

ESTIMATIVA DA EROSIVIDADE DE CHUVAS NO ESTADO DO PARANÁ PELO MÉTODO DA PLUVIOMETRIA: ATUALIZAÇÃO COM DADOS DE 1986 A 2008

Paulo Cesar Waltrick⁽¹⁾, Marco Aurélio de Mello Machado⁽²⁾, Jeferson Dieckow^{(2)*} e Dalziza de Oliveira⁽³⁾

⁽¹⁾ Secretaria de Educação do Estado do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

⁽²⁾ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Curitiba, Paraná, Brasil.

⁽³⁾ Instituto Agrônomo do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil.

* Corresponding author.

E-mail: jefersondieckow@ufpr.br

RESUMO

Três estimativas de erosividade de chuvas no Estado do Paraná foram feitas nas décadas de 1980-90, mas nenhuma outra depois. Os objetivos deste trabalho foram atualizar, numa quarta estimativa, as informações de erosividade anual das chuvas para o Paraná, com dados pluviométricos de 1986 a 2008; e gerar informações de erosividade mensal para identificar a distribuição temporal da erosividade. Foram utilizados os métodos pluviográfico e pluviométrico de determinação de erosividade. O primeiro serviu para revalidar equações prévias de correlação entre erosividade por pluviografia e por pluviometria, isso feito em três localidades; já o segundo, para calcular o coeficiente de chuva em 114 localidades, utilizando-se dados de precipitação média mensal e anual, e então a erosividade, com as equações de correlação revalidadas. Mapas de erosividade anual e mensal foram gerados por interpolações geoestatísticas. A erosividade variou entre 5.449 e 12.581 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e aumentou no sentido oeste, a partir da região metropolitana de Curitiba; e no sentido sul, a partir do noroeste paranaense. Isso resultou em maiores erosividades nas regiões centro-sul (Guarapuava), centro-ocidental (Campo Mourão), oeste (Cascavel) e, principalmente, sudoeste (Pato Branco). Também houve incremento de erosividade a partir da região metropolitana de Curitiba, no sentido leste, indicando o litoral como outra região crítica em termos de erosividade. A maior erosividade mensal ocorreu em janeiro (média estadual de 1394 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹), seguida por tendência de diminuição até agosto (331 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹), quando então tornou a aumentar. Porém, ocorrem dois importantes repiques de erosividade: um em maio e outro em outubro (843 e 1.173 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹,

Recebido para publicação em 27 de março de 2014 e em 8 de outubro de 2014.

DOI: 10.1590/01000683rbc20150147

respectivamente), principalmente nas regiões sudoeste e oeste. Esses repiques coincidem com períodos de implantação de culturas de inverno ou de verão nessas regiões. Em relação à última estimativa de erosividade anual, feita em 1993, houve aumento da área delimitada pela linha isoerodente de 11.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ nas regiões sudoeste e oeste e um deslocamento das linhas isoerodentes de 7.000 e 8.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ para o sentido leste nas regiões norte pioneiro, centro-oriental e sudeste, sugerindo elevação da erosividade nessas regiões. Tais alterações de erosividade podem estar associadas às eventuais mudanças no clima da região, mas também ao simples fato de este estudo estar considerando maior quantidade de dados em relação aos estudos anteriores. Concluiu-se que as equações de correlação determinadas entre os métodos pluviográfico e pluviométrico, obtidas para o Paraná em trabalhos anteriores, continuam válidas; os meses críticos quanto à erosividade são janeiro, maio e outubro; e as menores erosividades ocorrem nas regiões noroeste e metropolitana do Estado.

Palavras-chave: isoerodentes, geoestatística, EI₃₀.

ABSTRACT: ESTIMATE OF RAINFALL EROSIVITY IN PARANA, BRAZIL, BY THE PLUVIOMETRY METHOD: UPDATING WITH DATA FROM 1986 TO 2008

Three estimates of rainfall erosivity in the State of Parana, Brazil, were carried out in the 1980s and 1990s, but none afterwards. The objectives of this study were to update information, as a fourth estimate, on rainfall annual erosivity for Parana, with rainfall data from 1986-2008; and to generate information on monthly erosivity in order to identify its seasonal distribution. We used the pluviographic and pluviometric methods of erosivity determination. The first served to revalidate previous correlation equations between erosivity by pluviography and by pluviometry, which was performed at three sites. The second served to calculate the rainfall coefficient in 114 sites, using monthly and annual mean pluvial precipitation data, and, after that, erosivity, with revalidated correlation equations. Annual and monthly erosivity maps were generated by geostatistical interpolations. Erosivity ranged from 5,449 to 12,581 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹ and increased in a westerly direction from the Curitiba metropolitan region; and in a southerly direction as of the northwestern region of Parana. That resulted in greater erosivity in the south-central (Guarapuava), west-central (Campo Mourão), west (Cascavel) and, mainly, southwest (Pato Branco) regions. There was also an increase in erosivity from the Curitiba metropolitan region to the east, which indicated the Atlantic Coast as another critical region in terms of erosivity. The highest monthly erosivity occurred in January (average of 1,394 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ month⁻¹ statewide), followed by a trend to decrease until August (331 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ month⁻¹), at which time it increased once more. However, there are two important intermediate peaks in erosivity: one in May and another in October (843 and 1,173 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ month⁻¹, respectively), mainly in the southwest and west regions. Those two intermediate peaks coincide with periods of winter or summer crop establishment in those regions. Compared to the last annual erosivity estimate, carried out in 1993, the area delimited by the isoerodent line of 11,000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹ in the southeast and west regions increased, and the isoerodent lines of 7,000 and 8,000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹ advanced towards the east in the "pioneering" north, east-central, and southeast regions, suggesting an increase in erosivity in those regions. Such changes in erosivity may be associated with climate changes in the region, but also with the simple fact that the current study is considering a larger amount of data compared to previous studies. We conclude that correlation equations determined between the pluviographic and pluviometric methods of erosivity obtained for Parana in previous studies are still valid. The critical months with respect to erosivity are January, May, and October; and the lowest erosivities occur in the northwest and metropolitan regions of the State.

Keywords: isoerodents, geostatistics, EI₃₀.

INTRODUÇÃO

As estimativas de perda de solo por erosão hídrica e a quantificação de fatores que a influenciam são importantes subsídios na definição de melhores estratégias de uso e manejo do solo em dada região (Silva, 2004; Carvalho et al., 2005). A equação universal de perdas de solo (USLE), bem como

sua versão revisada (RUSLE), estima perdas médias anuais de solo a partir da erosividade da chuva, erodibilidade do solo, comprimento e declividade da encosta, uso e manejo do solo e práticas conservacionistas (Renard et al., 1997; Mello et al., 2006). Entre esses fatores, erosividade (R) é a capacidade potencial da chuva em causar erosão (Hudson, 1995) e, por ser dependente do

clima, varia de uma região para outra. Conhecer a erosividade e sua variabilidade espacial subsidia a tomada de decisão sobre qual a melhor estratégia de uso e manejo de solo para dada região ou gleba com suas particularidades de solo e topografia, bem como de adoção de práticas conservacionistas de suporte, como cultivo em nível e terraceamento, para que perdas de solo por erosão sejam mínimas (Cogo et al., 2003; Hickmann et al., 2008). Em planos de recuperação de áreas degradadas, a erosividade é informação-chave. Além disso, erosividade pode subsidiar políticas públicas permitindo a alocação de recursos financeiros para a conservação do solo, prioritariamente a regiões mais críticas (Oliveira et al., 2011; Rodrigues et al., 2011).

A determinação do fator R da USLE necessita de pelo menos 20 anos de séries históricas de precipitação e o EI_{30} é um dos parâmetros mais utilizados para a quantificação da erosividade, sendo o produto entre energia cinética da chuva (E) e sua maior intensidade num período contínuo de 30 min (I_{30}) (Wischmeier e Smith, 1958, 1978). Existem outros parâmetros, mas no Brasil o EI_{30} é o que apresenta melhor correlação com perda de solo (Lombardi Neto, 1977; Morais et al., 1988; Carvalho et al., 1989; Silva et al., 2010; Eltz et al., 2011).

O Paraná é o segundo maior produtor nacional de grãos (IBGE, 2013) e, para manter ou melhorar essa posição, depende muito da qualidade do manejo e da conservação do solo. Visando melhorar a modelagem matemática de perdas de solo por erosão, até este momento foram realizadas três estimativas de erosividade média anual para esse Estado, utilizando o parâmetro EI_{30} . A primeira foi feita por Castro Filho et al. (1982), ao desenvolver uma equação geral de determinação do EI_{30} a partir do método de Wilkinson (1975), que considera a precipitação total e I_{30} da chuva. A determinação da equação geral de Castro Filho et al. (1982) foi com base em dados pluviométricos obtidos em cinco locais (Londrina, Ponta Grossa, Paranavaí, Umuarama e Bela Vista do Paraíso), em séries históricas de três a cinco anos, entre 1975 e 1980.

A segunda estimativa de erosividade para o Estado foi feita por Rufino (1986), que utilizou a mesma equação geral de Castro Filho et al. (1982), mas com uma ampliação de dados pluviométricos para 31 locais até o ano de 1984, incluindo séries históricas de quatro a 13 anos. Com maior número de locais em relação ao trabalho de Castro Filho et al. (1982), Rufino (1986) gerou um mapa de erosividade com sete linhas isoerodentes, abrangendo todo o Estado do Paraná.

Tanto a primeira quanto a segunda estimativa de erosividade para o Paraná se basearam no método-padrão de determinação do EI_{30} , ou seja, o pluviográfico, com análise de pluviogramas diários para determinado período de tempo (Wischmeier e Smith, 1978). Porém, esse método

de determinação se torna extremamente lento e trabalhoso, além de que só pode ser aplicado para localidade que disponha de registros pluviográficos, normalmente muito mais escassos. Uma alternativa ao método pluviográfico é a utilização do método pluviométrico, pois dados de pluviômetros são mais simples de serem obtidos e possuem séries históricas longas na maioria das localidades brasileiras (Rufino et al., 1993; Moreti et al., 2003; Carvalho et al., 2005; Gonçalves et al., 2006; Peñalva Bazzano et al., 2007; Cassol et al., 2008; Mazurana et al., 2009). No entanto, para a utilização do método pluviométrico, há necessidade de uma equação de correlação com o método pluviográfico, que foi apresentada por Rufino et al. (1993).

Após utilizar o mesmo método pluviográfico empregado na segunda estimativa e considerando os mesmos 31 locais, porém com ampliação de dados pluviométricos para o período de 1972-1989, Rufino et al. (1993), numa terceira estimativa, dividiram o Estado em oito regiões e para cada uma delas determinaram uma equação de correlação entre EI_{30} , definido pelo método pluviográfico e o coeficiente de relação da chuva (R_c), obtido a partir da precipitação média mensal e precipitação média anual. Com essas oito equações de correlação, foi possível incorporar ao mapa de isoerodentes do Estado mais 144 locais, que dispunham somente de dados de pluviômetro e, com isso, estimar com melhor precisão a erosividade nas diferentes regiões.

Considerando que essas três estimativas de erosividade foram feitas para um período de praticamente uma década, e que nenhuma outra atualização tenha sido feita nas duas décadas seguintes à publicação do trabalho de Rufino et al. (1993), e levando em conta possíveis mudanças na precipitação durante esse período no sul do Brasil (Alexander et al., 2006; Marengo e Valverde 2007; Sansigolo e Kayano 2010; Back et al., 2013), é possível que alterações na erosividade também tenham ocorrido no Paraná.

Normalmente, mapas de isoerodentes apresentam somente a erosividade média anual. Apesar da utilidade dessa informação para uma análise da variação espacial da erosividade e identificação de regiões geográficas críticas, ela não serve para identificar períodos críticos ao longo dos meses do ano. Mapas com informações mensais de erosividade passam então a ter importância significativa, pois cruzando essas informações com aquelas de ciclo de culturas é possível identificar as situações mais críticas em termos de erosividade e manejo agrícola para dada região.

Os objetivos deste trabalho foram atualizar, numa quarta estimativa, as informações de erosividade anual das chuvas para o Estado do Paraná, utilizando-se dados pluviométricos de 1986 a 2008; e gerar informações de erosividade mensal para identificar a distribuição temporal da erosividade.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e características climáticas do Estado do Paraná

O trabalho incluiu todo o território paranaense, localizado entre 22° 29' 30" e 26° 43' 00" de latitudes sul e 48° 05' 37" e 54° 37' 08" de longitudes oeste. Segundo a classificação de Köppen, o clima do estado compreende os tipos Cfa (subtropical), nas regiões norte, oeste, sudoeste e litoral; e Cfb (temperado), predominantemente nas porções sul e sudeste do estado (Caviglione et al., 2000).

Determinação da erosividade por pluviometria

Foram selecionados 114 locais que possuíam séries históricas completas de precipitação pluvial para o período de 01/01/1986 a 31/12/2008. As estações pluviométricas nesses locais pertencem ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), ou ao Instituto Tecnológico SIMEPAR, ou ao Instituto de Águas do Paraná.

A erosividade foi estimada pelo método pluviométrico. Como esse não é o método-padrão, mas sim o pluviográfico (Silva e Dias, 2003), foram empregadas as oito equações de correlação entre esses dois métodos obtidas por Rufino et al. (1993), para as diferentes regiões do Estado do Paraná. Tais equações permitiram o cálculo do EI_{30} para cada mês e para cada ano entre 1986 e 2008. A erosividade média anual (R) em cada local foi dada pela média dos valores de EI_{30} anuais da série.

Nas equações de Rufino et al. (1993), a variável independente é o coeficiente de relação da chuva (R_c), calculado pela equação 1, adaptada por Lombardi Neto (1977):

$$R_c = p^2/P \quad (1)$$

em que p é a precipitação pluvial média mensal (mm); e P , a precipitação pluvial média anual (mm).

Revalidação das equações de correlação de Rufino et al. (1993)

Após a determinação da erosividade pelo método pluviométrico nos 114 locais, três locais assistidos por pluviógrafo foram selecionados para determinar a erosividade também pelo método pluviográfico (Silva e Dias, 2003). Por regressão linear, foram comparados os resultados de erosividade média mensal por ambos os métodos para verificar se as equações de correlação de Rufino et al. (1993) continuam válidas para o período deste estudo (1986 a 2008). Os critérios de escolha dessas três localidades foram: apresentar a maior alteração positiva de erosividade, a maior alteração negativa de erosividade e a menor alteração de erosividade em relação à última estimativa (terceira), feita por Rufino et al. (1993).

A obtenção do parâmetro EI_{30} no método pluviográfico foi feita pela equação geral proposta por Castro Filho et al. (1982):

$$EI = [28,814 + (10,800 + 7,896 \log I_{30})] P \times I_{30} \times 10^{-3} \quad (2)$$

em que I_{30} é a quantidade máxima de chuva que ocorre no intervalo de 30 min, expressa em mm h^{-1} ; e P , a precipitação total da chuva, em mm. O somatório dos valores de EI_{30} de cada chuva erosiva de um dado mês gerou o respectivo EI_{30} mensal, e o somatório desse ao longo de um ano, o EI_{30} anual. A média anual desse parâmetro, considerando a mais longa série histórica de dados de pluviografia disponível, correspondeu à erosividade média anual (R) (Dias e Silva, 2003).

As chuvas foram consideradas independentes com base nos critérios propostos por Wischmeier e Smith (1965), modificado por Cabeda (1976); ou seja, foram independentes quando separadas por um intervalo mínimo de 6 h com precipitação inferior a 1 mm. Foram consideradas erosivas a partir de um volume total precipitado superior a 10 mm, ou quando foram iguais ou superiores a 6 mm, em um período máximo de 15 min.

Análise geoestatística

As análises descritivas e geoestatísticas, bem como a produção de mapas de isoerodentes, foram realizadas utilizando o programa estatístico R (R. Development Core Team, 2008) e o pacote geoR (Ribeiro Júnior e Diggle, 2001). Inicialmente, foi elaborada uma planilha contendo localização geográfica (UTM), pluviometria e erosividades médias mensais e anuais dos 114 locais. Os dados foram submetidos à análise exploratória para verificar a condição de normalidade e determinar as variáveis estatísticas descritivas, como os valores máximo, mínimo, médio e de mediana. Para a espacialização da erosividade, foram utilizadas técnicas de interpolação geoestatísticas, que são mais eficazes por considerarem a existência de forte dependência espacial (Mello et al., 2007). Para o ajuste do semivariograma, foi aplicado o modelo *matern* do pacote estatístico geoR, pois esse foi o que melhor se ajustou à forma da curva gerada a partir dos pontos. O procedimento de ajuste não é automático e depende do usuário para fazer um primeiro ajuste e verificar se o modelo é adequado ou não, podendo ser redefinido até que se obtenha um modelo satisfatório. Esse semivariograma ajustado fornece apenas os valores iniciais para o bom ajuste que se espera pelo método da máxima verossimilhança, que não se baseia nos pontos do semivariograma e sim nas diferenças dos pares de pontos. Depois do ajuste do semivariograma e da verificação da dependência espacial dos dados avaliados, foi utilizada a krigagem ordinária para interpolar os valores de erosividade para a área de estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Revalidação das equações de correlação de Rufino et al. (1993)

Os três locais escolhidos para revalidar, para o período de 1986 a 2008, as equações de correlação propostas por Rufino et al. (1993) para estimar a erosividade pelo método pluviométrico foram: Planalto, que apresentou a maior alteração positiva (+1.238 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹); Paranavaí, que demonstrou a maior alteração negativa (-618 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹); e Umuarama, que praticamente não sofreu alteração (+19 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹) em relação à última atualização da erosividade para o Estado, feita no mesmo trabalho de Rufino et al. (1993).

Nos três locais, o coeficiente de correlação entre a erosividade média mensal obtida pelo método pluviográfico (dados extraídos de pluviogramas) e erosividade obtida pelo método pluviométrico [equações de Rufino et al. (1993)] foi igual ou superior a 0,92 (Figura 1). Esse alto coeficiente de correlação confirma que as equações propostas por Rufino et al. (1993) continuam válidas para obtenção da erosividade pelo método pluviométrico com a utilização de dados de 1986 a 2008. Isso permite, portanto, a utilização dos dados pluviométricos da rede de 114 estações, melhorando a cobertura do território do Estado na estimativa da erosividade. Alta correlação entre o método pluviométrico e pluviográfico também foi encontrada para a região de Santa Rosa, no Rio Grande do Sul (Mazurana et al., 2009).

Variação espacial da erosividade da chuva

A erosividade anual, em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, variou consideravelmente entre os 114 locais, desde um valor mínimo de 5.449, em Piraquara, até um máximo de 12.581, em Ampère (Quadro 1). Com a interpolação desses resultados de erosividade, foi gerado o novo mapa de isoerodentes para o Paraná (Figura 2).

Houve incremento de erosividade no sentido oeste, a partir da região metropolitana de Curitiba, localizada no Primeiro Planalto, e que avança para o Segundo e desse para o Terceiro (Figura 2). Também houve incremento no sentido norte-sul, a partir do noroeste paranaense (Figura 2). A resultante desses dois sentidos de incremento faz com que as regiões centro-sul (Guarapuava), centro-ocidental (Campo Mourão), oeste (Cascavel) e, principalmente, sudoeste (Pato Branco) tenham os maiores índices de erosividade, superando 9.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, e sejam as mais críticas em termos de potencial da chuva para causar erosão. Essas regiões são também aquelas que apresentam os maiores valores de precipitação anual no Estado, com algumas partes superando 2.000 mm (Caviglione et al., 2000).

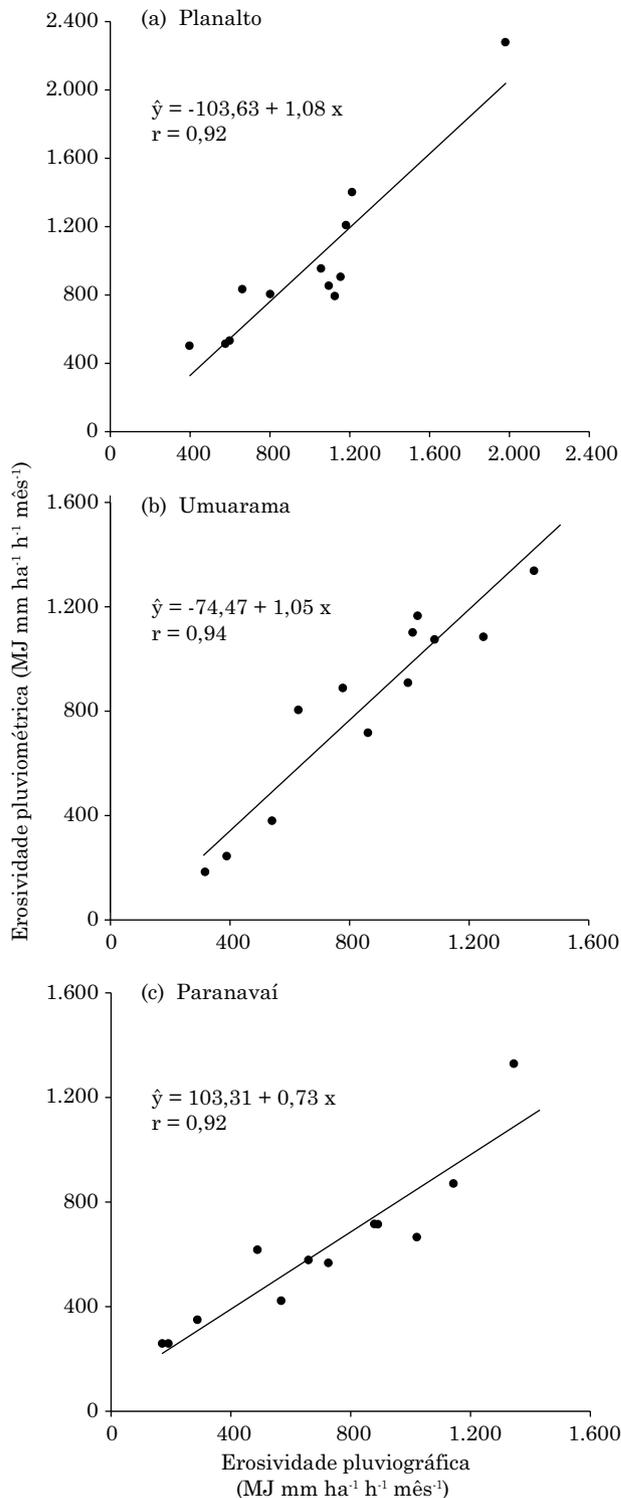


Figura 1. Correlação entre erosividade média mensal das chuvas obtida pelo método pluviográfico (dados extraídos de pluviogramas) e pelo pluviométrico [equações de Rufino et al. (1993)] em (a) Planalto, (b) Umuarama e (c) Paranavaí, no Estado do Paraná, para dados do período de 1986 a 2008. Cada ponto corresponde à erosividade média mensal.

Quadro 1. Erosividade média anual (R) das chuvas, para 114 locais do Estado do Paraná, estimada com dados pluviométricos do período 1986-2008

Nº	Localidade	R	Nº	Localidade	R	Nº	Localidade	R
		MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹			MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹			MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹ ano ⁻¹
1	Adrianópolis	6368	39	General Carneiro	8670	77	Pato Branco	11861
2	Alto Piquiri	10312	40	Goioerê	10645	78	Pinhão	9843
3	Altonia	10084	41	Grandes Rios	10014	79	Piraquara	5449
4	Ampére	12581	42	Guairá	10509	80	Pitanga	8819
5	Andirá	7544	43	Guaraniaçu	12384	81	Planalto	11571
6	Antonina	11088	44	Guarapuava	9140	82	Ponta Grossa	6790
7	Arapongas	7880	45	Guaraqueçaba	10613	83	Porecatu	8257
8	Assis Chateaubriand	10982	46	Ibiporã	8531	84	Porto Amazonas	6739
9	Bandeirantes	7529	47	Inácio Martins	8753	85	Porto Vitória	8557
10	Barbosa Ferraz	9264	48	Irati	7442	86	Prudentópolis	8586
11	Barracão	12412	49	Iretama	11456	87	Quedas do Iguaçu	12173
12	Bela Vista do Paraíso	8611	50	Itapejara do Oeste	11463	88	Realeza	10719
13	Bituruna	8669	51	Ivaiporã	9682	89	Rio Branco do Sul	6001
14	Bocaiúva do Sul	6194	52	Ivaí	7077	90	Rio Negro	6810
15	Cambará	7520	53	Jaguariaíva	6657	91	Roncador	11906
16	Campina da Lagoa	11461	54	Janiópolis	10762	92	Salto do Lontra	11712
17	Campo Largo	6104	55	Joaquim Távora	6771	93	Santa Fé	7415
18	Campo Mourão	10430	56	Lapa	6578	94	Santa Helena	11261
19	Cândido de Abreu	7281	57	Laranjeiras do Sul	9687	95	Santa Izabel Ivaí	6683
20	Capanema	10984	58	Londrina	7945	96	Santa Izabel do Oeste	11573
21	Cascavel	11588	59	Mallet	7068	97	São Jerônimo da Serra	8489
22	Castro	5627	60	Mamborê	11492	98	São José dos Pinhais	8777
23	Cerro Azul	5959	61	Mandirituba	5670	99	São Mateus Sul	7090
24	Céu Azul	12121	62	Manoel Ribas	10761	100	São Miguel do Iguaçu	10701
25	Cianorte	9713	63	Mariluz	9663	101	Tapejara	9429
26	Clevelândia	9614	64	Maringá	7664	102	Telêmaco Borba	7102
27	Corbélia	12088	65	Mariópolis	11651	103	Terra Roxa	10415
28	Coronel Vivida	10880	66	Matelândia	11531	104	Tibagi	7007
29	Cruz Machado	9058	67	Morretes	8550	105	Tijucas do Sul	6377
30	Cruzeiro do Oeste	10026	68	Nova Cantu	12018	106	Toledo	10623
31	Curitiba	5937	69	Nova Fátima	7698	107	Tomazina	7089
32	Dois Vizinhos	11864	70	Palmas	9842	108	Tuneiras do Oeste	10126
33	Entre Rios	10495	71	Palmeira	6022	109	Ubiratã	10910
34	Fênix	8948	72	Palmital	12164	110	Umuarama	10313
35	Fernandes Pinheiro	7024	73	Palotina	10436	111	União da Vitória	8274
36	Formosa do Oeste	10286	74	Paranacity	6563	112	Verê	12408
37	Foz do Iguaçu	11037	75	Paranaguá	9064	113	Vitorino	12023
38	Francisco Beltrão	11896	76	Paranavaí	7340	114	Xambrê	9364

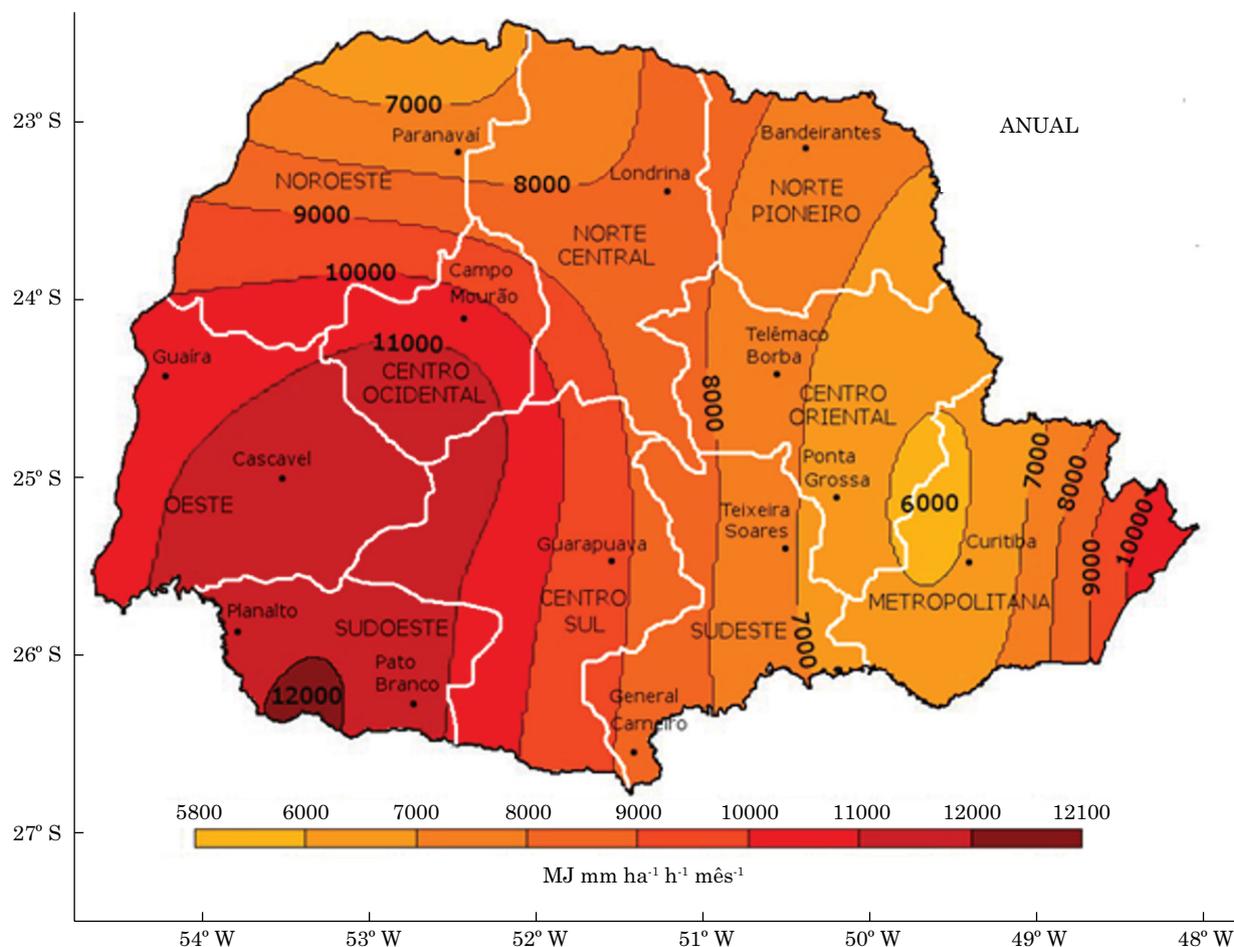


Figura 2. Mapa das linhas isoerodentes anuais para o Estado do Paraná. Estimativa atualizada com dados de 1986 a 2008 e valores médios anuais. A subdivisão de fundo corresponde às mesorregiões geográficas do IBGE.

Segundo Zipser et al. (2006), a região que engloba o sudoeste do Paraná, oeste de Santa Catarina, noroeste do Rio Grande do Sul, nordeste da Argentina e sudeste do Paraguai é uma das regiões do globo onde ocorrem as mais fortes tempestades. O principal sistema meteorológico que contribui para a formação dessas tempestades e para a elevada precipitação anual na região são os complexos convectivos de mesoescala (CCM), constituídos de espessa cobertura de nuvens frias com forma aproximadamente circular e com diâmetro na ordem de centenas de km, que duram no mínimo 6 h (Grimm, 2009). Os CCM ocorrem geralmente à tarde e início da noite, quando as primeiras células de chuva convectiva se desenvolvem e quando as condições à convecção são favoráveis, como topografia, umidade e fonte de calor localizada (Silva Dias et al., 2009). A frequente formação dos CCM nessa região ocorre em razão do jato de baixos níveis (JBN), que transporta calor e umidade da Amazônia pelo corredor topográfico imposto pela cordilheira dos Andes, que tem como saída a Bacia

do Prata. Os CCM perdem força ao se dissiparem sobre os planaltos paranaenses e conseqüentemente a intensidade da precipitação diminui, o que pode explicar a maior erosividade na região sudoeste do Estado e sua diminuição nos sentidos norte e leste.

Frentes frias também contribuem para a intensa e elevada precipitação na região sudoeste do Paraná e têm como características principais a diminuição da temperatura, o aumento da pressão atmosférica e os ventos de sul. Essas frentes frias se deslocam com trajetória de sudoeste para nordeste (Rodrigues et al., 2004) e quando encontram o ar quente e úmido sobre o sudoeste do Paraná ocorre forte e excessiva precipitação (Cavalcanti e Kousky, 2009).

A maior erosividade no litoral em relação à região metropolitana de Curitiba pode ser explicada pelo aquecimento diferenciado entre continente e oceano. Esse gradiente de temperatura origina uma célula de circulação que carrega calor e umidade para o continente, causando forte e elevada precipitação

e erosividade, no litoral (Rebiota et al., 2010). O efeito orográfico da serra do Mar que se apresenta como barreira para os ventos quentes e úmidos de superfície vindos do oceano também faz aumentar a precipitação na região, mas, como é melhor distribuída, a erosividade diminui. O arrefecimento no primeiro planalto na região de Curitiba reduz a intensidade da precipitação e consequentemente a erosividade.

Mudanças na erosividade da chuva no longo prazo

De maneira geral, os padrões de variação espacial da erosividade observados neste estudo, com chuvas mais erosivas nas regiões centro-sul, centro-ocidental, oeste, sudoeste e litoral, não diferiram daqueles observados há duas décadas por Rufino et al. (1993), na terceira e última estimativa de erosividade para o Estado. No entanto, duas importantes alterações na posição de linhas isoerodentes foram observadas em relação ao trabalho anterior. A primeira foi o aumento da área delimitada pela linha isoerodente de 11.000, nas regiões sudoeste e oeste (Figura 2), sugerindo aumento da erosividade nessas. A segunda foi um deslocamento das linhas isoerodentes de 7.000 e 8.000 para o sentido leste nas regiões norte pioneiro (Bandeirantes), centro-oriental (Telêmaco Borba, Ponta Grossa) e sudeste (Teixeira Soares), também sugerindo aumento da erosividade.

Alterações no clima podem ter contribuído para o aumento da área de abrangência da isolinha 11.000 e o deslocamento das isolinhas 7.000 e 8.000. No período de 1913 a 2006, foi observado na região Sul do Brasil aumento na temperatura mínima sazonal de 1,5 °C no outono, de 1,8 °C no inverno e na primavera e de 1,9 °C no verão (Sansigolo e Kayano, 2010). Alexander et al. (2006) encontraram para o período de 1960 a 2000 tendência de aumento no número de noites e dias quentes e redução no número

de noites e dias frios na região Sul do Brasil. Nessa mesma região e período, esses autores também identificaram aumento na precipitação, indicando a relação entre o aquecimento e a precipitação. Resultado similar foi encontrado por Back et al. (2013), no Vale do Rio do Peixe, SC, no período de 1970 a 2010. Pequenas alterações na temperatura média global podem causar grandes perturbações como aumento do nível do mar, ondas de calor e frio, fortes e frequentes tempestades de chuva, neve e furacões (Marengo, 2001, 2007; IPCC, 2007).

No entanto, alterações nos valores de erosividade também podem estar relacionadas ao simples fato de este estudo estar considerando um volume maior de dados de precipitação e usando técnicas geoestatísticas, que são mais eficazes na interpolação de fatores com forte dependência espacial, como erosividade, em relação aos estudos anteriores. Foram utilizados dados de 23 anos de séries completas de precipitação, atendendo o requisito da (R)USLE de um período mínimo de 20 anos.

Erosividade mensal da chuva

A erosividade da chuva no Paraná possui considerável variação temporal ao longo dos meses do ano. Em média, a maior erosividade ocorre em janeiro (média estadual de 1.394 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹), seguida por tendência geral de diminuição até agosto (331 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹), quando então torna a aumentar até janeiro do ano seguinte (Figura 3). Porém, nessa tendência geral de variação, existem dois importantes repiques de erosividade: um em maio (843 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹) e outro em outubro (1.173 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ mês⁻¹), este sendo o segundo mês mais erosivo (Figura 3). Esses resultados de erosividade e sua variação ao longo do ano estão associados com o regime de precipitação e se expressam principalmente nas regiões sudoeste e oeste (Figura 4e,j).

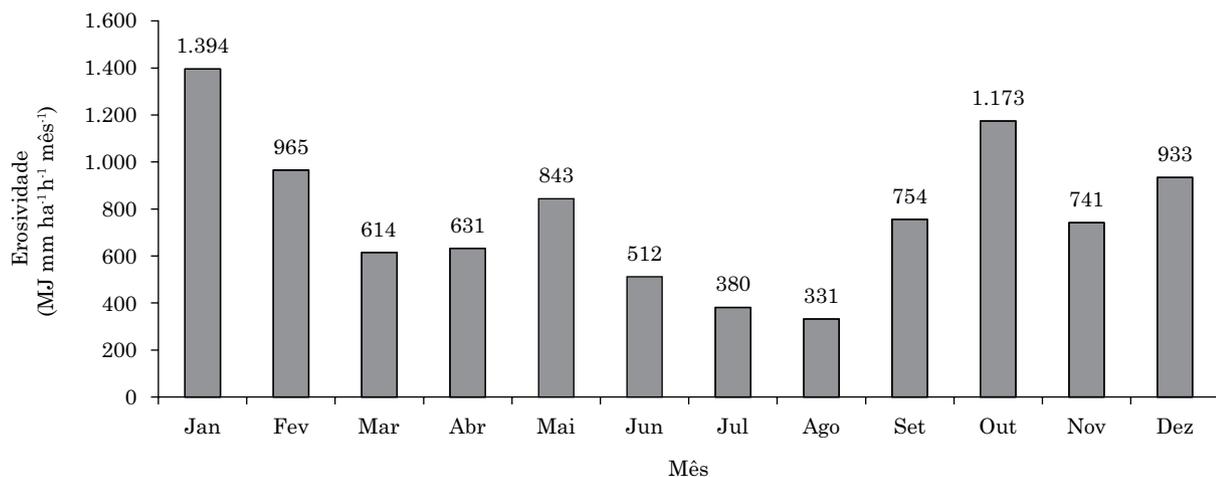


Figura 3. Erosividade média mensal das chuvas do Estado do Paraná, considerando dados de precipitação pluvial de 114 locais, para o período de 1986 a 2008.

A menor erosividade em agosto está associada com o deslocamento do jato subtropical (JS) das latitudes paranaenses para maiores latitudes, no Rio Grande do Sul, diminuindo assim a precipitação. O JS é uma corrente de ar de alto nível em forma de um estreito cano quase horizontal que se desloca de oeste para leste; esse possui centenas de km de largura e aparece geralmente acima de 13 km de altitude na faixa de latitude que vai de 20° S a 40° S, dependendo da estação do ano (Escobar, 2009). Considerando a incidência de baixa erosividade com

o pleno desenvolvimento vegetativo e de cobertura do solo das culturas e pastagens de inverno durante o mês de agosto, é possível inferir que, de maneira geral, esse é o período menos crítico em termos de risco de erosão no Estado.

Em setembro, ao final do inverno, o JS retorna para as latitudes paranaenses, aumentando a precipitação; em outubro, é intensificado com o JBN, levando a formação dos CCM, explicados anteriormente (Grimm, 2009). Esses sistemas atmosféricos sazonais somados aos ciclones e frentes

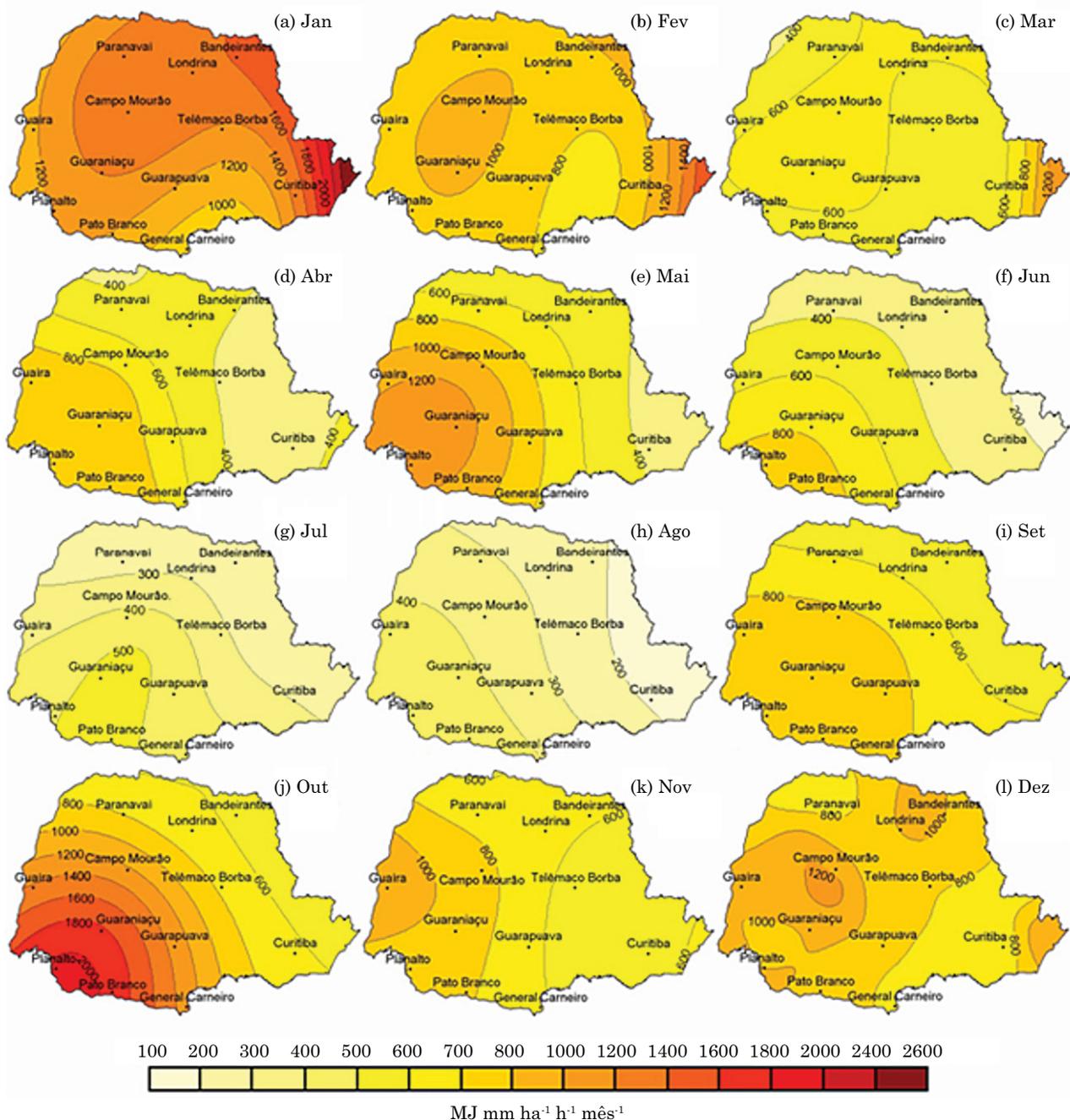


Figura 4. Estimativa da erosividade média mensal das chuvas para o Estado do Paraná.

frias que atingem a região aumentam a precipitação em outubro e explicam o repique de erosividade para esse mês. A partir de abril e culminando em maio, outro mês com valores elevados de erosividade, o fenômeno se repete com a aproximação do JS e a consequente formação de CCM, com o calor e a umidade transportada da Amazônia pelo JBN.

Os repiques de erosividade da chuva observados em outubro e maio nas regiões oeste e sudoeste podem ser considerados como os mais críticos no Estado, pois ocorrem em períodos de implantação das culturas de verão, no caso de outubro, e de inverno, no caso de maio, quando há menor cobertura vegetal sobre o solo. Essa combinação de alta erosividade com menor cobertura vegetal aumenta consideravelmente o potencial de erosão hídrica, principalmente se o preparo do solo foi com base num sistema convencional. A adoção de práticas conservacionistas de suporte e o manejo adequado do solo são fundamentais para superar este período crítico de alta erosividade.

Em novembro, o JS se afasta do Paraná, os sistemas atmosféricos se estabilizam, a precipitação normaliza e a erosividade diminui. Em dezembro, a precipitação torna a aumentar e atinge o pico em janeiro, em razão do regime de chuvas de verão, associado ao sistema de monções sul-americano (Grimm, 2009). Durante o verão, o aquecimento da superfície e o aumento de umidade para dentro do continente tendem a instabilizar a atmosfera, produzindo mais precipitação (Grimm, 2009).

A alta erosividade registrada em janeiro, apesar de ocorrer em praticamente todo o Estado, não é tão crítica quanto à de outubro nas regiões sudoeste e oeste, pois ocorre num período em que a maioria das culturas de verão está em pleno desenvolvimento vegetativo e com isso propiciam maior cobertura vegetal do solo. Porém, para a região do litoral, onde a erosividade supera $2.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$, a situação é considerada crítica, especialmente para cultivos como mandioca e olerícolas, importantes na região (Ipardes, 2013), mas com baixo índice de cobertura do solo.

CONCLUSÕES

As equações lineares propostas por Rufino et al. (1993), utilizadas para estimar a erosividade da chuva pelo método pluviométrico, continuam válidas.

As chuvas nas regiões sudoeste, oeste, norte pioneiro, centro-oriental e sudeste paranaense estão mais erosivas em relação à última estimativa feita por Rufino et al. (1993). Para as demais regiões, a erosividade não foi alterada.

As regiões mais críticas em termos de erosividade média anual das chuvas são a sudoeste, oeste e litoral.

Os meses de maior erosividade média mensal são: janeiro, maio e outubro.

À medida que os sistemas atmosféricos como os CCM e as frentes frias que causam intensa precipitação se afastam da sua origem e perdem força, a precipitação se distribui melhor reduzindo a erosividade na direção norte do Estado e na região de Curitiba.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), ao Instituto Tecnológico SIMEPAR e ao Instituto de Águas do Paraná, pelo fornecimento dos dados, sem os quais este trabalho não teria sido possível.

REFERÊNCIAS

- Alexander LV, Zhang X, Peterson TC, Caesar J, Gleason B, Tank AK, Haylock M, Collins, D, Trewin, B, Rahimzadeh, F, Tagipour, A, Ambenje, P, Rupa Kumar, K, Revadekar, J, Griffiths, G, Vincent, L, Stephenson, D, Burn, J, Aguilar, E, Brunet, M, Taylor, M, New, M, Zhai, P, Rusticucci, M, Vazquez-Aguirre, JL. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res.* 2006;111:1-22.
- Back AJ, Della Bruna E, Dalbo MA. Mudanças climáticas e a produção de uva no vale do Rio do Peixe-SC. *R Bras Frutic.* 2013;35:159-69.
- Cabeda MSV. Computation of storm EI value. West Lafayette: Purdue University; 1976.
- Carvalho DF, Montebeller CA, Franco EM, Valcarcel R, Bertol I. Padrões de precipitação e índices de erosividade para as chuvas de Seropédica e Nova Friburgo, RJ. *R Bras Eng Agríc Amb.* 2005;9:7-14.
- Carvalho MP, Lombardi Neto F, Vasques Filho J, Cataneo A. Índices de erosividade da chuva correlacionados com as perdas de um Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico textura argilosa de Mococa (SP): Primeira aproximação do fator erodibilidade do solo. *R Bras Ci Solo.* 1989;13:237-42.
- Cassol EA, Eltz FLF, Martins D, Lemos AM, Lima VS, Bueno AC. Erosividade, padrões hidrológicos, período de retorno e probabilidade de ocorrência das chuvas em São Borja, RS. *R Bras Ci Solo.* 2008;32:1239-51.
- Castro Filho C, Cataneo A, Biscaglia RCM. Utilização da metodologia de Wilkinson para cálculo do potencial erosivo das chuvas em cinco localidades do Paraná. *R Bras Ci Solo.* 1982;6:240-1.
- Cavalcanti IFA, Kousky VE. Frente frias sobre o Brasil. In: Cavalcanti IFA, Ferreira NJ, Justi da Silva MGA, Silva Dias MAF, editores. *Tempo e clima no Brasil.* São Paulo: Oficina de Textos; 2009. p.135-47.
- Cavaglione JH, Kiihl LRB, Caramori PH, Oliveira D, Galdino J, Borrozino E, Giacomini CC; Sonomura, MGY, Pugsley, L. *Cartas Climáticas do Estado do Paraná [CD-ROM].* Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná; 2000.

- Cogo NP, Levien R, Schwarz RA. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. *R Bras Ci Solo*. 2003;27:743-53.
- Dias AS, Silva JRC. A erosividade das chuvas em Fortaleza (CE): I - Distribuição, probabilidade de ocorrência e período de retorno - 1ª aproximação. *R Bras Ci Solo*. 2003;27:335-45.
- Eltz FLF, Cassol EA, Pascotini PB. Potencial erosivo e características das chuvas de Encruzilhada do Sul, RS. *R Bras Eng Agríc Amb*. 2011;15:331-7.
- Escobar G. Jatos de altos níveis. In: Cavalcanti IFA, Ferreira NJ, Justi da Silva MGA, Silva Dias MAF, editores. *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos; 2009. p.127-34.
- Gonçalves FA, Silva DD, Pruski FF, Carvalho DF, Cruz ES. Índices e espacialização da erosividade das chuvas para o estado do Rio de Janeiro. *R Bras Eng Agríc Amb*. 2006;10:269-76.
- Grimm AM. Clima na Região Sul. In: Cavalcanti IFA, Ferreira NJ, Justi da Silva MGA, Silva Dias MAF, editores. *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos; 2009. p.259-75.
- Hickmann C, Eltz FLF, Cassol EA, Cogo C.. Erosividade das chuvas em Uruguaiana, RS, determinada pelo índice EI30, com base no período de 1963 a 1991. *R Bras Ci Solo*. 2008;32:825-31.
- Hudson N. *Soil conservation*. 3rd ed. Ames: Iowa State University Press; 1995.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola: Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. *Levant Sist Prod Agríc*. 2013;26:1-84.
- Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social - IPARDES. *Caderno Estatístico Municipal* [internet]. 2013 [acesso em 15 nov 2013]. Disponível em: http://www.ipardes.gov.br/index.php?pg_conteudo=1&cod_conteudo=30.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. *Climate Change 2007: The physical science basis summary for policymakers contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2007. Cambridge (UK): Cambridge University Press; 2007.
- Lombardi Neto F. *Rainfall erosivity - its distribution and relationship with soil loss at Campinas, Brazil* [dissertation]. West Lafayette: Purdue University; 1977.
- Marengo JA. *Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade - Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; 2007.
- Marengo JA. *Mudanças climáticas globais e regionais: Avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro*. *R Bras Meteorol*. 2001;16:1-18.
- Marengo JA, Valverde MC. *Caracterização do clima no Século XX e cenário de mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos de IPCC AR4*. *Multiciência*. 2007;8:5-28.
- Mazurana J, Cassol EA, Santos LC, Eltz FLF, Bueno AC. Erosividade, padrões hidrológicos e período de retorno das chuvas erosivas de Santa Rosa (RS). *R Bras Eng Agríc Amb*. 2009;13:975-83.
- Mello G, Bueno CRP, Pereira GT. Variabilidade espacial de perdas de solo, do potencial natural e risco de erosão em áreas intensamente cultivadas. *R Bras Eng Agríc Amb*. 2006;10:315-22.
- Mello CR, Sá MCA, Curi N, Mello JM, Viola MR, Silva AM. Erosividade mensal e anual da chuva no estado de Minas Gerais. *Pesq Agropec Bras*. 2007;42:537-45.
- Morais LFB, Mutti LSM, Eltz FLF. Relações entre características físicas da chuva e perdas de solo no Rio Grande do Sul. *R Bras Ci Solo*. 1988;12:285-8.
- Moreti D, Carvalho MP, Mannigel AR, Medeiros LR. Importantes características de chuva para a conservação do solo e da água no município de São Manuel (SP). *R Bras Ci Solo*. 2003;27:713-25.
- Oliveira PTS, Alves Sobrinho T, Rodrigues DBB, Panachuki E. Erosion risk mapping applied to environmental zoning. *Water Res Manage*. 2011;25:1021-36.
- Peñalva Bazzano MG, Eltz FLF, Cassol EA. Erosividade, coeficiente de chuva, padrões e período de retorno das chuvas de Quaraí, RS. *R Bras Ci Solo*. 2007;31:1205-17.
- R Development Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing; 2008.
- Rebiota MS, Gan MA, Rocha RP, Ambrizi T. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *R Bras Meteorol*. 2010;25:185-204.
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, McColl DK, Yoder DC. *Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the revised Universal Soil Loss Equation*. Washington: United States Department of Agriculture; 1997. (Agricultural Handbook, 703).
- Ribeiro Junior PJ, Diggle PJ. *GeoR: A package for geostatistical analysis*. *R-News*. 2001 [acesso em 20 out 2009];1:609-3631. Disponível em: <http://cran.r-project.org/doc/Rnews>.
- Rodrigues DBB, Alves Sobrinho T, Oliveira PTS, Panachuki E. Nova abordagem sobre o modelo brasileiro de serviços ambientais. *R Bras Ci Solo*. 2011;35:1037-45.
- Rodrigues MLG, Franco D, Sugahara S. *Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina*. *R Bras Geofis*. 2004;22:135-51.
- Rufino RL, Biscaia RCM, Merten GH. Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná através da pluviometria: Terceira aproximação. *R Bras Ci Solo*. 1993;17:439-44.
- Rufino RL. *Avaliação do potencial erosivo da chuva para o estado do Paraná: Segunda aproximação*. *R Bras Ci Solo*. 1986;10:279-81.
- Sansigolo CA, Kayano MT. Trends of seasonal maximum and minimum temperatures and precipitations in Southern Brazil for de 1913-2006 period. *Theor Appl Climatol*. 2010;101:209-16.
- Silva AM. *Rainfall erosivity map for Brazil*. *Catena*. 2004;57:251-9.
- Silva JRC, Dias AS. 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. *R Bras Ci Solo*. 2003;27:347-54.
- Silva MA, Silva MLN, Curi N, Santos GR, Marques JJGSM, Menezes MD, Leite FP. *Avaliação e espacialização da erosividade da chuva no Vale do Rio Doce, Região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais*. *R. Bras Ci Solo*. 2010;34:1029-39.

Silva Dias MAF, Rozante JR, Machado LAT. Complexos convectivos de mesoescala na América do Sul. In: Cavalcanti IFA, Ferreira NJ, Justi da Silva MGA, Silva Dias MAF, editores. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos; 2009. p.181-94.

Wilkinson GE. Rainfall characteristics and soil erosion in the rainforest area of Western Nigeria. *Explor Agron*. 1975;2:247-55.

Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington:

United States Department of Agriculture; 1965. (Agricultural Handbook, 282).

Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: United States Department of Agriculture; 1978.

Wischmeier WH, Smith DD. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans Am Geoph Union*. 1958;29:285-91.

Zipser EJ, Cecil DJ, Liu C, Nesbitt SW, Yorty DP. Where are the most intense thunderstorms on earth? *Bull Am Meteorol Soc*. 2006;87:1057-71.