. É ainda um dos principais celeiros hídricos da América do Sul, onde nascentes e divisores de água de algumas das principais regiões hidrográficas brasileiras são encontradas (MMA, 2022). No Distrito Federal (DF), que é a terceira unidade da federação com menor disponibilidade hídrica, e que sofre intenso processo de crescimento populacional e de urbanização (CODEPLAN, 2020), esse fato ganha maior relevância.

Embora seja berço de grande número de nascentes e importante divisor de águas do país, com a presença das regiões hidrográficas do Paraná, São Francisco e Tocantins/Araguaia, o DF apresenta hidrografia marcada pela presença de corpos d'água superficiais com pequena vazão e porte, muito marcados pela sazonalidade (Souza et al., 2012). Nesse contexto, a microbacia do Córrego Tamanduá, situada a sudoeste do DF, tem sofrido intensa pressão pela urbanização desordenada, embora apresente boa parte inserida na Zona de Uso Sustentável (ZUS) delineada no Plano de Manejo da APA Planalto Central. A ZUS, em tese, é destinada para a produção agropecuária sustentável, com severas restrições à instalação de outras atividades impactantes (ICMBIO, 2015). Um dos poucos pontos preservados ou em processo de regeneração avançado é uma unidade hidrográfica situada na Fazenda Tamanduá, sede da Embrapa Hortaliças, que realiza importantes serviços ecossistêmicos como a produção de água.

O presente trabalho é continuidade de dois outros realizados na mesma área (Lima et al., 2025a; Lima et al., 2025b). O primeiro teve como objetivo a caracterização pedogeomorfológica da área e o segundo a caracterização morfométrica da unidade hidrográfica, bem como a avaliação de tendências climáticas e sua influência sobre as estimativas de erosividade das chuvas (fator R da equação universal de perda de solo revisada - RUSLE). Os resultados do primeiro trabalho apontaram a presença de relevo diversificado, com a presença de áreas planas a suavemente onduladas nos Planaltos e Planaltos Intermediários, além de transições abruptas e com forte declive nas Bordas de Chapadas. Predominam os Latossolos Vermelho-Amarelos e Vermelhos, seguidos pelos Cambissolos Háplicos. Solos mais jovens como Neossolos Litólicos, Neossolos Flúvicos e Plintossolos podem ainda ser observados com menor frequência. Já o segundo trabalho confirmou a presença de vales encaixados, com hidrografia

marcada pela forma circular da unidade hidrográfica e alongada dos corpos d'água. Ainda, foi constatada alteração expressiva dos padrões de precipitação, com crescimento e intensificação no período recente (entre 2015 e 2024) dos totais anuais e dos eventos extremos de chuva e seca. Essas alterações climáticas resultaram em grande aumento da erosividade das chuvas, atingindo alto potencial segundo classificação proposta por Lima et al. (2023). O valor de erosividade encontrado supera aquele médio para o DF encontrado por Galdino (2015). Todo o cenário exposto tende a tornar a área muito susceptível aos processos erosivos, especialmente nas Bordas de Chapada, e vulneráveis à contaminação nas áreas aplainadas, sobretudo em casos de alteração do uso e ocupação dos solos, fatos esses que se pretende confirmar no estudo ora conduzido.

O uso de ferramentas de geotecnologias avançadas como o GRASS GIS permite a geração de produtos cartográficos oriundos de modelagem espacial com elevada acurácia. Elas são capazes ainda de atingir alto grau de detalhamento com a produção de informações sobre os limites de bacias hidrográficas, o delineamento de sub-bacias, a hidrografia, o relevo, a geomorfologia, entre outros. Ainda, permite a obtenção, de maneira fácil, rápida e precisa, de parâmetros necessários para o entendimento da hidrologia e para a aplicação da RUSLE, como o fator LS (comprimento e declividade da rampa). O uso desta ferramenta se justifica por sua robustez em modelagem hidrológica, podendo ainda ser utilizada em softwares de acesso aberto como o QGIS.

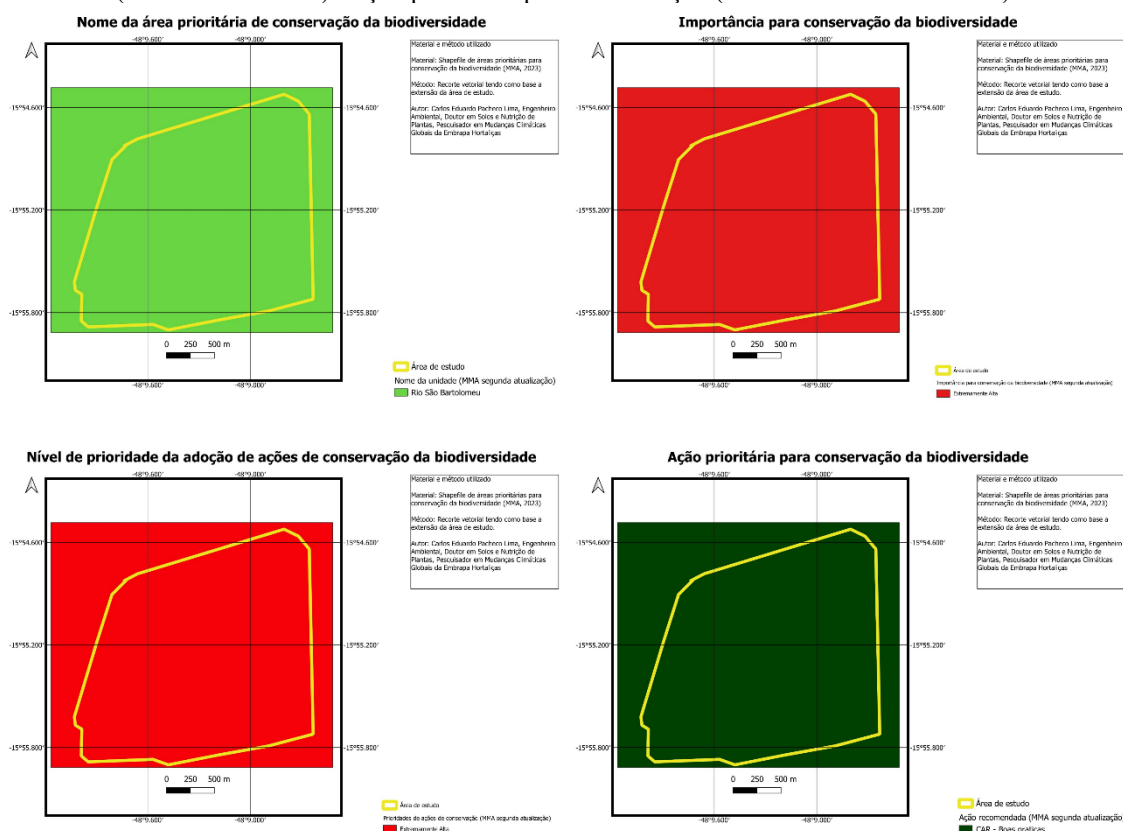
A RUSLE (Renard et al., 1997) tem sido amplamente utilizada para estimativa de processos erosivos no Brasil (Nachtigall et al., 2020; Silva et al., 2024) e em outras partes do mundo (Sakhraoui & Hasbaib, 2023; Barboza et al., 2024; Hamouch et al., 2025). Ela estima a perda média anual de solo considerando os seguintes fatores: LS – derivado da combinação do comprimento e da declividade das vertentes; R – fator erosividade das chuvas; K – fator erodibilidade dos solos; C – fator uso e cobertura do solo; P – fator práticas conservacionistas. A aplicação da RUSLE é versátil para o mapeamento de susceptibilidade à erosão em áreas diversas, sendo de ampla utilização em países como Estados Unidos, China, Brasil, Itália e Índia. Suas principais vantagens são a simplicidade operacional, o baixo custo de aplicação, a flexibilidade em diferentes escalas espaciais e a facilidade de integração com geotecnologias. Entretanto, também existem limitações inerentes ao caráter empírico do modelo, podendo superestimar ou subestimar as perdas de solo a depender da qualidade dos dados de entrada. Além disso, a RUSLE não considera processos como a deposição de sedimentos, erosão em sulcos profundos ou ocorrência de eventos extremos de chuva (Kumar et al., 2022).

A avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação, por sua vez, é importante como estratégia para o planejamento e avaliação de impactos ambientais, definição de uso e ocupação do solo, bem como para estabelecer planos de monitoramento de difusão vertical de contaminantes (Souza

et al., 2021). Ela é dependente de múltiplos fatores como a profundidade do aquífero, a permeabilidade e a reatividade dos solos, a declividade do terreno, a litoestatigrafia, entre outros (Silva Júnior e Pizani, 2003). No mapeamento em escala 1:100.000 realizado para todo o DF, disponível no Sistema Distrital de Informações Ambientais (SISDIA, 2023), a área de estudo está classificada como apresentando risco à contaminação variando entre muito baixa e alta, com risco de perda de recarga dos aquíferos apresentando comportamento similar. Porém, o baixo detalhamento dessas informações não permite que ações locais sejam implementadas, sendo necessário a geração de informações em escalas maiores, o que é realizado no presente estudo (Amaral et al., 2021). O uso de modelos para definição do grau de vulnerabilidade dos aquíferos, associado ao uso de geotecnologias, permite a espacialização desse indicador, resultando em maior eficácia dos planos de manejo ambientais (Yadav & Gupta, 2022).

Diante desse cenário, destaca-se a importância da atuação estatal por meio de políticas públicas ambientais voltadas à defesa dos direitos difusos – em especial o direito coletivo ao meio ambiente ecologicamente equilibrado para as atuais e futuras gerações, consagrado no artigo 225 da Constituição Federal. Instrumentos de planejamento territorial como planos de manejo, zoneamentos ecológico-econômicos e estratégias de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) devem ser implementados e, quando existentes, cumpridos. No caso em análise, a unidade hidrográfica estudada está localizada na Zona de Uso Sustentável (ZUS) da Área de Proteção Ambiental (APA) do Planalto Central (ICMBIO, 2015), regularmente cadastrada no Cadastro Ambiental Rural (CAR) da Embrapa Hortaliças e é classificada de nível de ações prioritárias de conservação ambiental extremamente alta, assim como sua importância para a conservação ambiental, pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudanças do Clima (MMA, 2023), o que, por si só, denota sua importância ambiental. A ação prioritária recomendada para essa área é o respeito ao CAR (Figura 1).

Figura 1 -Painel demonstrando o nome da área prioritária de conservação (Rio São Bartolomeu) onde a unidade hidrográfica está localizada, sua importância e o nível de prioridade de adoção de ações de conservação da biodiversidade (extremamente alta) e ação prioritária para conservação (Cadastro Ambiental Rural).



Fonte: MMA (2023).

Assim, o objetivo do presente trabalho foi de avaliar a susceptibilidade à erosão e a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos porosos de uma unidade hidrográfica da microbacia do Córrego Tamanduá, no Cerrado do DF, utilizando ferramentas avançadas de geotecnologias, bem como relacionar os resultados obtidos com a possível adoção e/ou elaboração de políticas públicas e relação com os direitos difusos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 2) está situada na microbacia do Córrego Tamanduá, parte da sub-bacia dos Rios Corumbá e Descoberto, em área de Cerrado no DF. Lima et al. (2025a) elaborou sua caracterização pedogeomorfológica. Ela está inserida no Planalto Central Brasileiro (PCB). Em termos climáticos, apresenta-se como tropical de savana (Aw) na classificação de Köppen-Geiger, com períodos seco e chuvoso muito bem definidos. O perímetro é de 8,71 km, o comprimento é de 8,67 km e a área de 4,73 km² (473 ha), estando compreendida entre as seguintes coordenadas geográficas: Ao Norte, 15°54'30,24''S; à Oeste, 48°09'51,84''O; ao Sul, 15°56'06''S e; à Leste, 48°08'34,08''O. A

amplitude altimétrica foi determinada Lima et al. (2025a), sendo de 124 m, com ponto máximo de 1.110 m de altitude e ponto mínimo de 986 m.

Figura 2 – Vista 3D sentido Leste-Oeste da área de estudo e delimitação dela (polígono amarelo).



Fonte: Os autores.

2.2 BASE DE DADOS

Para elaboração do presente estudo foram utilizados os seguintes materiais:

- Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM com resolução espacial de 30 m x 30 m;
- Curvas de nível com equidistância de 5 m, obtidas a partir do MDE;
- Imagens Google Satélite com resolução espacial de 0,5 m x 0,5 m;
- Mapa de classes de declividade elaborado por Lima et al. (2025a);
- Mapa de uso e ocupação do solo em escala 1:1.000 elaborado por Lima et al. (2025a);
- Mapa de reconhecimento semi-detalhado de solos em escala 1:10.000 elaborado por Lima et al. (2025a).
- Médias de precipitação total anual e total mensal de série histórica compreendida entre 2014 a 2025 e levantada por Lima et al. (2025b).
- Erosividade das chuvas determinado por Lima et al. (2025b) para o período 2014 a 2025.

Optou-se por utilizar série histórica mais recente para que houvesse uma representatividade das mudanças climáticas globais (MCGs) já em curso, que tem aumentado a ocorrência de eventos extremos e dos níveis de precipitações totais anuais, com consequente aumento da erosividade, conforme demonstrado por Lima et al. (2025b) para a área de estudo.

2.3 SOFTWARES UTILIZADOS

Para execução das análises geoespaciais foram utilizados os softwares Google Earth Pro e QGIS. O GRASS GIS foi operado como complemento em ambiente GRASS/QGIS.

2.4 PROCESSAMENTO E ANÁLISES ESPACIAIS

Inicialmente o MDE originário da imagem SRTM com 30 m x 30 m de resolução espacial teve suas depressões espúrias corrigidas, utilizando o algoritmo *r.fillnulls*, do complemento GRASS/QGIS. Posteriormente, utilizando o *r.watershed* com o MDE corrigido como camada de entrada e tamanho mínimo de células exteriores de 10, foram gerados o mapa de direção de drenagem e os índices topográficos LS, declividade, índice de poder de fluxo (Stream Power Index – SPI) e acumulação de fluxo (número de células que drenam). Ainda foram gerados os mapas de unidades hidrológicas e de segmentos de fluxo. Embora os mapas estejam apresentados no sistema de projeção WGS84, para cálculo da RUSLE foram reprojitados para coordenadas métricas (SIRGAS2000/UTM).

2.5 DETERMINAÇÃO DA PERDA DE SOLO POR EROSÃO E MODELAGEM DA SUSCEPTIBILIDADE A ESSE PROCESSO

A estimativa da perda anual de solo por erosão foi realizada a partir da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE). Sua fórmula é a seguinte:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Onde:

A é a perda de solo ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$)

R é o fator erosividade das chuvas ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$).

K é o fator erodibilidade do solo ($t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$).

LS é o fator comprimento-declividade

C é o fator uso e cobertura do solo.

P é o fator práticas conservacionistas.

O fator R foi determinado por Lima et al. (2025b) com base em série histórica recente de precipitações, entre 2015 e 2024, sendo o valor igual a $9239 MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$, valor que representa um aumento de $1.921 MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$ em relação ao último período para o qual esse valor havia

sido calculado (2002 a 2012). Por representar uma diferença tão expressiva e por já estarmos vivendo as MCGs é que optou-se por esse valor representativo da década recente.

Os fatores K e C, por sua vez, foram definidos com base em revisão de literatura e opinião de especialistas. A Tabela 1 mostra os valores de K assumidos no presente estudo, de acordo com as classes de solo existentes na área e mapeadas em escala 1:10.000 por Lima et al. (2025a). Já a Tabela 2 mostra os valores da reclassificação do fator C para cada classe de uso e ocupação dos solos mapeado por estes mesmos autores em escala 1:1.000, a partir de imagens de satélite com resolução de 0,5 m x 0,5 m.

Tabela 1 – Fatores erodibilidade dos solos (K) da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) utilizados no presente trabalho.

Classe de solo	K (t·ha·h / ha·MJ·mm)
Latossolo Vermelho	0,025
Cambissolo Háplico	0,030
Neossolo Litólico / Plintossolo Pétrico	0,030
Latossolo Vermelho-Amarelo	0,020
Solos Hidromórficos / Neossolos Flúvicos	0,035

Fonte: Os autores.

Tabela 2 – Valores do fator C utilizados no presente trabalho

Uso e ocupação do solo	Fator C
Formações florestais e Cerrado sensu stricto	0,01
Formações campestres e Campo Cerrado	0,03
Agricultura (com adoção de plantio direto)	0,12
Solo exposto	0,40
Áreas urbanas	1,00

Fonte: Os autores.

Já o fator LS foi determinado utilizando como base o MDE corrigido da área, por meio do algoritmo r.watershed em ambiente GRASS/QGIS. O fator P, por sua vez, seguiu os valores que constam na Tabela 3. Por meio de álgebra espacial, utilizando a calculadora raster do QGIS, a perda de solo foi então calculada.

Tabela 3 – Valores do fator P utilizados no presente trabalho

Práticas adotadas	Fator P
Adoção de práticas conservacionistas como o plantio direto	0,50
Sem adoção de práticas conservacionistas	1,00

Após o cálculo da estimativa da perda anual de solo por erosão hídrica, os valores foram reclassificados de acordo com as faixas dispostas na Tabela 4, utilizando para isso a calculadora raster do QGIS, com vistas à geração do mapa de susceptibilidade à erosão.

Tabela 4 - Reclassificação dos valores do Fator A para mapeamento de susceptibilidade à erosão da área de estudo.

Classe	Intervalo (kg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Valor atribuído
Muito Baixa	0 – 200	1
Baixa	200 – 500	2
Moderada	500 – 1.000	3
Alta	1.000 – 2.000	4
Muito Alta	>2.000	5

Fonte: Os autores.

2.6 DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS POROSOS À CONTAMINAÇÃO

Para a determinação da vulnerabilidade dos aquíferos porosos à contaminação foi utilizada a seguinte equação, proposta no presente trabalho para a realidade da área de estudo.

$$IV = (S \times 0,25) + (T \times 0,15) + (L \times 0,10) + (D \times 0,25) + (R \times 0,25)$$

Onde:

S = capacidade de infiltração de água no solo

T = declividade

L = litologia superficial

D = profundidade + condutividade hidráulica do aquífero poroso

R = reatividade geoquímica do solo

Para as variáveis S (Tabela 5) e R (Tabela 6) foram atribuídas notas de 0 a 10, utilizando como base o mapa de solos da área de estudo em escala 1:10.000 (Lima et al., 2025a). A definição das notas atribuídas ao fator S foi realizada com base nos trabalhos de Lima et al. (2020), Murta et al. (2022) e Ottoni et al. (2025). Já a definição do fator R foi realizada com base no trabalho de Lima (2007).

Tabela 5 – Reclassificação do fator S para as principais classes de solo presentes no mapeamento 1:10.000 da área de estudo

Classe do solo	Nota (S)
Latossolo Vermelho (LV)	9 (elevada capacidade de infiltração)
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)	7 (capacidade de infiltração intermediária)
Cambissolo Háplico	6 (capacidade de infiltração intermediária)

Fonte: Os autores.

Tabela 6 – Reclassificação do fator R para a reatividade dos solos presentes na área de estudo

Classe	Nota (R)
Latossolo Vermelho	3 (alta reatividade)
Cambissolo Háplico	9 (baixa reatividade)

Latossolo Vermelho-Amarelo	4 (reatividade ainda alta, mas levemente menor que LV)
----------------------------	--

Fonte: Os autores.

O fator T seguiu a lógica da definição das classes de declividade, segundo SIBICS (2025) e, seus valores, foram atribuídos de acordo com o que está disposto na Tabela 7. O fator L, por sua vez, seguiu os valores atribuídos na Tabela 8, de acordo com o mapa de litoestatigrafia da área disponível no repositório RIGEO. O fator D (Tabela 9), por sua vez, foi atribuído em função do mapa de hidrogeologia porosa da área de estudo, também disponível no repositório RIGEO e da descrição das unidades hidrogeológicas porosas disposta no Atlas Ambiental do Distrito Federal, elaborado pelo IPEDF (IPEDF, 2020).

Tabela 7 – Reclassificação do fator T extraído do mapa de declividade da área de estudo

Declividade	Classe de relevo	T
0-3	Plano	10
3-8	Suave-ondulado	8
8-20	Ondulado	6
20-45	Forte-ondulado	4
45-75	Montanhoso	2
>75	Escarpado ou forte-montanhoso	1

Fonte: Os autores.

Tabela 8 – Reclassificação do fator L para a litoestatigrafia da área de estudo

Litologia superficial associada	Nota (L)
Cobertura detrito-laterítica	9
Quartzitos finos/médios, metassedimentos e xistos	4

Fonte: Os autores.

Tabela 9 – Reclassificação do fator D para a profundidade dos aquíferos porosos da área de estudo

Unidade hidrogeológica porosa associada	Profundidade do lençol	Condutividade hidráulica	Nota (D)
P1	Profundo (> 5 m)	Alta	4
P4	Muito raso (<1 m)	Baixa	7

Fonte: Os autores.

Após o cálculo do índice IV, os valores foram então classificados conforme disposto na tabela 10.

Tabela 10 – Reclassificação final do índice de vulnerabilidade IV e classificação dela

Índice final	Classe
8 - 10	Muito alta vulnerabilidade
6 - 8	Alta vulnerabilidade
4 - 6	Moderada vulnerabilidade
2 - 4	Baixa vulnerabilidade
<2	Muito baixa vulnerabilidade

Fonte: Os autores.

2.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E INTERPRETAÇÃO DE GRANDE VOLUME DE DADOS

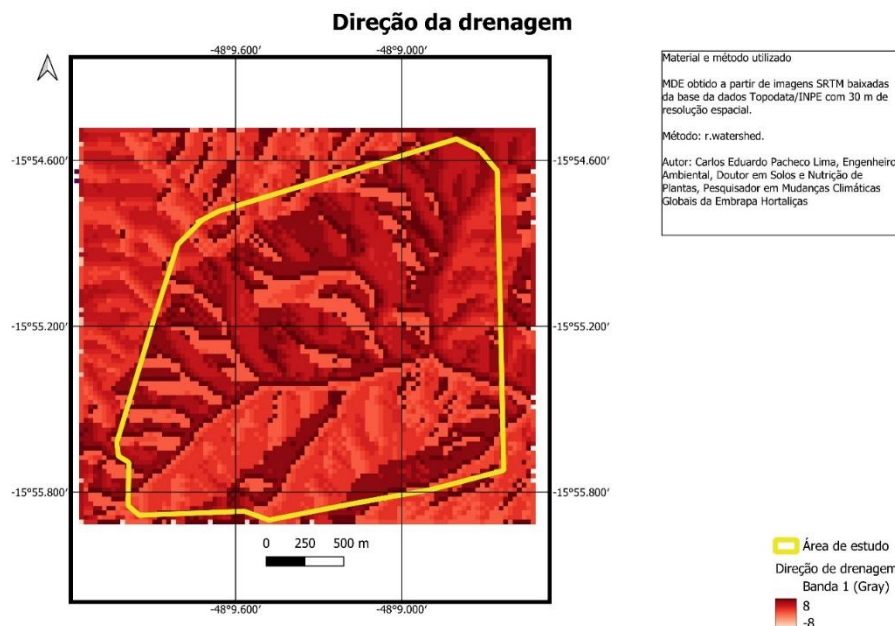
As análises estatísticas, geração de gráficos, bem como a interpretação do grande volume de dados gerados no presente trabalho foram realizadas com o auxílio da Inteligência Artificial Generativa (IA) Data Analyst. Faz-se necessário ressaltar, entretanto, que todos os processos foram supervisionados e analisados criticamente por humanos e que os dados utilizados foram obtidos de acordo com os processos previamente descritos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra a direção de drenagem da unidade hidrográfica que é objeto de estudo deste artigo. Essa Figura, bem como a maior parte das outras que comporão o conjunto de resultados desse artigo, são derivadas do MDE corrigido da área. O uso de MDE a partir de imagens SRTM foi mostrado como técnica válida para análise morfométrica de bacias hidrográficas no território brasileiro por Oliveira et al. (2010). O mapa representado pela Figura 3 é resultado do método determinismo de fluxo baseado na célula de maior declividade entre oito vizinhos, calculado pelo r.watershed (Grass Development Team, 2024). Cada valor representa uma das oito direções possíveis de escoamento (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).

A legenda do mapa mostra que cores mais claras indicam valores mais negativos, enquanto cores mais escuras indicam valores positivos. A partir da análise da imagem é possível verificar um padrão claro de drenagem dendrítica, confirmando os achados anteriores de Lima et al. (2025a) e Lima et al. (2025b). Os canais principais convergem para um eixo, que é exultório do Córrego Tamanduá no Rio Ponte Alta, em direção Sudeste-Leste e os canais secundários em direção Leste-Sudeste, Nordeste-Leste e Norte-Leste. A parte Nordeste e Norte, já fora dos limites da área de estudo, funcionam como áreas de recarga para a unidade hidrográfica. Percebe-se claramente que a área de estudo concentra a drenagem, razão pela qual fica claro a grande existência de nascentes na área. Esse fato corrobora a necessidade de conservação da área para fins de abastecimento regional, bem como para amortecimento de possíveis impactos negativos, conforme apontado por Moreira et al. (2019) e por Ferreira et al. (2020). O padrão de escoamento em vales encaixados, conforme discutido nos dois trabalhos anteriores, também fica claro a partir da análise da imagem. A densidade de drenagem também parece ser compatível com aquelas características classificadas de moderada a alta, própria de áreas com maior energia de relevo, conforme mostrado por Lima et al. (2025a). Esses achados estão de acordo com outros trabalhos conduzidos para o Cerrado como aqueles elaborados por Capoane & Silva (2020) e Costa & Leite (2023).

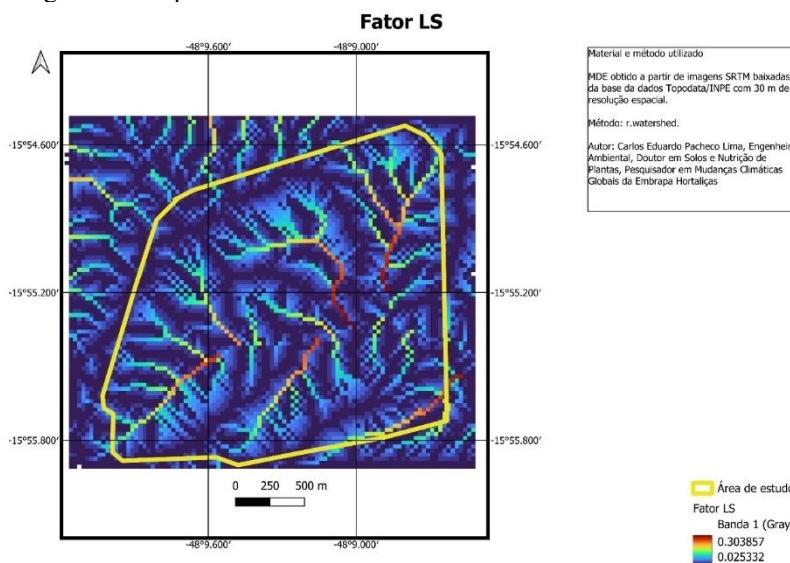
Figura 3 – Mapa da direção de drenagem encontrada na área de estudo.



Fonte: Os autores.

A Figura 4, por sua vez, refere-se à determinação do fator LS (comprimento-declividade), componente da RUSLE, que também foi determinado pelo r.watershed. A determinação do fator LS no GRASS é realizada a partir da derivação da acumulação de fluxo, que é obtida pelo método D8. O módulo então retorna valores combinados de declividade e comprimento utilizando a equação modificada de Moore & Burch (1986) para o cálculo. A abordagem considera a discretização espacial da bacia e a topologia raster do MDE (GRASS DEVELOPMENT TEAM, 2024).

Figura 4 – Mapa dos valores do fator LS encontrados na área de estudo.

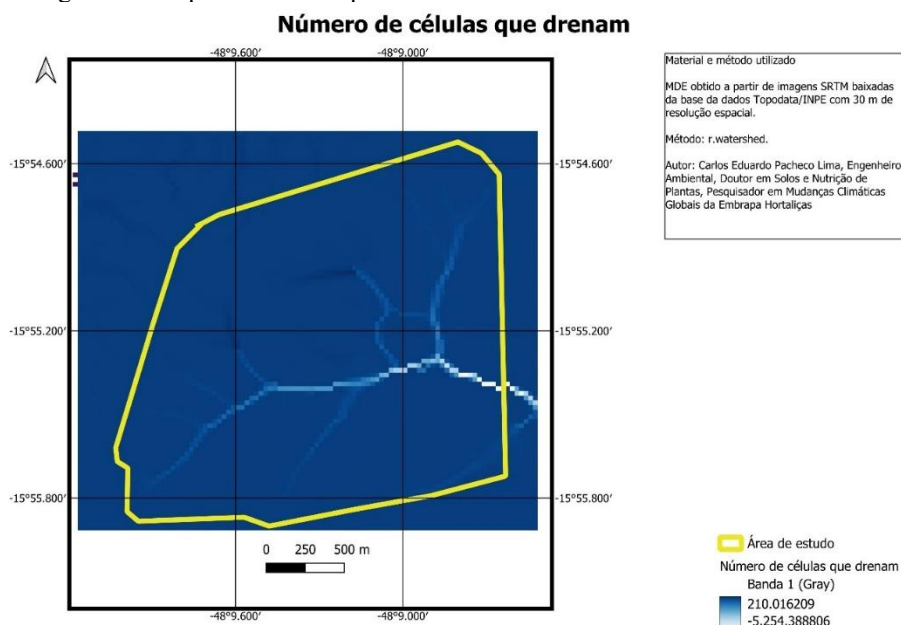


Fonte: Os autores.

O fator LS é um dos principais indicadores de suscetibilidade à erosão hídrica, sendo obtido a partir dos dados do MDE corrigido. A legenda do mapa aponta para valores mais baixos em tom azul e mais altos em tom vermelho, com valores intermediários crescendo entre verde e amarelo. Ela ainda aponta valores variando entre 0,025 e 0,303, demonstrando a variação do relevo local. Áreas aplainadas recebem valores mais baixos, enquanto áreas mais movimentadas recebem valores mais altos. A análise da Figura 4 mostra que as áreas que apresentam maiores valores do fator LS são compatíveis com aquelas representativas das Bordas de Chapada e Vales Dissecados, enquanto as áreas com menores valores estão associadas aos Planaltos e Planaltos intermediários. Esse padrão está de acordo com aquele observado por Lima et al. (2025a) quando da compartimentação pedogeomorfológica da área de estudo e constitui padrão comumente encontrado no Planalto Central Brasileiro (PCB) e foi encontrado também para o DF (Martins et al., 2024). As áreas com maiores valores do fator LS são mais suscetíveis à erosão.

A Figura 5 apresenta o mapa relativo ao número de células drenantes. Ele representa o acúmulo de fluxo por célula baseado no MDE corrigido, ou seja, o número de células a montante que contribuem para cada célula avaliada. Permite a delimitação de drenagens e avaliação de potenciais canais de escoamento concentrado.

Figura 5 – Mapa contendo a quantidade de células drenantes na área de estudo.



Fonte: Os autores.

A avaliação da Figura 5 mostra que os valores mais claros indicam células com maior contribuição de fluxo, enquanto aquelas mais escuras contribuem com maior drenagem para as

primeiras. As linhas de drenagem representadas pelas células mais claras coincidem com a hidrografia, o que reforça a coerência do modelo. A interpretação do modelo também reforça o encaixe dos corpos d'água e o padrão de drenagem que, mais uma vez, mostra-se dendrítico bem definido, sendo essas feições típicas de áreas sob controle litológico homogêneo e dissecadas, coerentes com os achados pedogeomorfológicos. Evidencia ainda, complementando informações anteriores, que a área de estudo concentra parte significativa do escoamento, sugerindo que as nascentes e os canais principais estão contidos nela. É, portanto, uma área de relevante contribuição hídrica.

Esses fatos reforçam a necessidade de conservação e de manutenção do CAR como originalmente cadastrado pela Embrapa Hortaliças, em que essa área é classificada como remanescente de vegetação nativa e de APPs, em consonância com a recomendação do MMA (2023). Nesse documento, o Ministério do Meio Ambiente e das Mudanças do Clima classificou a área como de importância extremamente alta para a conservação da biodiversidade, mesma classificação atribuída à urgência de adoção de boas práticas que, segundo o próprio ministério, deve ser o cumprimento do CAR. Silva et al. (2024) demonstram que estratégias de conservação de nascentes como a restauração com o favorecimento da regeneração natural de espécies nativas são essenciais para a manutenção do potencial hidrológico das nascentes.

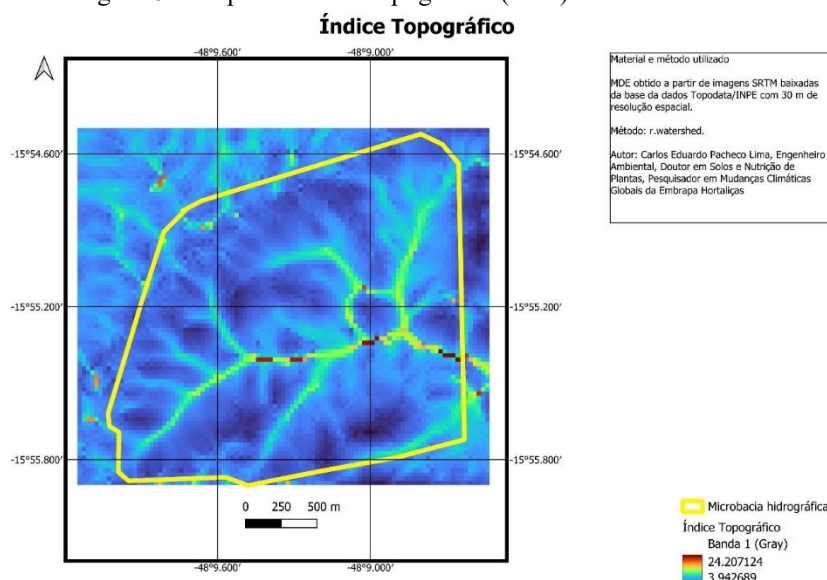
Por captar a maior parte da dinâmica hidrológica local, um eventual comprometimento da área poderia gerar impactos diretos sobre a qualidade e quantidade de água, causando prejuízos em nível regional, uma vez que os recursos hídricos superficiais ali presentes apresentam ainda boa qualidade num contexto regional onde o Rio Ponte Alta, exultório do Córrego Tamanduá, já se encontra como Classe 3 e com processos de assoreamento e sedimentação avançados, segundo informações disponíveis no Sistema Distrital de Informações Ambientais (SISDIA – DF) e em Rodrigues et al. (2024).

A Figura 6 apresenta o Índice Topográfico. Esse índice, também conhecido como Índice Topográfico de Umidade (Topographic Wetness Index – TWI) ou Índice de Umidade Topográfica, é amplamente utilizado em hidrologia e geomorfologia para representar o potencial de acúmulo de água devido a posição topográfica. Nesta figura, os tons azuis apresentam menor potencial de acúmulo de água, enquanto tons vermelhos apresentam maior potencial, com faixas intermediárias crescendo entre verde e amarelo.

Nela pode ser observado que os valores mais elevados de TWI são observados dentro da área de estudo (unidade hidrográfica avaliada), se concentrando ao longo dos canais e da drenagem principal e das secundárias. Isso indica zonas de maior convergência de fluxo superficial, com elevada

tendência à saturação hídrica do solo, tornando-as críticas para a regulação hídrica, formação de nascentes e manutenção da umidade do solo.

Figura 6 – Mapa de Índice Topográfico (TWI) da área de estudo.



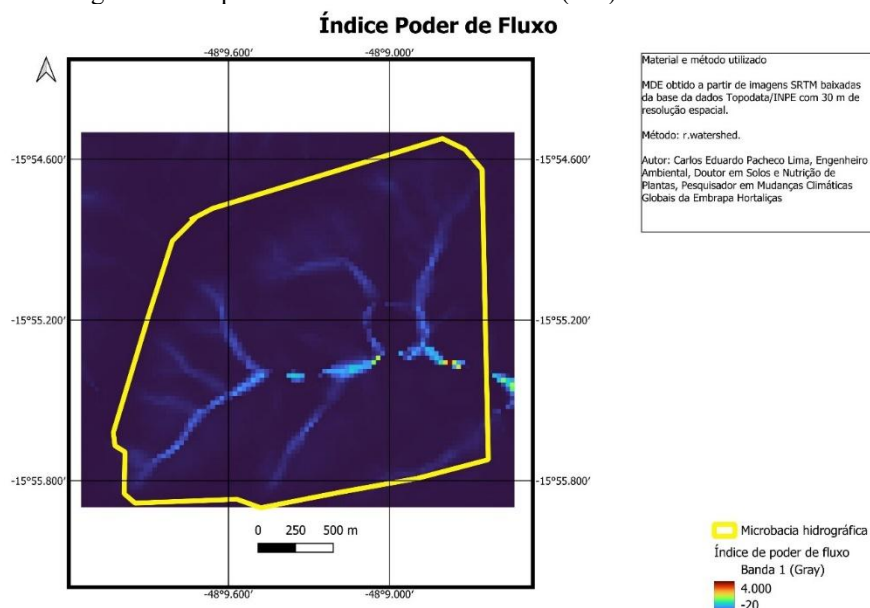
Fonte: Os autores.

As áreas mais distantes dos canais, por sua vez, indicam locais de maior altitude e menor acúmulo de fluxo, o que confirma seu papel como zona de recarga hídrica anteriormente discutido. A organização espacial é compatível com a morfologia dissecada já discutida anteriormente nesse trabalho e nos outros dois conduzidos na mesma área (Lima et al., a e b). A importância das áreas de recarga para o cerrado é discutida por Rodrigues & Cambraia Neto (2021).

O padrão observado reforça o papel estratégico da área para manutenção da disponibilidade hídrica regional, seja ela qualitativa ou quantitativa, pois atua como zona de captação, retenção e regulação hídrica, fato esse especialmente relevante dado o contexto de pressão para urbanização que a área vem sofrendo e do seu papel como afluente do Rio Ponte Alta. Cabe ressaltar que o TWI tem sido utilizado para ações de planejamento ambiental e de uso e ocupação do solo, como pode ser observado nos trabalhos de Santos & Coide (2016) e Hung et al. (2016).

A Figura 7 traz o mapa do Índice de Poder de Fluxo (Stream Power Index – SPI). Esse índice reflete o potencial de erosão da água ao longo da superfície. Ele combina o declive do terreno com a área de contribuição de fluxo, sendo útil para identificar áreas com maior energia disponível para o transporte de sedimentos.

Figura 7 – Mapa do Índice de Poder de Fluxo (SPI) da área de estudo.

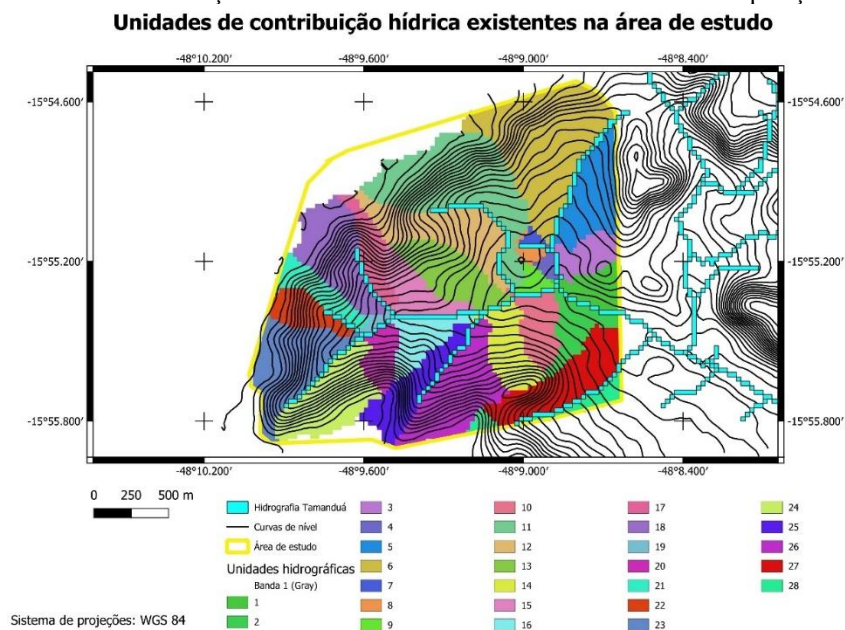


Fonte: Os autores.

O mapa mostrado pela Figura 7 indica que os valores mais altos se concentram nos canais principais e pontos de convergência de drenagem, que são caracterizados por apresentar maiores declividades e escoamento superficial. Nesses pontos estão as zonas críticas de maior energia de fluxo, com potencial para processos erosivos mais intensos. Demandam, portanto, maior atenção no planejamento ambiental e de uso e ocupação do solo. Existe coerência entre o SPI e os padrões topográficos e hidrológicos anteriormente encontrados, reforçando a confiabilidade do modelo. O aumento do agravamento dos processos erosivos em áreas com elevada energia do relevo em compartimentação geomorfológica do Cerrado devido a mudanças do uso e ocupação do solo foi claramente demonstrado por Rodrigues (2002).

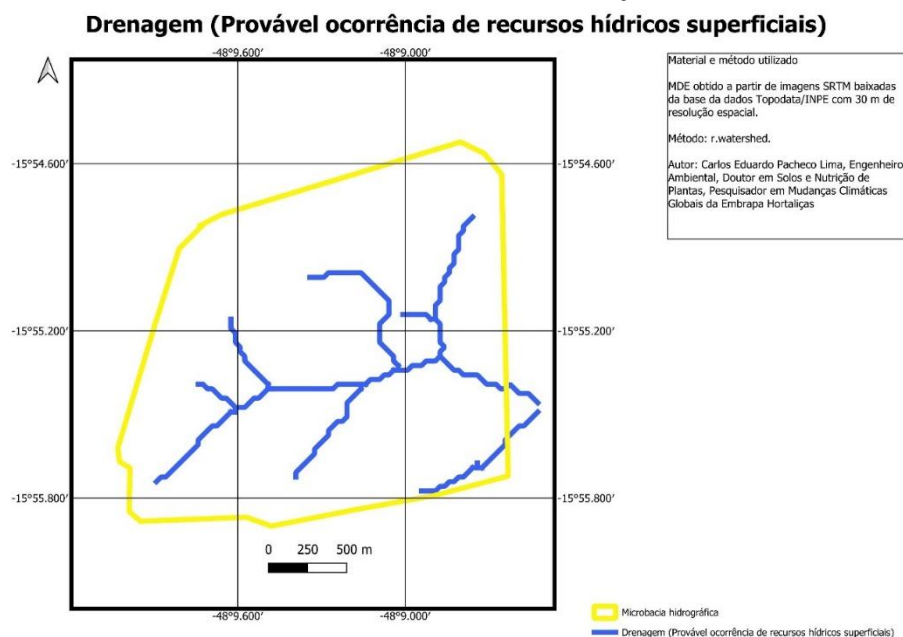
A compartimentação da área de estudo em unidades hidrológicas é apresentada na Figura 8. Elas representam pequenas unidades internas responsáveis pelo direcionamento do escoamento superficial até a drenagem principal, que é o Córrego Tamanduá.

Figura 8 – Unidades de contribuição hídrica existentes na área de estudo com sobreposição das curvas de nível.



A divisão da área em 28 outras unidades hidrológicas menores mostram uma alta compartimentação. É ainda possível visualizar o perfil convexo da dissecação do relevo, fundamentalmente encontrado nas Bordas de Chapada. Esse é um padrão tipicamente encontrado em áreas com relevo dissecado e drenagem bem definida (Lazlo, 2016; Manoel & Rocha, 2017), suportando os resultados anteriores. A organização em várias outras unidades hidrológicas é um indicativo da efetividade da área em atuar como zona de captação hídrica. A sobreposição com as curvas de nível permite suportar a afirmação de que o escoamento se organiza dos topos altos e aplainados em direção aos vales encaixados, reforçando, mais uma vez, o papel da área na manutenção do serviço ecossistêmico de produção de água. Leite & Brito (2012), avaliando as relações entre geomorfologia e hidrologia de uma área de Cerrado no norte de Minas Gerais, verificaram o papel fundamental que as planícies fluviais apresentam para a manutenção do fluxo hídrico na região. É possível perceber que, sobretudo a norte e a nordeste, há uma área não contribuinte para a drenagem da unidade hidrológica em estudo, o que está ligado à divisão entre as sub-bacias hidrográficas do Rio Corumbá, ao qual a unidade pertence, e do Descoberto, fato esse verificado quando da sobreposição do mapa de sub-bacias hidrográficas do DF com a área de estudo. Os achados até agora mostrados condizem com aqueles dos trabalhos de Lima et al. (2025a e b) e com a rede de drenagem traçada utilizando o r.watershed, que aponta para drenagem dendrítica correndo em planícies fluviais e leito encaixado, conforme pode ser observado na Figura 9.

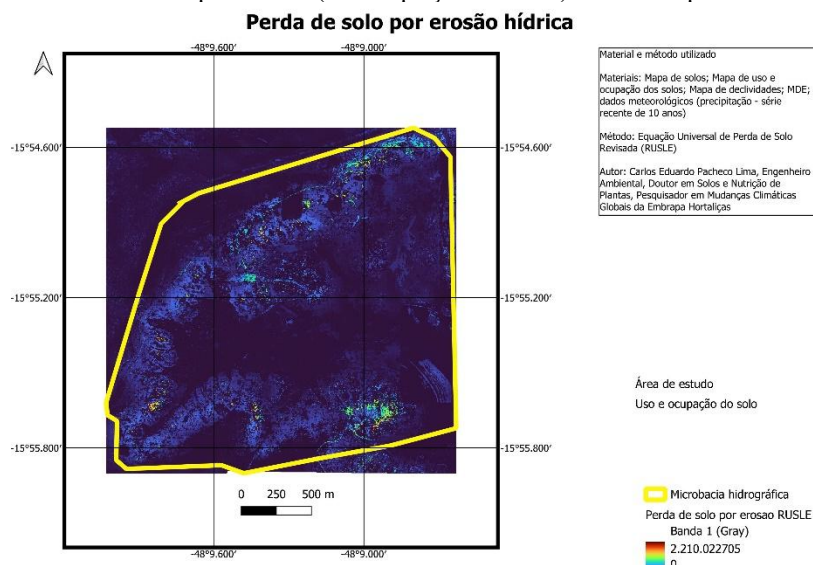
Figura 9 – Provável ocorrência de recursos hídricos superficiais na área de estudo, determinadas pelo algoritmo r.watershed em ambiente GRASS/QGIS.



Fonte: Os autores.

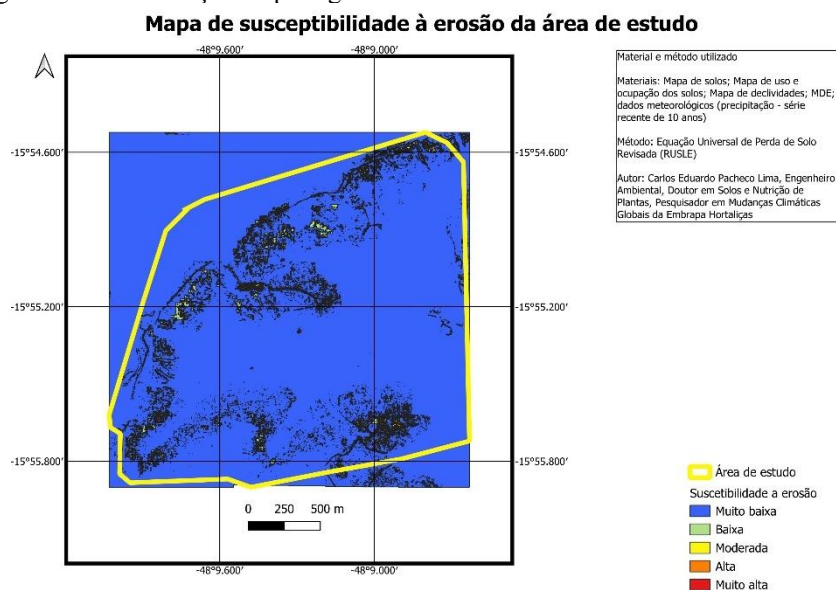
As perdas de solo por erosão, bem como o mapeamento de suscetibilidade, são mostradas nas Figuras 10 e 11, respectivamente. Observa-se que as áreas com maior perda de solo e maior suscetibilidade à erosão são indicadas por cores mais quentes em ambos os mapas, coincidindo com aquelas áreas com relevo mais movimentado e onde predominam Cambissolos Háplicos, de acordo com a avaliação pedogeomorfológica elaborada por Lima et al. (2025a). A coerência entre os mapas reforça a confiabilidade do modelo adotado (RUSLE). Ainda, os padrões observados possivelmente foram muito influenciados pelo uso e ocupação do solo, sobretudo pelo elevado grau de conservação da área, que está em processo de regeneração do Cerrado (Mapa de Uso e Ocupação do Solo – Lima et al., 2025a). Nesse sentido, mesmo a maior parte das áreas consideradas frágeis, como anteriormente mencionado, tiveram predomínio de baixa a moderada perda de solo e suscetibilidade à erosão, fato esse derivado principalmente dos baixos valores observados para fator C. A distribuição das classes de suscetibilidade em porcentagem da área ocupada está disposta na Tabela 11.

Figura 10 – Perdas de solo por erosão (A da equação RUSLE) estimadas para a área de estudo.



Fonte: Os autores.

Figura 11 = Distribuição na paisagem das classes de suscetibilidade à erosão hídrica.



Fonte: Os autores.

Tabela 11 – Distribuição, em percentual da área, das classes de suscetibilidade à erosão hídrica.

Faixa de perda de solo (t/ha/ano)	Área (ha)	Proporção aproximada (%)
0.0 – 200.0	160,49 ha	33,9%
200.0 – 500.0	236,74 ha	50,0%
500.0 – 1000.0	53,87 ha	11,4%
1000.0 – 2000.0	20,79 ha	4,4%
>2000.0	1,71 ha	0,4%

Fonte: Os autores.

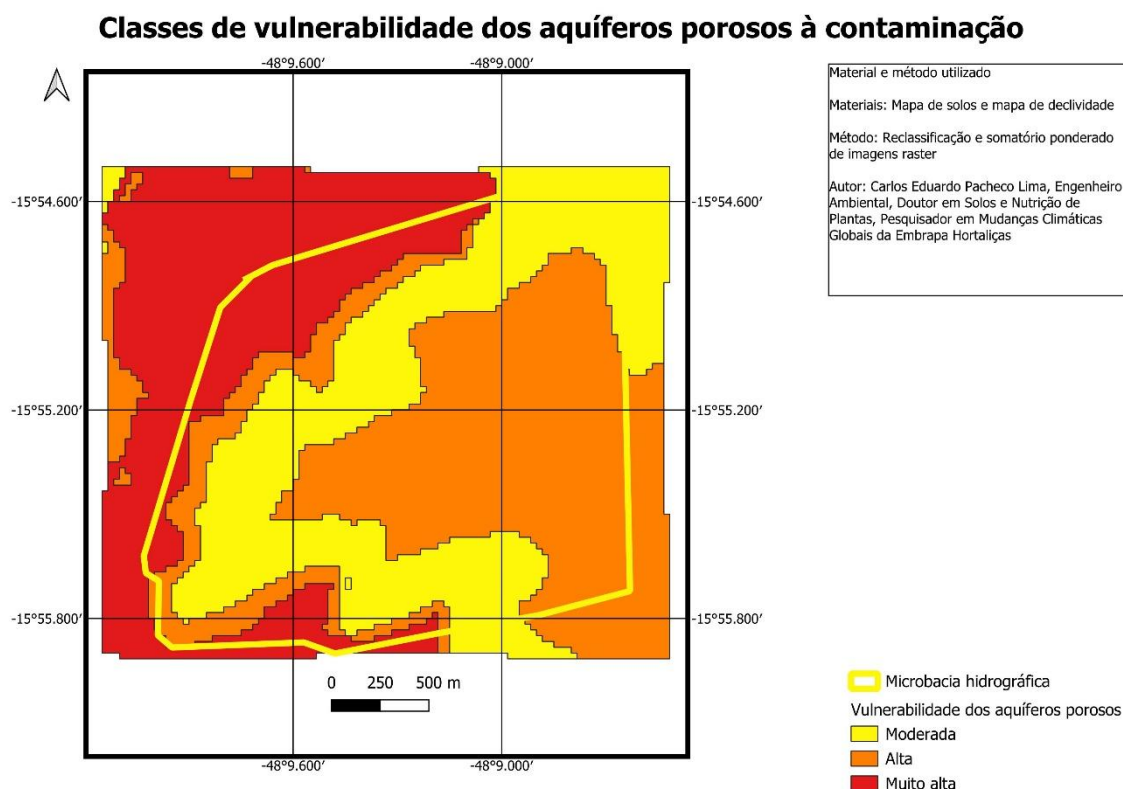
O valor médio de perda de solo na área foi de 232,42 t.ha⁻¹.ano⁻¹, classificado como baixo. O valor mínimo foi de 0 t.ha⁻¹.ano⁻¹ e o valor máximo de 5849,44 t.ha⁻¹.ano⁻¹, sendo este observado em

uma pequena mancha de relevo montanhoso a sudoeste da área. O desvio padrão foi de 372,67 e o intervalo de confiança a 95% foi de 228,75 t.ha⁻¹.ano⁻¹ a 236,10 t.ha⁻¹.ano⁻¹, valores estes determinados por álgebra espacial utilizando o QGIS. Portanto, a perda de solo média na área pode ser classificada como baixa, mas com valor máximo classificado como muito alto e ocorrências pontuais de manchas classificadas como de alta suscetibilidade à erosão. Esse cenário, contudo, pode mudar caso a vegetação seja suprimida e haja a instalação de estruturas ou de usos que causem impermeabilização ou compactação do solo, expondo os frágeis solos e o elevado declive das Bordas de Chapada.

Barbosa et al. (2024), ao avaliar as perdas de solo no Cerrado piauiense, encontraram maiores taxas em áreas declivosas com solos frágeis, além de evidenciarem o papel protetor da vegetação natural ou em restauração sobre a redução dos processos erosivos. Schwambach et al. (2024), por sua vez, identificou que solos comumente encontrados em áreas movimentadas como os Cambissolos são mais suscetíveis à erosão, processo esse que pode ser amenizado pela presença de vegetação natural em áreas conservadas ou em regeneração. Estes autores ainda destacam que o uso da RUSLE gerou padrão de mapeamento condizente com as características pedogeomorfológicas regionais. O papel protetivo da vegetação natural sobre os processos erosivos também foi constatado por Rios et al. (2024).

A Figura 12 apresenta o mapa de vulnerabilidade à contaminação gerado para a área de estudo.

Figura 12 – Mapa de vulnerabilidade dos aquíferos porosos à contaminação em unidade hidrográfica em Cerrado do DF.



Fonte: Os autores.

A vazão outorgável para diluição se apresenta na totalidade da unidade hidrográfica estudada classificada como de comprometimento muito alto, ou seja, superior a 70% da vazão disponível já se encontra alocada para tal, segundo informações disponíveis espacialmente no SISDIA-DF. Isso implica em uma capacidade limitada de assimilação de efluentes, com alto risco de perda da qualidade da água, especialmente em períodos de estiagem ou em caso de uso intensivo (Monfared et al., 2017; Patil et al., 2022). Essa condição crítica impõe restrições à emissão de novas outorgas para fins de diluição e reforça a necessidade de um rígido controle sobre o lançamento de efluentes (Speed et al., 2013).

Os resultados deste estudo evidenciam a importância de integrar o planejamento territorial e a gestão ambiental por meio de políticas públicas voltadas à conservação do solo e da água. A associação com os resultados encontrados por Lima et al. (2025 a e b) ainda indicam riscos concretos ao direito difuso de todos ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, conforme previsto no Art. 225 da Constituição Federal. Além disso, os achados dialogam com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 6 (Água potável e saneamento), ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e ODS 15 (Vida terrestre). Tais evidências justificam a necessidade de

políticas de uso do solo mais restritivas, proteção de áreas de recarga, manutenção de APPs e estabelecimento e respeito aos planos de manejo já existentes.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho fecha uma trilogia de estudos conduzidos na mesma área, complementando os trabalhos de Lima et al. (2025 a e b). Embora a susceptibilidade à erosão da maior parte da área seja baixa, existem feições como as Bordas de Chapadas que apresentam classificação alta e muito alta. Boa parte dessas feições, entretanto, apresentaram susceptibilidade baixa em razão, principalmente, da manutenção da vegetação nativa ou em regeneração. A vulnerabilidade à contaminação de aquíferos porosos, entretanto, apresentou-se como preocupante, especialmente quando do contexto atual de comprometimento muito alto da vazão outorgável para diluição.

Esses achados reforçam a necessidade urgente de implementação de políticas públicas e cumprimento dos planos de manejo existentes. Destaca-se, portanto, a forte ligação dos achados com o respeito aos direitos difusos e ao cumprimento dos ODS.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, Berenice de Paula; VALLE JUNIOR, Renato Farias do; MACHADO, Emerson Ribeiro; SIQUEIRA, Hygor Evangelista. Vulnerability analysis of underground aquifers to contamination using the DRASTIC method and risk determination. *Caminhos de Geografia, Uberlândia*, v. 22, n. 84, p. 227–245, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/RCG228457049>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- BARBOSA, Wellynne Carla de Sousa; GUERRA, Antonio José Teixeira; VALLADARES, Gustavo Souza. Soil erosion modeling using the Revised Universal Soil Loss Equation and a Geographic Information System in a watershed in the northeastern Brazilian Cerrado. *Geosciences, Basel*, v. 14, n. 3, art. 78, p. 1–28, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/geosciences14030078>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- BARBOZA, Elgar; RAYMUNDO, Augusto Abraham; VALQUI, Leandro; SALAS LOPEZ, Rolando. Estimation of soil loss using RUSLE model and GIS tools: Case study in the Jucusbamba Micro-Watershed (Amazonas, NW Peru). *Revista Ambiente & Água, Taubaté*, v. 19, e2998, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2998>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- CAPOANE, Viviane; SILVA, Daiane Alencar da. Avaliação de parâmetros geomorfométricos derivados de modelos altimétricos de diferentes fontes e resoluções: estudo de caso da bacia hidrográfica do córrego Lajeado, Campo Grande, MS. *Revista Brasileira de Geografia Física, Recife*, v. 13, n. 2, p. 674–690, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- COSTA, Edwina Santos da; LEITE, Emerson Figueiredo. Análise morfométrica na bacia hidrográfica do Ribeirão Vermelho-MS. *Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros – Seção Três Lagoas*, v. 1, n. 38, p. 124–147, jan. 2024. Disponível em: <https://revista.agbtrslagoas.org>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- FERREIRA, Fernanda Laurinda Valadares; VIEIRA, Francielle de Cássia Coelho; SOUSA, Izabelle de Paula; FIGUEIREDO, Flávio Pimenta de; FRAZÃO, Leidivan Almeida. Diagnóstico ambiental de nascentes em uma bacia hidrográfica do Cerrado brasileiro. *Caderno de Ciências Agrárias*, v. 12, p. 1–11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2020.20739>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- GRASS DEVELOPMENT TEAM. r.watershed – GRASS GIS manual. 2024. Disponível em: <https://grass.osgeo.org/grass-stable/manuals/r.watershed.html>. Acesso em: 18 jul. 2025.
- HAMOUC, Chakir; CHAAOUAN, Jamal; BOUISS, Charaf Eddine. Spatial-temporal assessment of soil erosion using the RUSLE model in the upstream Inaouène watershed, Northern Morocco. *Natural Hazards Research*, v. 5, p. 148–156, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.08.002>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- HASHEMI MONFARED, S. A.; DEHGHANI DARMIAN, M.; SNYDER, S. A.; AZIZYAN, G.; PIRZADEH, B.; AZHDARY MOGHADDAM, M. Water Quality Planning in Rivers: Assimilative Capacity and Dilution Flow. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 99, n. 5, p. 531–541, nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2182-7>. Acesso em: 17 jul. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA DO DISTRITO FEDERAL (IPEDF). Hidrogeologia. In: Atlas do Distrito Federal. Brasília: IPEDF, 2020. Disponível em: <https://atlas.ipe.df.gov.br/?p=1699>. Acesso em: 17 jul. 2025.

KUMAR, Mithlesh; SAHU, Ambika Prasad; SAHOO, Narayan; DASH, Sonam Sandeep; RAUL, Sanjay Kumar; PANIGRAHI, Balram. Global-scale application of the RUSLE model: a comprehensive review. *Hydrological Sciences Journal*, London, v. 67, n. 5, p. 806–830, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.2020277>. Acesso em: 17 jul. 2025.

LASZLO, Jhonatan. Padrões de dissecação do relevo e morfologias dominantes nas Bacias Hidrográficas dos Rios Aguapeí e Peixe. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 11., 2016, Maringá. Anais... Maringá: União da Geomorfologia Brasileira, 2016. Disponível em: <https://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/6/6-345-1099.html>. Acesso em: 18 jul. 2025.

LEITE, Manoel Reinaldo; BRITO, Jorge Luís Silva. Mapeamento morfoestrutural e morfoescultural na região de cerrado no Norte de Minas Gerais. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v. 24, n. 1, p. 115–126, jan./abr. 2012.

LIMA, Carlos Eduardo Pacheco. Produção de mapas de vulnerabilidade de solos e aquíferos à contaminação por metais pesados para o estado de Minas Gerais. 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

LIMA, Carlos Eduardo Pacheco; FONTENELLE, Mariana Rodrigues; BRAGA, Marcos Brandão; FLORINDO, Bruno Santos; FERREIRA, Joana Gabriely; FIGUEIREDO, José Maurício Ribeiro; FREIRE, Vinícius Pereira; SILVA, Juscimar da; GUEDES, Ítalo Moraes Rocha. Fragilidade e relevância ambiental de uma área do Cerrado no DF: subsídios pedogeomorfológicos para a proteção dos direitos difusos. *Revista Aracê*, São José dos Pinhais, v. 7, n. 7, p. 38028–38054, 2025a. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/arev7n7-168>. Acesso em: 17 jul. 2025.

LIMA, Carlos Eduardo Pacheco; FONTENELLE, Mariana Rodrigues; BRAGA, Marcos Brandão; SILVA, Karen Mendes Nascimento Barbosa da; RODRIGUES, Giovana Silva Santos; SILVA, Kelly Cristina Rodrigues. Clima, morfometria e erosividade em unidade hidrográfica do Cerrado do DF: implicações socioambientais e direitos difusos. *Revista Aracê*, São José dos Pinhais, v. 7, n. 7, p. 39480–39503, 2025b. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/arev7n7-250>. Acesso em: 17 jul. 2025.

LIMA, Felipe Pereira de; ALMEIDA, Frederico Piontkowski de Souza; MENDONÇA FILHO, Sérgio Fernandes; MURTA, Johnny Rodrigues de Melo; BRITO, Gleicon Queiroz de; SALEMI, Luiz Felipe. Water infiltration in the Brazilian tropical savanna: the case of Cerrado típico. *Journal of Biotechnology and Biodiversity*, Palmas, v. 8, n. 3, p. 165–171, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v8n3.lima>. Acesso em: 17 jul. 2025.

MANOEL, Jhonatan Laszlo; ROCHA, Paulo Cesar. Levantamento e análise comparativa dos padrões de drenagem das bacias hidrográficas dos rios Aguapeí e Peixe. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 17.; CONGRESSO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA, 1., 2017, Campinas. Anais... Campinas: Instituto de Geociências – Unicamp, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.1778>. Acesso em: 18 jul. 2025.

MARTINS, E. S. et al. Unidades de paisagem do Distrito Federal, escala 1:100.000. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). Áreas prioritárias para conservação da biodiversidade: segunda atualização. Brasília: MMA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade/areas-prioritarias>. Acesso em: 17 jul. 2025.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal*, v. 50, p. 1294–1298, 1986.

MOREIRA, Elto Aparecido; SOUZA, Thaís Silva de; DOMINGO, Saulo Santos; SIQUEIRA, Ana Paula. Protocolo de recuperação de nascentes no bioma do Cerrado. Informe Goiano – Circular de Pesquisa Aplicada, Urutaí: Instituto Federal Goiano, v. 7, n. 4, p. 1–4, 2019.

MURTA, Johnny Rodrigues de Melo; BRITO, Gleicon Queiroz de; MENDONÇA FILHO, Sérgio Fernandes; SALEMI, Luiz Felipe. Topsoil physical properties under a riparian forest in Central Brazil: infiltration and penetration resistance. *Hoehnea*, São Paulo, v. 49, e332021, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2236-8906-33/2021>. Acesso em: 17 jul. 2025.

NACHTIGALL, Stefan Domingues; NUNES, Maria Cândida Moitinho; MOURA-BUENO, Jean Michel; LIMA, Cláudia Liane Rodrigues de; MIGUEL, Pablo; BESKOW, Samuel; SILVA, Thaís Palumbo. Modelagem espacial da erosão hídrica do solo associada à sazonalidade agroclimática na região sul do Rio Grande do Sul, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 6, p. 933–946, nov./dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020190136>. Acesso em: 17 jul. 2025.

OLIVEIRA, Paulo T. S. de; SOBRINHO, Teodorico Alves; STEFFEN, Jorge L.; RODRIGUES, Dulce B. B. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 819–825, 2010. Disponível em: <http://www.agriambi.com.br>. Acesso em: 18 jul. 2025.

OTTONI, Marta Vasconcelos et al. Saturated hydraulic conductivity and steady-state infiltration rate database for Brazilian soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 49, e0240003, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20240003>. Acesso em: 17 jul. 2025.

PATIL, R.; WEI, Y.; PULLAR, D.; SHULMEISTER, J. Effects of change in streamflow patterns on water quality. *Journal of Environmental Management*, v. 302, pt. A, 113991, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113991>. Acesso em: 17 jul. 2025.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; McCOOL, D. K.; YODER, D. C. (Coords.). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, 1997. 407 p. (Agriculture Handbook, n. 703).

RIOS, Guilherme S.; SANTANA, Derielsen B.; LENSE, Guilherme H. E.; RUBIRA, Felipe G.; AYER, Joaquim E. B.; MINCATO, Ronaldo L. Serra da Canastra National Park: Influence of forest fires on the RUSLE C factor and its impact on water erosion. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, v. 52, n. 1, art. 13577, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.15835/nbha52113577>. Acesso em: 18 jul. 2025.

RODRIGUES, Lineu Neiva; CAMBRAIA NETO, Arnaldo José. Recarga e sua importância para as águas subterrâneas e para a sustentabilidade da agricultura na região do Cerrado. Portal Embrapa, 5 abr. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/60455159/artigo---recarga-e-sua-importancia-para-as-aguas-subterraneas-e-para-a-sustentabilidade-da-agricultura-na-regiao-do-cerrado>. Acesso em: 18 jul. 2025.

RODRIGUES, Roberta Carina da Silva; MINOTI, Ricardo Tezini; ALVES, Conceição de Maria Albuquerque. Avaliação da qualidade das águas superficiais em cursos d'água na bacia hidrográfica do rio Paranaíba a partir da análise do IQA e do ICE. Geo Ambiente On-line, Jataí, v. 48, p. 157–179, jan./abr. 2024. Disponível em: <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente>. Acesso em: 18 jul. 2025.

RODRIGUES, Sílvio Carlos. Mudanças ambientais na região do Cerrado: análise das causas e efeitos da ocupação e uso do solo sobre o relevo. O caso da bacia hidrográfica do Rio Araguari, MG. GEOUSP – Espaço e Tempo, São Paulo, n. 12, p. 105–124, 2002.

SAKHRAOUI, Fouad; HASBAIA, Mahmoud. Evaluation of the sensitivity of the RUSLE erosion model to rainfall erosivity: a case study of the Ksob watershed in central Algeria. Water Supply, London, v. 23, n. 8, p. 3262–3284, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2023.182>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SANTOS, Ronaldo Medeiros dos; KOIDE, Sergio. Avaliação da recarga de águas subterrâneas em ambiente de Cerrado com base em modelagem numérica do fluxo em meio poroso saturado. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 451–465, abr./jun. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p451-465>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SCHWAMBACK, Dimaghi; BRANDÃO, Abderraman R. Amorim; BERTOTTO, Luis Eduardo; BERNDTSSON, Ronny; ZHANG, Linus; WENDLAND, Edson; PERSSON, Magnus. Quantifying soil loss in the Brazilian savanna ecosystem: current rates and anticipated impact of climate changes. Land Degradation & Development, v. 35, n. 18, p. 5786–5803, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.5331>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SILVA JÚNIOR, Gerson Cardoso; PIZANI, Tiago Carvalho. Vulnerability assessment in coastal aquifers of Rio de Janeiro State, Brazil. Revista Latino-Americana de Hidrogeologia, n. 3, p. 93–98, 2003.

SILVA, Michele Aparecida Pereira da; EVANGELISTA, Laís Pinheiro; SILVA, Wallison Henrique Oliveira; SANTO, Fábio da Silva do Espírito. Diagnóstico e estratégias para a conservação ou restauração de nascentes em ambientes com ações antrópicas. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 34, n. 3, e71553, p. 1–24, jul./set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509871553>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SILVA, Raul Gomes da; NASCIMENTO, Joana Gabrielly Carias do; OLIVEIRA, Caio Maurício Eurico de; LISTO, Danielle Gomes da Silva. Equação universal de perda de solos revisada (RUSLE) para quantificação de perda de solos na bacia hidrográfica do Rio Goitá, Zona da Mata do Estado de Pernambuco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 20.; ENCONTRO LUSOAFROAMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA E AMBIENTE, 4., 2024, [s.l.]. Anais... [S.l.: s.n.], 2024.

SOUZA, Maria Eduarda Ribeiro de; VARGAS, Tiago; BELLADONA, Rossano. Vulnerabilidade à contaminação de aquíferos fraturados com base no método DRASTIC: a influência da densidade de lineamentos. Revista Águas Subterrâneas, v. 35, n. 3, e30086, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v35i3.30086>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SPEED, Robert; YUANYUAN, Li; LE QUESNE, Tom; PEGRAM, Guy; ZHIWEI, Zhou. Basin water allocation planning: principles, procedures and approaches for basin allocation planning. Paris: UNESCO, 2013. 138 p.

YADAV, Shashi Kant; GUPTA, Anirudh. Assessment of groundwater vulnerability to contamination using GIS-based DRASTIC model in Lucknow, India. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, v. 10, n. 10, p. 1229–1236, out. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.47166>. Acesso em: 17 jul. 2025.