

ESTIMATIVA E ESPACIALIZAÇÃO DA EROSIVIDADE NO ENTERNO DO RESERVATÓRIO DA UHE BATALHA (GO/MG) COM BASE EM DADOS PLUVIOMÉTRICOS

ESTIMATION AND SPATIALIZATION OF EROSVIVITY IN THE INTERIOR OF THE UHE BATALHA RESERVOIR (GO/MG)

BASED ON RAINFALL DATA

ESTIMACIÓN Y ESPACIALIZACIÓN DE LA EROSIVIDAD EN EL INTERIOR DEL EMBALSE DE UHE BATALHA (GO/MG) A

PARTIR DE DATOS PLUVIOMÉTRICOS

RESUMO

Identificar, quantificar e espacializar fatores que condicionam os processos erosivos hídricos, como a erosividade, podem auxiliar no entendimento do processo de aporte de sedimentos para cursos d'água, bem como, no caso específico, para reservatórios de usinas hidrelétricas. Desse modo, este estudo teve por objetivo estimar e espacializar a pluviosidade e o índices de erosividade, na Área de Influência Direta (AID) do reservatório de Batalha (GO/MG). A partir do banco de dados disponibilizado pelo portal HIDROWEB da Agência Nacional das Águas (ANA), adotou-se a equação proposta por Silva *et al.* (1997) e para medir a acurácia dos modelos de estimativa da Erosividade adotou-se o índice de Fournier (1958) para as chuvas da região, para uma série histórica de 1991 a 2021. Para isso, as estimativas levaram em conta chuvas, mensais, anuais e sua variabilidade espacial para as regiões sudeste de Goiás e Noroeste de Minas Gerais. Por meio de uma análise descritiva e da espacialização do Índice de Erosividade (EI), no estudo da variabilidade anual, verificou-se tendência de aumento na direção aproximadamente norte-sul, em sentido sul e centro-sul, de modo análogo, no estudo da variabilidade mensal, notou-se aumento do EI também na direção aproximadamente norte-sul, em sentido sul e centro-sul, nos meses de maior índice pluviométrico. Observou-se ainda que os meses de maior pluviosidade, que correspondem aos meses das estações primavera e verão, apresentaram maiores Índices de Erosividade, classificados como alto e muito alto, exceto o mês de outubro. Para os meses mais secos, correspondentes ao outono e inverno, esses índices foram classificados como baixo e muito baixo. No geral, a erosividade média anual foi classificada como alta.

Palavras-chave: Modelagem. Reservatório. Sedimento. Erosão. Estatística.

ABSTRACT

Identifying, quantifying and spatialising factors that condition water erosion processes, such as erosivity, can help to understand the process of sediment input to watercourses and, in this specific case, to hydroelectric plant reservoirs. The aim of this study was to estimate and spatialise rainfall and erosivity indices in the Area of Direct Influence (AID) of the Batalha reservoir (GO/MG). Using the database provided by the National Water Agency's (ANA) HIDROWEB portal, the equation proposed Silva *et al.* (1997) was adopted, and to measure the accuracy of the erosivity estimation models, the Fournier index (1958) was adopted for rainfall in the region, for a historical series from 1991 to 2021. To do this, the estimates took into account monthly and annual rainfall and their spatial variability for the south-eastern regions of Goiás and north-western Minas Gerais. By means of a descriptive analysis and spatialisation of the Erosivity Index (EI), in the study of annual variability, there was a tendency for it to increase in an approximately north-south direction, towards the south and centre-south. Similarly, in the study of monthly variability, there was an increase in the EI also in an approximately north-south direction, towards the south and centre-south, in the months with the highest rainfall. It was also observed that the months with the highest rainfall, corresponding to the spring and summer seasons, had the

 Glacielle Fernandes Medeiros ^a

 Gislaine Cristina Luiz ^b

 Patrícia de Araújo Romão ^c

 Maurício Martines Sales ^d

 Marta Pereira da Luz ^e

^a Universidade Federal de Goiás (UFG),
Goiânia, GO, Brasil

^b Universidade Federal de Goiás (UFG),
Goiânia, GO, Brasil

^c Universidade Federal de Goiás (UFG),
Goiânia, GO, Brasil

^d Universidade Federal de Goiás (UFG),
Goiânia, GO, Brasil

^e ELETROBRAS/FURNAS, Goiânia, GO,
Brasil

DOI: 10.12957/geouerj.2024.74561

Correspondência:

glaciellemedeiros@discente.ufg.br

Recebido em: 30 mar. 2023

Revisado em: 08 mar. 2024

Aceito em: 08 mar. 2024





highest Erosivity Indices, classified as high and very high, except for October. For the drier months, corresponding to autumn and winter, these indices were classified as low and very low. Overall, the average annual erosivity was classified as high.

Keywords: Modelling. Reservoir. Sediment. Erosion. Statistics.

RESUMEN

La identificación, cuantificación y espacialización de los factores que condicionan los procesos de erosión hídrica, como la erosividad, puede ayudar a comprender el proceso de aporte de sedimentos a los cursos de agua y, en este caso concreto, a los embalses de las centrales hidroeléctricas. El objetivo de este estudio fue estimar y espacializar los índices de pluviometría y erosividad en el Área de Influencia Directa (AID) del embalse de Batalha (GO/MG). Utilizando la base de datos proporcionada por el portal HIDROWEB de la Agencia Nacional de Aguas (ANA), se adoptó la ecuación propuesta por Silva *et al.* (1997), y para medir la precisión de los modelos de estimación de la erosividad, se adoptó el índice de Fournier (1958) para las precipitaciones en la región, para una serie histórica de 1991 a 2021. Para ello, las estimaciones tuvieron en cuenta las precipitaciones mensuales y anuales y su variabilidad espacial para las regiones sudeste de Goiás y noroeste de Minas Gerais. Mediante el análisis descriptivo y la espacialización del Índice de Erosividad (IE), en el estudio de la variabilidad anual, se observó una tendencia al aumento del mismo en dirección aproximadamente norte-sur, hacia el sur y centro-sur. Del mismo modo, en el estudio de la variabilidad mensual, se observó un aumento del IE también en dirección aproximadamente norte-sur, hacia el sur y centro-sur, en los meses de mayores precipitaciones. También se observó que los meses de mayor pluviosidad, correspondientes a las estaciones de primavera y verano, presentaban los Índices de Erosividad más elevados, clasificados como alto y muy alto, excepto en octubre. Para los meses más secos, correspondientes al otoño y al invierno, estos índices se clasificaron como bajos y muy bajos. En conjunto, la erosividad media anual se clasificó como alta.

Palabras Clave: Modelización. Embalses. Sedimentos. Erosión. Estadística.



INTRODUÇÃO

Erosões hídricas podem ser definidas como um conjunto de processos em que os materiais terrosos e rochosos da crosta terrestre são desagregados e transportados pela ação da água, em especial pelos agentes pluviométricos, que por meio do escoamento superficial transportam os sedimentos para corpos hídricos adjacentes. A ausência de um planejamento integrado de bacias hidrográficas tem como consequência a ocupação desordenada do solo. Associada a práticas não conservacionistas, essa ocupação acarreta a aceleração e até mesmo a deflagração de processos erosivos, os quais se tornam os principais responsáveis pelo assoreamento de mananciais hídricos, como rios e lagos naturais, ou mesmo de reservatórios de Usinas Hidrelétricas (UHEs).

O assoreamento de reservatórios vem sendo discutido por países que utilizam fontes de energia geradas por UHEs, tendo em vista que o seu funcionamento depende diretamente da vida útil desses mananciais. Além disso, a construção de uma barragem gera modificações no curso natural de um rio, provocando alterações nos processos geológicos associados ao manancial hídrico. Essas modificações induzem à busca de um novo equilíbrio hidrológico e hidrogeológico. Segundo Carvalho et al. (2000), quando o assoreamento de um reservatório aumenta, sua capacidade de armazenamento diminui, a influência do remanso aumenta à montante, as velocidades desses fluxos no lago aumentam, o que gera uma maior quantidade de sedimentos em suspensão, reduzindo a eficiência de retenção das partículas sólidas. Szabó (2010) destaca que tais intervenções podem ser consideradas como processos antrópicos de impacto direto, os quais fazem parte do escopo da Geomorfologia Antropogênica.

Desse modo, como parte do processo de assoreamento associado à erosão hídrica, a sedimentação das partículas sólidas no fundo do reservatório diminui o seu volume útil. Para compreender as consequências dos processos erosivos hídricos na borda de reservatórios de UHE, ocasionados pelas modificações antrópicas, faz-se necessário o conhecimento dos principais condicionantes dessa dinâmica, relacionados à geomorfologia, à geologia, aos tipos de solos, às condições climáticas e à cobertura vegetal, tendo em vista a ocorrência natural do fenômeno, bem como o entendimento de que tais processos podem ser intensificados devido ao uso e ocupação dos solos.

Dentre os fatores condicionantes que levam ao assoreamento de reservatórios, esta pesquisa priorizou a capacidade do clima e das chuvas em provocar erosões no solo. A erosividade é definida pela capacidade do clima e da chuva de desencadear a erosão, no qual, é influenciada por diversos fatores, como a intensidade e duração da chuva, a quantidade volumétrica de água infiltrada no solo, a declividade do terreno, a cobertura vegetal e a textura do solo. O modelo *Universal Soil Loss Equation* (USLE) ou Equação Universal de Perda de



Solos (EUPS), foi criado com o propósito de prever as perdas de solo de uma área. O modelo considera na estimativa de perda de solo ações conservacionistas e fatores naturais, tais como: chuva, solo, relevo e cobertura do solo.

O modelo USLE considera o parâmetro fator R, também conhecido como erosividade. Esse fator pode ser descrito como um índice numérico que quantifica o potencial da água da chuva em provocar erosão em regiões sem cobertura vegetal. O fator R diz respeito à intensidade, duração e frequência das chuvas, sendo a intensidade um fator importante na formação das feições erosivas, em especial, em regiões de clima tropical, uma vez, que está associado diretamente à ocorrência ou não do desprendimento de partículas de solos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2017; ARCAJA, 2007).

Nesse sentido, as áreas de influência direta (AID) de um reservatório de usinas hidrelétricas (UHE) podem, devido ao uso e cobertura do solo, tornar-se propensas a acelerar os processos erosivos hídricos, especialmente em situações de chuvas intensas. Para avaliar a influência da chuva no processo erosivo, ou seja, a erosividade nas áreas de influência direta (AID) das usinas hidroelétricas, o clima deve ser analisado quanto a variabilidade e à irregularidade das chuvas. Mediante essa perspectiva, se torna importante investigar a concentração das chuvas e a tendência dos episódios extremos e a relação com a erosão hídrica, a erosividade.

A partir desse contexto, esta pesquisa tem por motivação principal a intenção de contribuir para a compreensão da pluviosidade e erosividade, bem como sua intensificação nas bordas do reservatório da UHE de Batalha. Para alcançar essa intenção, pretende-se realizar um estudo da dinâmica da pluviosidade ao longo do tempo (1991 a 2021) e dos condicionantes da perda de solo ocasionadas pela chuva, na Área de Influência Direta (AID) do reservatório de Batalha (GO/MG), por meio de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Sensoriamento Remoto (SR).

Localização e caracterização da área de estudo

A Usina Hidrelétrica Batalha, administrada pelo Sistema Eletrobras/Furnas, em operação desde 2014, localiza-se no rio São Marcos, entre os municípios de Cristalina (GO) e Paracatu (MG) (FURNAS, 2020).

Este trabalho está vinculado a um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D), “Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs” – PD-0394-1705/2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, desenvolvido pela Eletrobrás Furnas, Universidade Federal de Goiás (UFG) e Universidade de Brasília (UnB). Todo estudo climático e

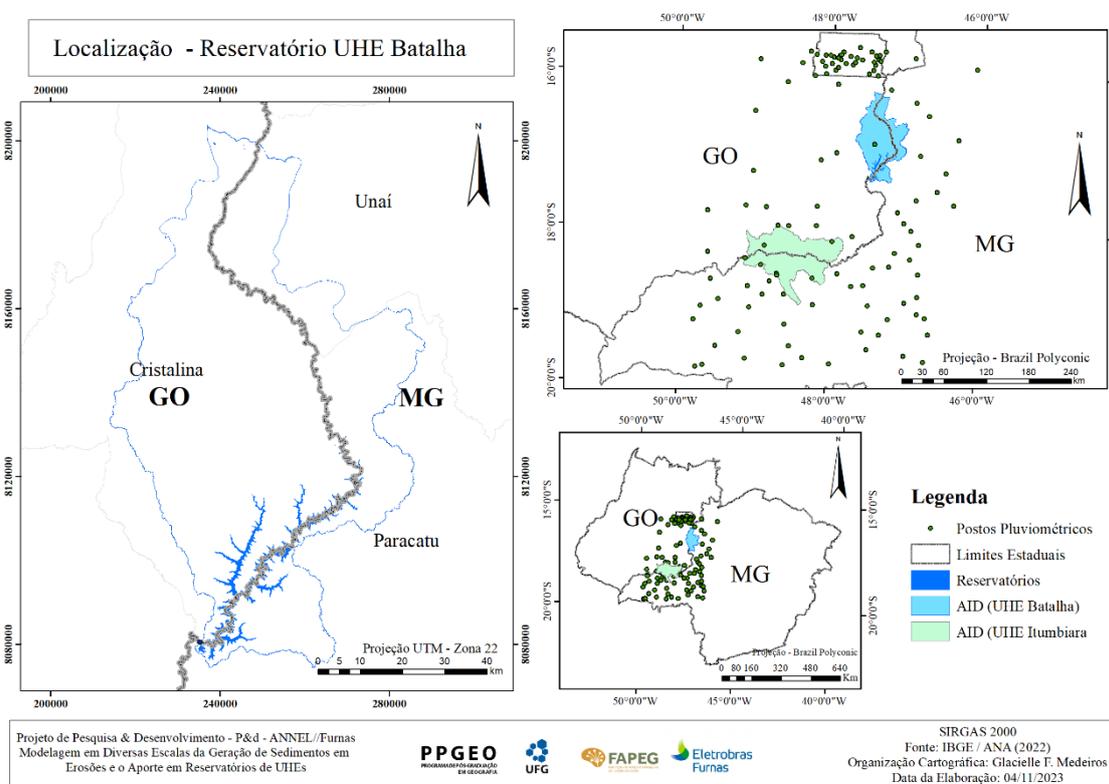


consequentemente os estudos de erosividade estão sendo desenvolvidos no âmbito deste projeto para os reservatórios da UHE de Batalha, localizado ao norte dos postos pluviométricos e para o reservatório da UHE de Itumbiara, localizado ao sul dos mesmos postos pluviométricos.

Como pode ser observada na Figura 1, a área deste estudo corresponde apenas ao reservatório de Batalha. É importante ressaltar que todos os recortes correspondentes à área de estudo se deram após seleção, refinamento, cálculos e interpolação dos dados.

Para o cálculo e espacialização dos índices de erosividade, a seleção dos postos pluviométricos se deu de forma que houvesse máxima cobertura dos dois reservatórios, permitindo assim posterior interpolação entre pontos. Os dados pluviométricos utilizados nesta pesquisa, foram obtidos pelo portal HIDROWEB v3.2.6, disponibilizado pela Agência Nacional de Água (ANA), no qual utilizou-se para *download* dos dados, o *plugin ana data acquisition*, disponibilizado para o *software* QGIS.

Figura 1. Localização da área de estudo



Elaborado por: Autora (2023)



O clima da área em estudo foi caracterizado como Savana (chuva no verão) em sua totalidade, conforme apresentado nos dados "Zonas Climáticas do Brasil" disponibilizados pelo Centro de Estudos da Metrópole (CEM) em parceria com a USP. Eles disponibilizaram gratuitamente uma base de dados georreferenciada com o cruzamento entre dados demográficos e econômicos dos municípios do Brasil em relação à divisão em zonas climáticas, conforme a classificação Köppen.

Os padrões climáticos nas áreas de estudo são influenciados pelos sistemas atmosféricos que são moldados pela circulação atmosférica em baixos e altos níveis, resultantes das variações nos campos de pressão, com origem e impacto na América do Sul. Em baixos níveis (950 hpa), o contraste de temperatura e pressão entre os oceanos tropicais Atlântico e Pacífico desencadeiam eventos climáticos de natureza tanto tropical quanto extratropical (NOVAIS; FARIAS, 2021).

No inverno, o sistema de alta pressão Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS) de origem no oceano tropical sul se intensifica e se aproxima do continente determinando a estabilidade atmosférica e a ausência das chuvas, com possibilidade de queda na temperatura devido à influência das entradas de frentes frias. A atuação do respectivo sistema justifica o período seco no reservatório da UHE de Batalha.

Para a confecção dos mapas do meio físico, adotou-se a imagem *Copernicus Global Digital Elevation Model* (COP-30). Cremon *et al.* (2022), ao estudar o MDE COP-30 aplicado à região Centro-Oeste do Brasil, concluíram que o modelo apresentou uma Raiz do Erro Quadrático Médio (REMQ) de 1,98 m para o estado de Goiás e o Distrito Federal, indicando maior acurácia em relação a outros MDEs globais gratuitos.

A partir do mapa hipsométrico da área de estudo (Figura 2B), é possível ter uma boa visão da forma do relevo da AID do reservatório da UHE de Batalha. Foi constatado, a partir da análise da hipsometria, que a Área de Influência Direta (AID) da UHE de Batalha possui uma altitude média de aproximadamente 1006 metros e uma amplitude de 499 metros, com altitudes mais elevadas (1071m – 1256m) a oeste da área de estudo.

A Declividade (Figura 2C) segundo a metodologia proposta por Ramalho Filho e Beek (1995) e adotada por Neto, Araújo e Araújo Filho (2010), em conformidade com o proposto pela Embrapa (2018), revela que os valores de declividade variam entre 0 e 35% na área de estudo. Isso aponta para uma variedade de categorias de terreno, que vão desde terreno plano até fortemente ondulado, não apresentando inclinações associadas a áreas montanhosas.

O mapa de uso e cobertura da terra da Área de Influência Direta (AID) da UHE de Batalha, foi elaborado para o ano de 2021 a partir dos dados secundários disponibilizados pelo projeto MapBiomias (Figura 2A).



Conforme os dados apresentados no mapa da cobertura e uso da terra, constantes na Figura 2A, pode-se descrever a cobertura vegetal e o uso do solo na Área de Influência Direta da UHE Batalha em 2021, em termos de área ocupada em km² e em porcentagem da área total da AID.

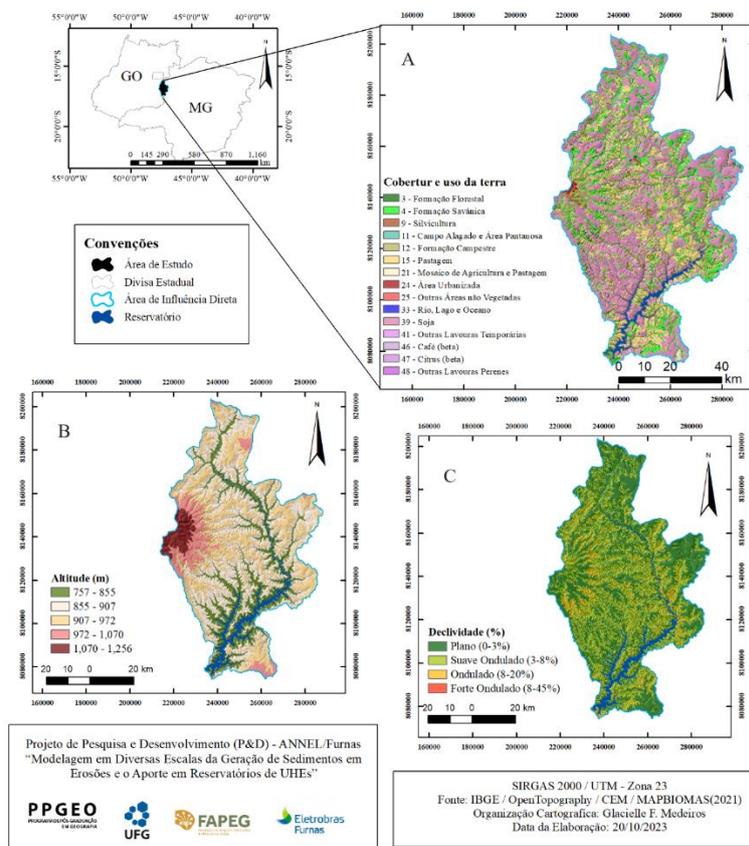
A formação florestal ocupa uma área de 191,24 km², o que corresponde a 3,69% da área em estudo. Já a formação savana ocupa 755,54 km², representando 14,57% do total. A soja é a cultura que ocupa a maior área, com 2094,07 km², representando 40,39% da AID da UHE Batalha. A pastagem ocupa 853,52 km², o que corresponde a 16,46% do total, enquanto a formação campestre ocupa 647,3 km², representando 12,49% da área.

Outros usos do solo incluem silvicultura (62,4 km²), campo alagado e área pantanosa (110,39 km²), mosaico de agricultura e pastagem (235,07 km²), área urbanizada (11,63 km²), outras áreas não vegetadas (6,41 km²), rios, lagos e oceano (96,29 km²), café beta (17,18 km²), citrus beta (2,15 km²) e outras lavouras perenes (0,12 km²), que juntos equivalem a 10,43 % da Área de Influência direta da UHE Batalha.

A área de formação florestal em 2021 foi de 191,24 km², enquanto a área de formação savana foi de 755,54 km². Juntas, essas duas coberturas vegetais ocupam 18,26% da AID da UHE Batalha. Em contra partida, a área ocupada pela cultura da soja é de 2094,07 km², o que representa 40,39% da AID. Isso significa que a área ocupada pela soja é mais de duas vezes maior do que a soma das áreas de floresta e savana.

O projeto MapBiomas mostra que em 2005 a área ocupada pela soja representava 25,79% de toda a área e em 2021 passou a representar 40,39% da AID de Batalha, indicando um aumento de 56,63% entre os anos de 2005 e 2021, e conseqüentemente redução nas áreas de vegetação nativa. Desta forma é importante ressaltar que a soja é uma cultura que tem crescido rapidamente nas últimas décadas no Brasil, ocupando cada vez mais áreas que antes eram cobertas por vegetação nativa. Esse processo tem gerado preocupações ambientais relacionadas a vida útil do reservatório de UHE Batalha, uma vez que, a remoção da vegetação nativa favorece a ocorrência de erosividade e o conseqüente carreamento de partículas sólidas para o reservatório, levando ao assoreamento do mesmo.

Figura 2: Cobertura e uso do solo, variações da altitude, classes de declividade e clima da AID da UHE Batalha.



Elaborado por: Autora (2023)

Desenvolvimento

A análise da dinâmica da pluviometria visa à caracterização regional das variações pluviométricas, a fim de avaliar a erosividade sobre os diferentes compartimentos paisagísticos da Área de Influência Direta da UHE Batalha. Como já mencionado, este trabalho está vinculado a um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) de maior abrangência, que inclui, além do mapeamento da Área de Influência Direta (AID), o mapeamento do Limite de Borda Imediata (LBI). Neste contexto, serão adotados dados da Câmera Multiespectral e Panchromática Wide-Scan (WPM) a bordo do satélite CBERS 4A (China-Brazil Earth Resources Satellite), com informações disponíveis para o ano de 2021.

Estabelecendo o ano de 2021 como limite para a análise dos dados, determinou-se um recorte temporal que se estende de 1991 a 2021, de modo que o intervalo da série fosse de 31 anos entre o início e fim do estudo, recorte temporal recomendado pela Organização Meteorologia Mundial (MM).

Dentre os postos pluviométricos selecionados, alguns apresentaram falhas advindas da leitura dos dados, correspondentes a ausências de dados pluviométricos. De forma a preencher essas lacunas, foram adotadas



técnicas para preenchimento das falhas. Além disso, para garantir total cobertura da área de estudo e uma interpolação satisfatória, aumentou-se o raio de seleção dos postos para além dos limites da área de estudo.

O preenchimento das falhas foi executado pelo método da regressão linear simples. Na regressão linear simples, as informações pluviométricas de um posto (Y) são correlacionadas com as observações correspondente a um posto vizinho (X) que apresente máxima correlação (ZEILHOFER et al, 2003).

O preenchimento das falhas foi executado no software RStudio a partir da adaptação do código em R para estimativa de falhas hidrológicas pelo método da regressão linear disponibilizado por Santos e Dias (2019).

Para estimativa das falhas e validação dos resultados, adotou-se a premissa de que o posto (x) com falha, seria correlacionado com a série de dados de outro posto pluviométrico que se apresenta um coeficiente de correlação $r \geq 0,84$ e um coeficiente de determinação $R^2 \geq 0,7$

O coeficiente de correlação de Pearson (r) refere-se ao grau de relação entre duas variáveis quantitativas e expressa o grau de correlação a partir de valores situados entre -1 e 1. Coeficiente de correlação próximo de 1, indica aumento no valor de uma variável quando a outra também aumenta, desta forma, pode-se dizer que há uma relação linear.

O coeficiente de determinação R^2 mede a proporção da variabilidade total dos dados explicada pelo modelo. Um valor de R^2 mais próximo de 1 indica que o modelo explica bem a variabilidade dos dados, enquanto um valor mais próximo de 0 indica que o modelo não está explicando muito.

Brubacher, Oliveira e Guasselli (2020) retratam que o método (RLS) e (RLM) são modelos de simples utilização e interpretação, que não necessitam de grande esforço computacional ou extensas bibliotecas

Cálculo do EI30

Como já mencionado, para quantificação do índice numérico de erosividade é necessário conhecer as características de intensidade, duração e frequência das chuvas. O índice de chuva mais adotado para estimativa da erosividade é o índice de erosividade em 30 minutos (EI_{30}) Proposto por Wischmeier e Smith (1978). O EI_{30} é determinado a partir da relação entre a energia cinética (E_c), durante o impacto das gotas da chuva no solo e pela intensidade máxima da chuva em um período de 30 minutos consecutivos (I_{30}), conforme Equação 1. Wischmeier e Smith (1978) estabelecem a Equação 1, para o cálculo da energia cinética das gotas de chuva no solo.



$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I \quad \text{Equação 1}$$

em que:

E_c = energia cinética, dada em MJ/(há.mm)

I = intensidade da chuva, em mm/h

O valor obtido pela Equação 1 é então multiplicado pela quantidade de chuva para expressar a energia cinética em MJ ha⁻¹. A energia cinética total é obtida a partir da soma das energias cinéticas de todos os segmentos uniformes da chuva. Por fim, a EI_{30} passa a ser definida como o produto da intensidade máxima da chuva durante um período de 30 minutos (I_{30}).

$$EI_{30} = E_c \times I_{30} \quad \text{Equação 2}$$

em que:

EI_{30} = índice de erosividade em 30 minutos (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹);

E_c = energia cinética, dada em (MJ ha⁻¹);

I_{30} = intensidade máxima da chuva em qualquer período de 30 minutos consecutivos, dada em (mm h⁻¹).

O método direto de cálculo da energia cinética exposto por Wischmeier e Smith (1978) é de difícil simulação, uma vez que os cálculos devem ser baseados nas características físicas da chuva, tais como, distribuição do tamanho de gotas.

Wagner e Massambini (1988) desenvolveram a relação entre a energia cinética e a intensidade da chuva para o Brasil a partir de 533 amostras da distribuição do tamanho da gota de chuva. Os respectivos autores concluíram que a equação gerada não apresentou diferenças significativas da proposta por Wischmeier e Smith (1978).

Diversos autores estudaram o índice modificado de Fournier e encontram bom resultado no cálculo do Fator, dentre eles pode-se destacar estudos realizado por: Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) e Oliveira *et al.* (2012).

Deste modo o Índice de Fournier Modificado (IFM) passa a ser adotado como uma variável usada para medir a acurácia dos modelos de estimativa da Erosividade. O índice de Fournier corresponde ao cálculo da razão



entre o quadrado da precipitação média mensal e a média anual (Equação 3) (LOMBARDI NETO E MOLDENHAUER, 1992).

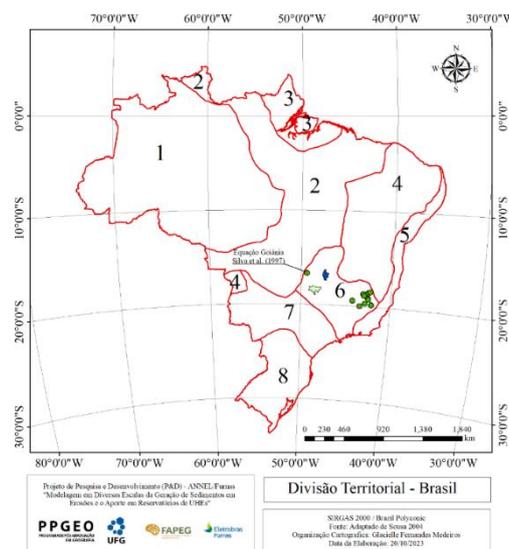
$$IFM = \frac{p^2}{P} \quad \text{Equação 3}$$

em que: IFM é o Índice de Fournier Modificado (IFM) em mm; p a precipitação média mensal em mm, e P a precipitação média anual.

Conforme apresentado por Silva (2004) e Nascimento e Romão (2017), muitos autores identificaram correlações significativas entre o índice de Fournier e os índices de erosão, como evidenciado pelo alto nível de correlação observado por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992). No entanto, os autores ressaltam a necessidade de uma maior consideração das propriedades individuais de cada chuva em relação à sua capacidade erosiva, especialmente no que diz respeito à duração, intensidade e frequência.

Silva (2004) fez um levantamento das estimativas da erosividade para o Brasil e dividiu o país em oito regiões que representam áreas homogêneas em termos de totais de precipitação anual. Oliveira, Wendland e Nearing (2012) fez um levantamento de equações de erosividade adotadas no estado de Goiás e Minas Gerais geradas a partir do Índice de Fournier modificado (IFM), como pode ser observado na Tabela 1.

Figura 3: Equações adotadas na determinação dos valores de erosividade mensais- anuais apresentada por Oliveira, Wendland e Nearing (2012) em função da área territorial apresentada por Silva 2004.



Fonte: Silva (2004) adaptado

Concluída a revisão bibliográfica dos modelos matemáticos, foi adotado neste estudo para determinar os valores mensais/ anuais da erosividade a equação proposta por Silva *et al.* (1997) e mais tarde apresentada



por Oliveira, Wendland e Nearing (2012), como pode ser observado na Tabela 1. Destaca-se que a equação adotada está inserida dentro da área “6” conforme divisão territorial proposta por Silva (2004) e apresentada na Figura 3.

Tabela 1: Equações de estimativa da erosividade da chuva para o Brasil obtidas a partir do Índice de Fournier modificado (IFM) e citadas por Oliveira, Wendland e Nearing (2012)

Estado	Município	Lat.	Long.	Equações	R ²	Referência
GO	Goiânia	-16,68	-49,38	$EI_{30} = 215,33 + 30,23(IFM)$	0,77	Silva et al. (1997)
MG				$EI_{30} = 25,3 + 43,35(IFM) - 0,232(IFM)^2$		Marques et al., (1997)
	Sete Lagoas	-19,42	-44,25			
MG	Açucena	-19,07	-42,55	$EI_{30} = 158,35(IFM)^{0,85}$	0,88	Silva et al. (2010)
MG	Antônio Dias	-19,64	-42,85	$EI_{30} = -119,27 + 784(P)$	0,90	Silva et al. (2010)
MG	Belo Oriente	-19,22	-42,49	$EI_{30} = 215,4(IFM)^{0,65}$	0,89	Silva et al. (2010)
MG	Caratinga	-19,8	-42,15	$EI_{30} = 321,63(IFM)^{0,48}$	0,86	Silva et al. (2010)
MG	Peçanha	-18,56	-42,54	$EI_{30} = 41,07 + 9,63(P)$	0,90	Silva et al. (2010)
MG	Sabinópolis	-18,67	-43,08	$EI_{30} = 123,33(IFM)^{0,74}$	0,95	Silva et al. (2010)
MG	Santa Barbara	-19,96	-43,42	$EI_{30} = 170,59(IFM)^{0,64}$	0,93	Silva et al. (2010)
MG	Santo Ant. Itambé	-18,46	-42,3	$EI_{30} = 179,33(IFM)^{0,77}$	0,90	Silva et al. (2010)
MG	Sat D do Prata	-18,87	-42,97	$EI_{30} = 114,42(IFM)^{0,81}$	0,86	Silva et al. (2010)

Fonte: Oliveira, Wendland e Nearing (2012)

Interpolação dos dados

Para elaborar o mapa de precipitação e, conseqüentemente, os mapas de erosividade da região em estudo, foi adotada técnica de interpolação que permite avaliar os erros associados aos atributos mapeados. Um Sistema de Informações Geográficas (SIG), como o que foi utilizado, permite que a interpolação espacial converta dados de observações pontuais em campos contínuos (*raster*), que apresentam padrões espaciais que podem ser comparados com outras entidades espaciais contínuas.

Perin *et al.* (2015) ao fazer uma revisão sistemática sobre diversos interpoladores estudados ao longo do globo Terrestre concluíram que os métodos de interpolação mais usados para espacializar a variável climática precipitação foram Kriging, Inverse Distance Weighting e Spline, respectivamente. Por sua vez, o método de interpolação mais eficiente para dados pluviométricos varia conforme o período. O Inverso da Potência da Distância (IPD) apresentou o maior percentual de eficiência para precipitação diária; Krigagem para mensal e Cokrigagem para anual.

Trindade *et al.* (2016) encontraram bons resultados ao estudar a Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil, bem como estimar os valores de erosividade para os locais não amostrados utilizando o método de interpolação krigagem ordinária.



Souza *et al.* (2011) estudaram os principais modelos de interpoladores utilizados na análise de dados espaciais e concluíram que os melhores resultados foram obtidos pela krigagem, seguidos pela curvatura mínima e inverso ponderado da distância.

Farias, Francisco e Senna (2017) aplicaram métodos de interpolação krigagem, Inverso da Potência da Distância (IPD) e a Curvatura Mínima (Spline) na estimativa de valores pluviométricos para locais sem dados, afim de gerar uma superfície contínua representando a distribuição espacial das chuvas. Os autores concluíram que método IPD apresentou o melhor desempenho entre os interpoladores testados.

Teixeira (2019) testou para a espacialização dos valores de erosividade os interpoladores Inverso da Potência da Distância (IPD), com potências variando de 1 a 6; e as técnica de Krigagem Simples (KS), Ordinária (KO), no qual adotou para validação dos dados a Raiz do Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). Dentre os interpoladores avaliados por Teixeira (2019), o IPD com potência 2 apresentou os menores valores de RMSE para a maioria dos meses avaliados, sendo utilizado para a geração dos mapas espacializados de erosividade da chuva mensal e anual.

Neste trabalho, com o objetivo de determinar o modelo mais adequado para espacialização dos dados de erosividade, foram selecionados três interpoladores para teste a partir dos modelos que demonstraram melhor desempenho, conforme identificado por Perin et al. (2015), Trindade et al. (2016), Souza et al. (2011), Farias, Francisco e Senna (2017) e Teixeira (2019). Os modelos escolhidos incluem a Krigagem ordinária, Krigagem Simples e o Inverso da Potência da Distância (IPD) ou *Inverse Distance Weighting (IDW)* com potência 2.

Como pode ser observado, para aplicações em dados pluviométrico e erosividade, o interpolador determinístico inverso da distância elevado a uma potência (IDP) é um dos mais adotados. O método de interpolação da krigagem ordinária (KRI), é um interpolador estatístico, que se destaca entre os demais interpoladores, uma vez que leva em consideração a existência de dependência espacial, sendo também constantemente adotado para variáveis relacionadas a precipitação.

Os modelos digitais de distribuição espacial da Erosividade e a validação cruzada foram desenvolvidos por meio da extensão *Geostatistical Analyst* do Software ArcGIS10.3/ESRI, disponível no laboratório do Centro Integrado de Pesquisa em Planejamento Geográfico (CIPGEO), do Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), da UFG. Os valores de erosividade foram classificados quanto à intensidade, conforme proposto por Carvalho (2008) e apresentado na Tabela 1.



Tabela 1. Classe da erosividade da chuva mensal e anual.

Classificação	Erosividade da Chuva (MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹)	
	Mensal	Anual (R)
Muito baixa	R < 250	R < 2452
Baixa	250 < R < 500	2452 < R < 4905
Média	500 < R < 750	4905 < R < 7357
Alta	750 < R < 1000	7357 < R < 9810
Muito alta	R > 1000	R > 9810

Fonte: Carvalho (2008), adaptado

Validação da interpolação e Análise Estatística Básica

Após a conclusão da interpolação dos três modelos de teste, o processo avançou para a fase de validação das interpolações, como forma de quantificar os erros da predição oriunda do processo de interpolação nos locais que foram amostrados. Tais erros quantificam a incerteza sobre hipóteses assumidas para a realização da interpolação e sobre o ajuste dos parâmetros de cada modelo adotado.

No processo de validação cruzada elimina-se temporariamente uma das n observações e utiliza-se as demais $n - 1$ observações durante o processo de ajuste do modelo, sendo este utilizado para prever a observação inicialmente retirada (WACKERNAGEL, 2003).

Esse processo deve ser realizado para cada uma das n observações que não entraram no processamento, obtendo-se, ao final, o erro absoluto para cada uma das observações, definindo assim, a diferença entre o valor predito e o observado para cada uma das observações (VIEIRA, 2000).

No processo de validação cruzada foi considerado como melhor interpolador aquele que apresentou média padronizada (MS – Mean Standardized) próxima de zero, o menor valor da raiz da média quadrada (RMS – Root – Mean – Square), média de desvio padrão (ASE – Average Standard Error) próxima da média padronizada e o valor da raiz média quadrática padronizada (RMSS – Root-Mean-Square Standardized) próximo de 1.

A estatística básica foi adotada para identificar a relação entre os 117 postos pluviométricos e a relação individual entre os índices pluviométricos e erosividade de cada um dos postos pluviométricos.

Em relação a estatística básica adotou-se as métricas: Média; Mediana; Desvio Padrão e Variação. Além desta adotou-se o coeficiente de variação, que corresponde uma medida relativa que mede a variação dos dados obtidos em relação à média. Pimentel, Gomes e Garcia (2002) estabeleceram que o Coeficiente de Variação (CV) pode ser classificado como:



- baixo, quando CV inferior a 10%;
- médio, quando CV variar entre 10 e 20%;
- alto, quando CV situar-se entre 20 e 30%; e
- muito alto, quando CV for maior que 30%

Valores baixos CV indica que os valores amostrais estão mais próximos em relação à média, logo, quanto menor o valor do CV, mais homogênea são as amostras. Deste modo, um coeficiente de variação baixo significa que a variabilidade dos dados é baixa em relação a sua média, por sua vez, um CV alto indica que a variabilidade dos dados é alta em relação à média e que mais heterogênea é a amostra.

Os parâmetros média e mediana são medidas de tendência central que fornecem informações sobre o valor central dos dados em um conjunto de observações. Uma distribuição dos dados é considerada simétrica, quando a média e a mediana são iguais ou muito próximas.

O Coeficiente de Curvatura (CC) é uma métrica estatística que indica o grau de curvatura de uma distribuição de dados. O valor positivo de CC indica uma distribuição com mais valores extremos do que a distribuição normal (distribuição mais pontuda) e um valor negativo indica uma distribuição com menos valores extremos em relação a distribuição normal (distribuição achatada). Um valor de CC igual a zero indica que a distribuição tem a mesma forma que a distribuição normal. Resumidamente a curtose é uma medida da forma da distribuição dos dados e pode ajudar a identificar valores extremos ou anomalias nos dados.

Discussão de resultados

Nesta seção, será apresentado de forma detalhada os resultados obtidos neste estudo, destacando a validação do interpolador adotado, análise da estatística básica e da interpolação da erosividade, as relações observadas e as implicações que essas podem na vida útil do reservatório da UHE Batalha.

Validação do interpolador

No processo de validação cruzada foi testado os interpoladores IDW, Krigagem Ordinária e Krigagem Simples. A primeira métrica a ser avaliada foi a raiz da média quadrada (RMS) e como apresentado na metodologia quanto menor o valor da métrica, melhor a precisão do método. O interpolador Krigagem Ordinária apresentou a melhor métrica RMS, com valor de 519,7824, seguido pelos métodos IDW com RMS de 544,6266 e Krigagem Simples com RMS igual a 555,689. Por se um interpolador determinístico, o método



IDW não gera as demais métricas (MS, RMSS e ASE) como apresentadas na Tabela 2. Desta forma, o interpolador IDW foi validado a partir da métrica RMS e gráfico de dispersão (Figura 4).

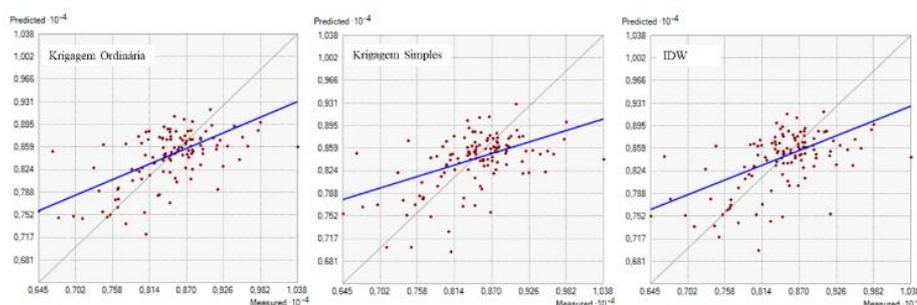
Os valores da MS foram próximo de zero para Krigagem Ordinária e Simples, com melhor resultado para Krigagem Ordinária. A média de desvio padrão (ASE) foram próximas da média padronizada (RMS). O valor de RMSS foi superior a 1 na Krigagem Simples, indicando que existe uma superestimação dos valores interpolados e na Krigagem Ordinária o valor de RMSS foi inferior a 1, indicando há existência de subestimação dos dados.

Tabela 2: Validação cruzada para interpolação pelos métodos IDW, Krigagem Ordinária e Krigagem Simples.

Métricas / Interpoladores	IDW	Krigagem Ordinária	Krigagem Simples
RMS (Root – Mean – Square)	544,6266	519,7824	555,6890
MS (Mean Standardized)	-	-0,0008	-0,0450
RMSS (Root-Mean-Square Standardized)	-	0,8738	1,3279
ASE (Average Standard Error)	-	605,5584	573,8417

Os gráficos de dispersão apresentado na Figura 4 permite identificar visualmente a correlação entre os valores preditos e estimados. O modelo ideal deve se aproximar ao máximo da linha cinza, ou seja, ter um coeficiente de Interseção próximo a zero e um coeficiente de regressão próximo de um. Dentre os modelos apresentados na Figura 4 o interpolador krigagem ordinária se aproximou mais do modelo ideal, seguindo pelo modelo IDW.

Figura 4: Comparação dos valores previstos e medidos do fator R para os três modelos: krigagem Ordinária, Krigagem Simples e IDW. A linha cinzenta é o resultado de um modelo ótimo ((Interceção = 0 e coeficiente de regressão = 1) e a linha azul é o resultado da regressão de cada modelo.





Após a análise dos resultados da validação cruzada, adotou-se a krigagem Ordinária como método de interpolação, seguindo os resultados apresentados por: Perin *et al.* (2015); Trindade *et al.* (2016); Souza *et al.* (2011).

Análise da Estatística Básica

Com o propósito de compreender a relação entre os 117 postos pluviométricos a Tabela 3 apresenta os resultados da análise estatística descritiva para os valores de erosividade mensais e anuais para os valores médios entre 1991 e 2021. É importante destacar que os autores deste estudo apresentaram a estatística básica da erosividade mensal/anual para a AID de UHE Batalha utilizando a equação da erosividade proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) para a região de Campinas-SP no trabalho intitulado “Estimativa e espacialização da erosividade na AID do reservatório da UHE Batalha (GO/MG) com base em dados pluviométricos” apresentado no “XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada”, encontrando métricas da estatística básica distinta das apresentadas neste trabalho.

Considerando divisão territorial proposta por Silva (2004) apresentada na Figura 3 e a equação proposta por Silva *et al.* (1997) e apresentada por Oliveira, Wendland e Nearing (2012) (Tabela 1) para o cálculo da Erosividade, foram encontradas as métricas apresentadas na Tabela 3.

O coeficiente de variação (CV) na análise da erosividade auxilia na avaliação da homogeneidade ou heterogeneidade dos dados. Um CV baixo indica que os valores estão próximos da média, por sua vez um CV alto indica que os valores estão mais dispersos em relação à média, podem assim, ser usado para avaliar a consistência dos dados e a confiabilidade da relação entre os postos pluviométricos adotado na interpolação dos dados.

Os meses de janeiro e abril apresentaram CV alto, indicando que a distribuição dos valores de erosividade nos 117 postos pluviométricos é mais heterogênea em relação à média. Os meses fevereiro, março, outubro, novembro, dezembro apresentaram média homogeneidade em relação a sua média, com CV variando entre 10 e 20 %. Já os meses maio, junho, julho, agosto e setembro se mostram homogêneos em relação à média, apresentando CV inferior a 10%. A variação anual apresentou CV de 7,62%, indicando que a distribuição dos valores de erosividade anual é relativamente homogênea em relação à sua média anual.



Tabela 3: Estatística descritiva da erosividade no estudo da relação entre os 117 postos pluviométricos

Mês	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Variação	Coeficiente	
			Máximo	Mínimo			Curtose	Assimetria
Janeiro	1505,11	1537,33	2358,78	779,91	384,25	25,53%	-0,79	0,02
Fevereiro	1044,48	1043,33	1485,29	653,55	160,94	15,41%	-0,05	0,06
Março	1075,08	1063,37	1478,3	667,19	144,63	13,45%	0,58	0,4
Abril	401,53	376,98	681,31	266,79	85,61	21,32%	0,31	0,96
Maio	236,29	233,87	265,84	219,44	10,15	4,30%	0,14	0,89
Junho	218,46	217,72	225,54	215,57	2,6	1,19%	0,17	0,99
Julho	216,2	215,93	221,09	215,33	1,03	0,47%	4,84	1,98
Agosto	218,24	217,89	225,18	215,82	1,75	0,80%	1,18	0,98
Setembro	250,88	248,17	295,23	218,87	16,53	6,59%	0,43	0,74
Outubro	463,26	457,21	631,35	337,73	64,31	13,88%	0,04	0,44
Novembro	1182,74	1174,3	1613,9	714,58	193,2	16,33%	-0,55	-0,04
Dezembro	1616,9	1606,67	2323,2	999,29	262,29	16,22%	-0,22	0,27
Anual	8422,84	8456,49	10377,51	6454,79	641,96	7,62%	1,23	-0,36

Obs.: Todos os dados apresentaram distribuição indefinida.

Elaborada por: autores (2022)

Observa-se que os valores de CV reduzem à medida que se aproxima das estações mais secas do ano (outono e inverno), com valor mais baixo no mês de julho contrário aos resultados apresentado ao utilizar a equação proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992). Esta divergência pode ser justificada pelas características geográficas e climáticas de cada região, indicando a importância de um modelo matemático que melhor represente as condições da área em estudo.

A partir dos dados apresentados na Tabela 3, pode-se observar que o mês de janeiro apresenta a maior amplitude dos dados em comparação com os outros meses, com valor máximo de 2358,78 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹ e o valor mínimo de 779,91 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹. Além disso, o resultado da curtose para janeiro é negativo (-0,79), o que indica que a distribuição dos dados é mais "achatada" do que a distribuição normal. Portanto, pode-se concluir que janeiro apresenta valores mais extremos em relação aos outros meses em termos de valor máximo e mínimo.

Os meses com maiores índices pluviométrico equivalem as estações do ano primavera e verão, com exceção do mês de outubro, apresentaram curtose (CC) negativa, indicando assim que a distribuição é mais achatada que a distribuição normal, em outras palavras, a distribuição dos dados é mais uniforme e menos variável.



Quando a simetria (CA) é igual a zero isso indica que a distribuição dos dados é simétrica em relação à média. Ou seja, os valores estão igualmente distribuídos em ambos os lados da média, o que significa que a distribuição é equilibrada. Quando a simetria é negativa, como ocorre no mês de novembro e na métrica referente aos dados anuais, a distribuição é assimétrica para a esquerda, indicando a existência de mais valores acima da média do que abaixo dela. Os outros meses apresentaram simetria positiva, indicando que a distribuição é assimétrica para a direita, o que significa dizer que há mais valores abaixo da média do que acima dela.

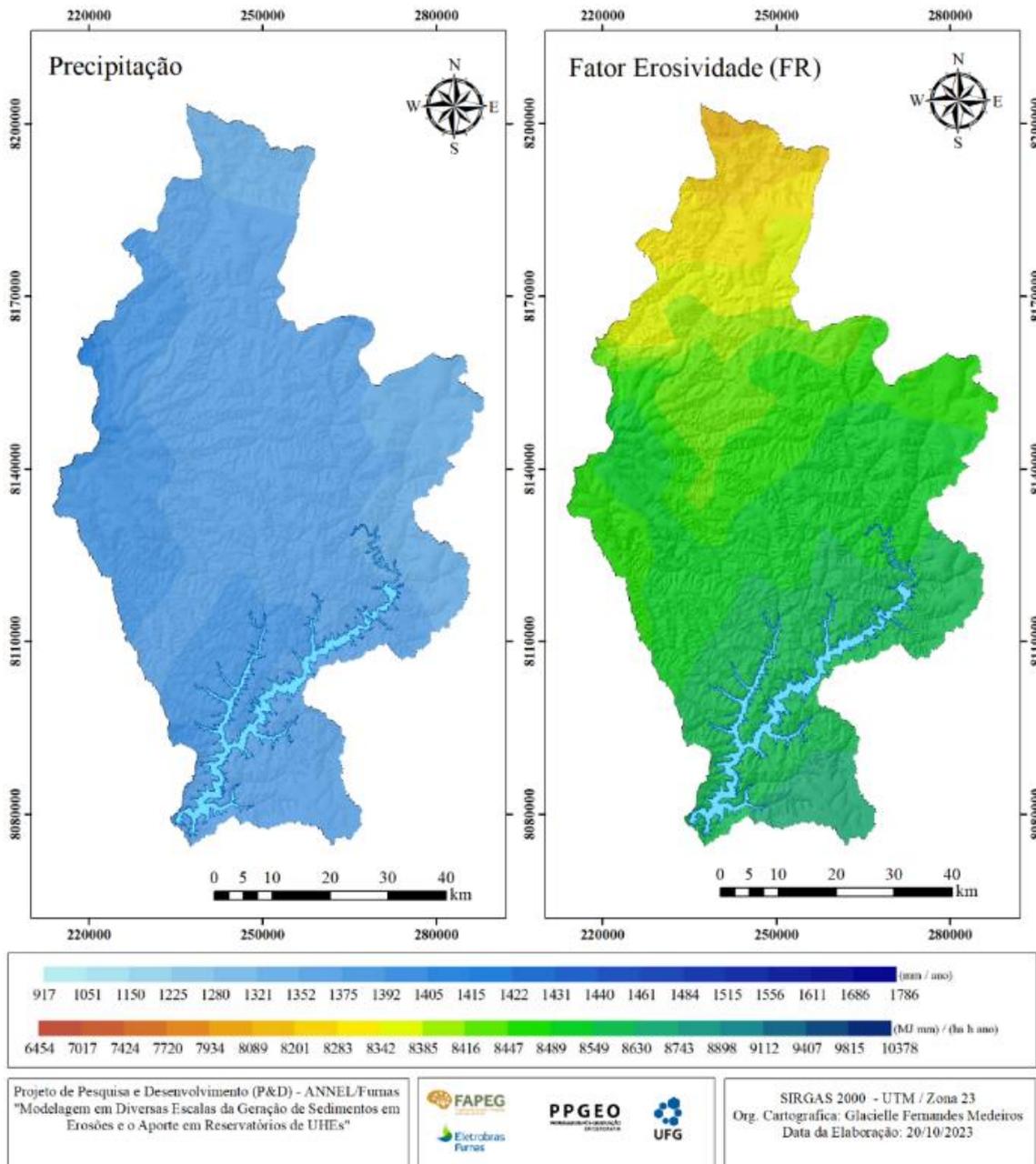
Analisando os parâmetros média, mediana e assimetria, foi possível concluir que os meses de janeiro, fevereiro e novembro apresentaram as menores distorções entre os 117 postos pluviométricos.

Análise da Erosividade

A interpolação krigagem ordinária foi aplicada com objetivo de estimar a erosividade e precipitação média anual e mensal, para locais com ausência de dados oriundos de postos pluviométricos. Ao analisar o mapa de erosividade anual da AID da UHE Batalha apresentado na Figura 5, nota-se que os menores valores de erosividade estão ao norte da AID da UHE Batalha e os maiores valores ao sul e sudoeste da área de estudo. Além disso, é possível notar que a erosividade tende a aumentar de norte a sul.

Concluída a análise da estática básica dos 117 postos pluviométrico, foi realizado o recorte espacial para a AID da UHE Batalha, no qual foi identificado predomínio de erosividade entre 7420 e 8901 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e pluviosidade 1321 e 1429 mm/ano. Segundo classificação de Carvalho (2008), toda a Área de Influência Direta (AID) da UHE de Batalha foi classificada como tendo “Alta Erosividade”. O resultado encontrado condiz com o apresentado por Oliveira, Wendland e Nearing (2012) onde a erosividade anual das chuvas na região Centro-Oeste e Sudeste do Brasil varia de 6.000 a 14.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹.

Figura 5. Mapa da distribuição do fator de Erosividade (R) espacializado para a AID do reservatório da UHE Batalha.



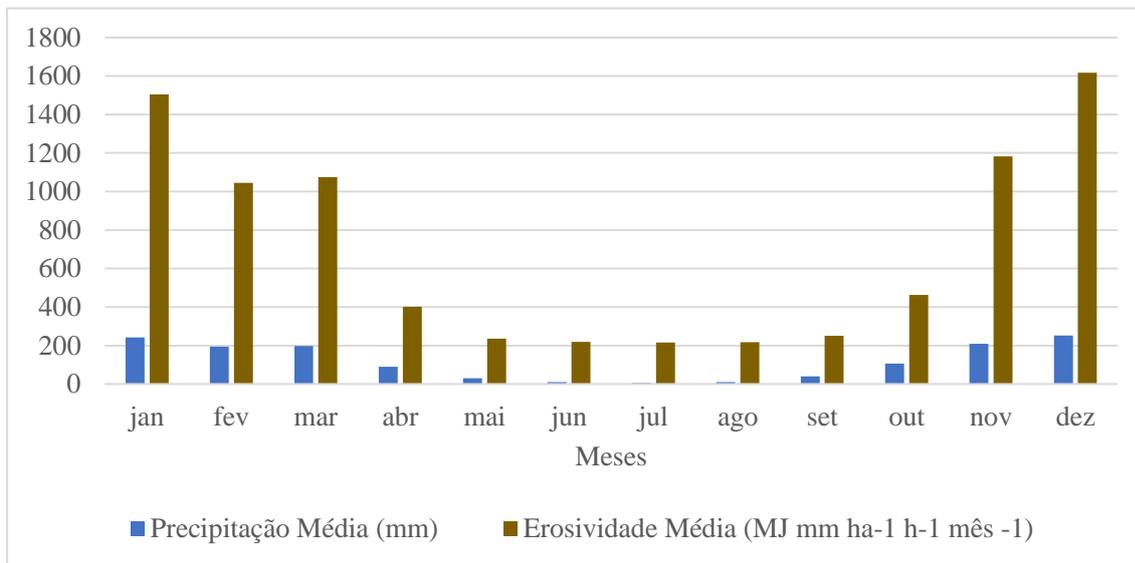
Elaborado por: autores (2023)

Para atingir os objetivos propostos neste estudo, além da erosividade anual, também foi estudada a erosividade média mensal ao longo da série histórica. Florentim *et al.* (2021) analisou a erosividade mensal e concluíram que os meses de maior erosividade estão relacionados com os períodos chuvosos da região, o



que é confirmado neste estudo, como evidenciado no gráfico apresentado na Figura 6. Os meses com maior volume pluviométrico demonstraram maiores índices de erosividade.

Figura 6: Normais Climatológicas (1991 – 2021) e erosividade referente aos 117 postos pluviométricos.



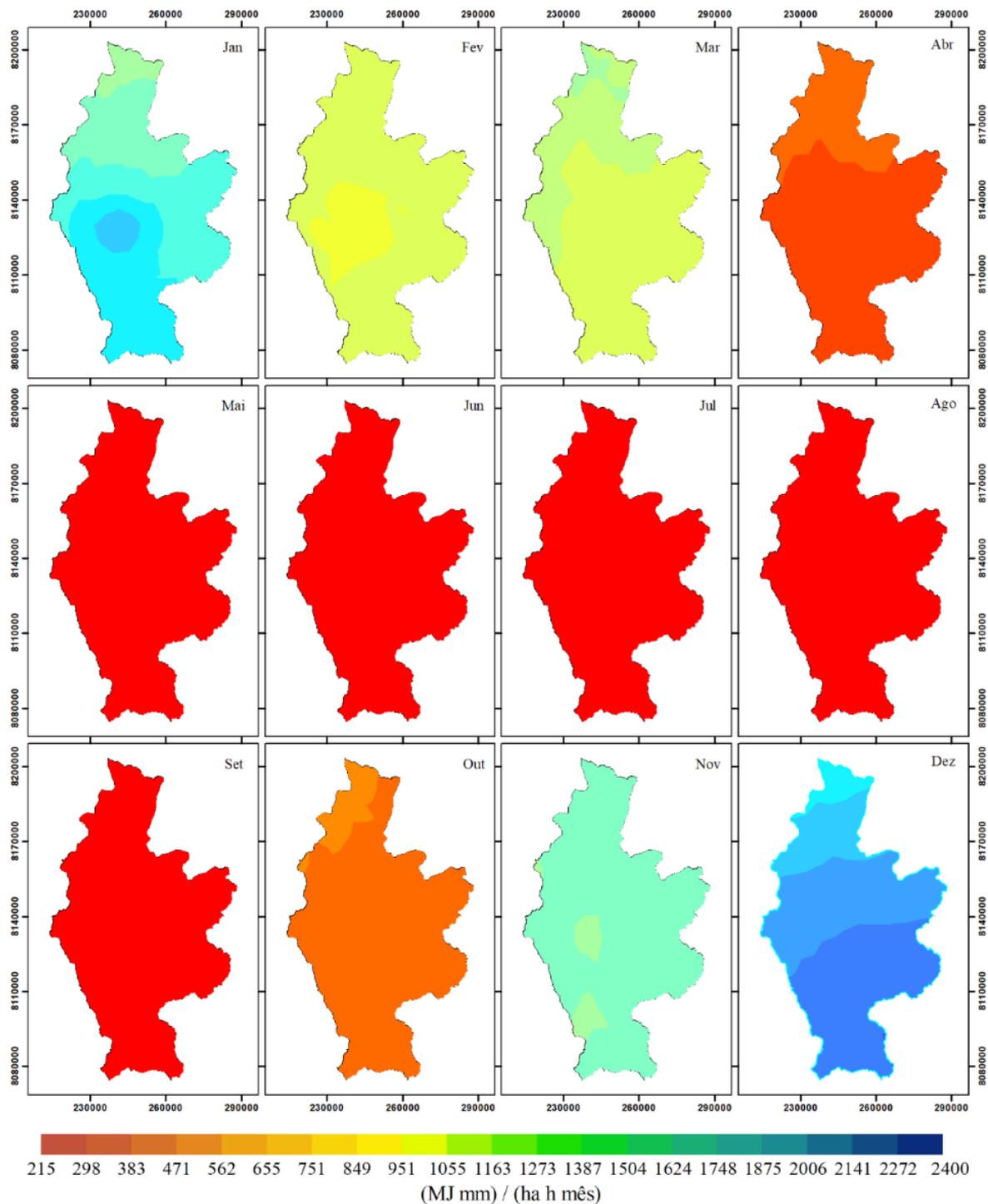
Fonte: ANA (2022)

A partir dos índices erosividade mensal apresentado na Figura 5 e com base na metodologia apresentada por Carvalho (2008) para classificação do Índice de Erosividade mensal aplicado para os valores das medianas para a AID da UHE Batalha, foi possível classificar os meses segundo o Fator de Erosividade. Os meses de janeiro, novembro e dezembro foram classificados como apresentando um Índice de Erosividade “muito alta” e os meses fevereiro e março como alta. Já os meses de abril e outubro tiveram seus índices de erosividade classificados como “baixa” e os meses de maio, junho, julho, agosto e setembro, como “muito baixa”.

Analisando a Figura 7 E Figura 8, foi possível confirmar que os meses com maior pluviosidade apresentaram maiores índices de erosividade. O mês de janeiro apresentou variações pluviométricas de aproximadamente 207 a 260 mm e Índice de Erosividade médio, variando de aproximadamente 1208 a 1739 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹. O mês de fevereiro teve variações pluviométrica de aproximadamente 178 a 197 mm e Índice de Erosividade entre 934 e 1021 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹. O mês de março teve variações pluviométricas entre 183 e 210 mm e erosividade variando de aproximadamente 937 a 1169 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹.



Figura 7: Mapa da distribuição do Índice de Erosividade médio da AID do reservatório da UHE Batalha.



Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) - ANEL/Furnas
"Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em
Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs"



0 12.5 25 50 75 100 km

PPGEO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOGRAFIA

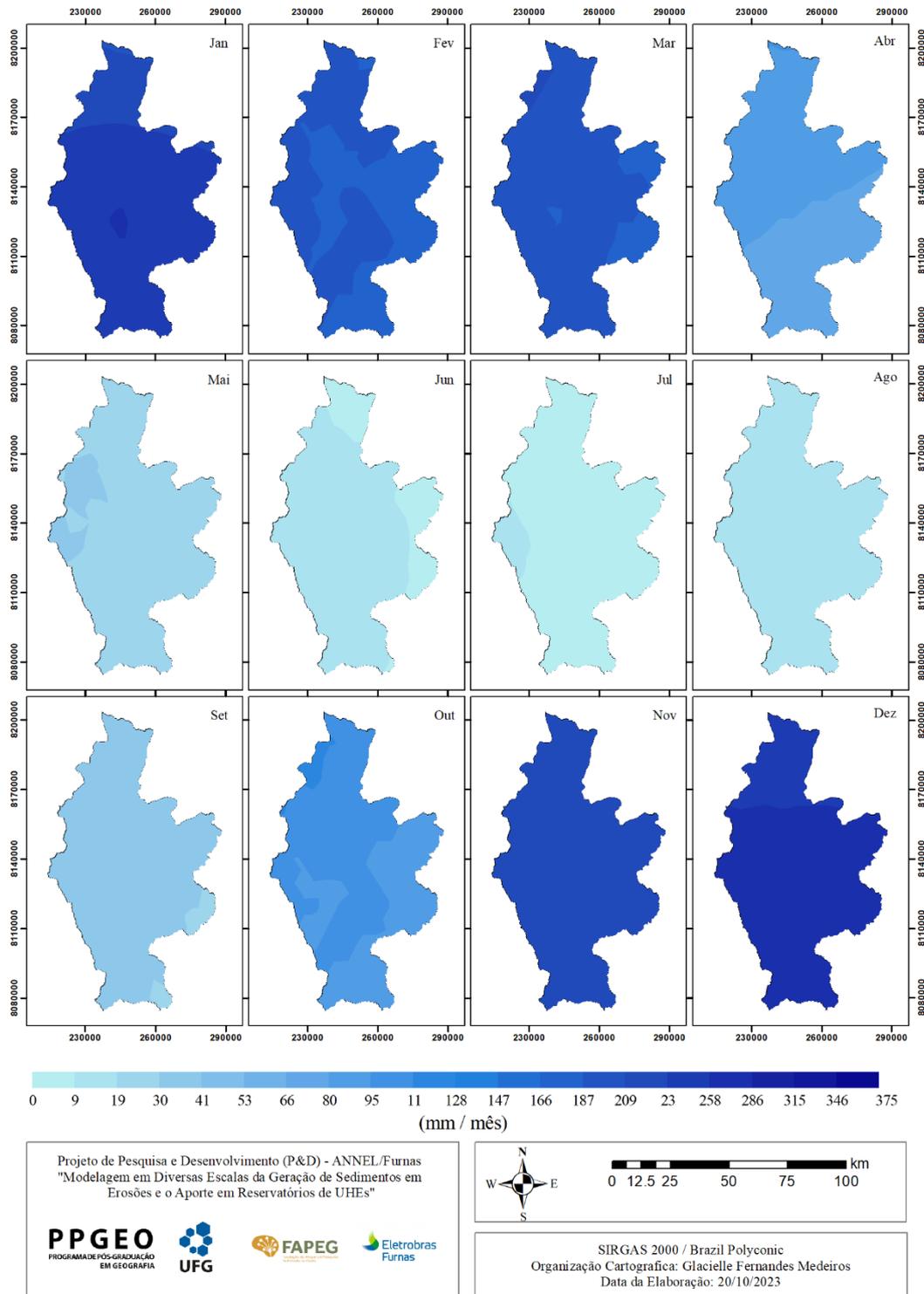


SIRGAS 2000 / Brazil Polyconic
Organização Cartográfica: Glacielle Fernandes Medeiros
Data da Elaboração: 20/10/2023



Elaborado por: autores (2022)

Figura 8: Mapa da distribuição pluviométrica média da AID do reservatório da UHE Batalha.



Elaborado por: autores (2022)



No mês de abril os valores EI começaram a reduzir em virtude da redução das chuvas, com o índice pluviométrico variando entre 71 e 98 mm e o Índice de Erosividade entre 330 a 445 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹. No mês de maio os índices de erosividade ficaram entre 37 e 52 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹ e os índices pluviométricos entre 24 a 30 mm, aproximadamente.

O mês de junho apresentou pluviosidade variando de 5 a 14 mm e erosividade entre 217 e 222 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹. O mês de julho teve os menores índices pluviométricos (3 a 10 mm) e conseqüentemente os menores índices de erosividade (215 a 219 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹). No mês de agosto a pluviosidade variou entre 9 e 15 mm e o fator de erosividade entre 217 a 221 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹.

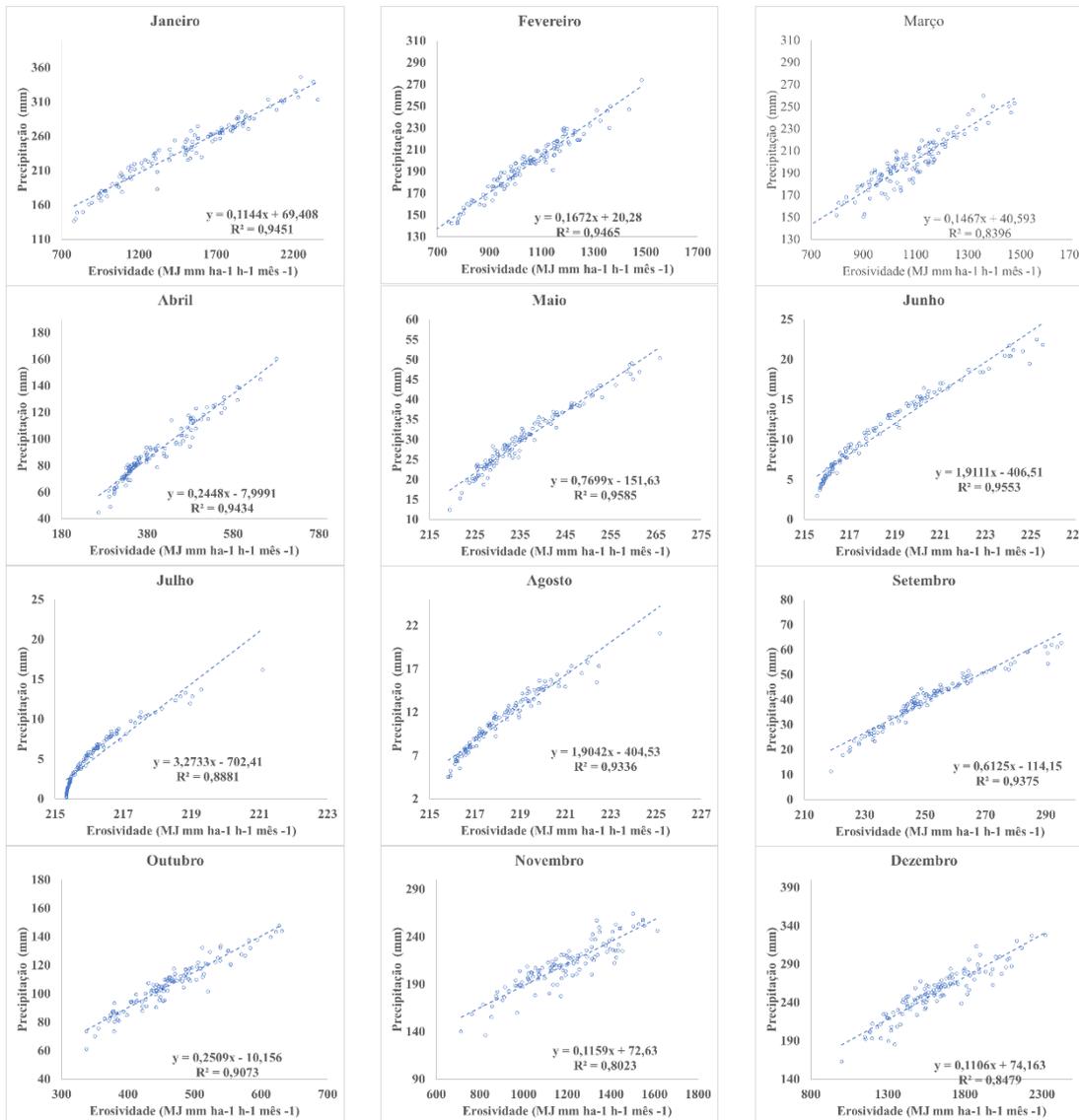
Setembro apresentou pluviosidade variando entre 28 a 40 mm e EI variando de 233 a 253 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹. Em outubro o índice de erosividade volta a aumentar em virtude da retomada do período chuvoso na área de estudo. A pluviosidade em outubro variou de 90 a 115 mm e a erosividade variou de 399 a 551 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹. Os meses de novembro e dezembro, assim com janeiro e fevereiro registraram altos volumes pluviométricos e conseqüentemente elevada erosividade. Novembro registrou pluviosidade de 215 a 225 mm e erosividade entre 1195 a 1349 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹ e dezembro registrou pluviosidade entre de 245 a 289 mm e erosividade de 1524 e 2015 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹.

Ao analisar a variabilidade espacial do Índice de Erosividade mensal, nota-se tendência de aumento da erosividade na direção norte-sul (Figura 7), conforme identificado no estudo da distribuição do Índice de Erosividade anual (Figura 8). Panos *et. al* (2017) ao especializar o Fator R para todo o globo concluíram que provavelmente as maiores incertezas presentes no mapa de erosividade tem relação com a transição entre diferentes zonas climáticas. Os autores concluíram ainda que as diferentes condições climáticas, que resultam na alta variabilidade na quantidade, duração, intensidade e magnitude das chuvas, são responsáveis pelos diferentes padrões espaciais de erosividade entre zonas climáticas.

A área em estudo localiza-se em sua totalidade na zona Tropical Brasil Central. Isso explica a baixa diversidade espacial nos índices de erosão quando analisados mês a mês, já que as mudanças climáticas não apresentam grandes oscilações ao longo do mês. O mesmo não pode ser afirmado em estudos de variação destinados a análise de eventos extremos anuais, uma vez que cada ano é analisado individualmente.



Figura 9: Gráfico de dispersão entre Erosividade e Precipitação nos meses de janeiro a dezembro



Além da análise visual apresentada nos produtos cartográficos de distribuição pluviométrica e erosividade, foi possível identificar a relação entre estes atributos a partir do gráfico de dispersão apresentado na Figura 9, no qual todos os meses apresentaram R^2 superior a 0,80 indicando existe uma correlação moderada entre essas variáveis. A métrica R^2 indica que quanto mais próximo de 1 for o valor seu valor, maior será a correlação entre a erosividade e a precipitação. Os meses de janeiro, fevereiro, abril, maio, junho, agosto e setembro apresentaram correlação forte entre as duas variáveis com R^2 maior que 0,90.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados analisados, constatou-se que os meses com maior índice pluviométrico (primavera e verão) exceto o mês de outubro, apresentaram valores que classificaram o Índice de Erosividade como alta e muito alto. No caso dos meses mais secos (outono e inverno), esse índice foi classificado como muito baixo e baixo. Porém, no geral, a erosividade média anual classificou-se como alta.

Os padrões de chuva influenciam diretamente os processos hidrológicos e erosivos, sendo tais padrões essenciais para a definição de práticas de conservação do solo e da água. Desta forma, o estudo do índice de erosividade torna-se fundamental, uma vez que os padrões de chuva podem ser identificados nessa análise.

Destaca-se, entretanto, que somente a espacialização dos índices de erosividade não determinam a ocorrência e a magnitude de processos erosivos e que é necessária uma análise integrada que leve em conta diversos outros fatores que também condicionam o processo erosivo hídrico, servindo, tal análise, de apoio, dentre outros, para os projetos de planejamento ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à Furnas Centrais Elétricas S.A. e à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), pela coordenação técnica e financiamento, no âmbito do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), intitulado “Modelagem em Diversas Escalas da Geração de Sedimentos em Erosões e o Aporte em Reservatórios de UHEs”, P&D ANEEL Sedimentos, código ANEEL PD.0394-1705/2017.

Os autores também agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pela concessão de bolsa de pesquisa e de produtividade.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) / Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. Hidroweb. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 04 agosto 2022.
- ARCAYA, Salomé Guadalupe Chacón. *Avaliação dos Fatores Condicionantes dos Processos Erosivos no Distrito Federal*. 2007. 189F. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.
- BERTONI, J.; LOMBARDI, F. N. (2017). *Conservação do Solo*. Ícone, 10ª ed. São Paulo, SP, 335p.
- BRUBACHER, João Paulo; OLIVEIRA, Guilherme Garcia; GAUSSAELLI, Laurindo Antonio. *Preenchimento de Falhas em Séries Temporais de Precipitação Diária no Rio Grande do Sul*. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 35, n. 2, 335 344, 2020.
- CARVALHO, N.O; FILIZOLA JÚNIOR, N.P; SANTOS, P.M.C; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL. 2000. 140p.



- CARVALHO, Newton de Oliveira. *Hidrossedimentologia prática*. 2. ed., Rio de Janeiro, p.602, 2008, Interciência.
- CREMON, Édipo H.; BETTIOL, G. M.; JUNIOR, J. P. M.; MACEDO, F. C.; RABELO, M. W. de O. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 74, n. 3, p. 536–546, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n3-60846. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/60846>. Acesso em: 18 abr. 2023.
- EMBRAPA (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. – 5. ed. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.
- FARIAS, Orlindo Gomes de; FRANCISCO, Cristiane Nunes; SENNA, Monica Carneiro Alves. Avaliação De Métodos De Interpolação Espacial Aplicados À Pluviosidade Em Região Montanhosa No Litoral Sul Do Estado Rio De Janeiro. *Revista Brasileira de Climatologia*. Ano 13 – Vol. 21 – JUL/DEZ 2017.
- FLORENTIM, Elyson Thiago de Souza; CORREA, Helen Caroline Rodrigues; MONTEIRO, Felipe das Neves; FALCÃO, Karina dos Santos; PANACHUKI, Panachuki. *Espacialização da erosividade mensal e anual da chuva na bacia hidrográfica do Córrego Fundo, Aquidauana-MS. Ícone*. Research, Society and Development, v. 10, n.1, p.1-10, 2021.
- FURNAS. *Sistema Furnas: números do sistema*. Disponível em: <<https://www.furnas.com.br/sistemafurnas/?culture=pt>>. Acessado em: 04/12/2020.
- LOMBARDI NETO, Francisco.; MOLDENHAUER, William Calvin. Erosividade da chuva – sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). *Bragantia*, Campinas, n. 51 (2) , p. 189-196, 1992
- MARQUES, João J.G.S.M.; ALVARENGA, Ramon C.; CURTI, Nilton. Erosividade das chuvas da região de Sete Lagoas, MG. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.33, p.761-768, 1997.
- NETO, Manuella Vieira Barbosa; ARAÚJO, Maria Do Socorro Bezerra; ARAÚJO FILHO, José Coelho de. Carta de declividade como ferramenta de análise para aptidão agrícola e conservação dos solos: o caso da bacia do rio natuba, pernambuco. In: VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia – VIII SINAGEO, 2010, Recife. *Anais do VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 2010. p. 01-15
- NOVAIS, G. T.; FARIAS, S. E. M. (2021). Caracterização Climática do Cerrado. NASCIMENTO, D. T. F.; PERINI, A.; LUIZ, G.C.; LOPES, R. M. (Orgs.), *Climatologia do Cerrado: variabilidades, suscetibilidades e mudanças climáticas no contexto do Cerrado Brasileiro*. Goiânia:C&A Alfa Comunicação, 11-50p.
- OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. *Catena*, v. 100, p. 139-147, 2012
- PANOS, Panagos; PASQUALE,, Borrelli; KATRIN, Meusburger; BOFU, Yu; ANDREAS, Klik; LIM, Kyoung, Jae; JAE, E.Yang; JINREN, Ni; CHIYUAN, Miao; NABANSU, Chattopadhyay; SADEGHI, Seyed, Hamidreza; ZEINAB, Hazbavi; MOHSEN, Zabihi; LARIONOV, Gennady, A.; KRASNOV, Sergey, F.; GOROBETS, Andrey, V.; YOAV, Levi; GUNAY, Erpul; CHRISTIAN, Birkel; NATALIA, Hoyos; VICTORIA, Naipal; OLIVEIRA, S., Paulo, Tarso; BONILLA, Carlos, A.; MOHAMED, Meddi; WERNER, Nel.; SHTI, Hassan, Al; MARTINO, Boni; NAZZARENO, Diodato; OOST, Kristof, Van; MARK, Nearing; CRISTIANO Ballabio. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, p. 1-12, 2017.
- PERIN, E. B.; VIANNA, L. F. N.; RICCE, W. S.; PANDOLFO, C. Interpolação das variáveis climáticas temperatura do ar e precipitação: revisão dos métodos mais eficientes. *GEOGRAFIA*, Rio Claro, v. 40, n. 2, p. 269-289, 2015.
- PIMENTEL GOMES, Frederico; GARCIA, Carlos Henrique. *Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos*. Piracicaba: Fealq, 2002. 309 p.
- Projeto MapBiomass –Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil, acessado em [06/11/2023] através do link: [<https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>].
- RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K.J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 3. ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1995. 65p.
- SANTO, E. P., DIAS, R. L. S. Rotina para estimativa de falhas hidrológicas pelo método de regressão linear. **RPurbs by RStudio**, 2019. Disponível em: < <https://rpubs.com/erlip/505809>>. Acesso em: 10, abril de 2021.
- SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. *Catena*, v. 57, n. 3, p. 251–259, 2004.



- SILVA, M. A. D.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; SANTOS, G. R. D.; MARQUES, J. J. G. D. S.; MENEZES, M. D. D.; LEITE, F. P. Evaluation and spatialization of rainfall erosivity in the Rio Doce Valley, central-eastern region of Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 4, p. 1029-1039, 2010
- Silva, M.L.N., Freitas, P.L., Blancaneaux, P., Curti, N., 1997. Rainfall erosivity indices in the Goiânia region, Goiás state, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 32, 977–985.
- Silva, R.B., Iori, P., Armesto, C., Bendini, H.N., 2010b. Assessing rainfall erosivity with artificial neural networks for the Ribeira Valley, Brazil. *International Journal of Agronomy*. <http://dx.doi.org/10.1155/2010/365249> 7 pp.
- SILVA, S. de A.; LIMA, J. S. de S.; SOUZA, G. S. de; OLIVEIRA, R. B. de. Evaluation of statistic and deterministic interpolators in the estimate of attributes of the soil in agriculture of precision. *Idesia*, v. 26, n. 2, p. 75-81, 2008.
- SOUZA, J. L. L.; GOMES, T. S.; DIAS, R. S.; OLIVEIRA, G. M. A.; SANTOS, R. L. Avaliação de Métodos de Interpolação Aplicados à Espacialização das Chuvas no Território Identidade Portal do Sertão / Bahia. In: *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 2011, INPE*, p. 4295
- SOUZA, N. M.; ROMÃO, P. A. Cartografia geotécnica e a preservação ambiental das bordas dos reservatórios. In: SALES, M.M. et al. (Org.). **Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG. 2017. pp.:277-285.
- SZABÓ, József. Anthropogenic Geomorphology: subject and system. In: SZABÓ, József; DÁVID, Lóránt; LÓCZY Dénes (eds). **Anthropogenic Geomorphology - A guide to man-made landforms**. 1 ed. New York: Springer, 2010. p. 3 – 11.
- TEIXEIRA, David Bruno de Sousa. *Erosividade da Chuva no Estado de São Paulo com Base em Séries Sintéticas de Dados Pluviográficos*. 2019. 118F. Universidade Federal de Viçosa. Programa de PósGraduação em Meteorologia Aplicada, 2019.
- Trindade, A. L. F.; Oliveira, P. T. S.; Anache, J. A. A.; Wendland, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 51, n. 12, p. 1918-1928, dez. 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016001200002.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, v.1, p.1-54, 2000.
- WAGNER, C S e MASSAMBANI, Oswaldo. Análise da relação intensidade de chuva - energia cinética de wischmeier e smith e sua aplicabilidade a região de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 12, n. 3 , p. 197-203, 1988. Acesso em: 04 junho. 2022.
- WISCHMEIER, Walter H.; Smith, Dwight D. 1978 *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington, United States Department of Agriculture, pp 67. *Agriculture Handbook*, 537.
- ZEILHOFER, Peter; LIMA, Eliana B. R.; SANTOS, Felipe M.; RIGO JÚNIOR, Luís O. Um ambiente SIG para modelagem integrada da qualidade da água utilizando Qual2e. *Caminhos de Geografia*, v.8, n.10, p.107-125, 2003.