



Erosividade da Chuva do Brasil



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura e Pecuária***

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
286**

Erosividade da Chuva do Brasil

*Evaldo de Paiva Lima
Joaquim Pedro de Santana Xavier
Alexandre Hugo Cezar Barros
Beatriz Barbosa da Silva*

***Embrapa Solos
Rio de Janeiro, RJ
2023***

Embrapa Solos

Unidade de Execução de Pesquisa e
Desenvolvimento de Recife

Rua Antônio Falcão, nº 402
Boa Viagem, Recife, PE
CEP: 51020-240
Fone: +55 (81) 3198-7800

www.embrapa.br

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pelo conteúdo e edição
Embrapa Solos UEP Recife

1ª edição

Publicação digital (2023): PDF

Comitê Local de Publicações

Presidente
Silvio Barge Bhering

Secretário-Executivo
Marcos Antônio Nakayama

Membros
*Bernadete da Conceição Carvalho Gomes Pedreira,
David Vilas Boas de Campos, Evaldo de Paiva Lima,
José Francisco Lumbreras, Joyce Maria Guimarães
Monteiro, Lucia Raquel Queiroz Pereira da Luz,
Maurício Rizzato Coelho, Wenceslau Gerales
Teixeira*

Supervisão editorial
Marcos Antônio Nakayama

Normalização bibliográfica
Enyomara Lourenço Silva (CRB –4/1569)

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
*Beatriz Regina de Figueiredo e Wilber Antônio Santos
da Silva*

Capa
*Beatriz Regina de Figueiredo e Maria Sonia Lopes
da Silva*

Foto da capa
Luiz Henrique Magnante

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Solos

Erosividade da chuva do Brasil / Evaldo de Paiva Lima ... [et al.]. – Rio de Janeiro :
Embrapa Solos, 2023.

PDF (37p.). : il. color. – (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa
Solos, ISSN 1678-0892 ; 286).

1. Erosão. 2. Conservação do solo. 3. Índice de erosividade. 4. Zoneamento
agrícola. 5. Risco climático. 6. Água. I. Lima, Evaldo de Paiva. II. Xavier, Joaquim
Pedro de Santana. III. Barros, Alexandre Hugo Cezar. IV. Silva, Beatriz Barbosa da.
V. Embrapa Solos. VI. Série.

CDD 631.45

Sumário

Resumo5

Abstract6

Introdução.....7

Material e métodos13

Resultados e discussões.....23

Considerações finais31

Agradecimentos.....31

Referências32

Erosividade da Chuva do Brasil

Evaldo de Paiva Lima¹

Joaquim Pedro de Santana Xavier²

Alexandre Hugo Cezar Barros³

Beatriz Barbosa da Silva⁴

Resumo – O estudo e conhecimento da erosividade da chuva é crucial para o planejamento e o manejo adequado do solo. Neste estudo foram empregadas 68 equações para calcular o índice de erosividade da chuva - EI_{30} , utilizando dados de precipitação mensal e anual. No total, foram utilizadas 3.659 estações pluviométricas distribuídas em todo território brasileiro, sendo 3.294 da rede de Zoneamento Agrícola do Risco Climático (Zarc) e 365 do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). A distribuição espacial das equações foi realizada por meio de polígonos de Thiessen, delimitando as áreas de influência de cada equação. A técnica geoestatística de krigagem ordinária foi utilizada para interpolar os valores estimados de erosividade, tanto mensais quanto anual. Os resultados mostraram que a maior parte do país apresenta índice de erosividade da chuva classificada como forte ou muito forte, sendo o período crítico entre os meses de novembro e abril. Esses índices de erosividade ocorrem nas áreas de maior concentração das atividades agropecuárias do país. A erosão hídrica causa perda de solo, nutrientes, água, matéria orgânica e insumos, reduzindo a produtividade das culturas. Nesse sentido, essas informações são fundamentais para o direcionamento de medidas para conservação do solo, visando minimizar os efeitos negativos da erosão hídrica na agricultura.

Termos para indexação: Erosão hídrica; estações pluviométricas; zoneamento agrícola de risco climático; krigagem ordinária.

¹ Meteorologista, doutor em Meteorologia Agrícola, pesquisador da Embrapa Solos UEP Recife, PE

² Geógrafo, mestre em Geografia, bolsista da Embrapa Solos UEP Recife, PE

³ Engenheiro-agrônomo, doutor em Física do Ambiente Agrícola, pesquisador da Embrapa Solos UEP Recife, PE

⁴ Geógrafa, mestranda em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE

Rainfall erosivity in Brazil

Abstract – Understanding rainfall erosivity is crucial for proper soil planning and management, as water erosion can have impacts on agricultural productivity. In this study, 68 equations were used to calculate the EI_{30} erosivity index, using monthly and annual precipitation data. A total of 3,659 rainfall stations distributed throughout Brazil were used, 3,294 from the Agricultural Climatic Risk Zoning network (Zarc) and 365 from the Mineral Resources Research Company (SGB/CPRM). The spatial distribution of the equations was performed using Thiessen polygons, delimiting the areas of influence of each equation. The geostatistical technique of ordinary kriging was used to interpolate the estimated monthly and annual erosivity values. The results estimated that most of Brazil has a rainfall erosivity index classified as strong or very strong, with the critical period being between November and April. This erosivity index occurs in the areas with the country's highest concentration of agricultural activities. Erosion causes loss of soil, nutrients, water, organic matter and inputs, reducing crop productivity. In this sense, this information is fundamental for directing soil conservation measures, aiming to minimize the negative effects of water erosion in agriculture.

Index terms: Water erosion; rain gauge stations; agricultural zoning for climate risk; ordinary kriging.

Introdução

Erosão hídrica é o fenômeno resultante da sobreposição da força de cisalhamento da chuva as forças de resistência do solo (Guerra, 1997; Lal, 2001). É caracterizada pela desagregação do solo, formação dos sedimentos e seu posterior transporte e deposição por meio do arraste decorrente da precipitação (Benavidez et al., 2018; Oliveira et al., 2018; Guerra, 1997; Lal, 2001; Lopes; Brito, 1993; Oliveira; Wendland; Nearing, 2012; Riquetti et al., 2020; Trindade et al., 2016). Conforme Guerra (1997; 2007), os processos erosivos de origem hídrica podem ser subdivididos em fases: (i) salpicamento (*splash erosion*); (ii) erosão laminar (*sheet/inter-rill erosion*) e; (iii) erosão linear (*rill erosion*). Na primeira fase do processo, o impacto das gotas de chuva provoca o rompimento de partículas que compõem o solo que são, posteriormente, transportadas pelo escoamento superficial (*runoff*). Na segunda fase, a água escoia sem definir leitos, fazendo uma remoção gradual e uniforme do solo em determinada área, essa erosão pode evoluir para a terceira fase quando o escoamento começa a causar incisões no solo (Benavidez et al., 2018; Bertoni; Lombardi-Neto, 1990; Guerra, 2007).

A força de cisalhamento da chuva, ou erosividade, é definida pela capacidade potencial de uma chuva causar erosão em função da energia cinética no impacto da gota de chuva ao solo e seu escoamento associado (Back; Poletto, 2018; Barbosa; Blanco; Melo, 2015; Paganos; Borrelli; Meusbürger, 2015; Teixeira et al., 2022). Dentre as características de uma chuva que podem aumentar ou diminuir a sua erosividade estão a quantidade, distribuição, intensidade, diâmetro das gotas, velocidade terminal, variabilidade espacial e temporal (Oliveira et al., 2018; Lopes; Brito, 1993; Oliveira; Wendland; Nearing, 2012; Renard; Freimund, 1994; Teixeira et al., 2022; Trindade et al., 2016; Wischmeier; Smith, 1978). Panagos et al. (2022) afirmam que as zonas tropicais apresentam as maiores magnitudes de erosividade do mundo, em ênfase para a América do Sul.

Os estudos sobre erosão e a própria erosividade da chuva vem se tornando mais importantes nos últimos anos, e em diversas áreas da ciência (Teixeira et al., 2022), entre elas as ciências agrárias e da terra. Para a questão hídrica, a erosão gera problemas como degradação da qualidade da água, assoreamento de rios e reservatórios (Benavidez et al., 2018; Rebutti et al., 2009; Souza et al., 2020; Teixeira et al., 2022), redução da infiltração e

armazenamento de água no solo (Panagos et al., 2015). Eventos intensos de precipitação pluvial, em linha com padrões de erosividade, podem provocar enchentes e inundações (Oliveira et al., 2018; Panagos et al., 2015). Estudos de erosividade da chuva ainda podem auxiliar no entendimento da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica (Cantalice et al., 2009; Nearing et al., 2017). Panagos et al. (2015), Back e Poletto (2018); Oliveira et al. (2018) e Souza et al. (2020) indicam que estudos de erosividade podem complementar análises sobre deslizamentos em ambientes urbanos, já que a erosão enfraquece estruturalmente as encostas.

Cada vez mais os estudos sobre a erosividade da chuva associado a mudanças climáticas vem aumentando a sua importância tendo em vista as alterações no padrão de chuva (Almagro et al., 2017; Trindade et al., 2016; Yin et al., 2017). Além disso, a retenção de CO₂ no solo reduz a liberação do gás na atmosfera, diminuindo a formação de gases de efeito estufa (Panagos et al., 2022). Segundo Panagos et al. (2022), as áreas tropicais, que já tem alta erosividade, experimentarão um aumento de 16% de erosividade, e a América do sul aumentará sua erosividade em 13% em 2050 e reduzirá em 11% em 2070. Riquetti et al. (2020) indicam uma redução da precipitação pluvial média anual para a região da Floresta Amazônica, que afetará a região Sudeste, e um aumento na região Sul do Brasil ao longo do século XXI.

Sem dúvidas, o principal interesse dos pesquisadores em relação a erosividade da chuva está na questão agrícola e segurança alimentar. A erosão causa perda de solo, nutrientes, água, matéria orgânica e insumos, reduzindo a produtividade das culturas (Benavidez et al., 2018; Oliveira et al., 2018; Panagos et al., 2015; Rebucci et al., 2009; Riquetti et al., 2020; Souza et al., 2020; Teixeira et al., 2022; Trindade et al., 2016). Informações de erosividade anual e mensal/sazonal são úteis para o planejamento dos ciclos de plantio e colheita e implementação de práticas conservacionistas para maior cobertura do solo nos períodos mais críticos, ou seja, de maior erosividade (Benavidez et al., 2018; Cantalice et al., 2009; Lopes; Brito, 1993; Marques; Alvarenga; Curi, 1998; Freitas Netto; Virgens Filho; Neves, 2018; Oliveira Júnior; Medina, 1990; Silva, 2004; Silva et al., 2010; Silva; Dias, 2003; Silva et al., 1997; Wischmeier; Smith, 1978).

O agronegócio influencia diretamente o crescimento do PIB brasileiro, impulsionado pelo protagonismo das commodities agrícolas e demandas de exportação, tornando a economia do país dependente do setor (Almagro et

al., 2017; Ferreira et al., 2022; Oliveira; Wendland; Nearing, 2012; Santos et al., 2022; Silva, 2004; Trindade et al., 2016). Pham, Degener e Kappas (2018) estimaram uma taxa média de erosão do solo entre 12 e 15 t.ha⁻¹.ano⁻¹ no mundo. Sartori et al. (2019) estimam o custo anual global decorrente da erosão hídrica em US\$ 8 bilhões e um declínio de 33,7 milhões de toneladas de alimentos produzidos (Teixeira et al., 2022). Dechen et al. (2015) calcularam para o Brasil uma perda de 616,5 milhões de toneladas de solo ao ano, com custo da ordem de US\$ 1,3 bilhão ao ano.

Modelos para avaliar a erosão do solo vem sendo desenvolvidos desde os anos 1940 nos EUA (Nearing et al., 2017; Wischmeier; Smith, 1978; Yin et al., 2017). Um dos mais importantes modelos é a Equação Universal de Perdas de Solo - USLE (Wischmeier; Smith, 1965), e seus derivados como a USLE Modificada - MUSLE (Williams, 1975), a USLE Revisada - RUSLE (Renard et al., 1991), e a Equação Universal de Perda de Solo Revisada versão 2 - RUSLE2 (USDA, 2008). Estes são modelos empíricos, menos complexos e com dados mais acessíveis e flexíveis, tornando sua aplicação mais fácil (Panagos et al., 2015; Teixeira et al., 2022; Wischmeier; Smith, 1978). Estas características fazem com que essa família de modelos sejam os mais aplicados no mundo (Borrelli et al., 2021; Rebucci et al., 2009; Rutebuka et al., 2020; Teixeira et al., 2022; Xavier et al., 2019). A USLE é estimada pelo produto de seis fatores: erosividade da chuva (R), erodibilidade do solo (K), comprimento da encosta (L), declividade da encosta (S), cobertura e manejo do solo (C), e práticas conservacionistas (P), conforme Wischmeier e Smith (1965). Segundo Souza et al. (2020), a USLE é amplamente utilizada no Brasil.

A erosividade da chuva estimada pela USLE é o índice EI_{30} desenvolvido para estimar numericamente a energia do impacto da gota e o escoamento da chuva em um solo desprotegido de vegetação (Lombardi Neto; Moldenhauer, 1992; Lopes; Brito, 1993; Nearing et al., 2017; Oliveira; Wendland; Nearing, 2012; Wischmeier; Smith, 1978). Este índice também pode ser utilizado em outros modelos como USPED, SEDNET, EUROSEM, SEMMED e WATEM/SEDEM (Panagos et al., 2015; Rutebuka et al., 2020). Wischmeier e Smith (1978) definiram o EI_{30} como o produto da energia cinética (E) e a intensidade da chuva erosiva em 30 minutos (I_{30}), período que está mais bem correlacionado com a perda de solo, sendo o resultado dado em MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹. O índice não é apenas uma quantificação energética, mas sim uma taxa

de desagregação e escoamento combinado com a capacidade de transporte (Marques; Alvarenga; Curi, 1998; Oliveira Júnior; Medina, 1990; Silva et al., 2010; Wischmeier; Smith, 1978).

Uma chuva erosiva é aquela que apresenta um total precipitado de ≥ 10 mm ou ≥ 6 mm em 15 min. Chuvas separadas por no mínimo 6 horas, inferiores a 1 mm não são consideradas erosivas (Wischmeier; Smith, 1978). Wischmeier e Smith (1978) orientam que esses dados sejam coletados por um pluviógrafo durante no mínimo 20 anos. No entanto, alguns autores estipulam um período mínimo de 10 anos (Gonçalves et al., 2006; Marques; Alvarenga; Curi, 1998; Rebucci et al., 2009; Renard; Freimund, 1994; Silva, 2004). A medição deve ser feita por períodos longos justamente para incluir variações climáticas incomuns (Nearing et al., 2017; Silva; Dias, 2003; Teixeira et al., 2022). A soma das chuvas individuais no mês corresponde ao El_{30} mensal, e a soma dos El_{30} mensais corresponde ao El_{30} anual, e o fator R é a média dos El_{30} anual do período avaliado (Barbosa; Blanco; Melo, 2015; Silva; Dias, 2003).

Entretanto, algumas críticas de caráter teórico e metodológico ao El_{30} são observadas na literatura. Hudson (1973) e Lal (1976; 1988) apontam que em ambientes tropicais, o El_{30} tenderia a subestimar a energia das chuvas, já que elas apresentam características diferentes da zona temperada para onde o índice foi gerado.

A depender da fase da erosão, a intensidade da chuva pode não ser a principal condição determinante para desagregação do solo, como na fase linear, que registra as maiores produções de sedimento, onde a taxa de escoamento tende a ser mais importante e tem mais relação com a topografia (Benavidez et al., 2018; Marques; Alvarenga; Curi, 1998; Nearing et al., 2017). Atualmente temos registros de precipitação pluvial muito mais detalhados e melhor capacidade computacional que Wischmeier e Smith (1978), onde podemos reavaliar se é necessário a retirada de chuvas “não erosivas” ou mesmo o tempo de intensidade máxima (Nearing et al., 2017; Yin et al., 2017).

O tratamento de dados obtidos por meio de pluviógrafos é bastante oneroso em relação ao tempo e recursos humanos. Além disso, pluviógrafos são bastante escassos em muitas partes do mundo, ainda mais em locais que têm séries históricas entre 10 e 20 anos (Borrelli et al., 2021; Lombardi Neto; Moldenhauer, 1992; Oliveira; Wendland; Nearing, 2012; Renard; Freimund, 1994; Silva, 2004; Trindade et al., 2016).

Esta situação também se aplica ao Brasil, que tem estudos sobre erosividade da chuva desde a década de 1980. Por exemplo, o estudo de Oliveira, Wendland e Nearing (2012) constataram que apenas 15% de 73 estudos com pluviógrafo no Brasil utilizaram séries de mais de 20 anos, além do pequeno número e desigual distribuição de estações que possuem este tipo de instrumento meteorológico.

Apesar de todos esses complicadores, têm-se a disposição índices alternativos como o $KE > 25$, $KE > 10$, dentre outros, e mais recentemente o uso de séries sintéticas de precipitação pluvial. Ainda assim, o EI_{30} ainda tem sido o índice mais utilizado para avaliar erosividade no Brasil. Grande parte da literatura indica boa correlação entre este índice e a perda de solo no país (Teixeira et al., 2022). Para contornar o problema da falta de pluviógrafos, se busca correlacionar o EI_{30} a dados de pluviômetros (volumes diários, mensais e anuais de precipitação pluvial) que são facilmente encontrados (Back; Poletto, 2018; Lombardi Neto; Moldenhauer, 1992; Marques; Alvarenga; Curi, 1998).

O procedimento para se estabelecer a relação descrita por Renard e Freimund (1994) é de calcular EI_{30} para estações pluviométricas e correlacionar com totais mensais ou anuais, por meio de equações empíricas lineares ou exponenciais (Benavidez et al., 2018; Panagos et al., 2015; Silva, 2004). A maior parte dos trabalhos no Brasil utilizaram o Índice Modificado de Fournier- MFI (Fournier, 1960), também chamado de Coeficiente de Chuva (R_c), como variável independente nas equações (Oliveira; Wendland; Nearing, 2012; Silva, 2004; Teixeira et al., 2022). O MFI é a relação entre a precipitação média mensal e precipitação média anual.

Vários autores afirmam que essas equações empíricas devem ser utilizadas apenas em áreas que compartilham chuvas de características semelhantes às do local em que foram desenvolvidas, já que seu uso de forma generalizada e/ou em grandes áreas, pode acarretar estimativas incorretas (Back; Poletto, 2018; Marques; Alvarenga; Curi, 1998; Marques et al., 1997; Rutebuka et al., 2020). Além disso, outros autores mostram que essas equações não conseguem capturar altas intensidades de chuva, com grande impacto na erosividade (Oliveira et al., 2018; Panagos et al., 2015). Para Renard e Freimund (1994) mesmo que estes valores sejam incorretos, servem ao menos para avaliar o potencial erosivo ou taxas relativas de erosão em diferentes condições. Xavier et al. (2019) avaliaram que mesmo

metodologias diferentes de obtenção do fator R, com magnitudes diferentes, não apresentam diferenças qualitativas para identificação de áreas prioritárias para intervenções de manejo e conservação dos solos.

A espacialização da erosividade por meio de mapas vem sendo desenvolvida desde o início dos estudos sobre o tema, inicialmente foram chamados de mapas “isoerodentes” porque conectavam por linhas pontos de igual erosividade, permitindo calcular o valor de erosividade entre as linhas por meio de interpolação linear (Wischmeier; Smith, 1978). Isso foi facilitado com aplicação de sistemas de informação geográfica e a geoestatística para interpolação de valores amostrados (Rebucci et al., 2009; Trindade et al., 2016).

Silva (2004) foi quem elaborou o primeiro mapa de erosividade da chuva para o Brasil, utilizando dados de 1.600 estações pluviométricas, com séries de no mínimo 10 anos, para oito equações regionalizadas. Oliveira, Wendland e Nearing (2012), em uma revisão sobre a erosividade da chuva no Brasil, apresentaram um mapa com 73 equações. Mello et al. (2013) utilizaram dados de 773 estações, com séries de no mínimo 15 anos, para 54 equações regionalizadas, com o emprego do polígono de Thiessen e índice de concentração de precipitação. Trindade et al. (2016) empregaram dados de 1.521 estações, com séries superiores a 20 anos com a aplicação de 75 equações regionalizadas com polígono de Thiessen. Todos estes trabalhos têm a mesma base metodológica de uso de equações correlacionadas ao EI_{30} com MFI (médias mensais/anuais), sendo variável independente. Diferente dos anteriores, Oliveira et al. (2015) estimaram a erosividade das chuvas do Brasil utilizando séries sintéticas de precipitação pluvial.

E diante deste contexto, este trabalho teve o objetivo de produzir um mapa de erosividade da chuva anual para o Brasil. O mapa de erosividade, apresentado nesta publicação, juntamente com o mapa de erodibilidade dos solos serviram para subsidiar a criação de mapas nacionais de risco a erosão hídrica (vulnerabilidade e suscetibilidade) dos solos do Brasil. Esses mapas foram confeccionados no âmbito do Programa Nacional de Manejo Sustentável do Solo e da Água em Microbacias Hidrográficas (Programa Águas do Agro), criado pela Portaria do MAPA Nº 525, de 6 de dezembro de 2022, que teve como propósito promover o desenvolvimento econômico sustentável no meio rural por intermédio do fomento e da adoção de práticas de conservação de solo e água.

Ainda vale mencionar que o presente trabalho está alinhado com algumas metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), com foco no ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e no ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável). No ODS 6 contribui para o alcance da meta 6.4, a qual pretende, até 2030, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores, assegurando retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez. Entretanto, no ODS 2 contribui para atingir a meta 2.4, que pretende, até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos, por meio de políticas de pesquisa, de assistência técnica e extensão rural, entre outras, visando implementar práticas agrícolas resilientes que aumentem a produção e a produtividade e, ao mesmo tempo, ajudem a proteger, recuperar e conservar os serviços ecossistêmicos, fortalecendo a capacidade de adaptação às mudanças do clima, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, melhorando progressivamente a qualidade da terra, do solo, da água e do ar.

Material e métodos

Caracterização climática da área de estudo

Na extensão continental do território brasileiro observa-se uma grande variação climática. Alvares et al. (2013) classificaram 3 zonas e 12 tipos climáticos de Köppen para o Brasil. O clima tropical (Zona “A”) com os tipos Af, Am, Aw e As representa 81,4% da superfície, sendo observado na maioria dos Estados da federação. Entretanto, na região Sul, e também em grande parte dos Estados do Sudeste, existe o predomínio do clima subtropical úmido (Zona “C”) com os tipos Cfa, Cfb, Cwa, Cwb, Cwc, Csa e Csb, que representa 13,7% do território brasileiro. Ainda existe a ocorrência do clima semiárido (Zona “B”) tipo BSh restrito a 4,9% da superfície na região Nordeste do Brasil (Figura 1).

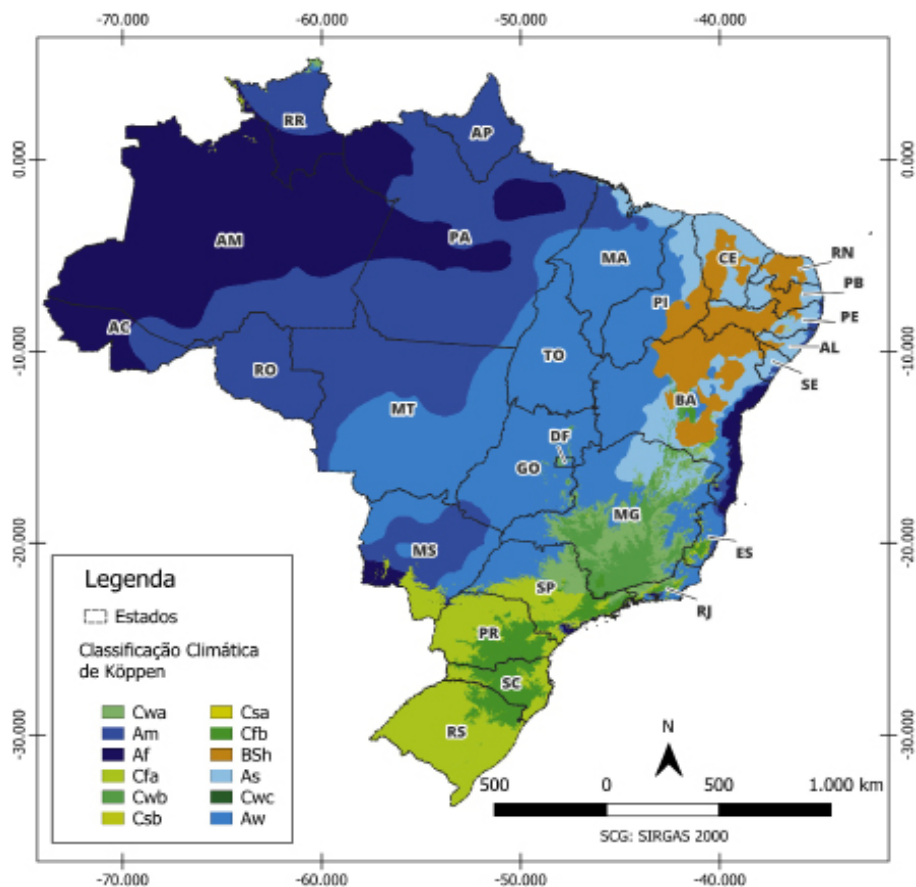


Figura 1. Classificação Climática do Brasil segundo Alvares et al. (2013). Zona tropical úmida: **Af** (sem estação seca), **Am** (monção), **Aw** (com inverno seco) e **As** (com verão seco); Zona Semiárida: **BSh** (de baixa latitude e altitude); Zona subtropical úmida: **Cfa** (com verão quente), **Cfb** (com verão temperado); **Cwa** (com verão quente), **Cwb** (com inverno seco e verão temperado); **Cwc** (com inverno seco e verão curto e fresco), **Csa** (com verão seco e quente) e **Csb** (com verão seco e temperado).

Essa grande variabilidade climática proporciona diferenças no regime de chuvas no território nacional (Mello et al., 2013), com a atuação de diferentes sistemas na baixa e alta troposfera (Figura 2). O Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM) e o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para o sul do Equador entre o verão e o outono causa elevados volumes de chuvas no Norte e Nordeste do país, com máximos pluviométricos superior a 2.000 e 1.500 mm.ano⁻¹, respectivamente (Mello et al., 2013; Reboita et al., 2010).

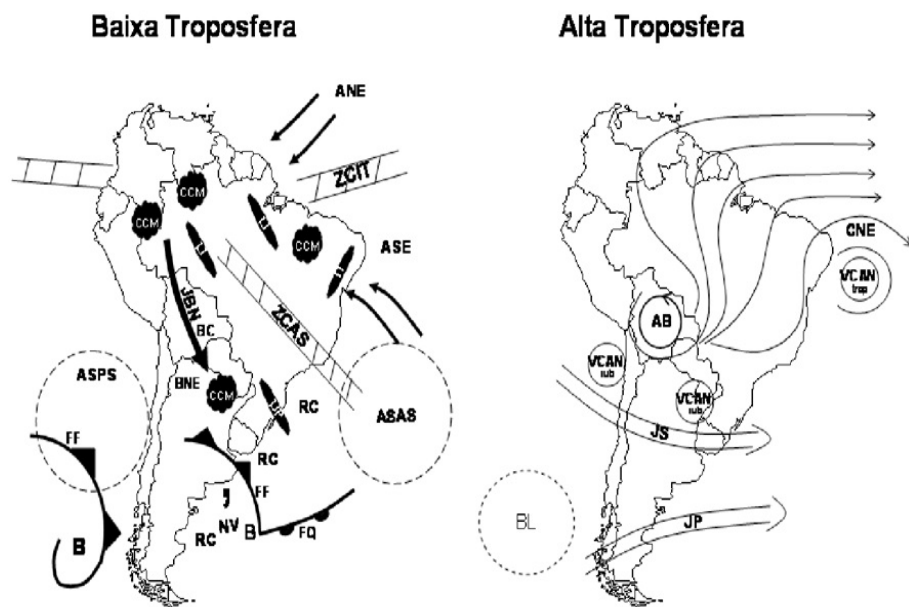


Figura 2. Representação esquemática dos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na América do Sul (Reboita et al., 2010). Em relação à baixa troposfera tem-se: **ANE** ventos alísios de nordeste, **ASE** ventos alísios de sudeste, **ASAS** anticiclone subtropical do Atlântico Sul, **ASPS** anticiclone subtropical do Pacífico Sul, **B** baixa pressão, **BC** baixa do Chaco – região de baixas térmicas, **BNE** região de baixas térmicas no noroeste argentino, **CCM** complexo convectivo de mesoescala, **FF** frente fria, **FQ** frente quente, **JBN** jato de baixos níveis a leste dos Andes, **LI** linha de instabilidade tropical, **LIP** linha de instabilidade pré-frontal, **NV** nuvem vírgula, **RC** regiões ciclogênicas, **ZCAS** zona de convergência do Atlântico Sul e **ZCIT** zona de convergência intertropical. Entretanto, em relação à alta troposfera tem-se: **AB** alta da Bolívia, **BL** região de bloqueios atmosféricos, **CNE** cavado do nordeste do Brasil, **JS** jato subtropical, **JP** jato polar, **VCAN sub** vórtices ciclônicos de altos níveis subtropicais, **VCAN trop** vórtices ciclônicos de altos níveis tropicais (Reboita et al., 2010).

No litoral do Nordeste brasileiro, durante o inverno, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é um importante mecanismo para precipitação, juntamente com a atuação de Frentes, ondas de leste e vórtices ciclônicos de altos níveis tropicais (VCAN trop.), conforme Reboita et al. (2010). Para Mello et al. (2013) existe uma forte influência, principalmente no verão, da floresta Amazônica juntamente com a alta temperatura, em eventos de chuva do tipo convectivo no Norte e no Centro-oeste. São chuvas que tem gotas com grande diâmetro, que podem gerar maior erosividade da chuva.

No sertão nordestino, onde predomina o clima semiárido, são registrados os mais baixos totais pluviométricos (200-500 mm.ano⁻¹). A maior parte das chuvas corresponde ao deslocamento da ZCIT no verão/outono. Outros sistemas que favorecem a precipitação são os VCANs tropicais, frentes frias e a ASAS, que quando atuam simultaneamente podem causar eventos extremos de chuva. O Planalto da Borborema impede que a umidade transportada pelos ventos de leste chegue ao interior do Nordeste, diminuindo a precipitação (Reboita et al., 2010).

A região onde ocorre o clima Subtropical tem melhor distribuição de chuvas no ano, alcançando totais pluviométricos entre 1050 e 2150 mm.ano⁻¹. As chuvas são associadas principalmente a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), ASAS, frentes frias, ciclones, VCANs subtropicais, linhas de instabilidade pré-frontais, nuvens virgulas, CCMs subtropicais, bloqueios atmosféricos, JBN e Brisas (Reboita et al., 2010). A região Sudeste tem alta concentração de chuvas durante o verão, recebendo alta umidade da Floresta Amazônica associados a frentes frias e a ZCAS, no inverno a ASAS se posiciona mais a oeste, reduzindo a precipitação nessa época (Mello et al., 2013).

Metodologia

Para a estimativa de erosividade da chuva anual (R) de todo o Brasil foram utilizados dados mensais de precipitação do banco de dados do Zoneamento Agrícola do Risco Climático (Zarc) e do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). O banco de informações da rede Zarc é composto de dados climatológicos, consistidos e preenchidos, obtidos de estações administradas por várias instituições. A maioria das estações que compõem o banco da rede Zarc é da Agência Nacional de Águas (Ana), mas ainda existem estações do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme), entre outras. No total foram 3.659 estações pluviométricas, sendo 3.294 da rede Zarc e 365 da CPRM com distribuição espacial em todo território brasileiro (Figura 3). Vale destacar que, os dados das estações da CPRM foram utilizados de forma complementar aos da rede Zarc, visto que muitas estações estavam repetidas nestas duas bases.

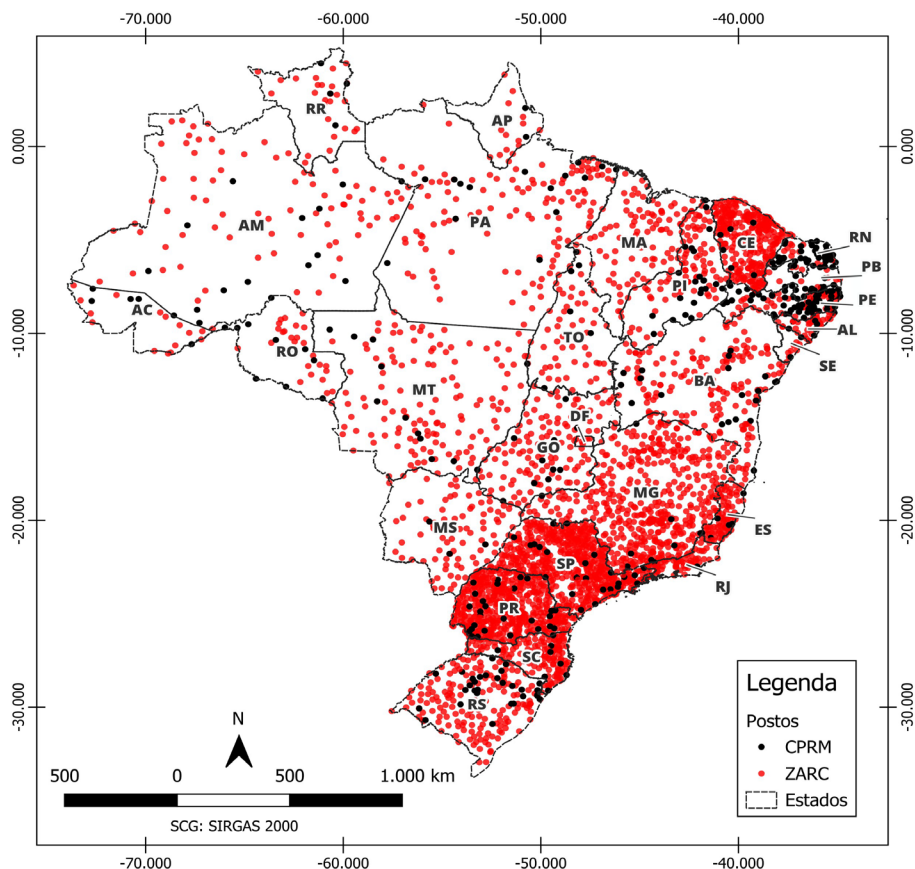


Figura 3. Distribuição dos postos pluviométricos.

A erosividade da chuva (EI_{30} mensal) foi determinada por um conjunto de 68 equações, conforme observa-se na Tabela 1. A equação de Barbosa, Blanco e Melo (2015), desenvolvida para Belém-PA, foi utilizada de forma adicional a maioria do conjunto de equações descritas no trabalho de Oliveira, Wendland e Nearing (2012). As equações utilizaram como informações de entrada tanto o Índice de Fournier Modificado (Modified Fournier Index - MFI), descrito na Equação 1, como a precipitação média anual, conforme Martins et al. (2010) e Silva et al. (2010).

Tabela 1. Equações utilizadas para determinar a erosividade das chuvas

Latitude (°)	Longitude (°)	Localidade	Equação	R ²	Referência
-1,46	-48,50	Belém-PA	$E_{30}=25,31*(MFI)+496,56$	0,96	Barbosa, Blanco e Melo (2015)
-19,58	-40,00	Aracruz-ES	$E_{30}=40,58+7,9075(Pm)$	0,61	Martins et al. (2010)
-16,68	-49,38	Goiania-GO	$E_{30}=215,33+30,23(MFI)$	0,77	Silva et al. (1997)
-19,42	-44,25	Sete Lagoas-MG	$E_{30}=25,3+43,35(MFI)-0,23(MFI)^2$	-	Marques et al.(1997)
-19,07	-42,55	Açucena-MG	$E_{30}=158,35(MFI)^{0,85}$	0,88	Silva et al. (2010)
-19,64	-42,85	Antônio Dias-MG	$E_{30}=-119,27+7,84(Pm)$	0,90	Silva et al. (2010)
-19,22	-42,49	Belo Oriente-MG	$E_{30}=215,4(MFI)^{0,85}$	0,89	Silva et al. (2010)
-19,80	-42,15	Caratinga-MG	$E_{30}=321,63*(MFI)^{0,48}$	0,86	Silva et al. (2010)
-18,56	-42,54	Peçanha-MG	$E_{30}=-141,07+9,63(Pm)$	0,90	Silva et al. (2010)
-18,67	-43,08	Sabinópolis-MG	$E_{30}=170,59(MFI)^{0,64}$	0,93	Silva et al. (2010)
-18,46	-43,30	Santa Bárbara-MG	$E_{30}=179,33(MFI)^{0,77}$	0,90	Silva et al. (2010)
-22,11	-54,56	Santo Antônio do Itambé-MG	$E_{30}=114,42(MFI)^{0,81}$	0,86	Silva et al. (2010)
-18,30	-54,45	Dourados-MS	$E_{30}=73,464+56,562(MFI)$	0,80	Oliveira et al. (2012)
-20,27	-54,31	Coxim-MS	$E_{30}=247,35+41,036(MFI)$	0,90	Oliveira et al. (2012)
-15,62	-56,11	Campo Grande-MS	$E_{30}=171,40+42,173(MFI)$	0,78	Oliveira et al. (2012)
-16,45	-54,57	Cuiabá-MT	$E_{30}=109,412(MFI)^{0,744}$	0,91	Almeida et al. (2011a)
-15,65	-57,48	Cáceres-MT	$E_{30}=172,6326451(MFI)^{0,5245258}$	0,94	Almeida et al. (2011b)
-16,05	-57,68	Rondonópolis-MT	$E_{30}=133,2004291(MFI)^{0,5372469}$	0,90	Almeida et al. (2011b)
-12,29	-55,29	Canarana-MT	$E_{30}=317,397829(MFI)^{0,484654}$	0,86	Almeida et al. (2012)
-15,84	-54,39	Vera-MT	$E_{30}=399,538719(MFI)^{0,468718}$	0,84	Almeida et al. (2012)
-13,44	-56,71	Poxoréo-MT	$E_{30}=272,865645(MFI)^{0,419164}$	0,66	Almeida et al. (2012)
-8,23	-49,37	São José do Rio Claro-MT	$E_{30}=147,262400(MFI)^{0,533025}$	0,83	Almeida et al. (2012)

Tabela 1. Continuação

Latitude (°)	Longitude (°)	Localidade	Equação	R ²	Referência
-16,03	-57,27	Cáceres-MT	$El_{30}=56,115(MFI)^{0,9504}$	0,87	Morais et al. (1991)
-13,55	-52,26	Cáceres-MT	$El_{30}=36,849(MFI)^{1,0852}$	0,84	Morais et al. (1991)
-8,40	-35,43	Conceição do Araguaia-PA	$El_{30}=321,5+36,2(MFI)$	0,89	Oliveira Júnior (1996)
-8,00	-35,18	Olinda-PE	$El_{30}=57,25+30,8(MFI)$	0,88	Cantalice et al. (2009)
-8,29	-35,98	Catende-PE	$El_{30}=57,32(MFI)^{0,618}$	0,75	Cantalice et al. (2009)
-8,19	-36,08	Gloria do Goitá-PE	$El_{30}=97,79+15(MFI)$	0,72	Cantalice et al. (2009)
-8,34	-36,42	Caruaru-PE	$El_{30}=61,81(MFI)^{0,58}$	0,67	Cantalice et al. (2009)
-7,57	-40,50	São Caetano-PE	$El_{30}=61,81(MFI)^{0,58}$	0,67	Cantalice et al. (2009)
-8,28	-39,24	Belo Jardim-PE	$El_{30}=61,81(MFI)^{0,58}$	0,67	Cantalice et al. (2009)
-7,88	-40,08	Araripina-PE	$El_{30}=73,34+23,18(MFI)$	0,94	Cantalice et al. (2009)
-9,39	-40,50	Cabrobó-PE	$El_{30}=73,34+23,18(MFI)$	0,94	Cantalice et al. (2009)
-8,32	-37,72	Ouricuri-PE	$El_{30}=73,34+23,18(MFI)$	0,94	Cantalice et al. (2009)
-24,25	-53,34	Petrolina-PE	$El_{30}=73,34+23,18(MFI)$	0,94	Cantalice et al. (2009)
-26,07	-53,03	Poço da Cruz-PE	$El_{30}=73,34+23,18(MFI)$	0,94	Cantalice et al. (2009)
-22,48	-51,19	Oeste Paraná	$El_{30}=182,86+56,21(MFI)$	-	Rufino, Biscaia e Merten (1993)
-23,22	-51,27	Sudoeste Paraná	$El_{30}=144,86+55,20(MFI)$	-	Rufino, Biscaia e Merten (1993)
-23,45	-52,03	Norte Paraná	$El_{30}=216,31+41,30(MFI)$	-	Rufino, Biscaia e Merten (1993)
-25,52	-51,46	Noroeste Paraná	$El_{30}=164,12+39,44(MFI)$	-	Rufino, Biscaia e Merten (1993)
-24,41	-50,26	Centro Paraná	$El_{30}=191,79+48,40(MFI)$	-	Rufino, Biscaia e Merten (1993)
-25,23	-49,14	Centro Sul Paraná	$El_{30}=107,52+46,89(MFI)$	-	Rufino, Biscaia e Merten (1993)
-22,17	-42,32	Centro Leste Paraná	$El_{30}=93,29+41,20(MFI)$	-	Rufino, Biscaia e Merten (1993)
-22,46	-43,41	Leste Paraná	$El_{30}=33,26+40,71(MFI)$	-	Rufino, Biscaia e Merten (1993)
-22,07	-43,56	Rio das Flores-RJ	$El_{30}=112,54+20,70(MFI)$	0,82	Gonçalves et al. (2006)

Tabela 1. Continuação

Latitude (°)	Longitude (°)	Localidade	Equação	R ²	Referência
-22,23	-44,06	Valença-RJ	$E_{130}=194,08+27,74(MFI)$	0,82	Gonçalves et al. (2006)
-23,03	-44,52	Angra dos Reis-RJ	$E_{130}=73,21+44,61(MFI)$	0,84	Gonçalves et al. (2006)
-21,84	-44,58	Carmo-RJ	$E_{130}=223,87+21,00(MFI)$	0,72	Gonçalves et al. (2006)
-22,48	-43,84	Barra do Piraí-RJ	$E_{130}=50,36+24,53(MFI)$	0,96	Gonçalves et al. (2006)
-22,75	-44,12	Piraí-RJ	$E_{130}=112,54+20,70(MFI)$	0,82	Gonçalves et al. (2006)
-22,71	-42,70	Rio Claro-RJ	$E_{130}=118,71+38,48(MFI)$	0,98	Gonçalves et al. (2006)
-22,58	-42,94	Rio Bonito-RJ	$E_{130}=64,59+47,68(MFI)$	0,89	Gonçalves et al. (2006)
-22,48	-42,66	Magé-RJ	$E_{130}=39,86+37,90(MFI)$	0,91	Gonçalves et al. (2006)
-22,48	-43,00	Conceição do Macabu-RJ	$E_{130}=146,28+46,37(MFI)$	0,70	Gonçalves et al. (2006)
-22,92	-43,42	Magé-RJ	$E_{130}=-13,36+50,02(MFI)$	0,65	Gonçalves et al. (2006)
-22,96	-43,28	Saquarema-RJ	$E_{130}=-76,27+53,31(MFI)$	0,40	Gonçalves et al. (2006)
-30,38	-56,43	Quaraí-RS	$E_{130}=-47,35+82,72(MFI)$	0,84	Bazzano, Eltz e Cassol (2007)
-28,65	-56,00	São Borja-RS	$E_{130}=99,646+63,874(MFI)$	0,77	Cassol et al. (2008)
-29,75	-57,08	Uruguaiana-RS	$E_{130}=-96,735+81,967(MFI)$	0,94	Hickmann et al. (2008)
-28,55	-53,90	Ijuí-RS	$E_{130}=330,86+34,54(MFI)$	0,40	Cassol et al. (2007)
-27,85	-54,48	Santa Rosa-RS	$E_{130}=354,71+44,927(MFI)$	0,41	Mazurana et al. (2009)
-27,40	-51,20	Campos Novos-SC	$E_{130}=238,585+22,626(MFI)$	0,50	Bertol (1994)
-22,62	-52,17	Teodoro Sampaio-SP	$E_{130}=106,8183+46,9562(MFI)$	0,93	Colodro et al. (2002)
-22,52	-47,04	Campinas-SP	$E_{130}=68,730(MFI)$ ^{0,841}	0,98	Lombardi Neto e Moldenhauer (1992)
-23,22	-49,23	Piraju-SP	$E_{130}=72,5488(MFI)$ ^{0,8488}	0,93	Roque, Carvalho e Prado (2001)
-24,28	-47,95	Sete Barras-SP	$E_{130}=316,20+55,40(MFI)$	0,98	Silva et al. (2009)
-24,40	-47,75	Juquía-SP	$E_{130}=207,21+40,65(MFI)$	0,90	Silva et al. (2009)
-21,28	-47,01	Mococa-SP	$E_{130}=111,173(MFI)$ ^{0,691}	0,98	Carvalho et al. (1991)

$$\text{MFI} = \text{Pm}^2/\text{Pa} \quad (1)$$

onde “MFI” é o índice de Fournier modificado; “Pm” é a precipitação média mensal (mm); e “Pa” é a precipitação média anual (mm).

Essas equações foram espacializadas em formato de ponto no *software* ARCGIS para a criação da área de influência de cada equação pelo método dos polígonos de Thiessen (Figura 4), conforme os trabalhos de Mello et al. (2013) e Trindade et al. (2016). Estabelecido os vínculos entre as equações de EI_{30} e as estações pluviométricas foram calculados o EI_{30} para cada um dos meses das estações pluviométricas. O somatório do EI_{30} de cada mês resultou na erosividade da chuva anual de cada estação em $\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

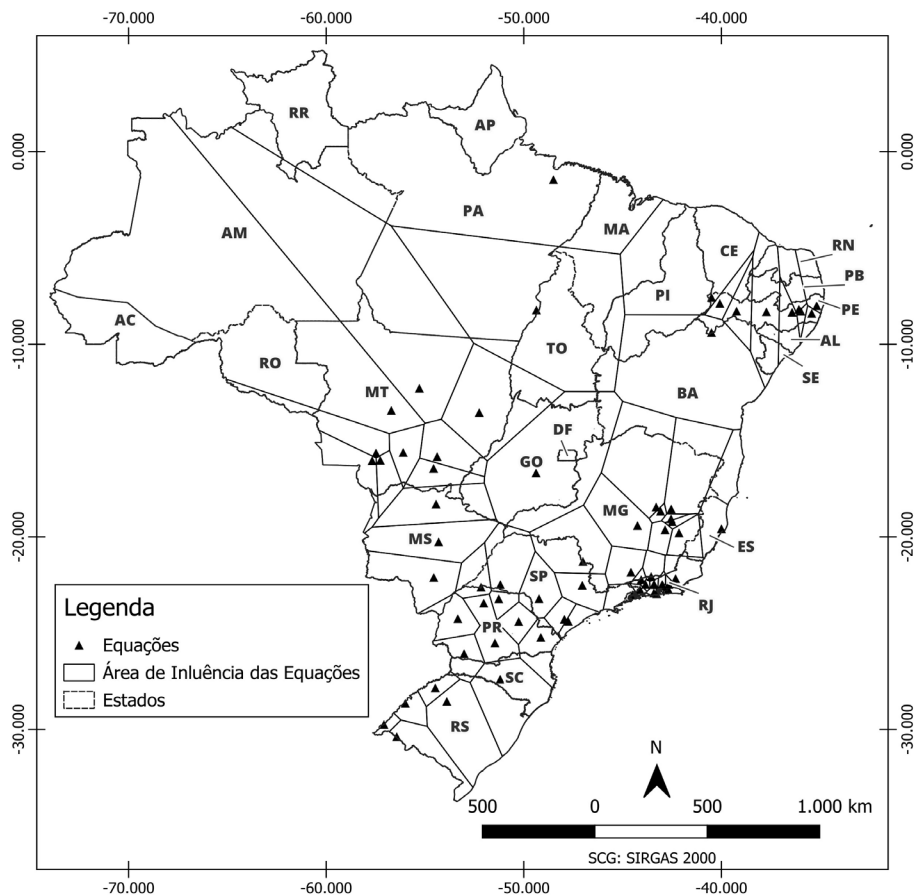


Figura 4. Localização das equações de EI_{30} e suas áreas de influência.

Para espacialização da erosividade da chuva foi utilizada a ferramenta de interpolação Krigagem Ordinária, modelo tipo esférico, do pacote “geostatistical Analyst” no software ARCGIS 10.8 (Environmental Systems Research Institute, 2020). A krigagem é um método de interpolação geoestatística que utiliza pesos lineares para estimar valores em locais não amostrados. A ferramenta leva em conta a dependência estocástica entre os dados amostrados no espaço e busca encontrar uma estimativa imparcial que minimize o erro quadrado. A variação espacial na krigagem é quantificada por meio de um semivariograma, uma função que descreve o comportamento da variável em diferentes direções do espaço geográfico, permitindo associar a variabilidade da estimativa com base na distância entre os pontos (Back; Poletto, 2018; Teixeira et al., 2022). Segundo Yin et al. (2017) cerca da metade dos estudos relacionados a erosividade da chuva utilizaram técnicas geoestatísticas como a Krigagem, tal qual pode ser verificado no trabalho de Trindade et al. (2016). O mapa de erosividade do Brasil foi reclassificado de acordo com as classes de erosividade anual proposta por Carvalho (2008), conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Classificação da erosividade (R), em MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹, de acordo com Carvalho (2008)

Classes de erosidade da chuva média anual e mensal	
Classes de erosividade	Valores de erosividade
Muito baixa	$R \leq 2452$
Baixa	$2453 < R \leq 4905$
Média	$4906 < R \leq 7357$
Alta	$7358 < R \leq 9810$
Muito alta	$R > 9811$

A técnica utilizada para avaliar o desempenho da interpolação foi a validação cruzada *leave-one-out*. Essa técnica consiste em remover um único ponto da base de dados e realizar a krigagem nos dados restantes para prever o valor do ponto removido. Esse processo é repetido para cada ponto da base de dados. Em seguida, os dados observados (erosividade calculada por equações) foram comparados com os dados estimados (erosividade da krigagem) de acordo com a metodologia de Trindade et al. (2016). O desempenho da interpolação foi avaliado utilizando as seguintes métricas estatísticas: a) Coeficiente de determinação (R^2); b) Erro médio (ME); c) Erro percentual

médio (MPE); d) Erro médio absoluto (MAE); e) Erro percentual absoluto médio (MAPE); f) Erro quadrático médio (MSE); e g) Raiz média dos erros quadrados médios (RMSE).

Resultados e discussões

Em relação a erosividade mensal da chuva (Figura 5) podemos observar que a erosividade tende a ser mais regular ao longo do ano no Sul do Brasil, chegando a apresentar valores de até $2.000 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$, nos meses de abril e outubro, na parte oeste da região. Diferentemente do Sudeste, em que os máximos erosivos, com valores superiores a $3.000 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$, são observados de novembro a janeiro. Valores superiores a $3.000 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{mês}^{-1}$ também são observados na região Norte e Nordeste, no mês de março. Os valores mais baixos de erosividade das chuvas são observados na região Nordeste entre os meses de maio a outubro. Entretanto, os valores elevados, nos meses de março e abril, estão associados ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical.

Na Figura 5 também se observa um deslocamento dos máximos de erosividade, a partir da região Sudeste no mês de novembro, com destaque para o estado de Minas Gerais, até a região Norte e Nordeste no mês de março, com destaque para os estados do Amapá, Pará e Maranhão. Esse mesmo padrão foi observado na publicação de Trindade et al. (2016) e está associado ao regime pluviométrico descrito por Reboita et al. (2010), no qual se tem a formação da ZCAS no final da primavera e começo do verão no Sudeste, e a posição mais austral da ZCIT entre o verão e o outono na região Norte e Nordeste.

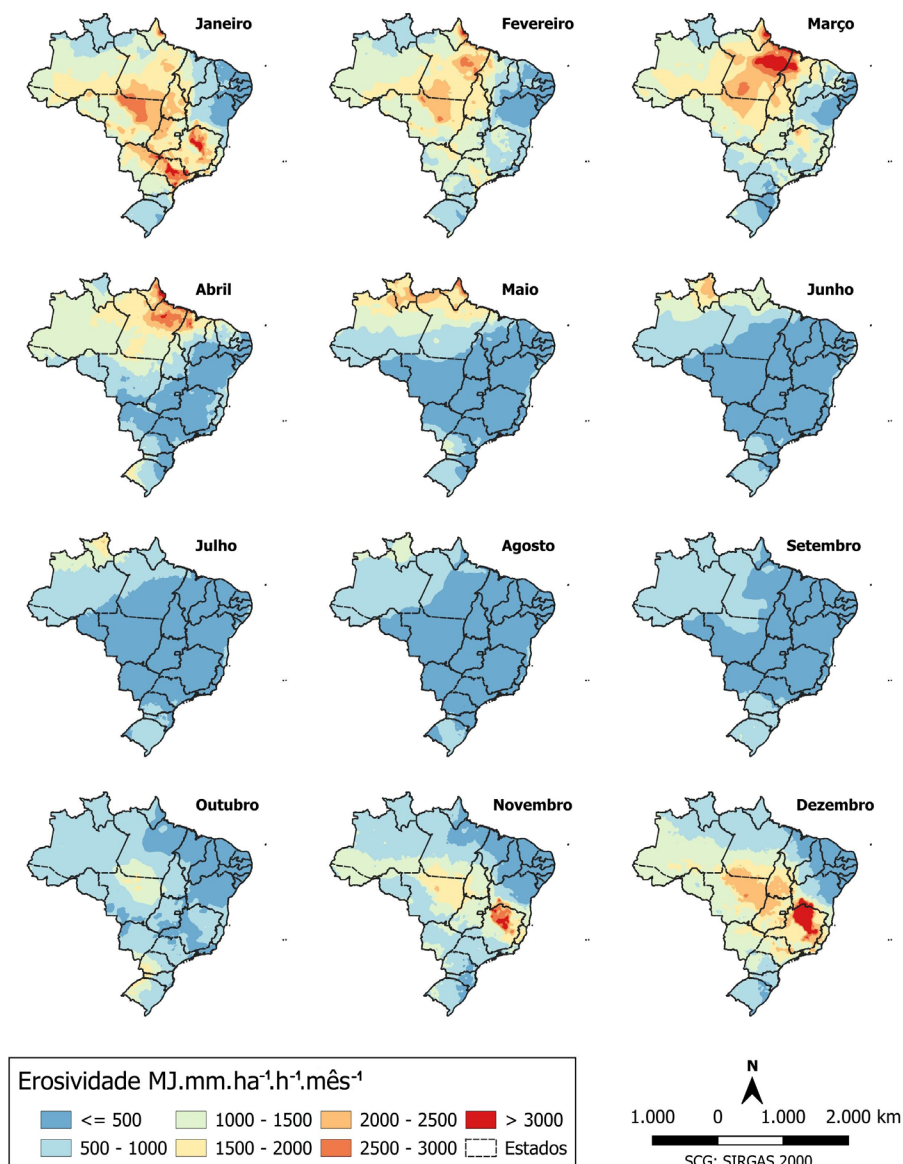


Figura 5. Erosividade mensal das chuvas do Brasil.

A Tabela 3 apresenta as métricas de avaliação das interpolações mensais e anual. Vale ressaltar que os valores do ME, MAE e MSE, e da RMSE estão em MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹. Entretanto, os valores do MPE e MAPE estão em porcentagem. Os valores dos coeficientes de determinação (R²) nas interpolações foram superiores a 0,98 (março), o que sugere um excelente ajuste do modelo de krigagem aos valores de EI₃₀ estimados pelas equações da Tabela 1. Mello et al. (2013) obteve valores do R² entre 0,68 e 0,75; e Trindade et al. (2016) de 0,83. Os valores mensais do ME, com exceção do valor anual, e MPE apresentaram valores negativos e relativamente próximos a zero, com exceção do mês de junho (-7,66 e -4,16 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, respectivamente), indicando que as interpolações tendem a subestimar a erosividade.

Tabela 3. Métricas de validação das interpolações de erosividade da chuva mensais e anual

	R ² (¹)	ME(²)	MPE(³)	MAE(⁴)	MAPE(⁵)	MSE(⁶)	RMSE(⁷)
Janeiro	0,99	-2,23	-0,86	48,29	3,88	6.228,77	78,92
Fevereiro	0,99	-1,11	-0,72	32,07	3,57	2.358,76	48,57
Março	0,98	-0,58	-1,24	54,37	5,55	7.142,67	84,51
Abril	0,99	-2,31	-1,14	23,07	3,89	1.478,13	38,45
Mai	1,00	-1,87	-1,21	14,33	4,12	538,10	23,20
Junho	0,99	-7,66	-4,16	16,39	7,38	799,38	28,27
Julho	1,00	-1,87	-1,72	6,55	3,73	145,46	12,06
Agosto	1,00	-1,25	-1,20	4,58	3,07	71,29	8,44
Setembro	0,99	-0,85	-1,13	12,66	4,07	666,18	25,81
Outubro	0,99	-1,88	-1,02	18,25	3,52	1.282,48	35,81
Novembro	1,00	-0,74	-0,29	9,70	1,30	472,15	21,73
Dezembro	1,00	-1,44	-0,64	30,79	2,89	3.145,19	56,08
Anual	0,99	0,25	-0,27	146,61	1,89	62.325,44	249,65

(¹)Coeficiente de determinação; (²)Erro médio, em MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹; (³)Erro percentual médio, em porcentagem (%); (⁴)Erro médio absoluto, em MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹; (⁵)Erro percentual absoluto médio, em porcentagem (%); (⁶)Erro quadrático médio, em MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹; e (⁷)Raiz média dos erros quadrados médios, em MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹

No geral, o MAE (Erro médio absoluto – *Mean Absolute Error*) apresentou valores baixos, variando entre 4,58 (agosto) e 54,37 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹ (março), com valor anual de 146,61 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹. As estimativas anuais de Mello et al. (2013) demonstraram MAE variando entre 7,7% e -14,1%, enquanto Trindade et al. (2016) relataram um MAE de 9,6%. É importante destacar que o MAE é uma medida de erro absoluto, expressa na mesma unidade da variável que está sendo prevista (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹). Portanto, expressar o MAE diretamente em termos percentuais não é uma prática comum. As comparações entre esses valores servem principalmente para avaliar a magnitude dos erros. Para uma comparação mais apropriada, recomenda-se utilizar o MAPE (Erro percentual absoluto médio – *Mean Absolute Percentage Error*), pois o MAPE é uma métrica de erro percentual que facilita a comparação entre diferentes conjuntos de dados. Observa-se ainda na Tabela 3 que o MAPE foi superior a 5% apenas nos meses de março e junho, indicando que nestes meses ocorre uma maior imprecisão da estimativa de EI₃₀.

As métricas do MSE e RMSE são muito dependentes da escala e da variabilidade dos dados. Como os erros são elevados ao quadrado, os valores mais altos têm um peso maior do que os valores absolutos do MAE. Os valores do MSE e da RMSE são maiores que os do MAE, indicando que as interpolações tendem a apresentar mais erros de previsão para valores elevados de erosividade da chuva. Isso significa que quanto maior o valor da erosividade maior será o erro estimado, o que pode ser explicado pela amplitude e variabilidade dos dados (os valores anuais são maiores que os mensais), presença de valores atípicos (*outliers*) ou as características da interpolação (Krigagem ordinária).

No clima tropical amazônico, a erosividade da chuva observada neste estudo variou entre 1.416 e 20.722 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. Silva (2004) estimou entre 3.116 e 20.035 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹, Oliveira et al. (2012) entre 1.672 e 22.452 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹, Mello et al. (2013) entre 2.216 e 23.187 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹, e Trindade et al. (2016) entre 1.782 e 16.583 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. Destaca-se que os trabalhos citados utilizaram a mesma metodologia do presente estudo e verifica-se que os valores mínimos do clima tropical amazônico estiveram congruentes com os de Oliveira et al. (2012) e Trindade et al. (2016). Entretanto, os valores máximos estiveram congruentes com o trabalho de Silva (2004).

De forma geral, em todos os trabalhos pesquisados, os valores mínimos são encontrados na região do semiárido, enquanto que os valores máximos foram observados sobre a região amazônica. Teixeira et al. (2022) realizaram uma revisão sobre a erosividade das chuvas no Brasil e encontraram valores entre 59 a 26.891 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. Utilizando séries sintéticas de precipitação, Oliveira et al. (2015) apresentaram valores menores de erosividade na faixa entre 468,3 e 2.000 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹, e valores maiores entre 10.000 e 20.000 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹.

Panagos et al. (2017) mostraram a partir do mapa de erosividade da chuva global que os maiores valores estão no sudeste asiático (Camboja, Indonésia, Malásia, Filipinas e Bangladesh), África Central (Congo e Camarões), América do Sul (Brasil, Colômbia e Peru), América Central e Caribe. Entretanto, os valores mais baixos de erosividade localizam-se, principalmente, na Sibéria, Oriente Médio, Norte da África, Canadá e Norte da Europa.

Na Figura 6 observa-se o mapa de erosividade das chuvas no Brasil, com a classificação proposta por Carvalho (2008), que também pode ser obtido por meio deste *link* (<https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#!/dataset/1775>) no formato digital (*raster*). De forma complementar, a Tabela 4 apresenta os resultados obtidos neste trabalho, e também em outras literaturas, para as classes de erosividade (Baixa, Média, Média-forte, Forte e Muito forte) no Brasil. Vale ressaltar que na Tabela 4 a porcentagem de cada classe representa a área existente em relação à extensão territorial do Brasil. De maneira geral, a classe “Forte” (21,6%) e, principalmente, a “Muito forte” (57,2%), que cobre praticamente toda a área dos Estados da região Norte, dominam a maior parte do país (78,8%). A classe de erosividade “Muito forte” (> 9.811 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹) ainda se estende para Estados das regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, se fazendo presente na parte oeste desta última região. Tanto a classe de erosividade “Baixa” (2,0%) como a “Média” (8,7%) estão concentradas nos Estados que fazem parte da região Nordeste. Vale destacar que o Estado do Maranhão apresenta uma grande variação, que abrange da classe de erosividade “Média” (2.453 - 4.905 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹), a Leste, para a classe “Muito forte”, a Oeste.

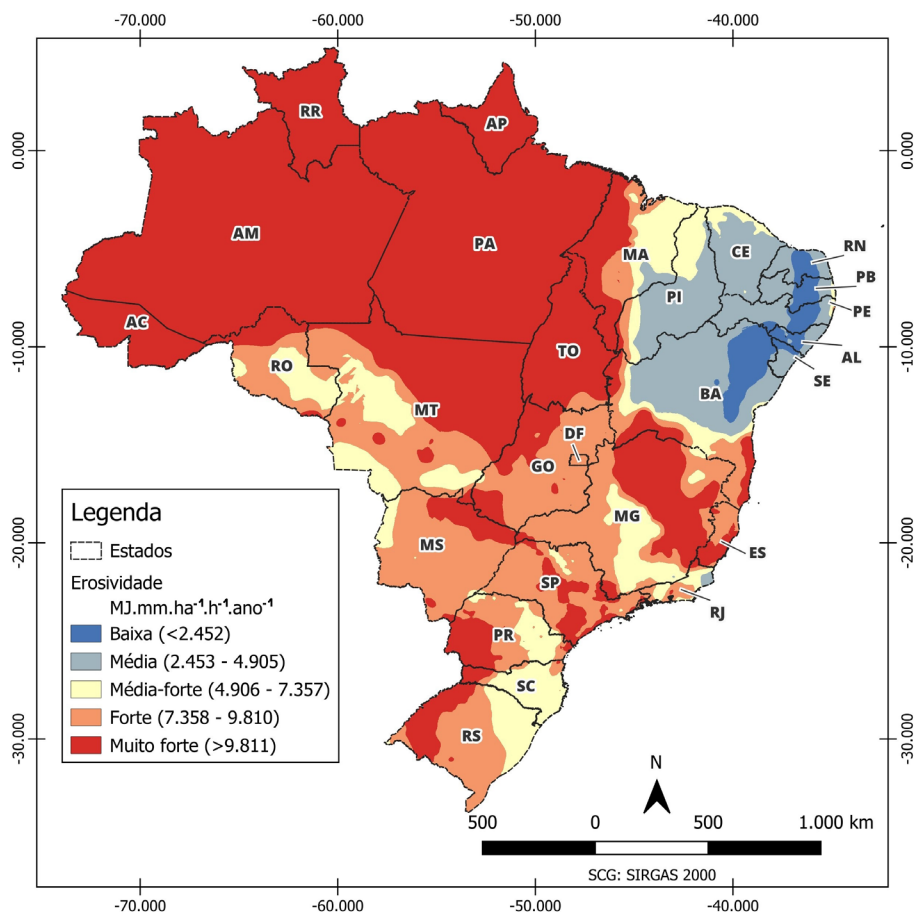


Figura 6. Mapa da erosividade das chuvas no Brasil.

Tabela 4. Classificação da erosividade das chuvas no Brasil

	Baixa	Média	Média-Forte	Forte	Muito forte
Resultados obtidos	2,0%	8,7%	10,4%	21,6%	57,2%
Silva (2004)	0,0%	4,7%	26,3%	10,6%	58,4%
Oliveira, Wendland e Nearing (2012)	2,6%	13,2%	31,6%	23,7%	28,9%
Mello et al. (2013)*	0,0%	8,0%	20,1%	30,4%	41,5%
Oliveira et al. (2015)	7,1%	8,5%	14,2%	21,8%	48,4%
Trindade et al. (2016)*	1,1%	11,9%	10,1%	30,1%	46,7%

*Para se obter as porcentagens nos trabalhos de Mello et al. (2013) e Trindade et al. (2016) foi necessário georreferenciar os mapas de erosividade e realizar uma classificação automática para se obter os valores da área de cada classe (baixa, média, média-forte, forte e muito forte) em relação à extensão territorial do Brasil.

Na Tabela 4 ainda podemos observar que não houve um comportamento similar de todas as classes do presente estudo com as dos demais trabalhos. Porém, na classe “Baixa” todos os trabalhos apresentaram valores inferiores a 2,6%, com exceção do trabalho de Oliveira et al. (2015), que apresentou um valor de 7,1% para esta classe. Na classe “Muito forte”, o trabalho que mais se aproximou desta publicação foi o de Silva (2004), com 58,4%, e o que mais divergiu foi o de Oliveira, Wendland e Nearing (2012), com 28,9% de área.

Na região Norte e parte da região Centro-Oeste, onde prevalece o clima tropical, os valores de erosividade variaram entre 10.000 e maiores do que 20.000 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. Estes valores estiveram próximos aos valores de outras regiões tropicais, como Colômbia (10.409 - 15.975 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹), conforme Hoyos, Waylen e Jaramillo (2005), e Malásia (9.000 - 14.000 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹), de acordo com Shamshad et al. (2008).

Barbosa, Blanco e Melo (2015) determinaram uma erosividade de 14.323 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ para Belém, no estado do Pará. Oliveira Júnior e Medina (1990) estimaram a erosividade das chuvas em Manaus-AM em 14.129 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. Nessas regiões, a floresta amazônica é de grande importância para a proteção do solo, porém é a área onde se tem forte expansão da fronteira agrícola, além do aumento do desmatamento (Oliveira et al., 2015).

No clima semiárido da região Nordeste, os valores variaram entre 1.416 e 4.000 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. Os valores encontrados foram semelhantes ao de outras regiões do globo que possuem o mesmo clima. Sadeghi, Moatamednia e Behzadfar (2011) determinaram o valor de 1.226 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ para o Irã, Delwaulle (1973) observou 1.985 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ para o norte da Nigéria, e Stillhardt, Herweg e Hurni (2002) registraram o valor de 2.980 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ para o leste da Eritreia.

Cantalice et al. (2009) descreveram valores entre 1.500 e 3.500 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ para o sertão do estado de Pernambuco. Nessa área a tendência é de que ocorra pouca precipitação. Mesmo assim, a vegetação de caatinga tem grande capacidade de aumentar a folhagem em resposta ao início da estação chuvosa, fornecendo proteção ao solo (Oliveira et al., 2015). Porém, não é incomum o aparecimento de eventos de precipitação extrema que aumenta a intensidade da chuva. Almagro et al. (2017) e Riquetti et al. (2020) sugerem que a região Nordeste será mais impactada devido ao aumento da erosividade das chuvas relacionada com as mudanças climáticas.

A região semiárida entre Santa Maria da Vitória, no sul da Bahia, e Pirapora, no norte de Minas Gerais, tem valores entre 10.000 e 16.000 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. Esses valores são considerados muito elevados para uma área com esse tipo clima. Essa situação também foi observada no mapeamento de Trindade et al. (2016). Segundo esses autores, tal incompatibilidade pode ser atribuída as áreas de influência do polígono de Thiessen. Visto que, ainda não existe uma equação para essa área em específico e a estimativa do cálculo foi com base na equação de Santo Antônio do Itambé, MG, que já possui outro contexto climático (Silva et al., 2010).

Na região subtropical foram observados valores que variaram entre 4.000 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ (leste da região Sul e sul de Minas Gerais) e 12.000 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ (oeste da região Sul, leste de São Paulo, e centro-leste de Minas Gerais). Bertol (1994) observou uma erosividade da chuva de 6.329 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ em Campos Novos-SC, Hickmann et al. (2008) descreveram o valor de 8.875 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ em Uruguaiana-RS, e Mazurana et al. (2009) relataram um valor de 11.217 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ em Santa Rosa-RS.

Silva et al. (2010) registraram um valor de 11.656 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ no vale do rio Doce, Minas gerais. Angulo-Martínez e Beguería (2009) citaram um valor de 4.500 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ na Espanha, e Lee e Heo (2011) descreveram um valor médio de 4.703 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹ no sul da península da Coreia. Observa-se que os valores registrados para o clima subtropical do Brasil são superiores aos de outros locais do mundo (Coreia do Sul e Espanha) que possuem clima similar. Vale destacar que a região subtropical do Brasil possui grande produção agrícola e que pode sofrer com o aumento da erosividade das chuvas ao longo do século XXI, devido a mudanças nos padrões de chuva e temperatura (Almagro et al., 2017; Riquetti et al., 2020).

Considerações finais

Foi observado que a maior parte do país apresenta erosividade da chuva classificada como “Forte” ou “Muito forte” (78,8%), sendo o período mais crítico entre os meses de novembro e abril. Os valores mais elevados de erosividade ocorrem em áreas onde se concentra a maior parte da produção agropecuária do país. Dessa forma, se torna imprescindível o planejamento conservacionista e a adoção de sistemas de manejo adequados para as atividades agropecuárias, com vista a conservação do solo e da água.

A metodologia apresentada necessita de um maior detalhamento tanto em relação ao desenvolvimento de novas equações para alguns Estados ou, até mesmo, regiões como na substituição de algumas equações regionais por outras que apresentem maior correlação ao EI_{30} . Vale destacar que, enquanto existem várias equações desenvolvidas para um determinado Estado outros não possuem nenhuma. É importante também o aperfeiçoamento constante dos mapas de erosividade da chuva para o Brasil, visto que, devido às mudanças climáticas, os padrões de chuva têm se alterado nas diferentes localidades do país.

Ainda é possível a aplicação do método dos polígonos de Thiessen associado a uma regionalização de chuvas com características semelhantes para uma melhor definição de áreas de influência das equações de EI_{30} . Apesar da krigagem ser a interpolação mais utilizada no Brasil, outras técnicas geoestatísticas podem ser testadas para indicar qual o melhor modelo para os dados regionalizados dos postos pluviométricos.

Agradecimentos

À Fundação de Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento – FAPED, pela bolsa de incentivo à inovação fornecida ao segundo autor.

À Bibliotecária Enyomara Lourenço Silva da Embrapa Solos UEP Recife, pela normatização bibliográfica.

Aos estagiários Beatriz Regina de Figueiredo e Wilber Antônio Santos da Silva pela diagramação deste trabalho.

Referências

- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; HAGEMANN, S. Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–12, 2017.
- ALMEIDA, C. O. S.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E. G.; ELTZ, F. L. F.; BORGES, L. E. C. Potencial erosivo da chuva de Cuiabá, MT: distribuição e correlação com a precipitação pluviométrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 178–184, 2011a.
- ALMEIDA, C. O. S.; AMORIM, R. S. S.; ELTZ, F. L. F.; COUTO, E. G.; PELISSARI, A. L. Correlação do índice de erosividade (EI_{30}) com o coeficiente de chuvas em Cáceres (MT) e Rondonópolis (MT). 2011. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia, MG. **Anais...** Uberlândia, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011b.
- ALMEIDA, C. O. S.; AMORIM, R. S. S.; ELTZ, F. L. F.; COUTO, E. G.; JORDANI, S. A. Erosividade da chuva em municípios do Mato Grosso: distribuição sazonal e correlações com dados pluviométricos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 142–152, 2012.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANGULO-MARTÍNEZ, M.; BEGUERÍA, S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: a comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). **Journal of Hydrology**, v. 379, n. 1–2, p. 111–121, 2009.
- BACK, A. J.; POLETO, C. Distribuição espacial e temporal da erosividade das chuvas no estado de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 381–403, 2018.
- BARBOSA, A. J. S.; BLANCO, C. J. C.; MELO, A. M. Q. de. Determinação do fator energético da chuva (R) para Belém-PA. 2015. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HIDROSEDIMENTOLOGIA, 1., 2015, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre, RS: IPH, 2015.
- BAZZANO, M. G. P.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A. Erosividade, coeficiente de chuva, padrões e período de retorno das chuvas de Quaraí, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1205–1217, 2007.
- BENAVIDEZ, R.; JACKSON, B.; MAXWELL, D.; NORTON, K. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 11, p. 6059–6086, 2018.
- BERTOL, I. Avaliação da erosividade da chuva na localidade de Campos Novos (SC) no período de 1981-1990. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 9, p. 1453–1458, 1994.
- BERTONI, J.; LOMBARDI-NETO, F. **Conservação do Solo**. 3. ed. São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.
- BORRELLI, P.; ALEWELL, C.; ALVAREZ, P.; ANACHE, J. A. A.; BAARTMAN, J.; BALLABIO, C.; BEZAK, N.; BIDDOCU, M.; CERDÀ, A.; CHALISE, D.; CHEN, S.; CHEN, W.; GIROLAMO, A. M. de; GESSSESSE, G. D.; DEUMLICH, D.; DIODATO, N.; EFTHIMIOU, N.; ERPUL, G.; FIENER, P.; FREPPAZ, M.; GENTILE, F.; GERIQUE, A.; HAREGEWEYN, N.; HU, B.; JEANNEAU, A.; KAFFAS, K.; KIANI-HARCHEGANI, M.; VILLUENDAS, I. L.; LI, C.; LOMBARDO, L.; LÓPEZ-VICENTE, M.; LUCAS-BORJA, M. E.; MÄRKER, M.; MATTHEWS, F.; MIAO, C.; MIKOS, M.; MODUGNO, S.; MÖLLER, M.; NAIPAL, V.; NEARING, M.; OWUSU, S.; PANDAY, D.; PATAULT, E.; PATRICHE, C. V.; POGGIO, L.; PORTES, R.; QUIJANO, L.; RAHDARI, M. R.; RENIMA, M.; RICCI, G. F.; RODRIGO-COMINO, J.; SAIA, S.; SAMANI, A. N.; SCHILLACI, C.; SYRRIS, V.; KIM, H. S.; SPINOLA, D. N.; OLIVEIRA, P. T.; TENG, H.; THAPA, R.; VANTAS, K.; VIEIRA, D.; YANG, J. E.; YIN, S.; ZEMA, D. A.; ZHAO, G.; PANAGOS, P. Soil erosion modelling: a global review and statistical analysis. **Science of the Total Environment**, v. 780, n. 146494, 2021.

CANTALICE, J. R. B.; BEZERRA, S. A.; FIGUEIRA, S. B.; INÁCIO, E. D. S. B.; SILVA, M. D. R. D. O. Linhas isoerosivas do estado de Pernambuco - 1ª Aproximação. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 2, p. 75–80, 2009.

CARVALHO, M. P. E.; LOMBARDI, N. F.; VASQUES, F. J.; CATÂNEO, A. Correlação entre o índice de erosividade El_{30} médio mensal e o coeficiente de chuva do município de Mococa, SP. **Científica: Revista de Agronomia**, v. 19, p. 1–7, 1991.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.

CASSOL, E. A.; ELTZ, F. L. F.; MARTINS, D.; LEMOS, A. M. de; LIMA, V. S. de; BUENO, A. C. Erosividade, padrões hidrológicos, período de retorno e probabilidade de ocorrência das chuvas em São Borja, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1239–1251, 2008.

CASSOL, E. A.; MARTINS, D.; ELTZ, F. L. F.; LIMA, V. S. de; BUENO, A. C. Erosividade e padrões hidrológicos das chuvas de Ijuí (RS) no período de 1963 a 1993. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, n. 3, p. 220–231, 2007.

COLODRO, G.; CARVALHO, M. P.; ROQUE, C. G.; PRADO, R. M. Erosividade da chuva: distribuição e correlação com a precipitação pluviométrica de Teodoro Sampaio (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 809–818, 2002.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. de F.; MARIA, I. C. de. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224–233, 2015.

DELWAULLE, J. C. Résultats de six ans d'observations sur l'érosion au Niger. **Bois et Forêts des Tropiques**, v. 150, p. 15–36, 1973.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **Geostatistical Analyst 10.8**. Redlands, 2020.

FERREIRA, I. C.; SILVA, J. C. L.; FREITAS NETO, L. B.; SANTOS, T. J. L.; CARVALHO, J. C. A. A contribuição e relevância do agronegócio para o Brasil. **Revista CEDS**, v. 2, n. 10, p. 1–21, 2022.

FOURNIER, F. **Climat et érosion: la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques**. Paris: Presses Universitaires de France, 1960. 198 p.

FREITAS NETTO, C. F.; VIRGENS FILHO, J. S.; NEVES, G. L. Análise da erosividade da chuva no estado do Paraná e cenários futuros impactados por mudanças climáticas globais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 404–422, 2018.

GONÇALVES, F. A.; DA SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; DE CARVALHO, D. F.; DA CRUZ, E. S. Índices e espacialização da erosividade das chuvas para o estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 269–276, 2006.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (ed.). **Erosão e conservação dos solos: Conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 17–56.

GUERRA, A. J. T. Ravinas: processo de formação e desenvolvimento. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 20, p. 9–26, 1997.

HICKMANN, C.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A.; COGO, C. M. Erosividade das chuvas em Uruguaiana, RS, determinada pelo índice El_{30} , com base no período de 1963 a 1991. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 825–831, 2008.

- HOYOS, N.; WAYLEN, P. R.; JARAMILLO, Á. Seasonal and spatial patterns of erosivity in a tropical watershed of the Colombian Andes. **Journal of Hydrology**, v. 314, n. 1–4, p. 177–191, 2005.
- HUDSON, N. W. **Soil conservation**. Ithaca: Cornell University Press, 1973. 320 p.
- LAL, R. Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria. **Geoderma**, v. 16, n. 5, p. 389–401, 1976.
- LAL, R. Erodibility and erosivity. In: **Soil and Water Conservation Society (U.S.). Soil erosion research methods**. Ankeny: SWCS, 1988. p. 141–160.
- LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation and Development**, v. 12, n. 6, p. 519–539, 2001.
- LEE, J.-H.; HEO, J.-H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. **Journal of Hydrology**, v. 409, n. 1–2, p. 30–48, 2011.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). **Bragantia**, v. 51, n. 2, p. 189–196, 1992.
- LOPES, P. R. C.; BRITO, L. T. L. Erosividade da chuva no médio São Francisco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, n. 1, p. 129–133, 1993.
- MARQUES, J. J. G. S. M.; ALVARENGA, R. C.; CURTI, N. Erosividade das chuvas da região de Sete Lagoas, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 5, p. 761–768, 1998.
- MARQUES, J. J. G. S. M.; ALVARENGA, R. C.; CURTI, N.; SANTANA, D. P.; SILVA, M. L. N. Índices de erosividade da chuva, perdas de solo e fator erodibilidade para dois solos da região dos cerrados - primeira aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 3, p. 427–434, 1997.
- MARTINS, S. G.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; NORTON, L. D.; FONSECA, S. Rainfall erosivity and rainfall return period in the experimental watershed of Aracruz, in the coastal plain of Espírito Santo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 999–1004, 2010.
- MAZURANA, J.; CASSOL, E. A.; SANTOS, L. C. dos; ELTZ, F. L. F.; BUENO, A. C. Erosividade, padrões hidrológicos e período de retorno das chuvas erosivas de Santa Rosa (RS). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 975–983, 2009.
- MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S.; NORTON, L. D. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, v. 202–203, p. 88–102, 2013.
- MORAIS, L. F. B.; SILVA, V.; NASCHENVENG, C.; HARDON, P. C.; ALMEIDA, J. E. L.; WEBER, O. L. S.; BOEL, E.; DURIGON, V. Índice EI_{30} e sua relação com o coeficiente de chuva do sudoeste do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 339–344, 1991.
- NEARING, M. A.; YIN, S.; BORRELLI, P.; POLYAKOV, V. O. Rainfall erosivity: an historical review. **Catena**, v. 157, p. 357–362, 2017.
- OLIVEIRA, J. P. B.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; ZANETTI, S. S. Espacialização da erosividade das chuvas no Brasil a partir de séries sintéticas de precipitação. **Revista Brasileira de Ciências**, v. 10, n. 4, p. 558–563, 2015.
- OLIVEIRA, J. P. B.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; ZANETTI, S. S.; MOREIRA, M. C. Assessing the use of rainfall synthetic series to estimate rainfall erosivity in Brazil. **Catena**, v. 171, p. 327–336, 2018.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. C.; MEDINA, B. F. A erosividade das chuvas em Manaus (AM). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, p. 235–239, 1990.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. **Índice de erosividade das chuvas na região de Conceição do Araguaia, Pará**. Belém, PA: EMBRAPA-CPATU, 1996. 20 p.

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; SOBRINHO, T. A.; CARVALHO, D. F.; PANACHUKI, E. Spatial variability of the rainfall erosive potential in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 69–79, 2012.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Catena**, v. 100, p. 139–147, 2012.

PANAGOS, P.; BALLABIO, C.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; KLIK, A.; ROUSSEVA, S.; TADIĆ, M. P.; MICHAELIDES, S.; HRABALÍKOVÁ, M.; OLSEN, P.; AALTO, J.; LAKATOS, M.; RYMSZEWICZ, A.; DUMITRESCU, A.; BEGUERÍA, S.; ALEWELL, C. Rainfall erosivity in Europe. **Science of The Total Environment**, v. 511, p. 801–814, 2015.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MATTHEWS, F.; LIAKOS, L.; BEZAK, N.; DIODATO, N.; BALLABIO, C. Global rainfall erosivity projections for 2050 and 2070. **Journal of Hydrology**, v. 610, p. 127865, 2022.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K. A new European slope length and steepness factor (LS-factor) for modeling soil erosion by water. **Geosciences**, v. 5, n. 2, p. 117–126, 2015.

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; YU, B.; KLIK, A.; LIM, K. J.; YANG, J. E.; NI, J.; MIAO, C.; CHATTOPADHYAY, N.; SADEGHI, S. H.; HAZBAVI, Z.; ZABIHI, M.; LARIONOV, G. A.; KRASNOV, S. F.; GOROBETS, A. V.; LEVI, Y.; ERPUL, G.; BIRKEL, C.; HOYOS, N.; NAIPAL, V.; OLIVEIRA, P. T. S.; BONILLA, C. A.; MEDDI, M.; NEL, W.; AL DASHTI, H.; BONI, M.; DIODATO, N.; VAN OOST, K.; NEARING, M.; BALLABIO, C. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. **Scientific Reports**, v. 7, p. 1–12, 2017.

PHAM, T. G.; DEGENER, J.; KAPPAS, M. Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 6, n. 2, p. 99–110, 2018.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.

REBUCCI, L. C. S.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; PERTUSSATTI, C. A.; SOBRINHO, T. A. Erosividade das chuvas no estado de Mato Grosso. 2009. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande, MS. **Anais...** Campo Grande, MS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009. p. 1–7.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; PORTER, J. P. RUSLE: revised universal soil loss equation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 46, n. 1, p. 30–33, 1991.

RENARD, K. G.; FREIMUND, J. R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. **Journal of Hydrology**, v. 157, n. 1–4, p. 287–306, 1994.

RIQUETTI, N. B.; MELLO, C. R.; BESKOW, S.; VIOLA, M. R. Rainfall erosivity in South America: current patterns and future perspectives. **Science of The Total Environment**, v. 724, n. 138315, 2020.

ROQUE, C. G.; CARVALHO, M. P.; PRADO, R. M. Fator erosividade da chuva de Piraju (SP): distribuição, probabilidade de ocorrência, período de retorno e correlação com o coeficiente de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 147–156, 2001.

- RUFINO, R. L.; BISCAIA, R. C. M.; MERTEN, G. H. Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná através da pluviometria: terceira aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, p. 439–444, 1993.
- RUTEBUKA, J.; DE TAEYE, S.; KAGABO, D.; VERDOODT, A. Calibration and validation of rainfall erosivity estimators for application in Rwanda. **Catena**, v. 190, n. 104538, 2020.
- SADEGHI, S. H. R.; MOATAMEDNIA, M.; BEHZADFAR, M. Spatial and temporal variations in the rainfall erosivity factor in Iran. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 13, n. 3, p. 451–464, 2011.
- SANTOS, B. P.; SIQUEIRA, R. A. G.; VILLAR, J. A. A.; FREITAS, M. A. V. Agricultura e irrigação no Brasil no cenário das mudanças climáticas. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável**, v. 1, n. 2, p. 1–10, 2022.
- SARTORI, M.; PHILIPPIDIS, G.; FERRARI, E.; BORRELLI, P.; LUGATO, E.; MONTANARELLA, L.; PANAGOS, P. A linkage between the biophysical and the economic: assessing the global market impacts of soil erosion. **Land Use Policy**, v. 86, p. 299–312, 2019.
- SHAMSHAD, A.; AZHARI, M. N.; ISA, M. H.; HUSSIN, W. M. A. W.; PARIDA, B. P. Development of an appropriate procedure for estimation of RUSLE E_{I30} index and preparation of erosivity maps for Pulau Penang in Peninsular Malaysia. **Catena**, v. 72, n. 3, p. 423–432, 2008.
- SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, v. 57, n. 3, p. 251–259, 2004.
- SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1811–1820, 2009.
- SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; SANTOS, G. R. dos; MARQUES, J. J. G. de S. M.; MENEZES, M. D. de; LEITE, F. P. Avaliação e espacialização da erosividade da chuva no Vale do Rio Doce, Região Centro-Leste do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 1029–1039, 2010.
- SILVA, J. R. C.; DIAS, A. S. A erosividade das chuvas em Fortaleza (CE): II - correlação com o coeficiente de chuva e atualização do fator R no período de 1962 a 2000. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 347–354, 2003.
- SILVA, M. L. N.; FREITAS, P. L. de; BLANCANEUX, P.; CURTI, N. Índices de erosividade das chuvas da região de Goiânia, GO. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 10, p. 977–985, 1997.
- SOUZA, E. de O.; COSTA, M. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. de; GOIS, G. de; MARIANO, G. L.; COSTA, C. E. S.; CORREIA FILHO, W. L. F.; SANTIAGO, D. de B. Estimativa e espacialização da erosividade em mesorregiões climáticas no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. Especial, p. 769–783, 2020.
- STILLHARDT, B.; HERWEG, K.; HURNI, H. **Long-term monitoring of soil erosion and soil and water conservation in Afdeyu, Eritrea (1984-1998)**: Soil erosion and soil and water conservation database. Berne: Centre for Development and Environment, 2002. 120 p.
- TEIXEIRA, D. B. de S.; CECÍLIO, R. A.; MOREIRA, M. C.; PIRES, G. F.; FERNANDES FILHO, E. I. Recent advancements in rainfall erosivity assessment in Brazil: a review. **Catena**, v. 219, n. 106572, 2022.
- TRINDADE, A. L. F.; OLIVEIRA, P. T. S. de; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 12, p. 1918–1928, 2016.

USDA. **Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (for the model with release date of May 20, 2008)**. Washington, D.C., 2008. v. 2, 355 p.

WILLIAMS, J. R. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources**. Oxford, MS: USDA, 1975. p. 118–124. (USDA-ARS Handbook, S-40).

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall-erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains**. Washington, D.C.: USDA, 1965. 47 p. (USDA. Agricultural Handbook 282).

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall-erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington, D.C.: USDA, 1978. 58 p. (USDA. Agricultural Handbook 282).

XAVIER, J. P. de S.; BARROS, A. H. C.; WEBBER, D. C.; ACCIOLY, L. J. de O.; MARQUES, F. A.; ARAÚJO FILHO, J. C. de; SILVA, A. B. da. Estimativa da erosividade da chuva por diferentes métodos e seu impacto na equação universal de perdas de solo, no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 859–875, 2019.

YIN, S.; NEARING, M. A.; BORRELLI, P.; XUE, X. Rainfall erosivity: an overview of methodologies and applications. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 12, p. 1-16, 2017.



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA

