



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



Daiane Casagrande

**MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO DOS SOLOS DOS MUNICÍPIOS
CONSORCIADOS À RIDES NO ALTO PARANAÍBA**

Monte Carmelo

2023

Daiane Casagrande

**MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO DOS SOLOS DOS MUNICÍPIOS
CONSORCIADOS À RIDES NO ALTO PARANAÍBA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Liliane Ibrahim
Co-orientador: Dr. Rodrigo Almeida Heringer

Monte Carmelo

2023

Daiane Casagrande

**MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROÇÃO DOS SOLOS DOS MUNICÍPIOS
CONSORCIADOS À RIDES NO ALTO PARANAÍBA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Geologia.

Monte Carmelo, 11 de janeiro de 2023

Banca Examinadora:

Prof.^a Dra. Liliane Ibrahim, UFU/MG

Prof.^o Dr. Guilherme Resende Corrêa, UFU/MG

Prof.^o Dr. Carlos Antônio Oliveira Vieira, UFSC/SC

Dedico este trabalho a Deus, sem ele nada seria possível. Aos meus pais e meu noivo; pela força e incentivo durante toda a graduação e em especial nesta fase tão importante, e aos meus professores do curso de Geologia que sempre deram o melhor para a realização de cada disciplina.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que foi minha base, me deu forças para continuar mesmo nos momentos mais difíceis da minha vida em que queria abandonar tudo.

Aos meus pais, pelo apoio durante toda graduação, cada sacrifício, cada incentivo, não teria chegado até aqui sem vocês.

Ao meu noivo pela paciência e apoio na reta final da graduação, sempre me motivando com muito amor a concluir o curso, e buscar sempre melhorar.

Ao meu irmão, cunhada e sobrinhas pelo apoio durante estes anos, o carinho, o incentivo e o amor foram fundamentais.

Aos meus colegas de trabalho, agradeço todo o apoio e paciência durante esta fase da minha vida e principalmente a todo conhecimento transmitido neste último ano.

À minha orientadora Liliane por toda ajuda e paciência durante estes meses.

Ao meu co-orientador Rodrigo por aceitar participar deste trabalho conosco e nos ensinar tanto.

Aos meus colegas de curso, que compartilharam estes anos comigo.

Por último agradeço a cada um que torceu por mim em algum momento durante a graduação e acreditaram no meu sucesso.

Muito obrigada!

RESUMO

A erosão acelerada dos solos é um grande problema ambiental no Brasil. Cerca de 200 milhões de toneladas de solo são perdidos anualmente, decorrentes de processos erosivos naturais e antrópicos. Informações a respeito de áreas mais propensas à erosão são importantes para tomadas de decisões por meio do poder público e privado, quanto à utilização do solo e instalação de infraestruturas. Diante disso, este trabalho tem o objetivo de avaliar os fatores responsáveis pela erosão e gerar um mapa de suscetibilidade à erosão dos solos dos municípios consorciados ao grupo RIDES – Região Integrada de Desenvolvimento Sustentável em Minas Gerais. Este consorcio prevê a escolha de um novo local para construção de um aterro sanitário, a fim de atender os municípios que compõem a RIDES no Alto Paranaíba. A implantação de um aterro sanitário é de grande importância para a região, visto que a agricultura é a principal atividade econômica, a qual depende da qualidade do solo e da água para seu desenvolvimento. Portanto, a implantação deste empreendimento em local inadequado pode ocasionar a perda e a poluição do solo e dos recursos hídricos. Este trabalho compreende uma revisão bibliográfica, levantamento de dados disponíveis para a área de estudo, geração de mapa de susceptibilidade à erosão e análise e interpretação dos resultados obtidos. Para tal produção foram utilizados os mapas dos solos disponibilizados pela Embrapa na região do Alto Paranaíba, dados geomorfológicos desenvolvidos pelo IBGE, dados da geologia oriundo dos mapeamentos realizados pela CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais e CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, imagens do satélite Alos Palsar (2011) e dados de estações pluviométricas convencionais e telemétricas disponíveis pelo HIDROWEB nos períodos de 1971 a 2021 e 2015 a 2021, respectivamente. Para construção do mapa de susceptibilidade foi empregada a Equação Universal de Perda de Solo (USLE - Universal Soil Loss Equation) com uso de dados primários tratados e corrigidos por meio do software estatístico R e dados secundários, como as declividades, obtidos por meio de Sistema de Informação Geográfica. Com a elaboração dos mapas, espera-se obter uma visualização facilitada das áreas com níveis de susceptibilidade à erosão e, assim, contribuir para a melhor gestão desse recurso.

Palavras-chave: Processos Erosivos, SIG, Gestão.

ABSTRACT

The accelerated soil erosion is a major environmental problem in Brazil. Every year, about 200 million tons of soil are lost, due to natural and anthropic erosive processes. Information regarding the areas most prone to erosion is important for public and private decision making, concerning land use and infrastructure installation. Taking this subject into account, this work aims to evaluate the factors that are responsible for erosion and generate a map of susceptibility to soil erosion in municipalities associated with the RIDES group –Integrated Region of Sustainable Development in Minas Gerais. This consortium is in charge of choosing a new site for the construction of a sanitary landfill, in order to serve the municipalities that make up the RIDES in Alto Paranaíba. The implantation of a sanitary landfill is of great importance for the region, since agriculture is the main economic activity, which depends on the quality of the soil and water for its development. Therefore, the implementation of this enterprise in an inadequate location can cause the loss and pollution of the soil and water resources. This work comprises a literature review, survey of available data for the study area, generation of an erosion susceptibility map, and analysis and interpretation of the results obtained. For such a production, we used the soil maps made available by Embrapa in the Alto Paranaíba region, geomorphological data developed by IBGE, geological data from the mappings made by CODEMIG (Minas Gerais Development Company) and CPRM (Mineral Resources Research Company) satellite images Alos Palsar (2011) and data from conventional and telemetric rainfall stations available by HIDROWEB in the periods from 1971 to 2021 and 2015 to 2021, respectively. To build the susceptibility map, the Universal Soil Loss Equation (USLE) was used using primary data treated and corrected using the R statistical software, and secondary data, such as slopes, obtained using the Geographic Information System. With the elaboration of the maps, it is expected to obtain an easier visualization of the areas with levels of susceptibility to erosion and, thus, contribute to the better management of this resource.

Keywords: Erosive Processes, GIS, Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização do aterro sanitário do município de Monte Carmelo - MG. ...	13
Figura 2: Mapa de localização dos municípios consorciados à RIDES.....	17
Figura 3: Fluxograma da metodologia do estudo.....	18
Figura 4: A) Estações convencionais encontradas na área de estudo; B) Estações selecionadas para desenvolvimento do estudo.....	26
Figura 5: Mapa de Localização das Estações Convencionais na área de Estudo.....	27
Figura 6: A) Situação dos dados brutos das estações convencionais; B) Dados após as correções realizadas no software RStudio.	28
Figura 7: Mapa das divisões dos domínios tectônicos de Minas Gerais e área de estudos delimitada em vermelho	43
Figura 8: Mapa geológico da região de Monte Carmelo/MG, Cascalho Rico/MG e Abadia dos Dourados/MG.	47
Figura 9: Correlação dos valores de EI dos modelos de Wischmeier e Smith (1978) e Richardson et al. (1983).....	50
Figura 10: Mapa da distribuição da erosividade da chuva na área de estudo.	52
Figura 11: Mapa de solos da área de estudo.....	53
Figura 12: Variação do fator K na área de estudo.....	54
Figura 13: Mapa das formas de relevo mapeadas na área de estudo.....	55
Figura 14: Mapa litológico da área de interesse.....	56
Figura 15: Mapa hipsométrico da área de estudo.....	57
Figura 16: Mapa do resultado do cálculo do fator LS da área de estudo.	58
Figura 17: Mapa de suscetibilidade à erosão hídrica elaborado pela EMBRAPA SOLOS.	59
Figura 18: Mapa de suscetibilidade à erosão dos municípios consorciados a RIDES, objeto de estudo.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade de habitantes por municípios do RIDES.....	12
Tabela 2: Dados coletados em cada estação antes das correções realizadas.....	27
Tabela 3: Valores do coeficiente (K) e tolerância a perda de solos definidos para o estado de São Paulo.....	32
Tabela 4: Valores de K para vários tipos de solos encontrados em diversas bibliografias.....	33
Tabela 5: Dados disponibilizados em diversas bibliografias, calculados para coberturas variadas.....	37
Tabela 6: Valores de EI dos modelos de Wischmeier e Smith (1978) e de Richardson et al. (1983).....	49
Tabela 7: Valores adotados para o coeficiente K para cada tipo de solo mapeado na área de estudo.....	53
Tabela 8: Síntese dos fatores que influenciam a erosão em cada classe de suscetibilidade a erosão.....	62

Sumário

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	12
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	METODOLOGIA	17
3.1	Levantamento Bibliográfico	18
3.2	Aquisição e compilação de Dados	18
3.3	Validação dos Dados de Precipitações	19
3.4	Aplicação do Modelo de Suscetibilidade à erosão da USLE	20
3.4.1	Erosividade da chuva - R	21
3.4.2	Erodibilidade do Solo - K	28
3.4.3	Fator topográfico – LS	35
3.4.4	Uso e Ocupação dos Solos – C	36
3.4.5	Fator de Práticas para Controle da Erosão do Solo - P	38
4	PARÂMETROS DO PROCESSO DE EROSÃO.....	39
4.1	Erosividade da chuva.....	40
4.2	Propriedades do Solo	41
4.3	Cobertura Vegetal	41
4.4	Características das Encostas	42
5	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA, MORFOLÓGICA, PEDOLÓGICA E CLIMÁTICA	43
5.1	Caracterização Geológica, Pedológica e Geomorfológica	43
5.1.1	Bacia Sanfranciscana	43
5.1.2	Faixa de Dobramentos Brasília	44
5.1.3	Bacia do Paraná.....	47
5.2	Caracterização Climática	49

6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
6.1	Validação do modelo de Richardson et al. (1983).....	49
6.2	Coeficiente R	51
6.3	Coeficiente K.....	52
6.4	Coeficiente LS	56
6.5	Mapa de suscetibilidade à erosão	58
7	CONCLUSÕES.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O consórcio Região Integrada de Desenvolvimento Sustentável - RIDES é formado por dez municípios da região do Alto Paranaíba, sendo eles: Abadia dos Dourados, Cascalho Rico, Coromandel, Douradoquara, Estrela do Sul, Grupiara, Indianópolis, Iraí de Minas, Monte Carmelo e Romaria. A RIDES busca alternativas para a população alcançar o desenvolvimento sustentável através dos poderes públicos, criando propostas de saneamento básico, planejamento urbano, preservação de recursos hídricos e melhorias ambientais (CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL RIDES, 2015).

A Tabela 1 apresenta a distribuição populacional nos municípios da RIDES, de acordo com dados do censo do IBGE de 2021.

Tabela 1: Quantidade de habitantes por municípios do RIDES.

<i>Municípios</i>	<i>Habitantes</i>
<i>Abadia dos Dourados</i>	7.022
<i>Cascalho Rico</i>	3.108
<i>Coromandel</i>	27.958
<i>Douradoquara</i>	1.915
<i>Estrela do Sul</i>	8.057
<i>Grupiara</i>	1.386
<i>Indianópolis</i>	7.009
<i>Iraí de Minas</i>	7.067
<i>Monte Carmelo</i>	48.049
<i>Romaria</i>	3.507
<i>Total</i>	115.078

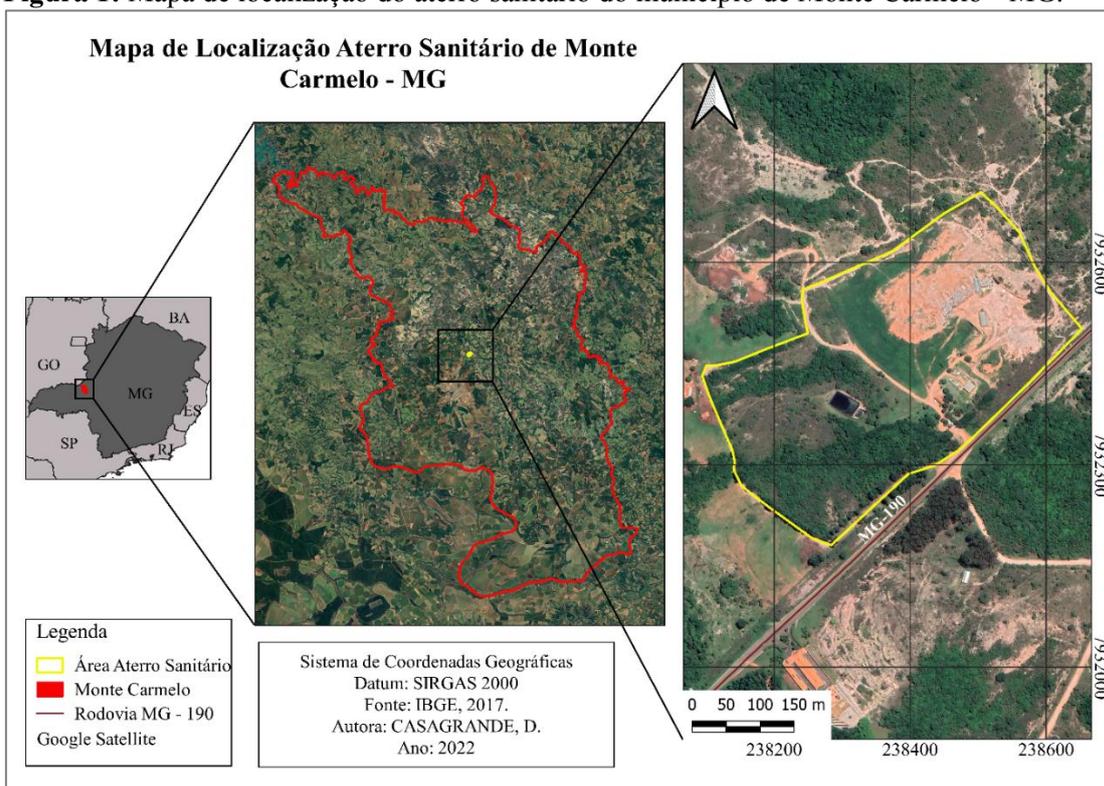
Nestes municípios, as principais atividades socioeconômicas são a agricultura e a pecuária. Destacando-se na área da agricultura a produção de café, soja, milho, sorgo e silvicultura (eucalipto). Já na pecuária ressalta-se a criação de gado de corte ou leiteiro, suinocultura, avicultura e piscicultura (NOVAIS, 2011). Além disso, destaca-se a produção de cerâmica nos municípios de Monte Carmelo/MG e Abadia dos Dourados/MG (PMSB, 2013).

Em relação à gestão dos resíduos sólidos urbanos - RSU do consórcio intermunicipal RIDES, tendo como base a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal 12.305/2010) foi elaborado em 2015, o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PGIRS, que apresenta diretrizes e ações que buscam a não geração de resíduos, bem como a redução, reutilização e reciclagem desses materiais, cujas práticas são importantes para o tratamento e

destinação final, ambientalmente correto dos resíduos sólidos, além de aplicar fundamentos da logística reversa e da responsabilidade compartilhada na gestão dos RSU (CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL RIDES, 2015), entre outras proposições.

O PGIRS prevê a escolha de um novo local para implantação de aterro sanitário para atender os municípios consorciados. Desses municípios pertencentes à RIDES, apenas o município de Monte Carmelo – MG apresenta a disposição de resíduos sólidos em aterro sanitário (Figura 1), no entanto a vida útil deste aterro está próximo do fim, tendo condições de operar até 2027.

Figura 1: Mapa de localização do aterro sanitário do município de Monte Carmelo - MG.



De acordo com dados disponibilizados pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto – DMAE (DMAE, 2021), em 2010 o aterro sanitário do município de Monte Carmelo – MG apresentava produção média anual de resíduos sólidos urbanos (RSU) de 679,60 m³, já em 2020 a produção aumentou para 1689,00 m³. Inicialmente o município contava com um lixão a céu aberto e, por meio de políticas públicas construiu o aterro sanitário, iniciando as atividades no dia 25 de novembro de 2006 e vida útil de 21 anos. O aterro sanitário recebe em média 60 t/dia, sendo 36% de recicláveis, 33% de orgânicos e 31% de rejeitos, sendo possível reduzir a quantidade de resíduos sólidos dispostos no aterro implantando atividades sustentáveis como a

coleta seletiva, compostagem de orgânicos e reciclagem, com isso, a vida útil deste aterro poderia ser estendida. Os demais municípios praticam a disposição de resíduos sólidos em lixões (Abadia dos Dourados, Douradoquara, Estrela do Sul e Romaria) ou aterros controlados (Cascalho Rico, Coromandel, Indianópolis, Iraí de Minas e Grupiara) (CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL RIDES, 2015; CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL RIDES, 2018)

Hoje existem tecnologias avançadas, como a incineração, para a destinação final de resíduos sólidos, no entanto esta tecnologia necessita de altos investimentos por conta do seu elevado custo. Assim, aterros sanitários são soluções de baixo custo e ambientalmente corretas quando adequadamente executados e monitorados para que não ocorram contaminação dos solos e águas superficiais e subterrâneas decorrentes da má gestão de resíduos nesses locais (CORESAB, 2020).

Por conta do altíssimo risco de poluição, a disposição de resíduos sólidos precisar ser feita em local correto. Assim, ao longo do tempo de funcionamento do aterro sanitário e até mesmo após seu encerramento, é necessário monitorar para que não ocorra o escape de lixiviados e gás metano que possam contaminar solos, recursos hídricos superficiais/subterrâneos e atmosfera. Para isso, o mapa de suscetibilidade à erosão é um dos aspectos a ser considerado pois prevê os locais onde há uma maior ou menor tendência à perda de solo, auxiliando na escolha do local mais adequado à disposição de resíduos sólidos.

O maciço de um aterro sanitário deve apresentar na sua base baixa condutividade hidráulica, baixa porosidade, conter porcentagens acima de 30% de partículas de argila retidas na peneira de malha #200, limite de liquidez $\geq 30\%$, limite de plasticidade $\geq 15\%$ e baixa suscetibilidade à erosão (LANGE et al., 2008; ZUQUETTE, 2015). Assim, erosão dos solos contribui para a instabilidade destes maciços, além de poder danificar a impermeabilização da base do aterro sanitário (REMÉDIO, 2014; ZUQUETTE, 2015; VIANA et al., 2016).

Desta forma, a maior susceptibilidade à erosão aumenta o risco de contaminação dos solos e de águas superficiais e subterrâneas, o que acarretaria problemas de saúde na população que é abastecida por este recurso hídrico. Além disso, o solo, águas superficiais e subterrâneas contaminadas, utilizados na agricultura e pecuária, são vetores contaminantes e o consumo destes produtos pode acarretar diversos problemas de saúde para a população (SOUZA; TEIXEIRA, 2012).

A escolha dos locais para implantação de aterros sanitários segue diversos critérios, segundo a NBR 13.896 (ABNT, 1997 - Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação). Os locais para a instalação de aterros sanitários devem atender

aos seguintes requisitos: i) o impacto ambiental a ser causado pela instalação do aterro seja mínimo; ii) a população tem que ter uma boa aceitação da instalação; iii) esteja de acordo com o zoneamento da região; iv) possa ser utilizado por um longo espaço de tempo, necessitando apenas de um mínimo de obras para início da operação.

A NBR 8419 (ABNT, 1992 - Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos) ressalta a importância da caracterização geológica e geotécnica do local destinado ao aterro sanitário visando os riscos de ruptura ou erosão acentuada do terreno de fundação e/ou dos terrenos adjacentes, entre outros.

A erosão é um processo que ocorre naturalmente no meio e é responsável pela evolução geomorfológica do terreno bem como pela renovação do solo, ao remover o solo mais antigo e expor um solo mais novo. No entanto, sob efeitos antrópicos, é uma das principais causas de degradação dos solos (DECHEN et al., 2015). A conservação dos solos ocorre por meio de práticas corretas de manejo, buscando diminuir a desagregação e transporte de sedimentos, diminuir o escoamento superficial e aumentar as taxas de infiltração das águas e assim, reduzir o risco de assoreamento e contaminação de corpos hídricos (XAVIER et al., 2010).

A erosão dos solos é prejudicial para o meio ambiente e para a população. As atividades antrópicas intensas potencializam a perda de solos e conseqüentemente aumenta a perda de nutrientes, prejudicando sua fertilidade. Além do mais, prejudica corpos hídricos com o assoreamento, alterando o substrato dos leitos dos rios, afetando o regime hídrico, ecossistema e comprometendo a navegabilidade. Desta forma, é importante entender os processos causadores da erosão para implementar as melhores práticas de conservação do solo. Neste sentido, os mapas de suscetibilidade à erosão auxiliam no manejo dos solos, contribuindo para elaboração de planos e técnicas para reduzir a perda de solo ao máximo (CERRI, 1999) além de identificar as áreas mais adequadas para as diversas atividades pretendidas.

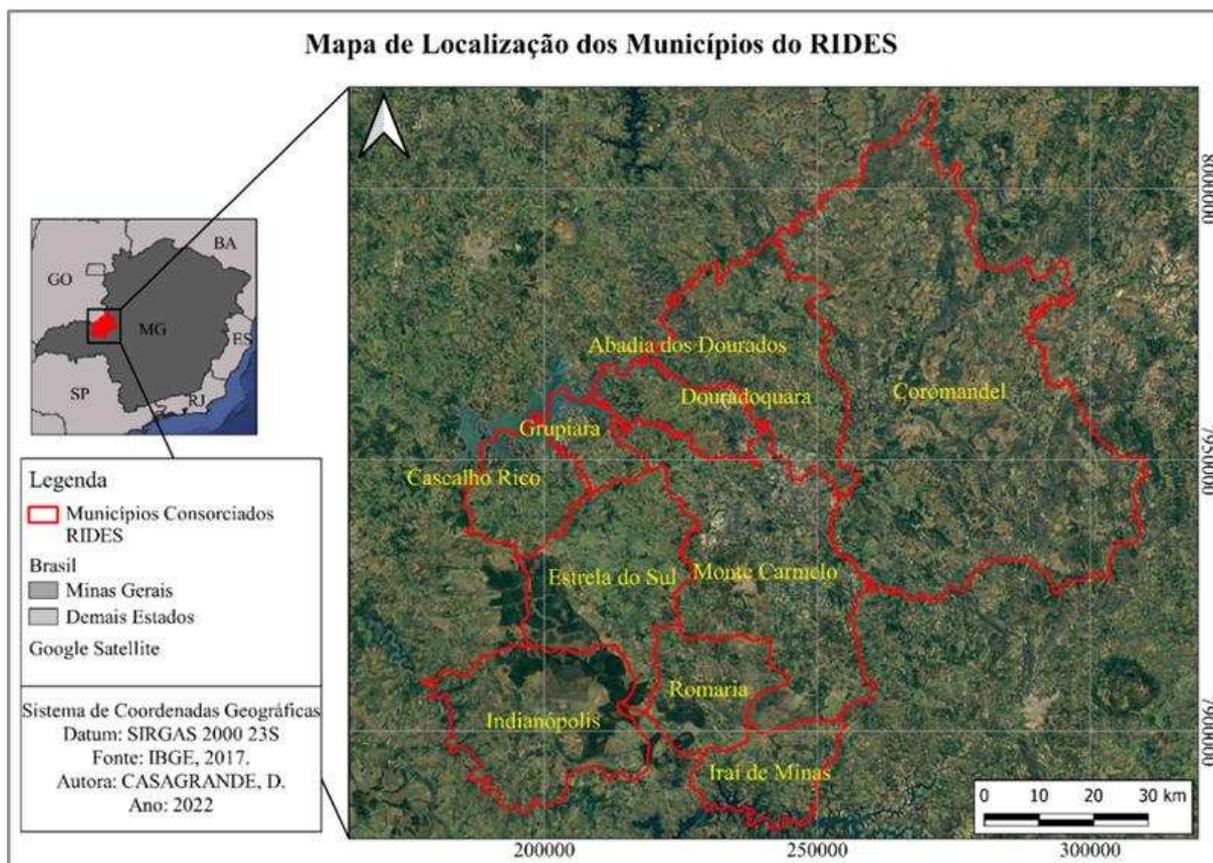
Para as áreas urbanas, existe legislação que regulamenta o uso dos solos, como a Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (BRASIL, 2001), nomeada de Estatuto da Cidade, que é responsável por elaborar diretrizes a respeito da política urbana, regulamentando o uso de solos urbanos e buscando um equilíbrio ambiental. Esta lei visa garantir à população o direito a uma cidade sustentável com saneamento básico, infra-estrutura, ordenação e controle do uso do solo urbano, proteção do meio ambiente, preservação e recuperação da natureza, entre outros. Tais direitos tem o intuito de evitar problemas futuros como: construções inadequadas à infra-estrutura urbana, deterioração do perímetro urbano, poluição, degradação ambiental, dentre outros. Das ferramentas propostas por esta lei, destacam-se o plano diretor e o zoneamento

ambiental, onde o plano diretor deve compreender toda a extensão do município e conter todo o planejamento urbano, com práticas sustentáveis para atendimento das necessidades da população.

Já a Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979 (BRASIL, 1979), conhecida como Lei Lehmann, estabelece diretrizes sobre o parcelamento do solo urbano municipal, sendo que cada estado, município e o Distrito Federal podem determinar normas complementares com intuito de conciliar o regulamento desta lei com as características de cada região. As divisões do solo urbano podem ser realizadas na modalidade de loteamento ou desmembramento, sendo que no loteamento há abertura de novas vias de circulação e está associado ao adensamento da área com a construção de novas edificações acompanhadas de logradouros públicos e infraestrutura básica composta por equipamentos urbanos (escoamento das águas pluviais, iluminação pública, sistema de esgoto, abastecimento de água potável, energia elétrica pública e domiciliar).

Sendo assim, este trabalho busca elaborar um mapa de suscetibilidade à erosão dos municípios consorciados à RIDES (Figura 2), visando contribuir para o desenvolvimento de futuros projetos e planos diretores propostos para estes municípios. Desta forma, o estudo auxiliará na escolha de locais para obras futuras, além de contribuir na avaliação das melhores práticas de proteção à erosão em cada local.

Figura 2: Mapa de localização dos municípios consorciados à RIDES.



2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem por objetivo elaborar um mapa de suscetibilidade à erosão dos solos dos municípios consorciados à RIDES – Região Integrada de Desenvolvimento Sustentável.

2.2 Objetivos específicos

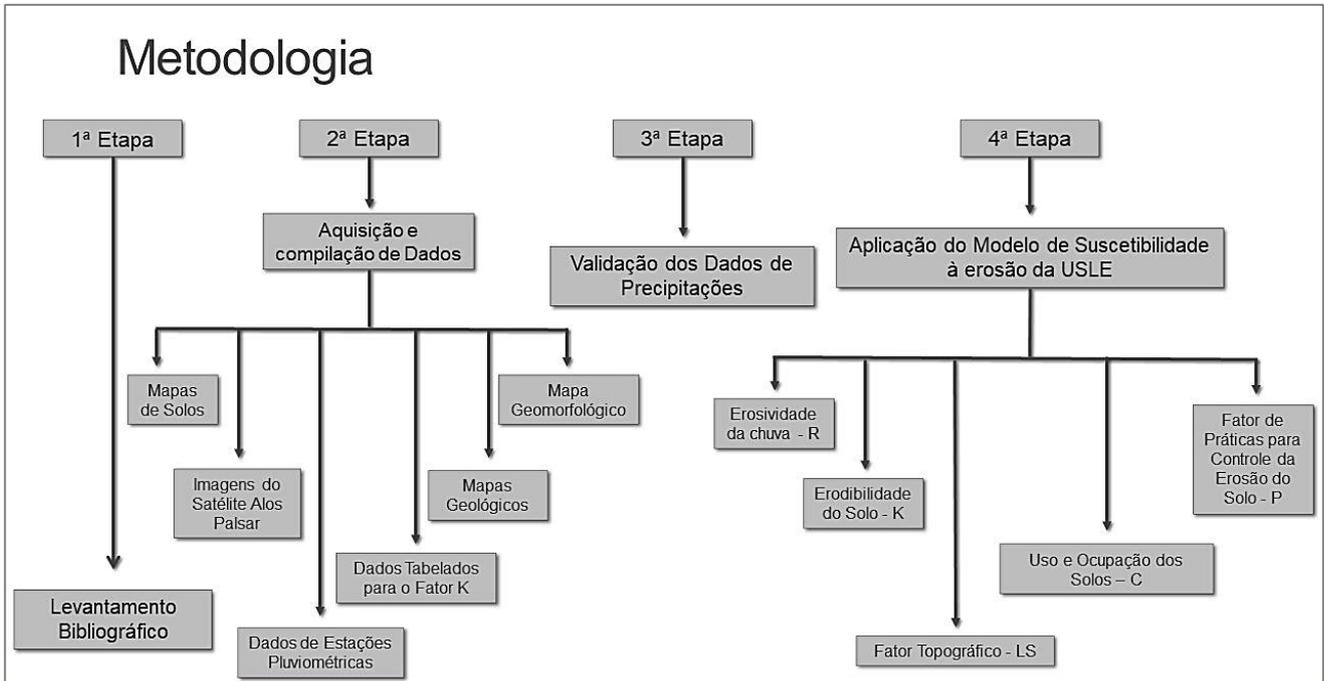
- Entender os mecanismos que afetam os processos erosivos;
- Avaliar o grau de erosão da área de estudo;
- Definir classes de nível de erosão;
- Contribuir para futuros planos diretores dos municípios da área de estudo;
- Recomendar áreas adequadas, do ponto de vista erosivo, à instalação de aterros sanitários.

3 METODOLOGIA

O presente estudo está dividido em quatro etapas: levantamento bibliográfico, aquisição e compilação de dados, validação dos dados de precipitação, aplicação do modelo de

suscetibilidade à erosão da Equação Universal de Perda de Solo (USLE - Universal Soil Loss Equation), resultando na elaboração do mapa de suscetibilidade à erosão, como sintetizado na Figura 3.

Figura 3: Fluxograma da metodologia do estudo.



3.1 Levantamento Bibliográfico

Nesta etapa foi realizada a revisão bibliográfica relacionada aos fatores que influenciam o processo erosivo, ao desenvolvimento e utilização da Equação Universal de Perda de Solo (USLE - *Universal Soil Loss Equation*) (WISCHMEIER; SMITH, 1978); e os procedimentos para a aplicação de ferramentas SIG (Sistema de Informações Geográficas), onde foi utilizado softwares ArcMap 10.8 e QGIS versões 3.16.0 e 3.22.7, o uso de duas versões do software QGIS ocorreu devido ao melhor funcionamento de determinadas ferramentas.

3.2 Aquisição e compilação de Dados

Os dados secundários utilizados no estudo foram:

- mapas de solos elaborados pela EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (<https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/2236/banco-de-dados-de-solos---bd-solos>);
- mapa geomorfológico desenvolvido pelo IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes->

ambientais/geomorfologia/10870-geomorfologia.html?=&t=downloads);

- mapas geológicos oriundos de mapeamentos realizados na região pela CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais e CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (<http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/>);
- imagens do satélite Alos Palsar (<https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=8.463¢er=-47.758,-19.006&dataset=ALOS&resultsLoaded=false>) para obter o Modelo Digital de Elevação (DEM);
- dados de estações pluviométricas convencionais e telemétricas disponíveis na plataforma HIDROWEB (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>); e
- Dados tabelados para o fator K disponíveis na bibliografia por diversos autores.

A compilação e processamento destes dados culminou na geração de diferentes camadas de informações utilizadas para a produção do mapa de suscetibilidade à erosão.

3.3 Validação dos Dados de Precipitações

Os dados de precipitação disponíveis em estações pluviométricas são na sua maioria dados diários. No entanto, o parâmetro de erosividade utilizado na USLE pede a utilização de dados com intervalo de 30 minutos para a determinação da intensidade da chuva. A intensidade da chuva é o fator responsável pela desagregação do solo. Neste sentido, foi utilizada uma abordagem proposta por Richardson et al. (1983) onde dados diários são utilizados para a determinação da erosividade. Assim, inicialmente, foi feita uma avaliação da aplicabilidade do modelo de Richardson utilizando-se dados de estações telemétricas.

Para a determinação do fator R (erosividade da chuva) da USLE foram utilizados dados de doze estações convencionais obtidos da plataforma HidroWeb. No entanto, estes dados precisam ser tratados e corrigidos antes da sua utilização. O software estatístico R foi utilizado para o tratamento e correção dos dados coletados das estações pluviométricas convencionais e telemétricas disponíveis. Com os dados carregados no software, foram escolhidas as estações para desenvolver o estudo, utilizando como critério as estações que continham dados em um intervalo de 45 anos (1976 a 2021).

3.4 Aplicação do Modelo de Suscetibilidade à erosão da USLE

Buscando compreender os processos erosivos para o controle sustentável das atividades antrópicas e visando diminuir as perdas de solo, Wischmeier e Smith (1978) desenvolveram uma equação empírica denominada Equação Universal de Perda de Solo (USLE - *Universal Soil Loss Equation*) a partir da análise estatística multivariada dos dados coletados de experimentos realizados durante anos e em diversas localidades, referentes ao escoamento e perda de solo para diferentes condições de chuva, tipo de solo, topografia, uso do solo e práticas conservacionistas.

A USLE consegue estimar a perda anual de solo em um local, de acordo com as técnicas de manejo aplicadas em diferentes tipos de solo e assim pode auxiliar no processo de tomada de decisão no planejamento de conservação de solo (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Para determinar a taxa erosiva é necessário analisar a gestão das diferentes variáveis físicas de certo local. Dessa maneira é possível aplicar os dados de erosão em diversas condições e localidades diferentes. Assim, o modelo USLE é projetado para estimar a perda de solo em longos intervalos de tempo e em circunstâncias variadas de cultivo, escoamento superficial e práticas de conservação, sendo aplicado não apenas em áreas de agricultura, mas também em locais com obras (WISCHMEIER; SMITH, 1978; MACIEL, 2000).

A USLE considera seis parâmetros para estimar a perda anual média de solo. Estes valores são analisados durante um longo período, avaliando as diferentes condições de uso e ocupação do solo, fatores climáticos, relevo e aplicações de técnicas conservacionistas (WISCHMEIER; SMITH, 1978; MACIEL, 2000; VALLADARES et al., 2010; SILVA et al., 2017). Deste modo a equação é definida como:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Sendo,

A = estimativa de perda média anual de solo por unidade de área (t. ha⁻¹ ano);

R = Erosividade da chuva e enxurrada (MJ.mm h⁻¹. ha⁻¹);

K = Erodibilidade do solo (t. ha. h/ ha.MJ.mm);

LS = Fator topográfico incluindo a declividade e o comprimento de rampa (adimensional);

C = Uso e ocupação do solo (adimensional);

P = Fator de práticas para controle da erosão do solo (adimensional).

De modo geral, o valor de A é calculado por meio da perda de solo por unidade de área, definido para os valores de K e para o intervalo de tempo de um ano. Já o valor de R é calculado de acordo com o índice de chuva e de escoamento, podendo ser expresso em unidades do índice de erosão pluvial ou pelo fator de escoamento causado pelo degelo da neve (este parâmetro é avaliado desde que haja um escoamento significativo). O coeficiente K é avaliado de acordo com cada tipo específico de solo. O fator LS corresponde ao fator topográfico e compreende a declividade da vertente e o seu comprimento, sendo medido através da perda de solo em função do gradiente de inclinação e comprimento da rampa. O coeficiente C equivale à cobertura do solo, assim a perda de solo varia de acordo com o tipo de cobertura do solo e de seu uso. Por fim, o fator P corresponde à redução da erosão em função da utilização de práticas conservacionistas (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

As variáveis R, K e LS resultam de condições naturais do clima, relevo e solo e juntos definem a capacidade natural de erosão. Já as variáveis C e P estão sujeitas a ações antrópicas, pois estão relacionadas ao uso e ocupação dos solos (C) e às práticas conservacionistas adotadas (WEILL; SPAROVEK, 2008; SILVA et al., 2017).

A seguir, são detalhados os parâmetros da USLE e a forma de cálculo de cada parâmetro neste trabalho.

3.4.1 Erosividade da chuva - R

A erosividade da chuva - R corresponde ao índice de erosão pluvial, que expressa o potencial erosivo da chuva em uma área desprotegida (CARVALHO et al., 2012). Assim, o coeficiente numérico para R deve estimar o impacto ocasionado pela precipitação, considerando o tamanho da gota, velocidade, ângulo e direção, além disso é preciso avaliar a intensidade, frequência e duração da chuva. Além disto deve-se considerar os efeitos do escoamento superficial durante estes eventos chuvosos por meio do tipo de fluxo, que pode ser difuso ou concentrado (COSTA, 2016).

Segundo Wischmeier e Smith (1978), para determinar o coeficiente R é necessário analisar dados pluviométricos de vários anos e avaliar a perda anual de solos, utilizando dados acumulados de diversos períodos chuvosos no decorrer do tempo (RICHARDSON et al., 1983).

Wischmeier e Smith (1978) observaram que mantendo-se os demais parâmetros constantes, a taxa de perda de solo era proporcional a um parâmetro da chuva determinado de EI (Índice de Erosão Hídrica). O parâmetro EI é o potencial erosivo de uma chuva com duração de 30 minutos, causado por diversas tempestades durante um determinado intervalo de tempo,

sendo assim, os valores obtidos de EI em uma região são considerados como o índice de erosão hídrica daquela localidade. A energia da chuva pode ser calculada a partir da equação abaixo de Richardson et al. (1983):

$$E = \sum_j e_j p_j \quad (2)$$

onde,

E = energia para um evento em MJ/ha;

e = energia cinética em mega joules por hectare por milímetro de chuva (MJ/ha.mm) para o intervalo de tempo j ;

p = precipitação para o intervalo de tempo j em mm.

Para calcular o valor de e , Richardson et al. (1983) propôs a seguinte fórmula:

$$e_j = 0,119 + 0,0873 \log_{10} i_j, i_j \leq 76 \text{ mm/h} \quad (3)$$

ou

$$e_j = 0,283, i_j > 76 \text{ mm/h} \quad (4)$$

onde,

i = intensidade da chuva em mm/h.

O valor de EI é determinado através do produto entre a energia e a intensidade da chuva. As gotas de chuva aumentam a ação erosiva de acordo com a intensidade, sendo assim, o valor EI representa a energia total e a intensidade de picos definidos em cada chuva (WISCHMEIER; SMITH, 1978; CABRAL et al., 2005). O fator EI é de grande importância, tanto cientificamente como prático, pois por meio dele é possível identificar períodos do ano de maior risco ou de maior potencial de erosão hídrica e a partir disso, planejar medidas de controles mais eficientes (FURTADO, 2019). O EI pode ser calculado através da equação abaixo de Wischmeier e Smith (1978).

$$EI = E \times I_{30} \quad (5)$$

onde,

EI = índice de erosão hídrica em MJ.mm/ha.h

E = energia para um evento em MJ/ha;

I₃₀ = intensidade máxima de uma chuva com intervalo de 30 minutos em mm/h

Existe uma relação entre os valores de EI e precipitação (P), sendo os valores de P responsáveis por aumentarem o valor de EI, já os episódios individuais de chuvas fazem com que o valor de EI varie de forma considerável. Esta relação é expressa na equação abaixo (RICHARDSON et al., 1983):

$$EI = aP^b + \epsilon \quad (6)$$

Os valores da equação acima são descritos por Richardson et al. (1983) como aP^b sendo o componente determinístico e ϵ o componente aleatório. Os valores de a e b são os parâmetros da equação. O componente aleatório ϵ é adquirido através da diferença do valor de EI observado em determinado evento e o valor de EI adquirido utilizando a equação determinística (6). Caso os valores de a e b sejam definidos e a distribuição estatística de ϵ seja determinada, o valor de EI pode ser estimado através dos componentes determinísticos e aleatórios da relação de P e EI.

Definindo os valores do componente determinístico e componente aleatório, obtém-se o valor de EI a partir do valor da precipitação, sendo que o componente determinístico da relação P e EI apresenta variação de acordo com a localização e estação do ano. Já o componente aleatório resulta da variação da intensidade de chuva e quantidade durante um episódio de chuva (RICHARDSON et al., 1983).

A precipitação diária pode ser caracterizada como um único evento, como vários eventos ou simplesmente parte de um evento. Assim, o modelo proposto por Richardson et al. (1983) tem o intuito de calcular o valor de EI através de dados de chuvas diários considerando os valores de precipitações diárias como ocorrências de tempestades individuais, podendo definir o valor de P por meio de quaisquer chuvas diárias e/ou tempestade.

Durante eventos diários de chuvas, o valor mínimo de EI pode ser calculado por meio da relação da quantidade diária de P durante um evento, com uma intensidade uniforme de precipitação, considerando assim, $i = I_{30} = P/24$, este valor mínimo equivale a menor quantidade

de erosão que uma chuva pode causar. Deste modo, a partir das equações (2), (3) e (5) é possível calcular o EI_{min} mediante as seguintes equações (RICHARDSON et al., 1983):

$$e_j = 0,119 + 0,0873 \log_{10}(P/24) \quad (7)$$

$$EI_{min} = P(0,119 + 0,0873 \log_{10}(P/24)) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} EI_{min} &= P[(0,119 + 0,0873 \log_{10}(P/24))] (P/24) \\ &= P^2(0,00364 \log_{10} P - 0,000062) \end{aligned} \quad (9)$$

Já o valor máximo de EI considera a situação em que a precipitação diária medida tenha ocorrida em 30 minutos. Ou seja, um evento de chuva com duração igual ou inferior a 30 minutos. (RICHARDSON et al., 1983):

$$e_j = 0,119 + 0,0873 \log_{10}(P/0,5) \quad (10)$$

$$E_{max} = P[0,119 + 0,0873 \log_{10}(P/0,5)] \quad (11)$$

$$\begin{aligned} EI_{max} &= P \left[0,119 + 0,0873 \log_{10} \left(\frac{P}{0,5} \right) \right] \left(\frac{P}{0,5} \right) \\ &= P^2(0,291 + 0,1746 \log_{10} P) \end{aligned} \quad (12)$$

Em casos que a intensidade for maior que 76 mm/h, considerar $P > 38$ mm, assim a equação passa a ser (RICHARDSON et al., 1983):

$$EI_{max} = P(0,283) \left(\frac{P}{0,5} \right) = 0,566 P^2 \quad (13)$$

As variações sazonais influenciam nesta relação entre P e EI, pois há mudanças nas intensidades e quantidades de precipitações de uma estação do ano para outra. Assim, os valores de a e b da equação (6) podem ser estimados por meio de regressão linear dos logaritmos de P e EI. São esperados valores maiores de P e EI durante o verão por apresentarem maiores precipitações e chuvas de maior intensidade, comparado com o período de inverno (RICHARDSON et al., 1983).

O componente determinístico aP^b da relação entre EI e P é definido por meio do valor de b e a variação decorrente da mudança das estações do ano no valor de a . Caso EI seja estimado de acordo com valor de P, sendo utilizado como um modelo de erosão para calcular a erosão por um longo período de tempo, deve-se incluir o componente aleatório ϵ que apresentará a variação de EI para um dado P. Com a aplicação logarítmica a EI e P, o EI é calculado por meio da equação (RICHARDSON et al., 1983):

$$\log EI = \log a + b \log P + \epsilon' \quad (14)$$

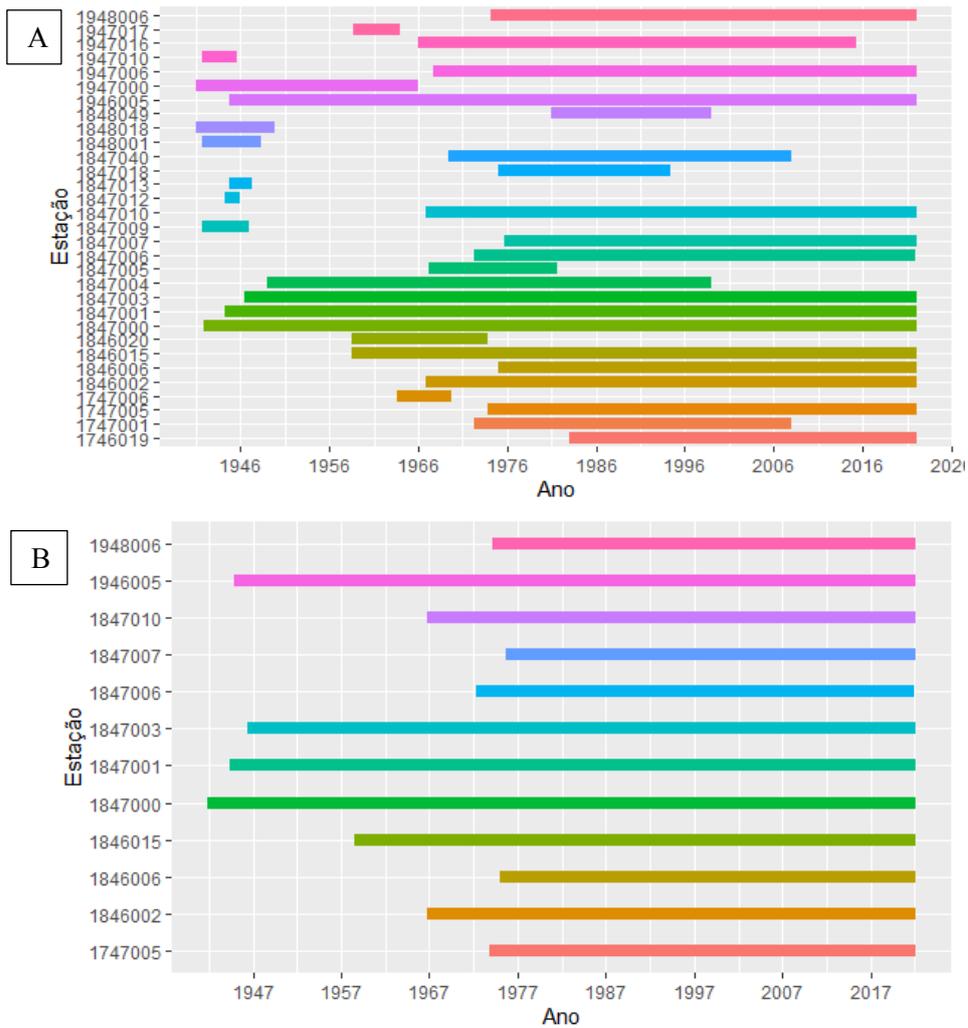
Para cada evento e local, o valor de ϵ' pode ser obtido através da equação (RICHARDSON et al., 1983):

$$\epsilon' = \log EI - (\log a + 1,81 \log P) \quad (15)$$

Através da equação (14) calcula-se o índice de erosão em cada evento diário de chuva, utilizando dados diários de precipitação. Para isso, inicia-se por i) escolher um valor aleatório com uma distribuição normal, com média zero e desvio padrão desejado, ii) determinar o logaritmo de EI para ϵ' e P, iii) utilizar a transformação inversa de log EI para alcançar o valor de EI, e iv) realizar o cálculo de EI_{\min} e EI_{\max} e avaliar se o valor de EI está dentro dos limites. Com os valores de a , b , e o desvio padrão de ϵ' definidos corretamente, os valores calculados para EI devem alcançar a relação determinística adequada para P e o valor estatístico correto para o componente aleatório (RICHARDSON et al., 1983).

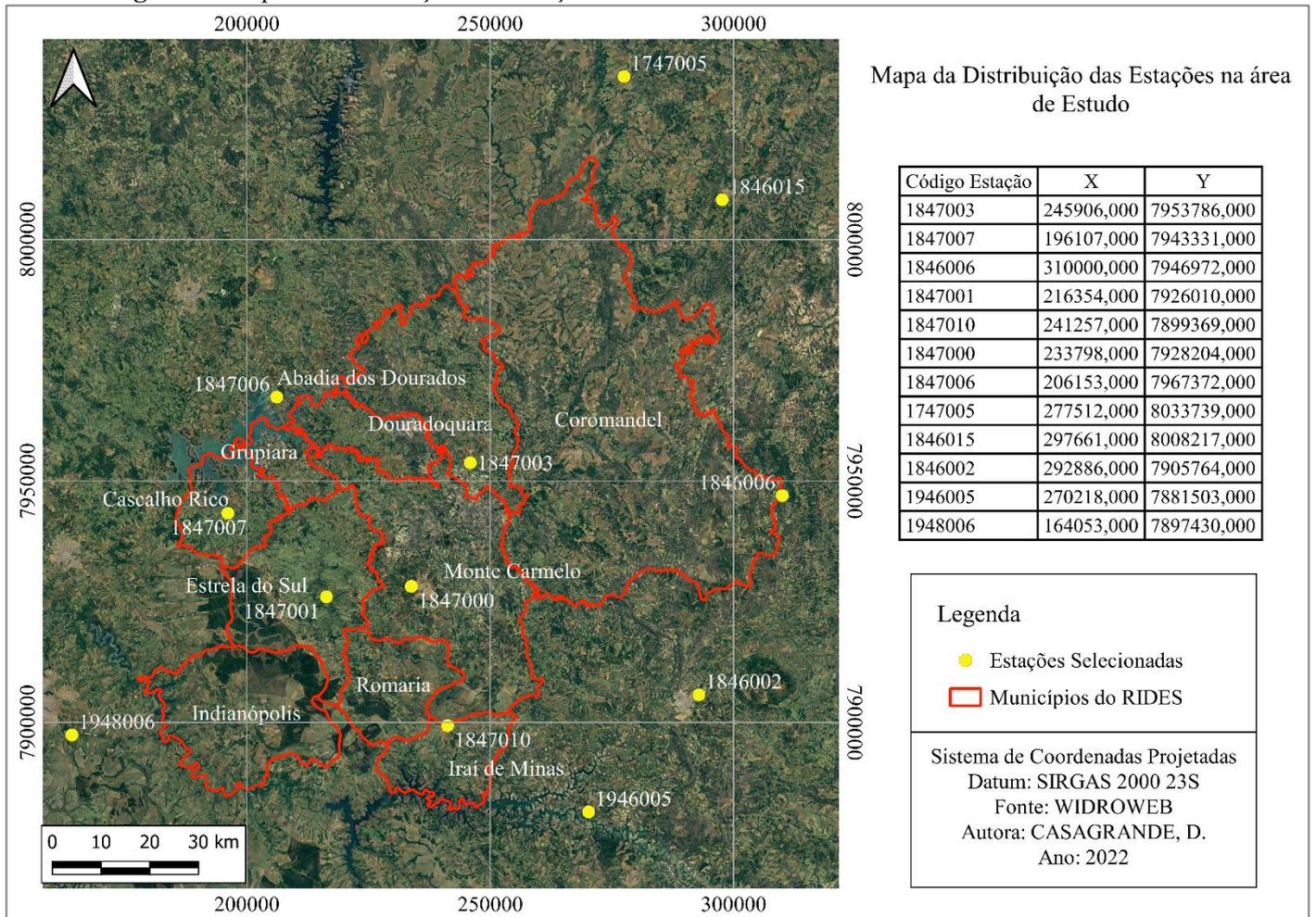
Para calcular o coeficiente R utilizou-se dados de estações pluviométricas da plataforma HIDROWEB (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>) e do Instituto Federal Goiano – IFG *Campus* Morrinhos (<https://ifgoiano.edu.br/home/index.php/meteorologia-2.html>), sendo 31 estações pluviométricas convencionais (Figura 4A) e dessas estações foram escolhidas 12 (Figura 4B). Para a escolha das estações utilizou-se como critério as estações que continham dados dos anos 1976 a 2020; para esta análise de dados usou-se o software livre RStudio, sendo feita a avaliação estatística do conteúdo das estações e correções de dados ausentes e/ou estimados.

Figura 4: A) Estações convencionais encontradas na área de estudo; B) Estações selecionadas para desenvolvimento do estudo.



As estações convencionais (Figura 5) contêm dados diários de precipitação. Na área de estudo não foram encontrados dados de estações telemétricas para calcular o coeficiente R pelo modelo de Wischmeier e Smith (1978). Assim, foi aplicado o modelo de Richardson et al. (1983) para calcular este coeficiente através de dados pluviométricos diários das estações convencionais.

Figura 5: Mapa de Localização das Estações Convencionais na área de Estudo.



Uma vez seleccionadas as estações para o presente estudo, foram realizadas as correções dos dados das estações. Essas correções compreendem o preenchimento de dados faltantes ou acumulados para o período compreendido entre 1976 e 2020, que corresponde a 16437 dados por estação. A Tabela 2 apresenta a quantidade de dados disponíveis para cada estação para o período.

Tabela 2: Dados coletados em cada estação antes das correções realizadas.

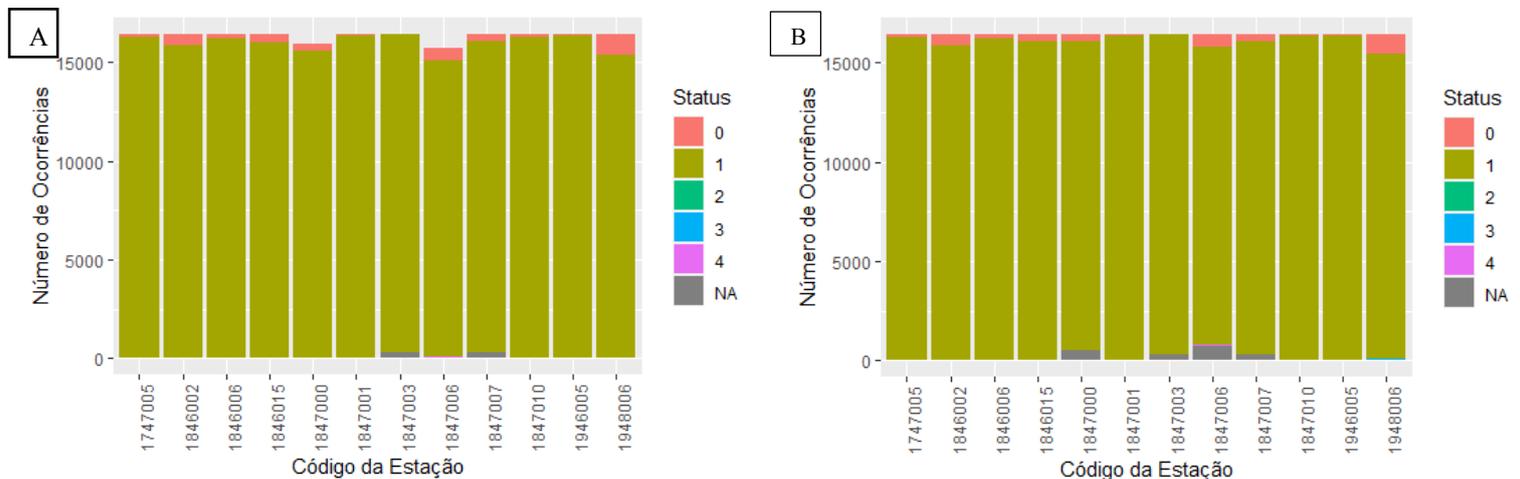
<i>Estação</i>	Código Estação	Nº de dados
1	1747005	16437
2	1846002	16437
3	1846006	16437
4	1846015	16407
5	1847000	15921

Cont...

<i>Estação</i>	Código Estação	Nº de dados
6	1847001	16437
7	1847003	16437
8	1847006	15738
9	1847007	16437
10	1847010	16406
11	1946005	16437
12	1948006	16376

A qualidade dos dados das estações pode ser resumida na Figura 6 onde: 0 – dado ausente, 1 – real, 2 – estimado, 3 – duvidoso, 4 – acumulado. A Figura 5B apresenta a qualidade dos dados após preenchimento dos dados faltantes pelo código ‘NA’ que corresponde a valores não definidos.

Figura 6: A) Situação dos dados brutos das estações convencionais; B) Dados após as correções realizadas no software RStudio.



Na sequência os valores com status 0, 4 ou NA foram interpolados utilizando-se o inverso da distância e expoente determinado pela relação entre a precipitação e as estações onde o status é igual a 1.

3.4.2 Erodibilidade do Solo - K

Considerando os coeficientes da USLE, o coeficiente de erodibilidade do solo está ligado às propriedades do solo, contendo taxas erosivas diferentes de um tipo de solo para outro. Assim um solo que apresente fator de erodibilidade baixo, pode conter feições erosivas graves quando localizados em encostas íngremes ou em locais de altas taxas pluviométricas, e um solo

com erodibilidade alta pode não apresentar feições erosivas quando localizados em áreas de taxas pluviométricas baixas, de declives suaves ou em uma região que apresente um manejo correto dos solos. Sendo assim, a erodibilidade do solo pode ser analisada independentemente dos efeitos dos demais parâmetros da equação (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Cada solo contém um potencial a erosão diferente, mesmo que estes solos apresentem condições semelhantes de relevo, cobertura do solo, práticas conservacionistas e clima, seus coeficientes de erodibilidade serão diferentes, isso se dá pelas propriedades de cada solo. Tais propriedades são responsáveis pelo potencial erosivo dos solos, determinando a maior ou menor fragilidade a erosão (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999 *in* XAVIER et al., 2010).

Um dos fatores determinantes para o aumento da taxa erosiva de um solo é sua capacidade de infiltração, como exemplo, a expansão de cultivo mecanizado em certas lavouras sem aplicação de práticas para a conservação do solo modifica a capacidade de infiltração do solo. A alteração da capacidade de infiltração de um solo, faz com que aumente o escoamento superficial que por sua vez aumenta a erosão laminar. Além disso, a falta de vegetação faz com que o solo fique desprotegido, não tendo os galhos e folhas para diminuir a energia das gotas de chuva e aumentando o ressecamento do solo, facilitando a desagregação das partículas e o seu transporte (CARVALHO et al., 2012).

O valor atribuído para o coeficiente K de cada tipo de solo é obtido por meio de experimentos realizados no campo. Os experimentos de Wischmeier e Smith (1978) consideram uma parcela unitária com comprimento de 22,13 metros e declividade de 9%. O solo é preparado como de costume para o plantio, no entanto se mantém sem cobertura vegetal por dois anos. É realizado a manutenção da preparação do solo em toda primavera, assim é realizado esse tipo de experimento para cada tipo de solo, obtendo o coeficiente de K (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Mannigel et al. (2002) determinaram o valor de K para 31 solos brasileiros e para alguns norte-americanos. Para calcular este fator foi utilizado informações de parâmetros físicos e químicos de solos variados, sendo utilizada a equação:

$$K = 7,48. 10^{-2} . X_1 + 4,48. 10^{-3} . X_2 - 6,31. 10^{-2} . X_3 + 1,04. 10^{-2} . X_4 \quad (16)$$

onde,

K = valor a ser estimado do fator erodibilidade do solo (t.ha.h/ha.MJ.mm);

X_1 = variável “M”, obtida a partir de parâmetros granulométricos;
 X_2 = permeabilidade do perfil do solo;
 X_3 = diâmetro médio considerado das partículas menores do que 2 mm;
 X_4 = relação entre o teor de matéria orgânica e o teor da “nova areia”.

Para estimar o valor de K para cada tipo de solo, Mannigel et al. (2002) avaliou diversos perfis representativos utilizando a seguinte equação para determinar a relação textural dos solos:

$$RT = \frac{\%ARG.B}{\%ARG.A} \quad (17)$$

onde,

RT = relação textural da fração argila;

%ARG. B = distribuição média em % da argila no sub-horizonte B;

%ARG. A = distribuição média em % da argila no sub-horizonte A.

A determinação da perda de solo tolerável considera os fatores: i) profundidade do solo; ii) relação textural e iii) quantidade de terra por unidade de superfície. Em relação à profundidade do solo é considerado apenas um metro para cada tipo de solo, isso se deve à necessidade de homogeneização dos cálculos. Este fator afeta positivamente no desenvolvimento do sistema radicular das plantas e é a característica mais importante para a determinação dos limites de tolerância de perdas de solo por erosão (MANNIGEL et al., 2002).

A relação textural de argila nos horizontes próximos à superfície influencia na infiltração e na permeabilidade do solo. Solos com altas taxas de argilas no horizonte superficial apresentam porcentagens de infiltrações menores, o que pode aumentar a erosão nesses horizontes superficiais. A quantidade de terra por unidade de superfície considera a espessura e a densidade do solo, sendo calculado o peso de terra por unidade de superfície com a equação (MANNIGEL et al., 2002):

$$P = h \times Ds \times f \quad (18)$$

onde,

P = peso da terra (t/m^2);

h = espessura do horizonte escolhido (m);

Ds = densidade do solo (t/m³);

f = fator de conversão.

Por meio dos resultados obtidos por estas equações, o fator K pode ser calculado através do método indireto em cada horizonte escolhido, pela equação de Bouyoucos (HUDSON, 1982; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990 *in* MANNIGEL et al., 2002):

$$K = \frac{((\% \text{ areia} + \% \text{ silte}) / (\% \text{ argila}))}{100} \quad (19)$$

onde,

K = fator erodibilidade do solo de cada horizonte (t.ha.h/ ha.MJ.mm);

% areia = porcentagem da fração areia no horizonte;

% silte = porcentagem da fração silte no horizonte;

% argila = porcentagem da fração silte no horizonte.

O valor de K é calculado para os horizontes iniciais A e B, ou C quando o solo não apresenta o horizonte B. Mannigel et al. (2002), calculou os valores de K para diversos solos encontrados no estado de São Paulo, desta forma, a partir dos resultados obtidos, separou-se os valores de K em seis classes:

- i. extremamente alto: > 0,0600 t.ha.h/ha.MJ.mm;
- ii. muito alto: entre 0,0450 e 0,0600 t.ha.h/ha.MJ.mm;
- iii. alto: entre 0,0300 e 0,0450 t.ha.h/ha.MJ.mm;
- iv. médio: entre 0,0150 e 0,0300 t.ha.h/ha.MJ.mm;
- v. baixo: entre 0,0090 e 0,0150 t.ha.h/ha.MJ.mm;
- vi. muito baixo: < 0,0090 t.ha.h/ha.MJ.mm.

Tabela 3: Valores do coeficiente (K) e tolerância a perda de solos definidos para o estado de São Paulo.

Classe de solo	Relação Textural	Fator K (Mg.h.Mj ⁻¹ .mm ⁻¹)		
		Horizonte A	Horizonte B	Valor _{médio}
Argissolo Amarelo Distrófico arênico A moderada textura arenosa/média	8,79	0,4278	0,0391	0,23345
Argissolo Vermelho Eutrófico típico A moderada textura média/ argilosa	1,49	0,0228	0,0112	0,01700
Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico A moderada textura média/ argilosa	2,54	0,0466	0,01	0,0283
Argissolo Vermelho Eutrófico câmbico A moderada textura argilosa/ muito argilosa	1,64	0,0178	0,0074	0,0126
Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico	1,25	0,0254	0,0186	0,0220
Cambissolo Háptico Tb Distrófico latossólico	1,00	0,0347	0,0345	0,0346
Cambissolo Húmico Distrófico latossólico	1,38	0,0433	0,0267	0,0350
Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico A moderada textura média	1,19	0,0441	0,0361	0,0401
Espodossolo Ferrocárbico Hidromórfico típico	1,56	0,3267	0,5750	0,45085
Gleissolo Háptico Ta Distrófico típico A moderada textura errática	0,52	0,0044	0,0266	0,0155
Latossolo Vermelho Distroférico típico A moderada textura muito argilosa	1,10	0,0071	0,0052	0,00615
Latossolo Vermelho Ácrico típico A moderada textura muito argilosa	1,45	0,0263	0,0152	0,02075
Latossolo Vermelho Distrófico típico A moderada textura muito argilosa	1,05	0,0061	0,0038	0,00495
Latossolo Amarelo Distrófico típico A proeminente textura média	1,09	0,0570	0,0513	0,05415
Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico A moderada textura argilosa	1,15	0,0112	0,0081	0,00965
Latossolo Vermelho Acriférico típico	1,17	0,0085	0,0058	0,00715
Luvissolo Crômico Pálico arênico A moderada textura média/argilosa	4,84	0,2466	0,0313	0,13895

Cont...

Classe de solo	Relação Textural	Fator K (Mg.h.Mj ⁻¹ .mm ⁻¹)		
		Horizonte A	Horizonte B	Valor _{médio}
Luvissolo Crômico Pálico planossólico A moderada textura arenosa/média	3,53	0,1509	0,0353	0,0931
Neossolo Quartzarênico Órtico típico A fraco	1,16	0,1448	0,1081	0,12645
Nitossolo Háplico Distrófico típico A moderada textura média/argilosa	1,33	0,0355	0,0187	0,0271
Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico A moderada textura argilosa/ muito argilosa	1,20	0,0130	0,0062	0,0096
Nitossolo Háplico Eutroférico chernossólico	1,25	0,0104	0,0065	0,00845
Nitossolo Vermelho Eutroférico típico A moderada textura muito argilosa	1,04	0,0081	0,0074	0,00775
Planossolo Hidromórfico Eutrófico típico A proeminente textura média/ argilosa	2,24	0,0317	0,0088	0,02025

Fonte: Modificado de MANNIGEL et al., 2002.

Gómez (2012) reuniu valores diversos de K disponibilizados em bibliografias, separando por tipos de solos, com informações dos métodos empregados para determinar cada valor de K e suas respectivas fontes.

Tabela 4: Valores de K para vários tipos de solos encontrados em diversas bibliografias

Ordem	Valor K (Mg.h.Mj ⁻¹ .mm ⁻¹)			Fonte
	Valor _{min}	Valor _{max}	Valor _{médio}	
Argissolos	0,0220725	0,089	0,04825103	RBCS (1989) / (1997); Moretti; 5º SIMPOSIO NACIONAL; BUENO (1994); PCBAP (1997); FIORIO (1998); CERRI (1999); CAIUÁ- CESP (2002); FUJIHARA.
Cambissolos	0,025	0,074	0,05090093	MORETTI; PCBAP (1997); FIORIO (1998); RANIERI (2000).

Cont...

Ordem	Valor K (Mg.h.Mj ⁻¹ .mm ⁻¹)			Fonte
	Valor _{min}	Valor _{max}	Valor _{médio}	
Chernossolos	0,0183486	0,0438328	0,03089535	PCBAP (1997); NETO (2004).
Espodosolos	0,0307	0,0903	0,05925	CERRI (1999); NETO (2004).
Gleissolos	0,001019	0,063	0,036123	PCBAP (1997); FIORIO (1998).
Latosolos	0,0087	0,0313	0,01624788	MORETTI; 5° SIMPOSIO NACIONAL; BUENO (1994); PCBAP (1997); CERRI (1999); CAIUÁ - CESP (2002); FUJIHARA; BURIN (1999).
Neossolos	0,00101	0,054	0,03505931	MORETTI; BUENO (1994); PCBAP (1997); FIORIO (1998); CERRI (1999); RANIERI (2000); CAIUÁ - CESP (2002); FUJIHARA; BURIN (1999).
Nitossolos	0,0174	0,037	0,02374971	BUENO (1994); PCBAP (1997); FIORIO (1998); CERRI (1999); BURIN (1999).
Organossolos	0,0467	0,0681	0,06096667	CERRI (1999)
Planossolos	0,00203	0,0050968	0,00305227	PCBAP (1997)

Fonte: Modificado de Gómez (2012).

Na Tabela 3 a classificação dos solos é até o quarto nível categórico e a Tabela 4 apresenta apenas a classificação do primeiro nível categórico, no entanto, não existe grande discrepância entre os valores de K entre ambas as tabelas.

Para a determinação do coeficiente K, foi utilizado como base os valores médios de erodibilidade do solo obtidos dos diversos valores atribuídos a diferentes tipos de solos

descritos pelos autores citados nas Tabelas 3 e 4 e o mapa de solos compilado pela EMBRAPA da área de estudo.

Os valores médios de erodibilidade para cada tipo de solo da área de estudo foram organizados na tabela de atributos do mapa de solos e feita a conversão dos dados vetoriais para dados raster (rasterização), obtendo assim o mapa de erodibilidade dos solos no software livre QGIS 3.22.17.

3.4.3 Fator topográfico – LS

O fator topográfico avalia a erosão do solo através da declividade do terreno e do comprimento da encosta, sendo apontado como um dos principais causadores da erosão do solo. Pois neste fator é combinado o efeito da declividade e do comprimento da encosta, responsáveis por aumentar a velocidade da lâmina d'água do escoamento superficial e conseqüentemente aumentar a taxa de transporte das partículas do solo, intensificando a ação erosiva provocada pela água (VALLADARES et al., 2012; COSTA, 2016; SILVA et al., 2017). Para determinar este valor WISCHMEIER e SMITH (1978) usaram uma parcela unitária correspondendo a uma área de 22,13 m² com inclinação de 9%:

$$LS = (\lambda / 72,6)^m (65,41) \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065 \quad (20)$$

sendo,

λ = comprimento do talude (m);

θ = ângulo de inclinação;

m = 0,5 caso a declividade seja de 5% ou mais, 0,4 para declividades de 3,5 a 4,5%, 0,3 para declividades de 1 a 3% e 0,2 em regiões uniformes com menos de 1% de declividade.

Para elaboração desta equação foram observados os efeitos da declividade e do comprimento do talude na erosão do solo, sendo utilizado como estudo uma área de plantio, com declividades que variavam de 3 a 18% e comprimento de talude de 9,14 a 91,44 metros (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

O fator LS é calculado baseado na declividade e no comprimento de rampa, com isso, o cálculo deste fator pode ser realizado aplicando-se a ferramenta SIG, usando o modelo digital de elevação (MDE) como base para este cálculo. Por mais que os componentes declividade e comprimento de rampa sejam analisados em conjunto, primeiro é calculado o valor de S

(Declividade) e depois o valor de L (Comprimento da rampa), e durante este procedimento são obtidas as direções de fluxo e acumulação. Assim, com ambas as variáveis calculadas, é realizada a multiplicação de L e S (GOMES et al., 2018).

Para que este cálculo seja o mais confiável possível, o MDE deve ser de alta qualidade para que os erros de processamento sejam mínimos. Além disso, os algoritmos a serem empregados nesta operação precisam ser bem escolhidos (GÓMEZ, 2012).

Utilizando o software livre QGIS 3.16.0 para o cálculo do fator LS, tendo como base para este cálculo o modelo digital do terreno do satélite ALOS PALSAR com resolução de 2,5 m, foi necessário preencher as depressões espúrias com a ferramenta Fill Sinks da extensão SAGA do QGIS.

Com o modelo digital do terreno hidrologicamente condicionado foi aplicado a ferramenta da extensão SAGA “LS – Factor, Field Based” no QGIS 3.16.0. Esta ferramenta calcula o coeficiente LS automaticamente e é possível escolher três opções de modelos para este cálculo, assim foi escolhido o do Wischmeier e Smith (1978) para obtenção do fator LS da área de estudo.

3.4.4 Uso e Ocupação dos Solos – C

O fator de uso e ocupação do solo é analisado juntamente com o tipo de manejo realizado, já que não podem ser calculados separadamente. O método de plantio e tipo de cultura, seja anual ou perene, influenciam na erosão dos solos, já que algumas culturas possuem raízes maiores que outras e protegem melhor o solo contra a ação das gotas da chuva. Além do mais, cada tipo de cultura requer preparos diferentes do solo, que pode ser preparado de maneira que apresente rugosidade e curvas de níveis ou pode ser deixado totalmente regular e liso (WISCHMEIER; SMITH, 1978; FARINASSO et al., 2006).

Além disso, logo após a colheita, os resíduos deixados se transformam em cobertura e quando preparado o solo para o próximo ciclo de cultivo, esses resíduos tornam-se matéria orgânica. Uma boa cobertura necessita ter uma quantidade de resíduos orgânicos considerável, apresentar uma quantidade e distribuição de precipitações significativa, fertilidade do solo e práticas de manejo do solo para ser classificado como uma cobertura boa. A cobertura do solo tem o objetivo de o proteger contra a ação erosiva das chuvas, desta maneira as técnicas de manejo desses solos influenciam nesse parâmetro, já que em culturas com atividade agrícola intensa a taxa de erosão é bem maior (WISCHMEIER; SMITH, 1978; XAVIER et al., 2010; GÓMEZ, 2012).

O coeficiente C da USLE é calculado pela relação de perda de solo com plantio que apresentem condições específicas de solos expostos, já que dependendo do tempo e da frequência que o solo é cultivado, fatores como porosidade, compactação, rugosidade, entre outros, podem diminuir a taxa de infiltração, favorecendo o escoamento superficial. Conseqüentemente, o fator C calcula o impacto de todas as variáveis de cobertura do solo e de seu manejo, sendo que o valor deste coeficiente muda para áreas de construção, onde é retirado todo o material superficial com restos vegetais e matéria orgânica, assim o valor do coeficiente C passa a ser $C = 1$, e em locais onde há presença de vegetação, restos vegetais e matéria orgânica os valores de C são inferiores a 1 (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Utilizando a ferramenta SIG é possível calcular o coeficiente C por meio de classificação automática, reclassificação de mapas disponíveis de uso do solo e de cobertura vegetal dos biomas ou através de dados disponibilizados na bibliografia (Tabela 5) (GÓMEZ, 2012).

Tabela 5: Dados disponibilizados em diversas bibliografias, calculados para coberturas variadas.

Valor de C	Uso e Ocupação do Solo	Fonte
0,001	Vegetação transitória	ARS (1975)
0,1514	Pasto	
0,0004	Florestas	
0,0383	Pastagem formada	
0,1107	Cultura permanente	
0,2588	Cultura temporária	
0,3658	Pastagem em reforma	
0,00019	Floresta	MORGAN, R, P, C (1995)
0,15	Cerrado	
0,22	Caatinga	
0,18	Pasto	
0,2	Área urbana	
0,002	Floresta primária	SHI (2002)
0,006	Floresta secundária	
0,1	Arroz	
0,11	Culturas permanentes	
0,15	Solo agrícola exposto	SIVERRTUN (2003)

Cont...

Valor de C	Uso e Ocupação do Solo	Fonte
0,1	Culturas anuais	
0,075	Culturas perenes	
0,05	Plantio direto	
0,03	Áreas urbanas	
0,01	Gramíneas	
0,0005	Florestas	
0,04	Floresta manejada	
0,01	Florestas	BERTONI E LOMBARDI NETO (1983)
0,26	Campos	
0,29	Agricultura permanente	
0,46	Agricultura irrigada	
0,404	Solos expostos	

Fonte: Modificado de GÓMEZ, 2012.

3.4.5 Fator de Práticas para Controle da Erosão do Solo - P

Este fator avalia a eficácia das práticas de controle da erosão dos solos realizadas antes do cultivo; em áreas íngremes é comum a criação de terraços, além disso há outras práticas comuns que auxiliam no controle da erosão, como rotações com plantio de grama, tratamentos de fertilidade e quantidades maiores de resíduos da colheita deixados no campo. Tais medidas auxiliam na diminuição do escoamento superficial, diminuem o transporte de sedimentos e protegem o solo contra os impactos causados pelas gotas de chuva, além de proteger os corpos hídricos de serem assoreados, evitando assim enchentes (WISCHMEIER; SMITH, 1978; SENA, 2008).

A prática de cultivo em curvas de nível tem auxiliado na diminuição da taxa de erosão, ajudando a diminuir o escoamento superficial além de reduzir a velocidade da água escoada e, portanto, reduz o transporte de sedimentos e favorece a infiltração de água nos solos. Esta prática apresenta resultados melhores para chuvas de média a baixa intensidades (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Atualmente no Brasil, a perda de solo nas áreas urbanas ocorre pela construção indevida nas encostas sem que seja feito procedimentos como o de terraplenagem para receber a obra e rede de escoamento de águas pluviais. Com isso, há o transporte de sedimentos pelo escoamento superficial e a desestabilização da encosta, resultando em escorregamentos e acidentes sérios, podendo ocasionar perdas materiais e óbitos (SENA, 2008).

Como este trabalho tem por objetivo a elaboração de um mapa de suscetibilidade à erosão e não o cálculo de perda de solo anual, não serão utilizados os parâmetros C e P. Assim, define-se a suscetibilidade à erosão como sendo composta por aqueles fatores naturais intrínsecos do meio e com pouca ou nenhuma influência antrópica. Ou seja, são considerados apenas os fatores R, K e LS.

4 PARÂMETROS DO PROCESSO DE EROSÃO

De acordo com Guerra e Cunha (2015), a erosão dos solos é um problema global, principalmente em países em desenvolvimento com climas tropicais. Desde os anos 90, os estudos sobre este tema vem se intensificando, o que mostra a preocupação a respeito dos processos erosivos, como evidenciado nos trabalhos de SANTOS et al., 1992; MENK e MIRANDA, 1997; CERRI, 1999; HERNANI et al., 1999; BARBOSA e FEARNSSIDE, 2000; CASTRO et al., 2006; MELLO et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2008; WEILL e SPAROVEK, 2008; FEITOSA et al., 2010; XAVIER et al., 2010; DECHEN et al., 2015; MOMOLI e COOPER, 2016; VIEL et al., 2017. Com o uso excessivos dos solos sem que haja um manejo correto, a perda de solo anual passa de 200 milhões de toneladas no Brasil (CASTRO, 1991 *in* WEILL; SPAROVEK, 2008).

A intensa erosão dos solos apresenta diversos impactos, sendo eles o agravamento do risco de desertificação, destruição das nascentes, alteração da calha dos rios pelo desmoronamento e deposição de sedimentos no leito, formação de sulcos indesejáveis no terreno e poluição dos corpos hídricos causando o aumento da turbidez na água e do potencial de eutrofização (CARVALHO, 2008 *in* GOMES et al., 2018).

Dentre os impactos causados pelos processos erosivos, o aumento da produção de sedimentos pode ser o mais preocupante, pois acarreta no assoreamento de corpos hídricos. Estes sedimentos podem se originar em diversos ambientes, como locais de agricultura e mineração, e quando estes sedimentos são transportados eles podem carregar partículas com características poluentes, sendo assim um vetor de contaminação para os corpos hídricos (XAVIER et al., 2010; CERRI, 1999).

A erosão dos solos pode ocorrer de diversas maneiras: pela ação do vento, da água ou do gelo, esta última em regiões de alta latitude. A erosão causada pelos ventos é denominada erosão eólica, este tipo de erosão é mais intensa em locais de clima árido a semiárido, onde o intemperismo físico é mais atuante, já em regiões de clima tropical este tipo de erosão ocorre de forma mais branda. Através da erosão eólica, os ventos transportam sedimentos dos solos a

uma distância significativa, podendo chegar a centenas de quilômetros e depositando estes sedimentos em outros continentes (CERRI, 1999).

A erosão originada pela ação da água, nomeada de erosão hídrica, é mais intensa em ambientes de clima tropical, onde há altas taxas de precipitação e o intemperismo químico é mais atuante, pois a ação das chuvas faz com que as partículas do solo sejam desprendidas. Isso pode ocorrer de duas formas: i) através do impacto das gotas de chuva na superfície do solo ou ii) pelo escoamento superficial (CERRI, 1999).

A erosão causada pela chuva é responsável por modificar a qualidade química, física e biológica dos solos, causando redução nas taxas de infiltração, na capacidade de retenção de água, nutrientes e teor de matéria orgânica e afetam desfavoravelmente a biota e a espessura do solo. Estes efeitos impactam na produtividade dos solos e geram problemas ambientais e de saúde pública graves, além disso, podem prejudicar o ecossistema, danificando a qualidade e a quantidade de água, e impactar a biodiversidade, produtividade agrícola e atividades recreativas (FURTADO, 2019).

Os processos erosivos apresentam fatores controladores que são responsáveis pelo aumento ou diminuição das taxas erosivas, sendo eles: i) erosividade da chuva; ii) propriedades do solo; iii) cobertura vegetal e iv) características topográficas. A ação antrópica pode afetar estes fatores de forma a acelerar ou reduzir os processos erosivos (GUERRA; CUNHA, 2015).

4.1 Erosividade da chuva

A erosividade da chuva é causada pela ação das gotas de chuva (*splash*), onde por meio delas ocorre a desagregação das partículas de solo. Tal fator é intensificado de acordo com a distribuição pluviométrica no tempo e espaço em determinada região (CERRI, 1999). Com as chuvas intensas ou torrenciais durante os períodos chuvosos, o impacto das gotas de chuva no solo é maior, fazendo com que a taxa erosiva destes tipos de chuva também seja maior (DAEE/IPT, 1990 *in* SENA, 2008).

Nas regiões áridas a semiáridas, as precipitações são baixas e comumente acontecem em um curto espaço de tempo e com grande intensidade. Desta maneira, estas chuvas causam erosões comparadas a de chuvas torrenciais, apresentando altas taxas erosivas (MAFRA, 1981 *in* SENA, 2008).

O volume de chuva é um parâmetro importante para as taxas de infiltração, pois à medida que os poros do solo são saturados, a taxa de infiltração diminui consideravelmente (STOCKING, 1977 *in* GUERRA e CUNHA, 2015). Este cenário muda de acordo com alguns

fatores como: propriedades do solo, características da encosta, cobertura vegetal e tipo de chuva, visto que quanto mais intensa seja a chuva, maior será o escoamento superficial também, pois a taxa de infiltração é extrapolada (HORTON, 1933 *in* GUERRA; CUNHA, 2015).

4.2 Propriedades do Solo

As propriedades dos solos que podem influenciar na erosão são: textura, densidade aparente, porosidade, teor de matéria orgânica, teor e estabilidade dos agregados e pH dos solos. Estas propriedades se alteram com o tempo, assim é importante estudá-las e compreendê-las, pois à medida que varia alguma dessas propriedades, o solo pode se tornar mais suscetível à erosão (GUERRA; CUNHA, 2015).

As espessuras dos solos juntamente com as propriedades biológicas, físicas, químicas e mineralógicas controlam o estado de agregação das partículas, alterando sua resistência a erosão, podendo aumentar ou diminuir. Em solos rasos, a saturação dos horizontes superficiais é mais rápida, o que beneficia o escoamento superficial (FRÓES FILHO et al., 2015).

A matéria orgânica presente nos solos auxilia no aumento da estabilidade dos agregados, mostrando resultados melhores do que a argila. No solo que contém uma alta estabilidade dos agregados nota-se uma diminuição da erodibilidade, isso acontece por conta do alto índice de porosidade nesses solos, aumentando as taxas de infiltração, que por sua vez diminui o escoamento superficial. Além disso, a esta estabilidade alta dos agregados reduz a erosão por *splash*, pois demonstra uma resistência maior ao impacto das gotas de chuva (GUERRA; CUNHA, 2015).

4.3 Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal do solo e a rugosidade superficial gerada pelos processos de preparação do solo pela ação antrópica ajudam a reduzir a erosão hídrica, de modo que a cobertura vegetal absorva a energia cinética das gotas de chuva, evitando o impacto na superfície do solo. A rugosidade superficial tem a função de reter parte da água escoada pela superfície, provocando a infiltração desta água e reduzindo a velocidade e volume de enxurradas, além de conter os sedimentos derivados da erosão (CASTRO et al., 2006).

Áreas com solos expostos tendem a exibir uma erosão laminar grave, com grande transporte de sedimentos e desenvolvimento de sulcos (KERTZMAN et al., 1995), provocando a desestabilização dos solos (FRÓES FILHO et al., 2015). Áreas com densidade elevada de cobertura vegetal apontam baixas taxas de erosão e de *runoff*, pois os galhos e folhas da

vegetação interceptam as gotas de chuva, diminuindo sua velocidade e conseqüentemente reduzindo a ação erosiva. Desta maneira, quando não há cobertura vegetal, a intensidade do escoamento e do transporte de sedimentos é maior e aumenta rapidamente. Normalmente isso ocorre em locais de clima semiárido com agricultura ou pastagens, em solos com menos de 70% de cobertura vegetal. Além disso, a cobertura vegetal influencia na taxa de infiltração de água e no teor de matéria orgânica disponível no solo (VALLADARES et al., 2012; FRÓES FILHO et al., 2015; GUERRA; CUNHA, 2015).

4.4 Características das Encostas

As características das encostas são capazes de aumentar o transporte dos solos por meio da declividade, do comprimento e da forma. A declividade proporciona o aumento do efeito de *runoff*, pois aumenta a velocidade do escoamento da água das chuvas, intensificando a erosão (GUERRA; CUNHA, 2015). Os solos localizados em encostas com declividades acima de 30% apresentam taxas altas de erosões (LUK, 1979 *in* GUERRA; CUNHA, 2015).

Além disso, o relevo apresenta superfícies erosivas e deposicionais, podendo ocorrer ambas as superfícies ou apenas uma. Desta forma, considera-se relevos com superfícies mais antigas, localizadas comumente em áreas planas, propensas à ocorrência de deposição e relevos de superfícies recentes, tendem a ser mais erosivos, localizados principalmente em áreas declivosas (CAMPOS et al., 2008).

Entender a evolução do relevo auxilia na compreensão dos agentes erosivos. Desta forma, relevos constituídos por cristas longas com encostas curtas do tipo convexo-côncavas e em áreas de interflúvios que se estendem até o fundo dos vales com topografia suavemente ondulada, proporcionam um aumento na taxa de erodibilidade (EVANS, 1980;1990 e MORGAN, 1977 *in* GUERRA; CUNHA, 2015). Isso ocorre por serem relevos de alta declividade, favorecendo o escoamento superficial e conseqüentemente aumentando a taxa erosiva (CAMPOS et al., 2008).

As formas de relevo com diferentes declives afetam a ação pedogenética, pois a taxa de infiltração é diferente em cada tipo de relevo e influencia na formação de solos. Relevos com formas convexas apresentam solos menos espessos em comparação aos solos encontrados em relevos côncavos, o que indica uma taxa erosiva maior em relevos com formatos convexas (SANCHES et al., 2009).

A ausência de planejamento do uso e ocupação dos solos causam erosões intensas e rápidas, resultando em perda de solo. Desta maneira o estudo da suscetibilidade à erosão

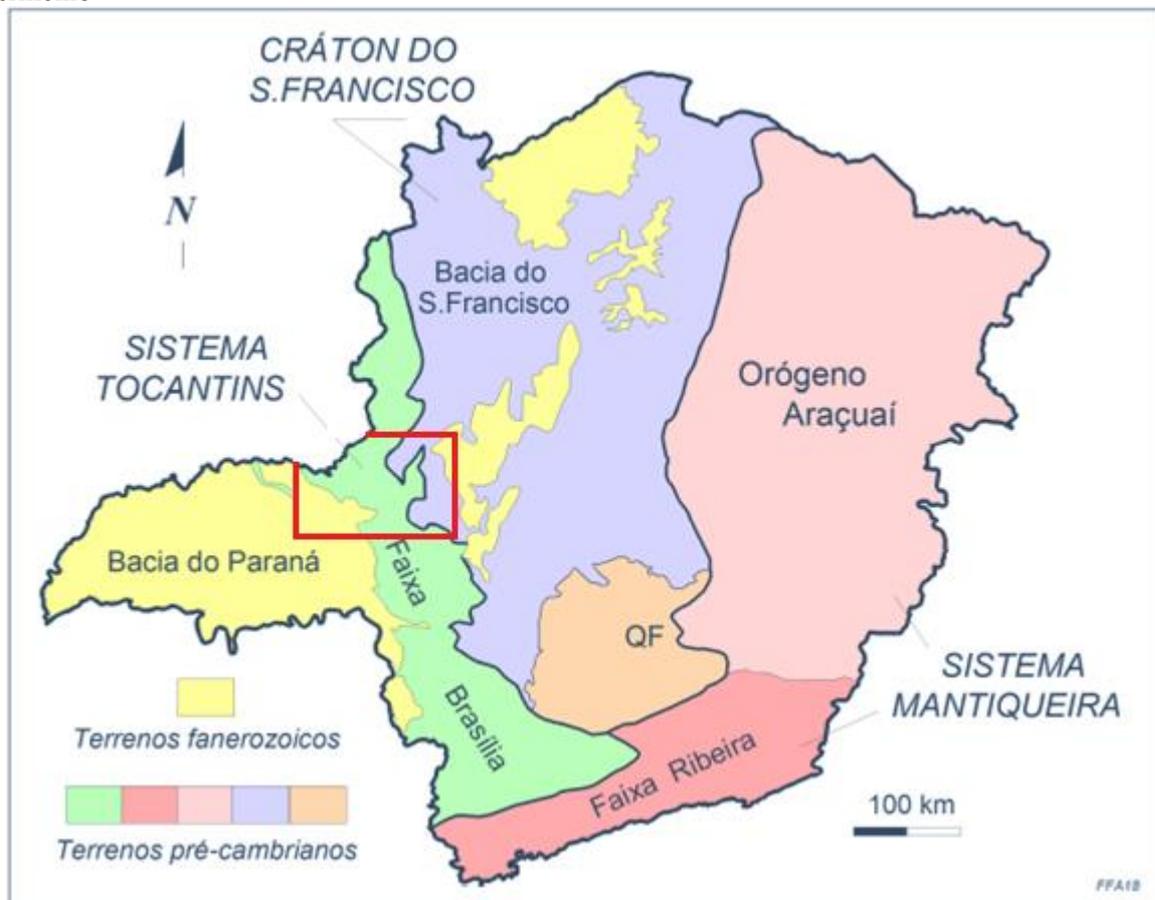
funciona como ferramenta importante para o manejo correto desses locais (VALLADARES et al., 2012).

5 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA, MORFOLÓGICA, PEDOLÓGICA E CLIMÁTICA

5.1 Caracterização Geológica, Pedológica e Geomorfológica

A área de estudos localiza-se predominantemente na Faixa de Dobramentos Brasília, na borda da Bacia do Paraná e porções na borda ocidental do Cráton São Francisco (Bacia Sanfranciscana) (Figura 7).

Figura 7: Mapa das divisões dos domínios tectônicos de Minas Gerais e área de estudos delimitada em vermelho



Fonte: Alkmin, 2018.

5.1.1 Bacia Sanfranciscana

O Grupo Mata da Corda ocorre na porção sudoeste da Bacia Sanfranciscana, contendo materiais vulcanoclásticos e vulcânicos, correspondendo a um dos maiores vulcanismos de

kamafugitos já estudados (SGARBI et al., 2001; SGARBI; SGARBI 2003 *in* DIAS, 2011). Estas rochas estão sobre as rochas do Grupo Areado, apresentando uma discordância erosiva entre estes grupos (RIMANN, 1917; BARBOSA, 1965, SGARBI, 1989 *in* FERNANDES, 2013), sendo dividido em duas formações: Formação Patos e Formação Capacete (CAMPOS e DARDENNE (1997a) *in* FERNANDES, 2013)

A Formação Patos é caracterizada como a parte basal do Grupo Mata da Corda, formada por intrusões subvulcânicas kamafugíticas, kimberlitos e vulcanoclásticas (SGARBI, 1991; SGARBI et al., 2001 *in* FERNANDES, 2013). Já a Formação Capacete, encontra-se no topo do grupo sendo constituída por rochas vulcanoclásticas, equivalentes a conglomerados, arenitos epiclásticos e materiais piroclásticos (SGARBI et al., 2001 *in* FERNANDES, 2013).

A zona fisiográfica do Alto Paranaíba onde se localizam as litologias descritas é definida pela presença de superfícies aplainadas em diferentes níveis de altitude, separadas por áreas acidentadas. A região de aplainamento de maior altitude nivela o topo dos chapadões, equivalente à superfície Sul-Americana (BRAUN, 1971 *in* MOTTA et al., 2004), em alguns locais nota-se um aplainamento quase perfeito e, em outros, leves ondulações.

O ciclo de erosão Velhas foi responsável por esculpir grande parte do relevo atual da região do Alto Paranaíba, proporcionando a dissecação da superfície Sul-Americana e a construção de superfícies aplainadas mais recentes. Devido a este ciclo, o aplainamento encontra-se em um estágio evolutivo incipiente, sendo capaz de imprimir nitidamente na paisagem o predomínio de áreas dissecadas sobre áreas efetivamente aplainadas (MOTTA et al., 2004).

A descontinuidade da superfície de aplainamento do ciclo Velhas e a discrepância de nível entre seus segmentos está associada aos níveis de base locais e à resistência diferencial do material trabalhado. Em alguns locais, partindo de áreas efetivamente aplainadas que se encontram mais estáveis e próximas aos rios maiores, sobem em plano inclinado pelos vales dos seus afluentes, estreitando-se e aproximando-se das cotas altimétricas da superfície Sul-Americana (MOTTA et al., 2004).

5.1.2 Faixa de Dobramentos Brasília

A Faixa Brasília está inserida na borda ocidental do Cráton São Francisco, apresenta idades neoproterozóicas e se estende pelos estados de Goiás, Minas Gerais e Tocantins. Esta faixa de dobramentos foi dividida por Uhlein et al. (2012) em Unidade estrutural do Cráton do São Francisco, Unidade externa e Unidade interna. Sendo a Unidade estrutural do Cráton do

São Francisco formada pelo Grupo Bambuí e Grupo Vazante com sedimentos argilo-carbonáticos levemente dobrados a sub-horizontais, além de extensas coberturas fanerozóicas. O limite com a Faixa Brasília é apontado por falhas de empurrão de baixo a médio ângulo que revelam o Grupo Paranoá ou o Grupo Canastra que são unidades mesoproterozóicas.

A Faixa Brasília na região apresenta suas vergências estruturais para o Cráton São Francisco, que segundo Dardenne (2000) e Cordani et al. (2013) suas características litológicas são de uma espessa cobertura metassedimentar neoproterozóica, representada pelos grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Ibiá, estando sobrepostos ao embasamento paleoproterozóico e sobre porções do arqueano na margem ocidental do Cráton São Francisco.

A unidade externa da Faixa Brasília é formada por unidades metassedimentares do período Mesoproterozóico como os Grupos Araí, Natividade, Paranoá e Canastra, assim como porções do embasamento Arqueano-Paleoproterozóico que evidenciam o rejuvenescimento em função da tectônica brasileira. Além disso, a unidade interna da Faixa Brasília é gerada por unidades alóctones do Grupo Araxá e Grupo Serra da Mesa, como também, porções do embasamento fortemente envolvido na tectônica brasileira (UHLEIN et al., 2013). Localmente ocorrem complexos máfico-ultramáficos granulitizados e sequências vulcano-sedimentares de idade proterozóica (PIMENTEL et al., 2000 in UHLEIN et al., 2012)

Na porção sul da Faixa Brasília Meridional, a porção interna da Faixa Brasília é formada por um sistema de nappes vergentes para ESE, geradas por espessas sequências metassedimentares, metavulcânicas, contendo melanges ofiolíticas e intrusivas graníticas (SANTOS et al., 2021).

Na área de estudo há ocorrência do Complexo Monte Carmelo, sendo descrito por Seer e Moraes (2013) como um batólito granítico que ocorre entre os municípios de Monte Carmelo – MG e Abadia dos Dourados – MG, associado a anfíbolitos de granulação média a grossa. O Complexo Monte Carmelo foi formado através de processos de fusão das rochas formadoras do arco magmático de Goiás, este do tipo colisional, existem também registros de material pré-colisional, através do método Rb/ Sr SiO_2 . Além disso, este batólito apresenta deformações nas bordas, estando com o núcleo preservado.

Em sua grande maioria, os granitos do Complexo Monte Carmelo apresentam texturas porfiríticas e equigranulares com grau de alteração. A mineralogia do complexo consiste nos minerais: quartzo, ortoclásio, plagioclásio e biotita como minerais formadores de rocha, entretanto também existem os minerais acessórios que foram formados através de processos hidrotermais, que são: apatita, zircão, epidoto e granada. Há uma variância de acordo com

determinadas localidades, onde os granitos são classificados como tonalitos e granodioritos, chegando até sienogranitos e monzogranitos (SEER; MORAES, 2013).

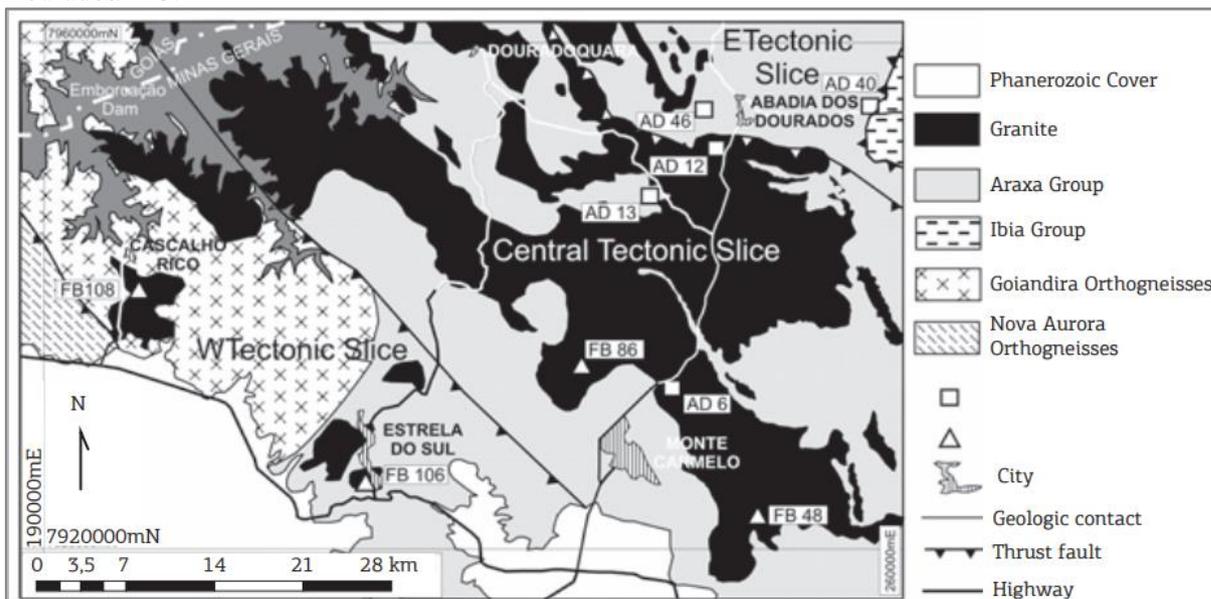
A Suíte Estrela do Sul é um corpo granítico pequeno de forma elíptica, que aflora no município de Estrela do Sul – MG, onde encontra-se intrudido em xistos granada-quartzo, anfíbolito e talco xisto. Estes afloramentos estão deformados nas bordas e no núcleo encontram-se preservados. Os granitos Estrela do Sul apresenta características de zona de subducção e anomalias negativas de Sr, P e Ti, sendo caracterizado como granitos colisionais e de arco vulcânico (SEER; MORAIS, 2013).

A Suíte Estrela do Sul apresenta a predominância de fácies equigranulares, contém coloração cinza claro e granulometria fina a média, sendo formado por minerais como quartzo, ortoclásio e microclínio, oligoclásio, biotita, muscovita e opacos, além de minerais acessórios como zircão, apatita, granada e turmalina, e secundariamente sericita, epidoto e carbonato. Estes granitos são classificados no diagrama QAP como sienogranitos com fácies de monzogranitos (SEER; MORAIS, 2013).

O Complexo Abadia dos Dourados está inserido no Grupo Araxá, correspondendo a uma sequência vulcano-sedimentar que se encontra nas proximidades da cidade de Abadia dos Dourados - MG, apresentando uma orientação NW-SE. O contexto litológico inclui anfíbolitos encaixados nos mica-xistos de granulação fina, onde na base da litologia é possível notar uma granulação mais grosseira, diminuindo em direção ao topo. Ainda fazem parte do complexo os metagabros, rochas essas que apresentam corpos extremamente alongados e tetraédricos, sendo os anfíbolitos e os metagabros os correspondentes da sequência vulcânica toleítica (BROD, 1992).

Além do mais fazem parte da unidade, a sequência meta-sedimentar, sendo composta por filitos sericíticos que variam sua coloração em tons de cinza e as vezes apresentam coloração avermelhada. A litologia exhibe intercalações onde se depara com concentrações maiores de filitos carbonosos e as vezes quartzosos (CPRM, 2015).

Figura 8: Mapa geológico da região de Monte Carmelo/MG, Cascalho Rico/MG e Abadia dos Dourados/MG.



Fonte: SEER; MORAIS, 2013.

A unidade morfoestrutural do Complexo Granito – Gnáissico e Metassedimentar é constituído pelas rochas deste complexo e pelas rochas metassedimentares do Grupo Araxá, abrangendo o Planalto Dissecado do Paranaíba, com formas de relevo denudacionais convexas.

5.1.3 Bacia do Paraná

A região do Triângulo Mineiro está inserida na unidade dos Planaltos e Chapadas da Bacia Sedimentar do Paraná (RADAMBRASIL, 1983 *in* BACCARO et al., 2001), tendo presente rochas do Grupo Bauru (Formação Uberaba, Formação Marília e Formação Adamantina), abaixo deste grupo encontra-se o derrame basáltico do Serra Geral, e acima do Grupo Bauru encontra-se os sedimentos de idade cenozóica, onde apresentam altas altitudes na região, assim na porção basal há as rochas do Grupo Araxá sustentando estas rochas (BACCARO et al., 2001).

A unidade morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná é formada por rochas sedimentares e vulcânicas, onde a Formação Marília sustenta os relevos residuais por meio do Membro Serra da Galga com arenitos e um nível conglomerático calcífero resistente (BACCARO et al., 2001).

A Formação Serra Geral originou-se de um derrame vulcânico de grande proporção durante a sequência do Gondwana III da Bacia do Paraná. Estas rochas encontram-se sobre os arenitos eólicos da Formação Botucatu e do embasamento da Faixa de Dobramentos Brasília.

Nesta formação há ocorrência de *intertraps*, podendo ter derivado de um processo de extravasamento fissural, onde observa uma separação das camadas de basaltos por camadas de arenito da Formação Botucatu, isso ocorreu por conta de uma série de pulsos magmáticos originados durante o processo de separação do Gondwana. Além disso, esta formação apresenta enxames de diques com direções variadas, associados este evento vulcânico, que podem ser correlacionados com a ascensão magmática e o tectonismo expressivo na época (MACHADO et al., 2009).

A Formação Marília pertence ao Grupo Bauru e é dividida nos membros Echaporã, Serra da Galga e Ponte Alta (BARCELOS & SUGUIO, 1987 in MAOSKI, 2013). No Membro Echaporã as rochas presentes são arenito maturo bege rosado e camadas de lamitos e lentes de conglomerados. Já o Membro Serra da Galga é formado principalmente por arenitos com coloração amarelo esbranquiçados e maduros, e em menores quantidades há presença de lentes de lamitos arenosos de coloração marrom avermelhados e de arenitos conglomeráticos. O Membro Ponte Alta apresenta arenitos com coloração esbranquiçada, contendo intercalações de arenitos conglomeráticos aparentemente maciço e com cimentação carbonática. Além disso, na Formação Marília há ocorrências de paleossolos, e de fósseis de vertebrados e invertebrados do Cretáceo Superior (MAOSKI, 2013).

A Formação Marília sustenta os relevos residuais por meio do Membro Serra da Galga com arenitos e um nível conglomerático calcífero resistente. Assim, forma-se solos predominantes de argissolo vermelho – amarelo distrófico e eutrófico, apresentando horizonte B textural, com coloração avermelhada e vermelho amareladas, correspondendo a matiz 5YR, podendo ser mais vermelho e mais amarelo que 2,5YR (BACCARO et al., 2001).

A unidade morfoestrutural das Planícies Fluviais Cenozóicas referem-se aos depósitos fluviais cenozóicos encontrados nos leitos dos principais rios do Triângulo Mineiro, com níveis altos de dissecamento e vales entalhados. Nessa região é comum se deparar com rochas do Grupo Araxá e Serra Geral, formando solos do tipo argissolos vermelho – amarelo distrófico e eutrófico, latossolo vermelho distrófico e latossolo vermelho acriférrico contendo horizonte B latossólico, não hidromórfico com variação de coloração de matiz 2,5YR, neossolo litólico eutrófico apresentando sequência de horizonte A-C-R ou A-R e cambissolo háplico e distrófico com horizonte B incipiente, não hidromórfico, com pouca atividade pedogenética por ser um solo relativamente novo e pouco desenvolvido (BACCARO et al., 2001; MOTTA et al., 2004).

5.2 Caracterização Climática

As condições climáticas predominantes nas regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba equivalem a um clima tropical com duas estações bem definidas: uma seca, com longo período de estiagem, que vai de abril a setembro, e a outra chuvosa que se estende de outubro a fevereiro. Assim a área de estudo apresenta clima quente e úmido, com inverno seco, variando a temperatura entre a mínima de 15,2° C a máxima de 32,2° C (PMSB, 2013).

No período de outubro a março, ocorrem as principais precipitações na região, cerca de 1300 até 1700mm ao ano, apresentando maiores quantidades de precipitação nas regiões de topografia elevada. Nos meses de seca, a precipitação cai para 20 a 50mm, sendo uma precipitação bem baixa em comparação com o período chuvoso (EPAMIG, 1982).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Validação do modelo de Richardson et al. (1983)

Já com a finalidade de avaliar a aplicabilidade do modelo de Richardson et al. (1983) para estimar o fator R de erosividade, foi feita uma comparação deste com o modelo de Wischmeier e Smith (1978).

O modelo de Wischmeier e Smith (1978) utiliza dados pluviométricos com intervalos de tempo de meia em meia hora, calculando o fator I_{30} que mede a intensidade erosiva de uma chuva em um período de meia hora. Já o modelo de Richardson et al. (1983) emprega dados pluviométricos diários, sendo o somatório de todos os eventos decorridos em 24 horas.

A validação do modelo de Richardson et al. (1983) se deu através do cálculo dos índices de erosão por meio do software RStudio, utilizando dados de estações telemétricas. Os dados de meia em meia hora das estações telemétricas foram adquiridos do Instituto Federal Goiano – Campus Morrinhos, e se deu, por conta da indisponibilidade de dados neste intervalo de tempo para a área de estudo.

Portanto, ao aplicar estes dados nos modelos propostos por Wischmeier e Smith (1978) e por Richardson et al. (1983), foi obtido o valor de EI para ambos os modelos (Tabela 6).

Tabela 6: Valores de EI dos modelos de Wischmeier e Smith (1978) e de Richardson et al. (1983).

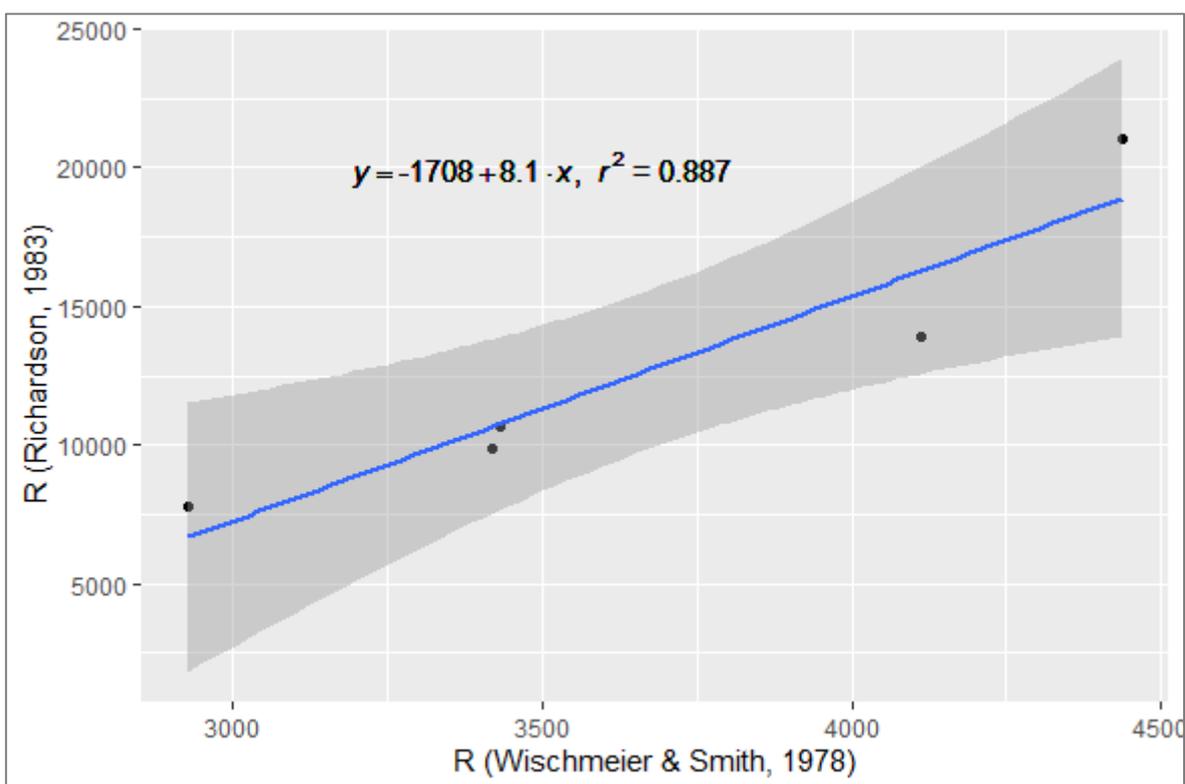
Ano	Valor de EI	
	Wischmeier e Smith (1978)	Richardson et al. (1983)
2017	443,6937	2107,1721
2018	292,9378	780,1863

Cont...

Ano	Valor de EI	
	Wischmeier e Smith (1978)	Richardson et al. (1983)
2019	343,3030	1065,0222
2020	341,8045	986,6843
2021	411,3291	1391,2946

Os valores obtidos pelo modelo de Richardson et al. (1983) são maiores que os adquiridos pelo modelo de Wischmeier e Smith (1978). No entanto, observa-se uma linearidade entre esses valores, apresentando uma correspondência linear (Figura 9).

Figura 9: Correlação dos valores de EI dos modelos de Wischmeier e Smith (1978) e Richardson et al. (1983).



Na Figura 9, o eixo x corresponde aos dados do modelo de Wischmeier e Smith (1978) e o eixo y ao do Richardson et al. (1983). Observando o gráfico, nota-se que à medida que aumenta o valor de EI do modelo de Wischmeier e Smith (1978), o valor de EI do modelo do Richardson et al. (1983) também aumenta, este comportamento comprova a proporcionalidade entre estes.

Muito embora os valores de erosividade (R) obtidos pelo modelo proposto por Richardson sejam maiores que aqueles obtidos pelo modelo de Wischmeier, a relação de proporcionalidade linear permite o seu uso para fins de obtenção de taxas de erosão relativas.

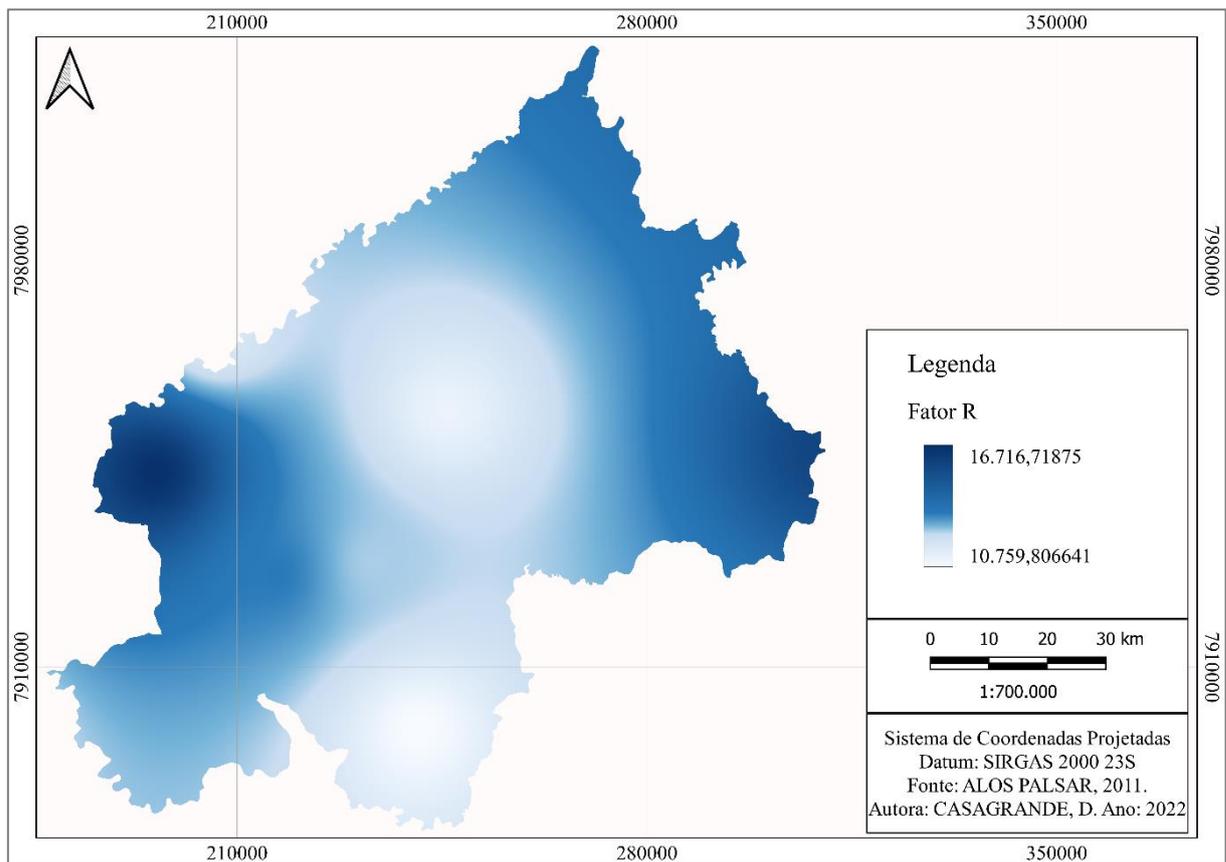
6.2 Coeficiente R

Para realizar o cálculo da erosividade da chuva, foram utilizados dados de estações pluviométricas convencionais com dados diários de precipitação, adquiridos por meio do site do HIDROWEB, onde foram escolhidas 12 estações (Figura 5).

As estações convencionais contêm dados diários de precipitação, assim com estas informações é possível calcular o coeficiente R da USLE (1), através do modelo de Richardson et al. (1983). Com os dados das estações telemétricas com intervalo de meia hora é possível calcular este coeficiente utilizando a Equação (5), por meio do I_{30} . A utilização de dados de estações convencionais é o método mais comum de cálculo do coeficiente R, já as informações de estações telemétricas com intervalos de 30 min é o método ideal para estimar com maior precisão o valor de R, pois avalia a intensidade real de eventos ocorridos durante o dia.

No entanto, como não há dados de estações telemétricas no local de estudo, foram utilizados dados de estações convencionais. Os dados presentes nestas estações passaram por correções no software livre RStudio, onde foram interpolados os dados inexistentes ou acumulados. De posse do fator de erosividade calculado para as 12 estações pluviométricas utilizadas, foi feita a interpolação dos dados para a área de estudo considerando-se o inverso da distância, obtendo como resultado uma camada do tipo raster com os valores de erosividade interpolados pelo método do inverso da distância, considerando-se 12 estações pluviométricas (Figura 10).

Figura 10: Mapa da distribuição da erosividade da chuva na área de estudo.



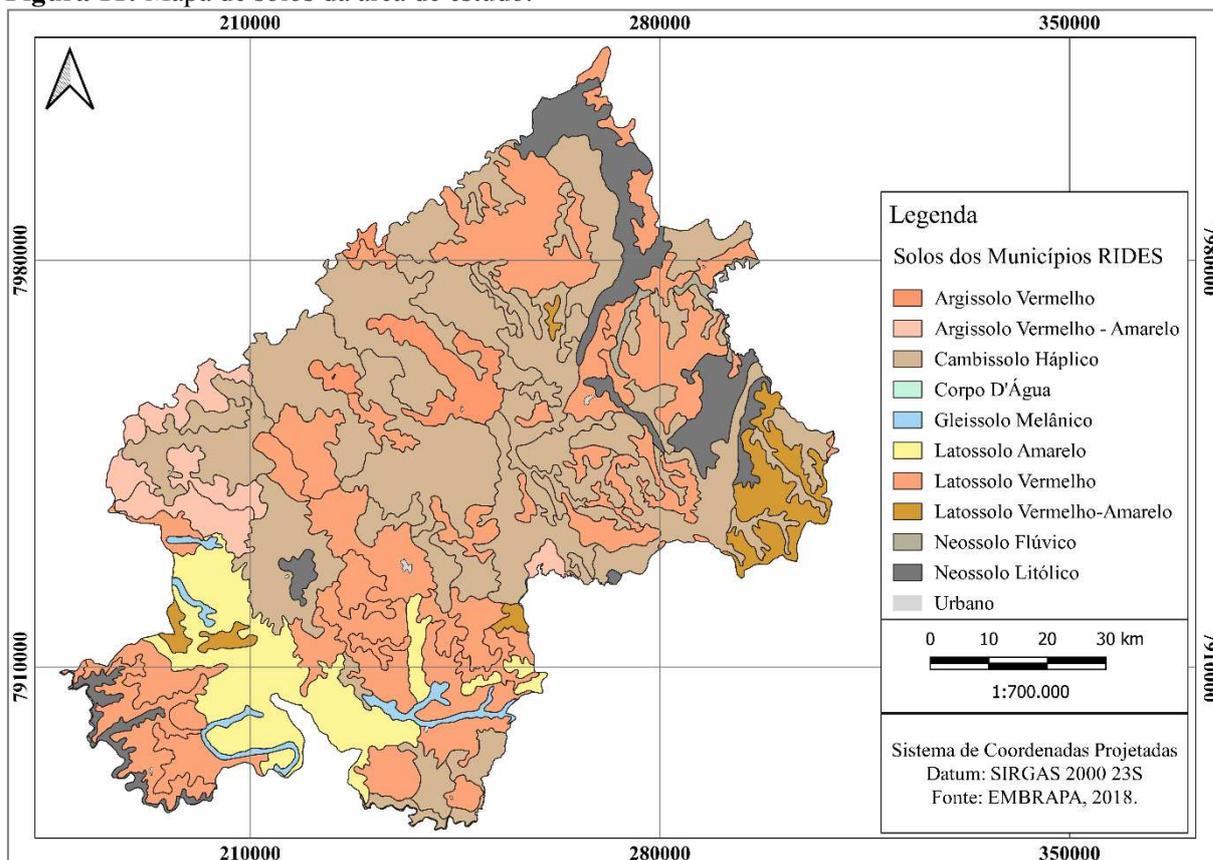
As áreas com tonalidades azul claro da Figura 9, são os locais com valores de erosividade da chuva mais branda, onde as concentrações de chuvas são um pouco menores. Já os locais com coloração azul escuro apresentam valores de erosividade mais intensos.

6.3 Coeficiente K

O fator K corresponde à erodibilidade do solo e varia de acordo com a propriedade de cada solo. Como visto no item 3.4.2, para determinar o coeficiente K dos solos, é necessário fazer ensaios de campo em um local com área definida e com declividade específica, desta forma, na literatura encontram-se descritos diversos valores do fator K para diferentes tipos de solos.

Assim, elaborou-se um mapa de solos (Figura 11) da área de estudo por meio de dados de shapefile disponibilizados do mapeamento realizado pela EMBRAPA na região do Alto Paranaíba. As informações foram recortadas para abranger apenas a área de estudo, utilizando para a compilação deste mapa, o software livre QGIS 3.22.7.

Figura 11: Mapa de solos da área de estudo.



No local de estudo foi encontrado uma variedade de solos mapeados, assim, utilizou-se dados de erodibilidade dos solos retirados de diversas bibliografias para calcular o coeficiente K da USLE. Para a realização do cálculo foi empregado o software livre QGIS 3.22.7, utilizando o valor médio de todos os dados descritos no item 3. 4. 2 deste trabalho, o resultado deste cálculo está representado na Figura 12.

Na Tabela 7 estão representados os valores adotados do coeficiente K para cada tipo de solo mapeado na região de estudo.

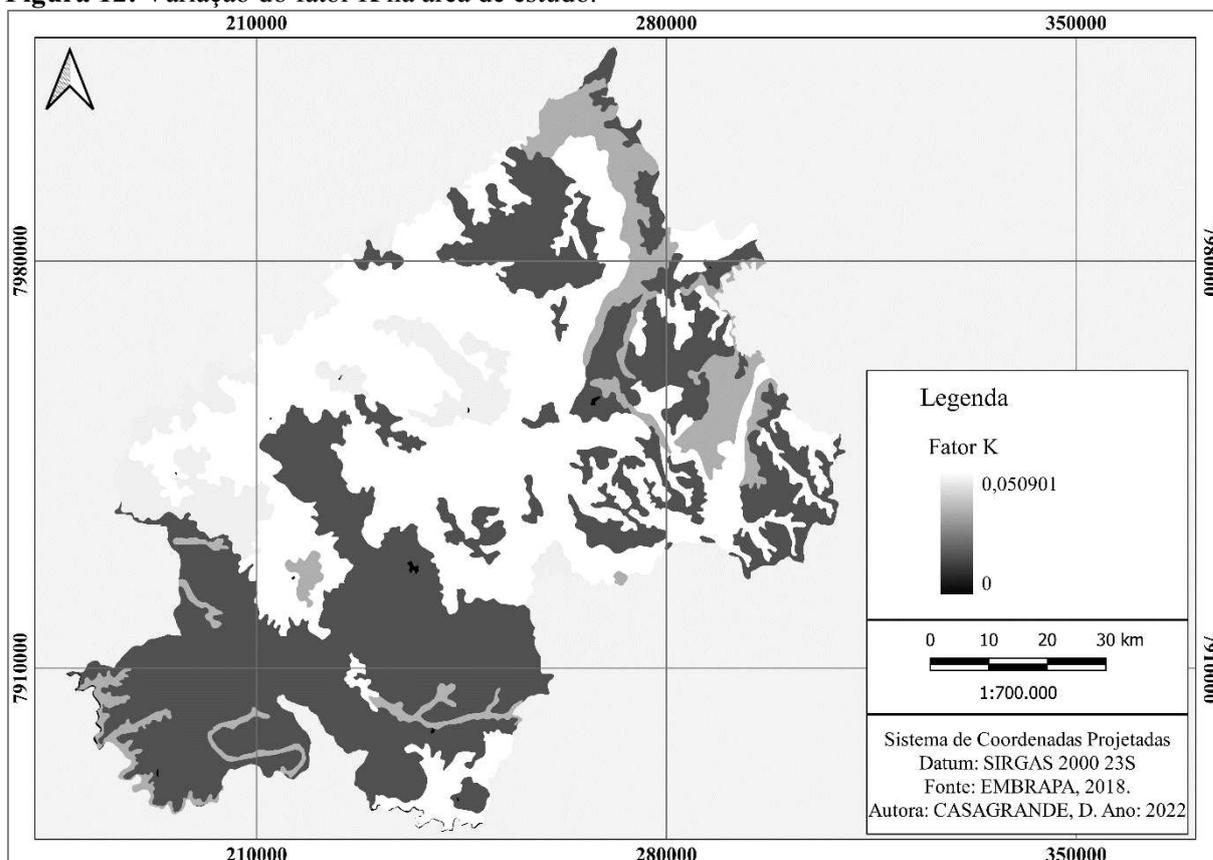
Tabela 7: Valores adotados para o coeficiente K para cada tipo de solo mapeado na área de estudo.

Legenda	K
Cambissolo Háplico	0,05090093
Latossolo Vermelho	0,01624788

Cont...

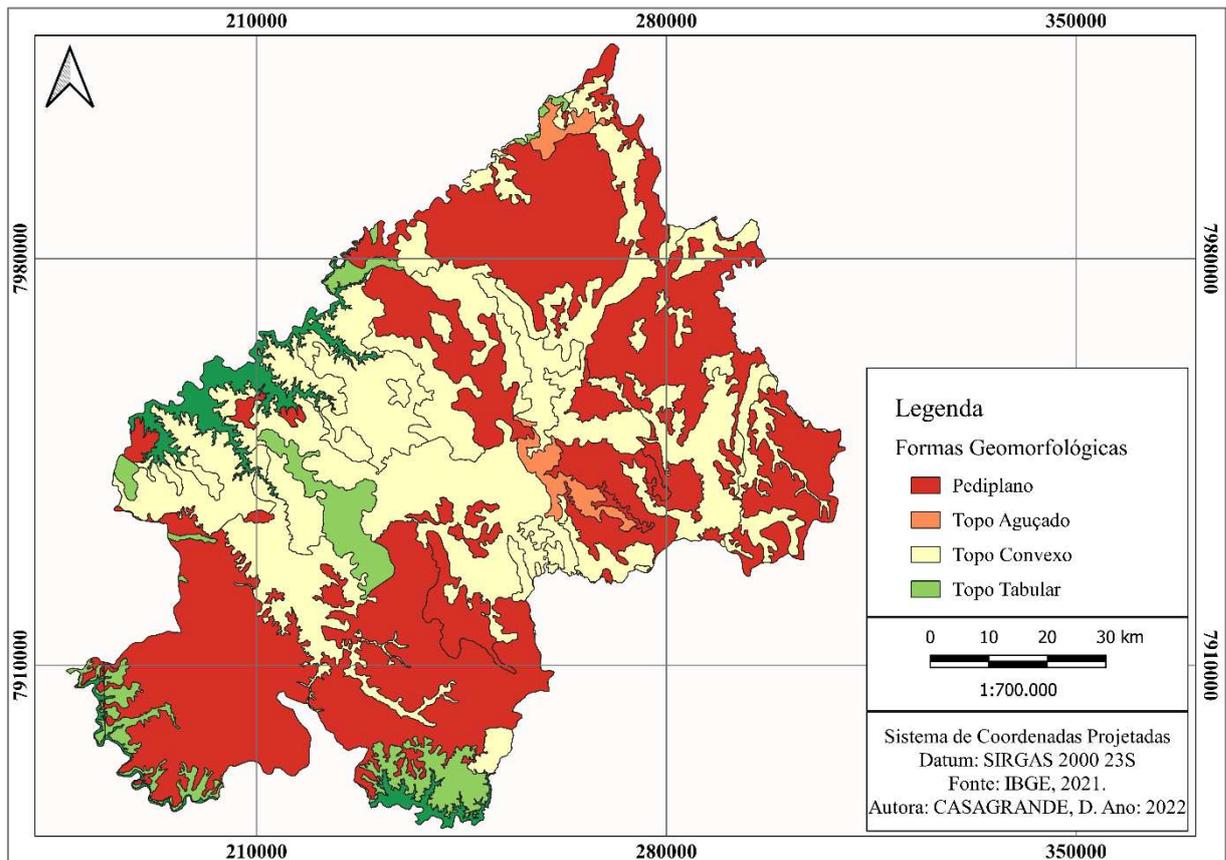
Legenda	K
Argissolo Vermelho	0,04825103
Argissolo Vermelho - Amarelo	0,04825103
Latossolo Amarelo	0,01624788
Gleissolo Melânico	0,036123
Neossolo Litólico	0,03505931
Latossolo Vermelho - Amarelo	0,01624788
Neossolo Flúvico	0,03505931

Figura 12: Variação do fator K na área de estudo.



Observa-se pelo cálculo da erodibilidade do solo expresso na Figura 12, que as áreas de tonalidades brancas e cinza claros correspondem aos solos com as maiores taxas erosivas, onde localizam-se os solos do tipo cambissolos, que são solos mais rasos e pouco desenvolvidos, que possui horizonte B incipiente. Além disso, notou-se que nestes locais predomina formas de relevos do tipo topo convexo (Figura 13) e como visto na literatura, estas exibem taxas erosivas maiores que em outros tipos de relevo.

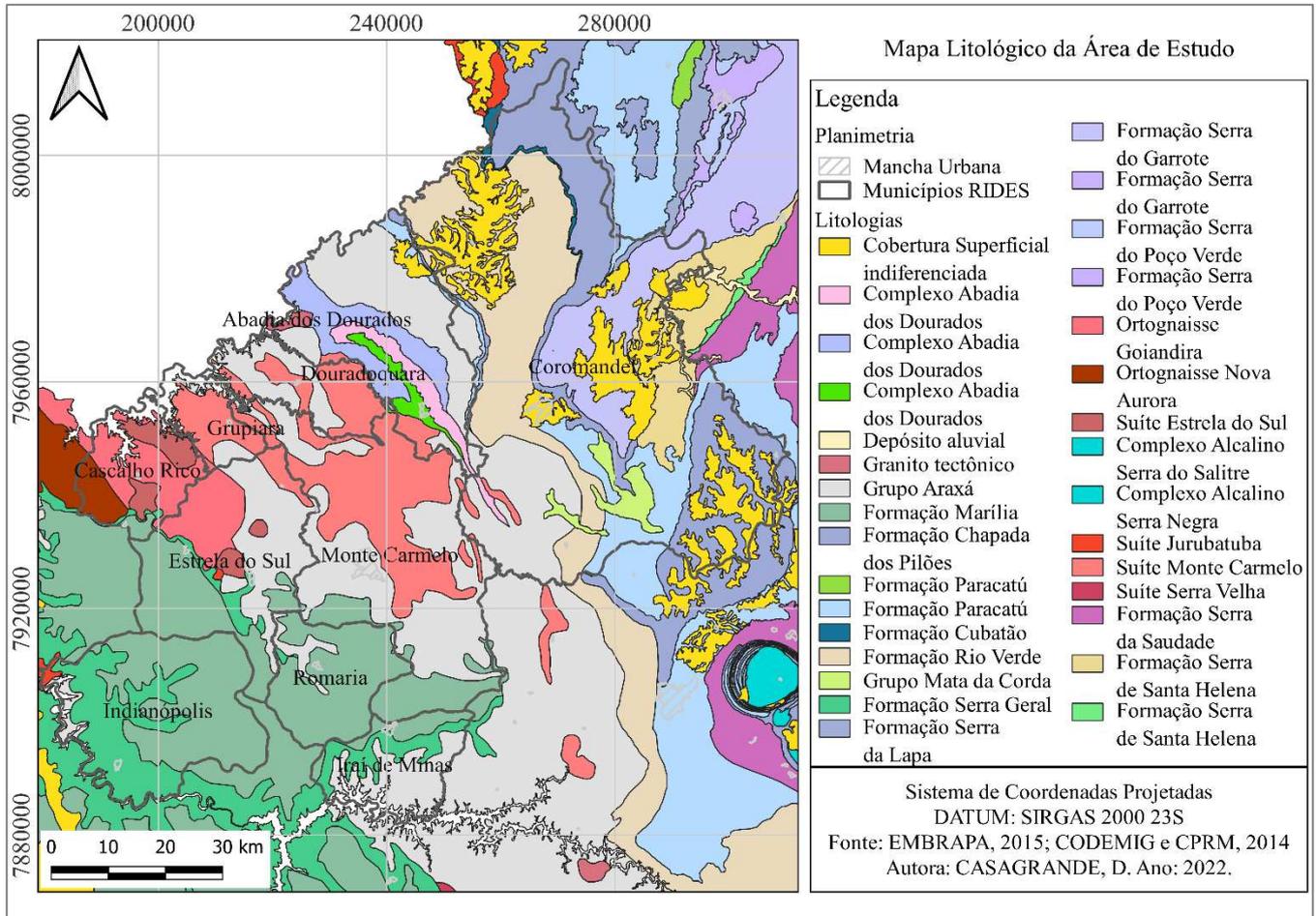
Figura 13: Mapa das formas de relevo mapeadas na área de estudo.



De acordo com a Figura 13, a área de estudo apresenta quatro tipos de relevo, sendo eles: pediplano, topo aguçado, topo convexo e topo tabular. Ao analisar a geomorfologia da área com o resultado do fator K, nota-se que a maioria das áreas com taxas de erodibilidade elevadas correspondem a relevos do tipo topo convexo. No entanto, há áreas com estas taxas altas de erodibilidade em áreas de pediplanos e topos tabulares, isso se dá pelos tipos de solo que ocorrem nesses locais, tendo a ocorrência de cambissolos e neossolos, solos estes que são pouco desenvolvidos, porosos e com pouca coesão entre as partículas, o que facilita sua desagregação e transporte.

Além disso, nota-se que nas áreas com taxas elevadas de erodibilidade do solo afloram rochas da Formação Rio Verde e Grupo Araxá (Figura 14), representados predominantemente por xistos, Complexo Monte Carmelo, Suíte Estrela do Sul, complexos de ortognaisses Nova Aurora e Goiandira, compostos por granitos e ortognaisses.

Figura 14: Mapa litológico da área de interesse.



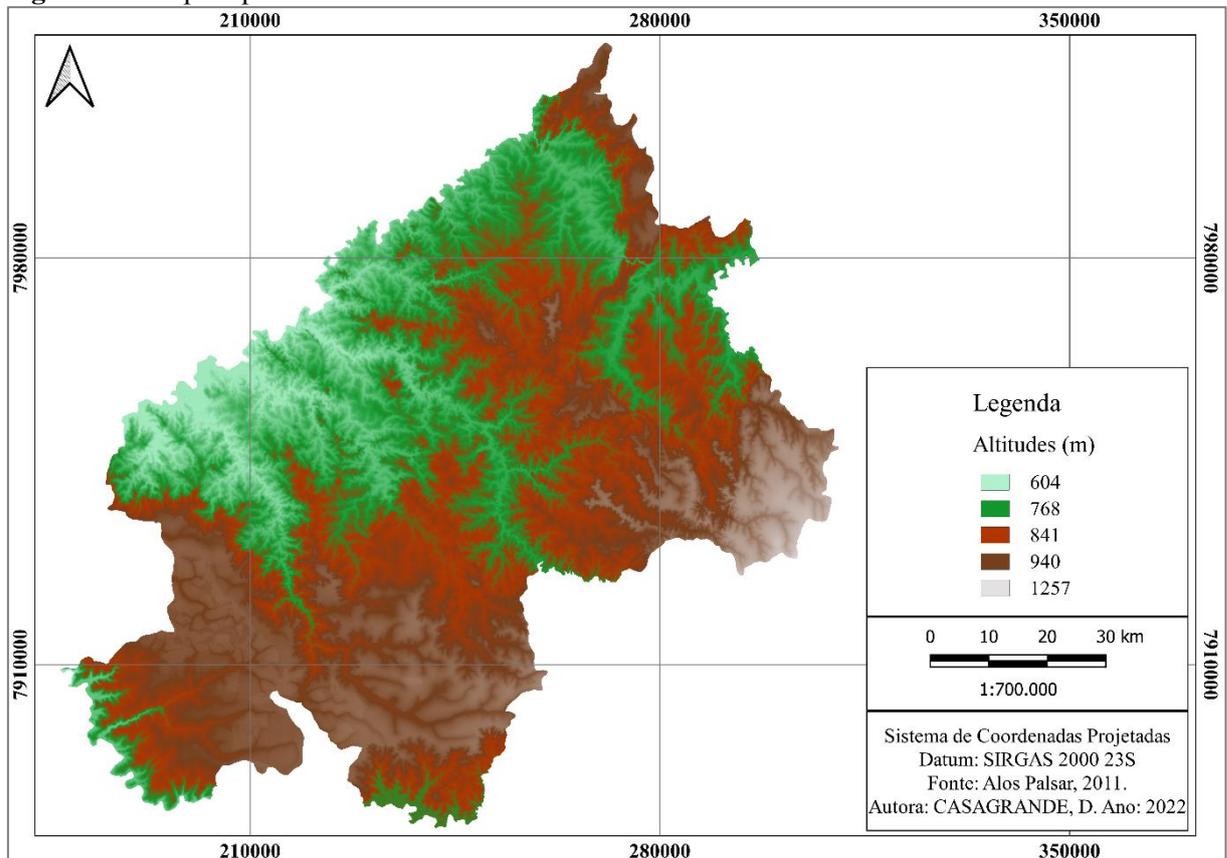
6.4 Coeficiente LS

O fator LS corresponde aos valores de comprimento de rampa e declividade, ambos componentes são avaliados em conjunto, pois um interfere no resultado do outro. A declividade é a responsável por aumentar a velocidade da enxurrada durante um evento de chuva e quanto maior for a rampa, maior será a quantidade de água acumulada e consequentemente maior a ação erosiva.

Para realizar o cálculo do fator LS, foi utilizado como base o modelo digital do terreno (Figura 15), sendo escolhido imagens do satélite *Alos Palsar* com resolução de 2,5 m. Com o

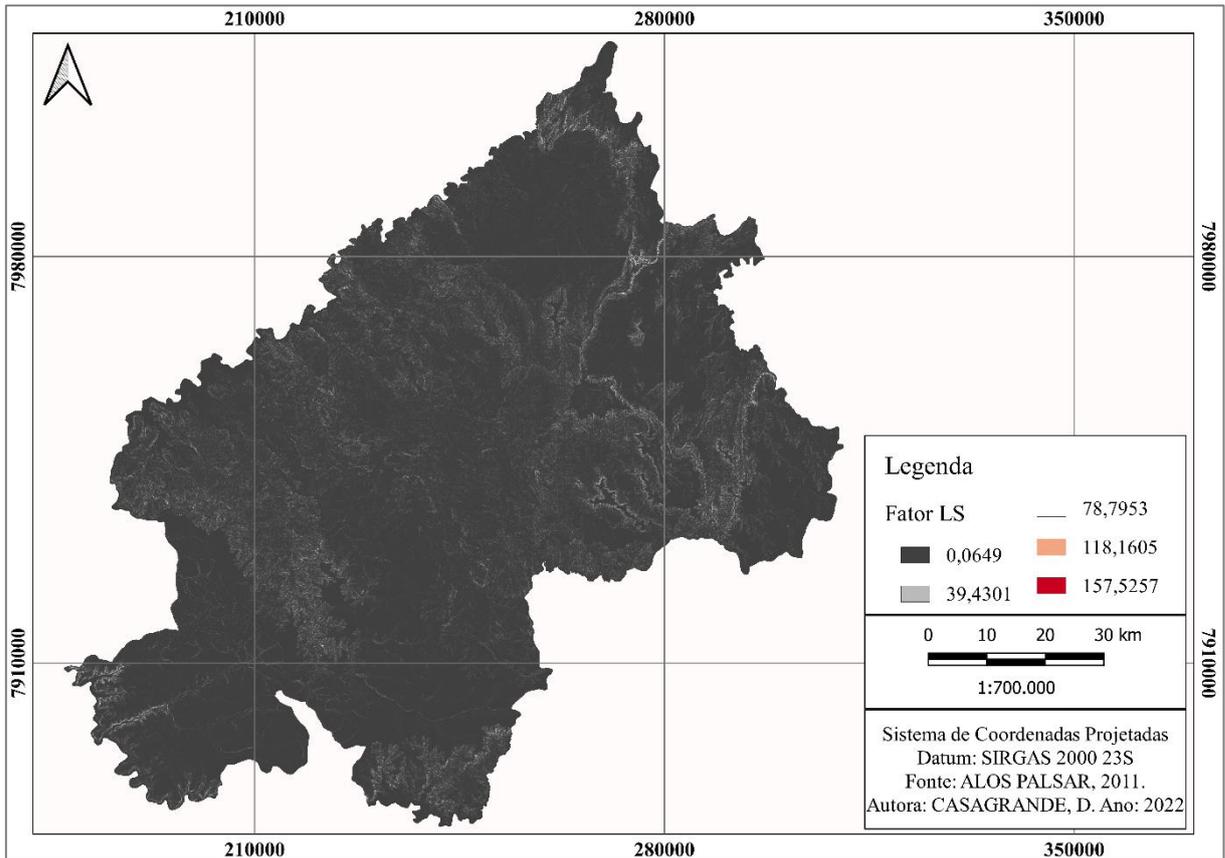
mapa hipsométrico observa-se a variação de altitude do local de estudo, ocorrendo altitudes de 600 m a 1200 m.

Figura 15: Mapa hipsométrico da área de estudo.



Foi efetuado o cálculo do coeficiente LS da área de interesse por meio do software QGIS 3.16.0, utilizando a extensão SAGA como ferramenta para tal cálculo. Desta maneira, chegou-se ao resultado expresso na Figura 16, que apresenta as maiores taxas erosivas onde há transição de uma forma de relevo para outra, sendo que nesses locais a variação de altitude é mais abrupta e as drenagens são mais entalhadas.

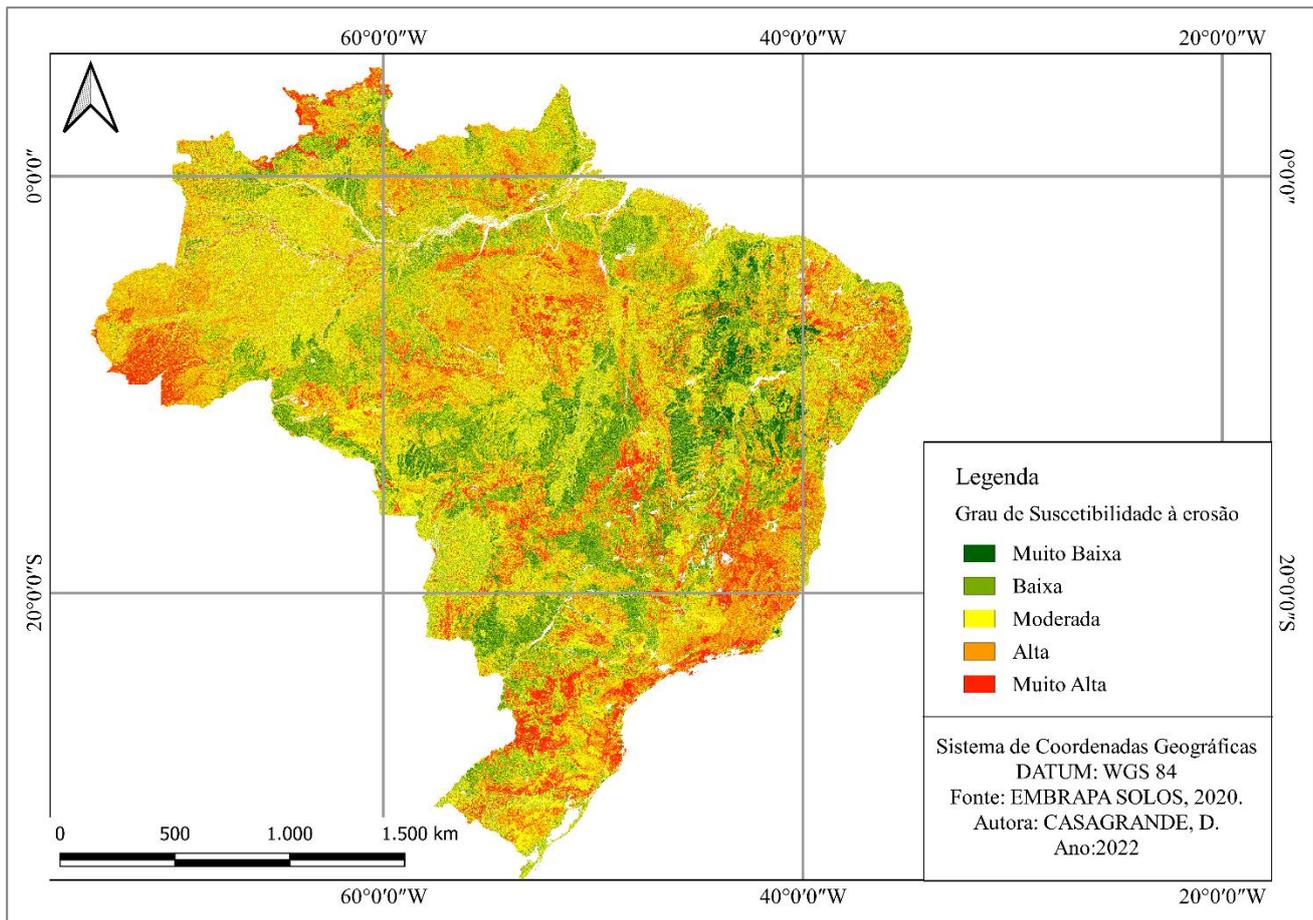
Figura 16: Mapa do resultado do cálculo do fator LS da área de estudo.



6.5 Mapa de suscetibilidade à erosão

No ano de 2020, a EMBRAPA Solos compilou um mapa de suscetibilidade à erosão hídrica abrangendo todo território brasileiro, em escala de 1: 250.000. Para elaboração deste mapa, a equipe desenvolveu mapas de erosividade das chuvas no Brasil, erodibilidade dos solos e modelo digital do terreno obtido pela NASA, desta forma, através da modelagem desses dados, elaboraram o mapa de suscetibilidade à erosão hídrica em escala nacional (Figura 17).

Figura 17: Mapa de suscetibilidade à erosão hídrica elaborado pela EMBRAPA SOLOS.



Durante a compilação das camadas para a elaboração do mapa, a EMBRAPA SOLOS utilizou dados de cerca de 3.659 estações pluviométricas para o cálculo da erosividade da chuva (Fator R). Para o cálculo da erodibilidade dos solos, usaram dados provenientes de mapeamento do Mapa de Solos do Brasil em escala 1:250.000. Já o modelo digital do terreno tem resolução espacial de 30 m, assim efetuaram os cálculos dos fatores comprimento de rampa (L) e declividade (S) e ao juntar todas as camadas destes fatores, produziram o mapa de suscetibilidade à erosão hídrica de todo território nacional.

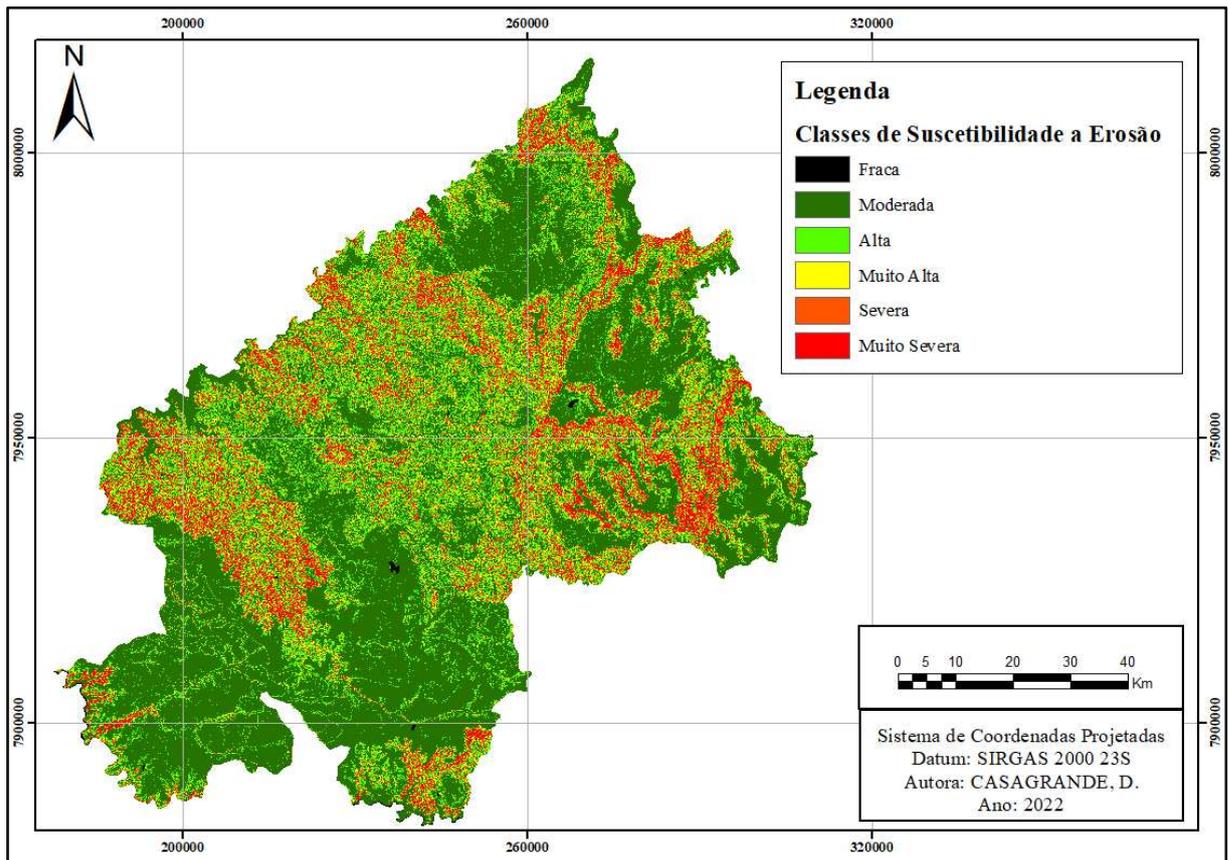
Assim sendo, este trabalho teve o intuito de produzir um mapa de suscetibilidade à erosão dos municípios consorciados a RIDES (Figura 18), gerando um detalhamento do mapa elaborado pela EMBRAPA SOLOS em escala nacional e possibilitando sua utilização para contribuir na tomada de decisões sobre as políticas de sustentabilidade da RIDES através da análise de suscetibilidade à erosão dos solos na região.

Para a compilação deste mapa foi utilizado modelo digital do terreno *Alos Palsar* para obtenção do fator de declividade e comprimento de rampa; dados de precipitação, onde foi

calculada a erosividade do solo e o mapa de solos da região do Alto Paranaíba, elaborado pela EMBRAPA SOLOS, juntamente com dados de erodibilidade dos solos já definidos nas Tabelas 3 e 4.

Com intuito de alcançar bons resultados das classes de suscetibilidade à erosão, as classes adquiridas foram definidas por meio de quantil, separando estas classes com números iguais de informações.

Figura 18: Mapa de suscetibilidade à erosão dos municípios consorciados a RIDES, objeto de estudo.



Observando a Figura 18, notamos as principais áreas de erosão severa na cor vermelha, locais estes marcados por rupturas topográficas e presença de solos pouco desenvolvidos e porosos como neossolos e cambissolos. Em locais de maiores incidências de chuvas, como na área noroeste do local de estudo, há elevadas classes erosivas em argissolos, que são solos mais desenvolvidos e espessos, com grande teor de argilas em seu perfil, oriundos dos ortognaisses Nova Aurora e Goiandira.

Nas áreas com classes de suscetibilidade à erosão muito severa a alta, afloram rochas graníticas do Complexo Monte Carmelo e Suíte Estrela do Sul, ortognaisses Goiandira e Nova

Aurora, xistos do Grupo Araxá, Ibiá e Complexo Abadia dos Dourados, quartzitos e filitos do Grupo Canastra. Onde afloram estas rochas ocorre a formação de solos do tipo cambissolo, neossolo e em menores quantidades argissolos. Além disso, alinhado a esta geologia, o tipo de relevo nesses locais é caracterizado como do tipo topo convexo, que favorece a erosão, classificando estas áreas como alta suscetibilidade à erosão.

Comparando o mapa de suscetibilidade à erosão elaborado pela EMBRAPA SOLOS e o confeccionado pela autora, nota-se a maior riqueza de detalhes do último, pois além da diferença de escala, a EMBRAPA utilizou imagens SRTM com resolução de 30 m e o presente trabalho utilizou imagens Alos Palsar com resolução de 2,5 m, assim, ao se calcular o fator LS, obteve as declividades e comprimentos de rampas mais exatas.

7 CONCLUSÕES

Como visto, a aplicação do modelo de Richardson et al. (1983) para calcular o fator R da USLE apresenta um bom resultado com os dados das estações convencionais, sendo uma alternativa quando não há dados de estações telemétricas com intervalos de 30 min (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Portanto, como não há dados de estações telemétricas na área de estudo, esta metodologia possibilitou obter o valor de R para gerar o mapa de suscetibilidade à erosão aplicando a equação da USLE, proposta por Wischmeier e Smith (1978) com bons resultados quando comparados com a geologia, pedologia e geomorfologia da área. Assim, o mapa de suscetibilidade à erosão de certa forma resume estes efeitos e ainda incorpora o efeito das chuvas em quantidade e intensidade.

Para que o Consórcio Intermunicipal RIDES escolha um local para a implantação do novo aterro sanitário, é necessária atenção quanto ao tipo de solo, geomorfologia, geologia e classe de suscetibilidade à erosão. É recomendável que se escolha uma área que apresente solos mais desenvolvidos, que tenham porosidade maior em suas imediações, além de não estarem no domínio de topos convexos com ocorrências de rochas como granitos e gnaisses, pois favorecem ainda mais a ação erosiva. Desta forma, é recomendado que escolha a área para implantação do aterro sanitário nos locais onde a suscetibilidade a erosão seja de baixa a moderada.

Tabela 8: Síntese dos fatores que influenciam a erosão em cada classe de suscetibilidade a erosão.

Classe de Suscetibilidade a erosão	Declividade	Solos	Geologia
Fraca	0 – 3%	Argissolo Vermelho	Formação Serra Geral e Formação Serra do Poço Verde
Moderada	3 – 10%	Argissolo Vermelho, Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho	Formação Serra Geral, Grupo Araxá, Formação Marília, Formação Serra do Garrote, Formação Serra da Lapa, Formação Serra de Santa Helena, Formação Rio Verde
Alta	10 – 22%	Cambissolos, Neossolos e Argissolos	Complexo Monte Carmelo, Suíte Estrela do Sul, Complexo Abadia dos Dourados, Ortognaisse Goiandira, Ortognaisse Nova Aurora
Muito Alta	22 – 35%	Cambissolos, Neossolos e Argissolos	Complexo Monte Carmelo, Suíte Estrela do Sul, Complexo Abadia dos Dourados, Ortognaisse Goiandira, Ortognaisse Nova Aurora
Severa	35 – 45%	Cambissolos, Neossolos e Argissolos	Complexo Monte Carmelo, Suíte Estrela do Sul, Complexo Abadia dos Dourados, Ortognaisse Goiandira, Ortognaisse Nova Aurora
Muito Severa	>45%	Cambissolos, Neossolos e Argissolos	Complexo Monte Carmelo, Suíte Estrela do Sul, Complexo Abadia dos Dourados, Ortognaisse Goiandira, Ortognaisse Nova Aurora

Conforme o local escolhido, é necessário implantar técnicas que auxiliem a diminuição da ação erosiva para que não ocorram danos na impermeabilização da base ou no maciço de resíduos sólidos, corroborando para a contaminação de solos, águas superficiais e subterrâneas, e aumento das poro-pressões, que acarreta a desestabilização do maciço.

Além disso, de acordo com as normas NBR 13.896 e 8419, são necessários ensaios geotécnicos para obter parâmetros do solo como condutividade hidráulica, compactação, infiltração, granulometria, entre outros.

O mapa de suscetibilidade à erosão gerado para a RIDES pode auxiliar na tomada de decisão e práticas conservacionistas que reduzam a erosão dos solos e subsidiar, além do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, os planos diretores, de saneamento, de macrodrenagem, entre outros estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419. **Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**, Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13. 896. **Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação**, Rio de Janeiro, 1997.
- ALKMIM F.F. História Geológica de Minas Gerais. Recursos Minerais de Minas Gerais. Ouro Preto, 2018. Disponível em:< <http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/HistoriaGeologicadeMG.pdf>>.
- ALMEIDA, F. M. M. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Review*, n. 17, p. 1-29. 1981.
- BACCARO, C. A. V; FERREIRA, I. L; ROCHA, M. R; RODRIGUES, S. C. Mapa geomorfológico do Triângulo Mineiro: uma abordagem morfoestrutural-escultural. **Sociedade & Natureza**, [S. l.] , v. 13, n. 25, 2015. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/sociedadnatureza/article/view/29958>>.
- BARBOSA, R. I.; FEARNSTIDE, P. M. Erosão do solo na Amazônia: Estudo de caso na região do Apiaú, Roraima, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 30, p. 601-601, 2000.
- BRASIL. Presidência da República. Lei nº 6.766 de 19 de dezembro de 1979. **Parcelamento do Solo Urbano**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm. Acesso em: 24 set. 2022.
- BRASIL. Presidência da República. Lei nº 10.257 de 10 de julho de 2001. **Estatuto da Cidade**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm. Acesso em: 24 set. 2022.
- BROD J.A; LEONARDOS, O. H.; MENESES, P. R.; ALBUQUERQUE, M. A. C.; ALMEIDA, R.; BLANCO, S. B.; CARDOSO, F. B. F.; ROMÃO, P. A.; THOMSEN, F. P. R. Geoquímica da Sequência Vulcano Sedimentar de Abadia dos Dourados e Complexo Chapada das Perdizes, Triângulo Mineiro – MG. *Revista Escola de Minas*, 45(1-2):164-166. 1992.
- CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. D.; BARBIERI, D. M. Variação espacial da perda de solo por erosão em diferentes superfícies geomórficas. **Ciência Rural**, 38, 2485-2492. 2008.
- CARVALHO, J. C.; JUNIOR, G. F. N. G.; CARVALHO, E. T. L. Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Vol 4. Brasília. 2012.
- CASTRO, L. G.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 339-352, 2006.

CERRI, C. E. P. **Mapeamento das áreas de risco de erosão dos solos da Bacia do Rio Piracicaba, utilizando geoprocessamento**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL RIDES. Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do Consórcio Intermunicipal Rides – Região Integrada de Desenvolvimento Sustentável. Vol. I. Uberlândia. 2015. Disponível em: <<http://www.rides.mg.gov.br/publicacoes>>.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL RIDES. Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do Consórcio Intermunicipal Rides – Região Integrada de Desenvolvimento Sustentável. Vol. III. Uberlândia. 2018. Disponível em: <<http://www.rides.mg.gov.br/publicacoes>>.

CORDANI, U. G. et al. The significance of the TransbrasilianoKandi tectonic corridor for the amalgamation of West Gondwana. *Braz. J. Geol.*, São Paulo, 43(3): 583-597. 2013.

CORESAB – CONSÓRCIO REGIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO CENTRAL DE MINAS. 2020. **A Incineração de Resíduos Urbanos**. Disponível em: <<https://coresab.com.br/2020/07/08/a-incineracao-de-residuos-urbanos/>>.

COSTA, C. S. M. **Contributo para a modelação da suscetibilidade à erosão por sulcos e ravinas na Quinta de S. Luiz (Tabuaço)**. Orientador: Doutor(a) Laura Maria Pinheiro de Machado Soares. 2016. 113 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território) - Faculdade de Letras da Universidade do Porto, [S. l.], 2016. Disponível em: https://sigarra.up.pt/flup/en/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=165882. Acesso em: 1 set. 2022.

CPRM 2015. Carta geológica Preliminar da Folha SE.23-Y-A-V-Monte Carmelo, Escala 1:100.000. Rio de Janeiro, CPRM.

DARDENNE, M. A. The Brasilia fold belt. In: Cordani, U. G.; Milani, E. J.; Thomaz Filho, A. (Eds) *Tectonic Evolution of South America*. In: *International Geological Congress*. Rio de Janeiro. p.231-263. 2000.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. F.; MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, p. 224-233, 2015.

DIAS, P. H. A. Estratigrafia dos grupos Canastra e Ibiá (Faixa Brasília Meridional) na região de Ibiá, Minas Gerais: caracterização e estudo de proveniência sedimentar com base em estudos isótopos U-Pb e Sm-Nd. Dissertação de Mestrado em Geologia Regional. UFMG. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/IGCC-9CBGC9>>.

DMAE - Departamento Municipal de Água e Esgoto. **Relatório de Monitoramento Ambiental Aterro Sanitário - Janeiro de 2020 a janeiro de 2021**. Monte Carmelo. 2021.

EPAMIG. Levantamento de Reconhecimento de Média Intensidade de Solos e Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras no Triângulo Mineiro. 1982.

FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. D.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A.

T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminarem grandes áreas por meio da EUPS-Equação Universal de Perdas de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba-PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Ano 7, nº 2. Pag. 73 – 85. 2006.

FEITOSA, A.; FECHINE, J. A. L.; FERREIRA, C. W. S.; ARAÚJO, M. S. B. Modelagem dinâmica de escoamento superficial influenciando a susceptibilidade à erosão dos solos num município do semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 2, 2010.

FERNANDES, A. F. Tectonoestratigrafia da Faixa Brasília Meridional e estudo de casos de possíveis rochas fonte de diamante, Coromandel-MG. Dissertação de Mestrado na Área de Geologia Regional. UFMG. Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/IGCM-9QTMH5>>.

FRÓES FILHO, A. S.; COSTA, J. R.; ZIMMER, J. R.; CASTRO, P. Aplicação do Método “Verah” para a Determinação da Suscetibilidade a Erosões na Microbacia do Córrego Tereza Botas, Poconé, Mato Grosso. **Geociências**, São Paulo, v. 34, ed. 2, p. 286-301, 2015. Disponível em: <<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/10115>>. Acesso em: 2 set. 2022.

FURTADO, S. D. S. F. Índice de erosividade e fator R para Jaboticabal, SP. Tese (Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo)). Universidade Estadual Paulista (Unesp). 2019.

GALDINO, S.; WEILL, M. A.M. Estimativa do Fator Topográfico (LS) da RUSLE para a Bacia do Alto Taquari-MS, Usando do Ângulo de Inclinação Limite para Erosão/Deposição. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, Curitiba, Brasil. INPE. Pag. 4813, 2011.

GOMES, F. E. F.; MAMEDE, G. L.; LOPES, F. B. Alternativa para o cálculo automático e espacializado do fator topográfico da USLE em bacias hidrográficas. **IRRIGA**, v. 1, n. 2, p. 6-13, 2018.

GOMEZ, J. D. P. **Estimativa de erosão pela Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e transferência de sedimentos para todo território brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 2012. doi:10.11606/D.11.2012.tde-25102012-150933. Acesso em: 06/11/2022.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos**. 13ª edição. ed. atual. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015. 472 p.

HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, WM da. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 145-154, 1999.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. 2021. Acesso em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/monte-carmelo.html>>.

KERTZMAN, F. F.; OLIVEIRA, A. M. S.; SALOMÃO, F. X. T.; GOUVEIA, M.I. F. Mapa

de Erosão do Estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 16, p. 31-36, 1995. DOI <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19950008>. Disponível em: <https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rig/article/view/8842>. Acesso em: 31 ago. 2022.

LANGE, L. C.; SIMÕES, G. F.; LIMA, W. S.; CATAPRETA, C. A. A.; FREITAS, I. C. Resíduos Sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: guia do profissional em treinamento: nível 2. **Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental - ReCESA**, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/recesa/projetooperacaoemonitoramentodeaterrossanitarios-nivel2.pdf. Acesso em: 4 out. 2022.

MACHADO, F. B.; NARDY, A. J. R.; ROCHA JUNIOR, E. R. V.; MARQUES, L. S.; OLIVEIRA, M. A. F. D. Geologia e litogeoquímica da Formação Serra Geral nos estados de Mato grosso e Mato Grosso do Sul. *Geociências*, UNESP. Vol. 28, Nº 4. Pag. 523-540. São Paulo, 2009. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/71388>>.

MACIEL, M. M. Aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) em Ambiente de Geoprocessamento e sua Comparação com Aptidão Agrícola. Dissertação de Mestrado em Área Concentração Ciência do Solo, UFPR. Curitiba, 2000.

MANNIGEL, A. R.; PASSOS, M.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 24, 1335-1340. 2002.

MAOSKI, E. Gênese dos calcretes da Formação Marília no Centro-Oeste Paulista e Triângulo Mineiro, Bacia Bauru (Ks). Dissertação de Mestrado em Área de Geologia Exploratória, do Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012. Disponível em: < <https://www.acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/27326/R%20-%20D%20-%20ELOIR%20MAOSKI.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

MELLO, G.; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de perdas de solo, do potencial natural e risco de erosão em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 315-322, 2006.

MENK, J. R. F.; MIRANDA, J. I. Levantamento pedológico e mapeamento do risco de erosão dos solos da microbacia do Córrego Taquara Branca, Sumaré-SP. **Embrapa Meio Ambiente-Documentos (INFOTECA-E)**, 1997.

MOMOLI, R. S.; COOPER, M. Erosão hídrica em solos cultivados e sob mata ciliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1295-1305, 2016.

MOTTA, P. E. F.; BARUQUI, A. M.; DOS SANTOS, H. G. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da região do Alto Paranaíba, Minas Gerais. EMBRAPA. Rio de Janeiro. 2004.

NOVAIS, G. T. Caracterização climática da mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e do entorno da Serra da Canastra (MG). 189 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/16101>>.

OLIVEIRA, F. P.; SANTOS, D.; SILVA, I. F.; SILVA, M. L. N. Tolerância de Perda de Solo

por Erosão para o Estado da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, p. 1519-5228, 2008.

PEREIRA, L. F. Relações tectono-estratigráficas entre as unidades Canastra e Ibiá na região de Coromandel, MG. Dissertação de Mestrado. UNB. Brasília, 1992.

PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO DE MONTE CARMELO. Elaborado por Departamento Municipal de Água e Esgoto de Monte Carmelo. Monte Carmelo. 2013 Disponível em: <<https://www.dmae.montecarmelo.mg.gov.br/plano-municipal-de-saneamento-basico>>

REMÉDIO, F. H. Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com Nspt. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas (UNESP). Rio Claro. 2014.

RICHARDSON, C. W.; FOSTER, G. R.; WRIGHT, D. A. Estimation of Erosion Index from Daily Rainfall Amount. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. Pag.153 – 160, 1983. Disponível em: < <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=33893>>. Acesso: 11/09/2022.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M. D.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, 68, 1095-1103. 2009.

SANTOS, D.; BAHIA, V. G.; TEIXEIRA, W. G. Queimadas e erosão do solo. **Informe Agropecuário, Belo Horizonte**, v. 16, n. 176, p. 62-68, 1992.

SANTOS, B. L.; SIMÕES, L. S. A.; SEER, H. J. Evolução estrutural do domínio interno da faixa Brasília meridional na região de Estrela do Sul, Minas Gerais, Brasil. **Geociências**, UNESP. Vol. 40, Nº 02. Pág. 287-305. São Paulo, 2021.

SEER, H.J.; BROD J.A., FUCK R.A., PIMENTEL M.M., BOAVENTURA G.R. e DARDENNE, M.A. Grupo Araxá na sua área tipo: um fragmento de crosta oceânica Neoproterozóica na Faixa de Dobramentos Brasília. **Rev. Bras. Geociências**, 31: 389-400. 2001.

SEER, H. J., MORAES, L. C; CARNEIRO, A. C. Geologia e deformação do Grupo Araxá na região de Estrela do Sul-Monte Carmelo-Abadia dos Dourados, Minas Gerais. In: SBG, Simpósio de Geologia, Sudeste. 2007.

SEER, H. J.; MORAES, L. C. Within plate, arc, and collisional Neoproterozoic granitic magmatism in the Araxá Group, Southern Brasília belt, Minas Gerais, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, 43, p. 333-354. 2013.

SENA, J. N. O uso de sistema de informação geográfica na avaliação de diferentes alternativas de geração de cartas de suscetibilidade à erosão. **Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista**. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2008.

SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Identificação de Áreas com Perda de Solo acima do Tolerável Usando NDVI para o Cálculo do Fator C da USLE. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**. Curitiba. Vol. 42. Pag. 72 –

85. 2017.

SOUZA, S. S.; TEIXEIRA, G. F. Aterro Sanitário: Um problema de Cruz das Almas. *Revista NAU Social*, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 29–37, 2012. DOI: 10.9771/ns.v3i4.31176. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/nausocial/article/view/31176>. Acesso em: 5 jan. 2023.

UHLEIN, A.; FONSECA, M. A.; SEER, H. J.; DARDENNE, M. A. Tectônica da Faixa de Dobramentos Brasília–Setores Setentrional e Meridional. *Geonomos*, 2012.

UHLEIN, A.; FONSECA, M. A.; SEER, H. J.; DARDENNE, M. A. Tectônica da Faixa de Dobramentos Brasília – Setores Setentrional e Meridional. *Geonomos*. Belo Horizonte. Vol. 20, Pág. 1 – 14. 2013.

VALLADARES, G. S., GOMES, A. D. S., TORRESAN, F. E., RODRIGUES, C. A. G., & GREGO, C. R. Modelo multicritério aditivo na geração de mapas de suscetibilidade à erosão em área rural. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília. Vol. 47, Pag. 1376-1383. 2012.

VIANA, A. F. Estudo de Caso – A importância da geotecnia no projeto executivo de dois aterros sanitários a serem implantados em área escarpada localizada em Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. 2016.

VIEL, J. A.; ROSA, K. K.; HOFF, R. Estudo da erosão superficial do solo por meio de SIG na região da denominação de origem Vale dos Vinhedos (Brasil). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18, n. 3, 2017.

WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP): I-Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 801-814, 2008.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D.D. Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning, Estados Unidos. **Department of Agriculture, Agriculture Handbook** N° 537. 1978.

XAVIER, F. V.; CUNHA, L. K.; SILVEIRA, A.; SALOMÃO, F. X. T. Análise da suscetibilidade à erosão laminar na bacia do rio manso, Chapada dos Guimarães, MT, utilizando Sistemas de Informações Geográficas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 11, n. 2, 2010.

ZUQUETTE, Lázaro Valentin. *Geotecnia Ambiental*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. cap. 8, p. 215-260. ISBN 978-85-352-8058-6.