

A EROSIVIDADE DAS CHUVAS NOS PLANALTOS CÁRSTICOS DO VALE DO RIO BETARI, IPORANGA (SP)

José Antonio FERRARI
Rosângela do AMARAL
Gustavo ARMANI
Silvio Takashi HIRUMA

RESUMO

Neste trabalho são apresentadas as primeiras estimativas da erosividade das chuvas (EI_{30}) nos planaltos cársticos da bacia do Rio Betari, obtidas a partir da análise de séries pluviográficas. Os resultados possibilitaram ajustar um modelo probabilístico para avaliar a ocorrência de eventos erosivos, bem como estabelecer modelos locais simplificados para o cálculo de EI_{30} a partir do coeficiente de chuva (RC). Os valores de EI_{30} mostraram-se inferiores aos estimados pelo modelo tradicionalmente empregado para se inferir a erosividade no Estado de São Paulo.

Palavras-chave: erosividade, planaltos cársticos, Rio Betari, Vale do Ribeira

ABSTRACT

This paper presents the first estimation of rainfall erosivity calculated from pluviographic data for the karst plateaus of the Betari River. The results were used to fit a probabilistic model for evaluating the occurrence of erosive events and also to develop local models for calculating rainfall erosivity from a single rainfall coefficient (RC). The EI_{30} values are smaller than those estimated from the model traditionally used to calculate rainfall erosivity in São Paulo State.

Keywords: rainfall erosivity, karst plateaus, Betari River, Ribeira Valley

1 INTRODUÇÃO

Nas faixas de rochas carbonáticas do Vale do Ribeira, a manutenção da qualidade da água em nascentes e a conservação dos sistemas de cavernas com fluxo ativo estão diretamente ligadas ao controle da erosão na zona de recarga de aquíferos cársticos. A erosão acelerada em dolinas e vales cegos, locais onde a recarga do aquífero ocorre principalmente pela injeção direta de fluxos concentrados, pode aumentar a turbidez nas fontes e promover o assoreamento das rotas subterrâneas. O conhecimento da dinâmica dos fatores erosivos nesta paisagem contribui para a formulação de estratégias de preservação.

Além dos fatores relevo, tipo de solo, cobertura vegetal e prática utilizada no cultivo, a erosão dos solos também está relacionada à precipitação, tanto pelo poder das gotas de chuva em desagregar partículas da superfície, como pelo escoamento superficial. Isto se aplica particularmente à erosão em lençol ou em sulcos, onde a intensidade da chu-

va é considerada a característica mais importante (MORGAN & DAVIDSON 1986).

A erosividade das chuvas é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área com solo exposto. Este termo foi difundido mundialmente, principalmente pelo emprego da Equação Universal de Perdas do Solo (USLE) desenvolvida por WISCHMEIER & SMITH (1962). O cálculo da erosividade (EI_{30}) depende de dados pluviográficos; a erosividade total corresponde ao somatório da energia liberada por diferentes eventos de chuva. Infelizmente, muitos países não dispõem de redes pluviográficas, fato que levou à elaboração de modelos simplificados para o cálculo da erosividade. Em geral, estes modelos derivam da correlação entre a erosividade obtida a partir de dados pluviográficos (método de WISCHMEIER & SMITH 1962) e dados de aquisição mais simples, como o total precipitado anual e/ou mensal. Neste caso, o modelo elaborado para uma determinada área é aplicado em regiões que

dispõem apenas de totais pluviométricos. Esta abordagem foi usada por LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1992), que adotaram o modelo gerado a partir do comportamento das chuvas na região de Campinas (Equação 1) para estimar a erosividade em outras regiões do Estado de São Paulo, desprovidas de pluviógrafos. Esse modelo serviu de base para a elaboração do mapa de isoerodentes do Estado de São Paulo (BERTONI & LOMBARDI NETO 1990).

$$EI_{30} = 68,73 (RC)^{0,841} \quad [Eq. 1]$$

onde: EI_{30} = média mensal do índice de erosão em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹; RC = coeficiente de chuva ($RC = p^2/P$), p^2 = precipitação média mensal, P = precipitação média anual.

Alguns estudos compararam a erosividade obtida pela equação 1 com valores calculados pelo método de WISCHMEIER & SMITH (1962). Analisando as chuvas de Piraju – SP, ROQUE *et al.* (2001) constataram que o valor obtido pelo modelo de LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1992) é 9,9% inferior à erosividade medida diretamente dos pluviogramas. Estudo recente em municípios do Vale do Ribeira (Silva *et al.* 2009) mostrou que a aplicação da equação 1 resulta em valores de EI_{30} mais baixos que os obtidos com dados pluviográficos. Estes resultados apontam para a necessidade de expansão da rede pluviográfica para refinar a estimativa da erosividade.

Estudos hidrológicos desenvolvidos por FERRARI & KARMANN (2008) e FERRARI (2009) possibilitaram a aquisição de séries pluviográficas inéditas no relevo serrano da borda do Planalto Atlântico, na área onde estão localizados aquíferos cársticos do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR). O presente trabalho utiliza estas séries registradas em anos hidrológicos distintos para obter a primeira estimativa da erosividade na região, com base no método de WISCHMEIER & SMITH (1962). Além do cálculo da erosividade total, o trabalho analisa a probabilidade de ocorrência de eventos erosivos. Os valores de erosividade também foram correlacionados com o coeficiente de chuva, com o objetivo de estabelecer modelos locais simplificados para a obtenção de EI_{30} . Para fins de comparação, tanto os modelos locais, como o de LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1992), foram aplicados aos totais pluviométricos obtidos ao longo de 33 anos em uma estação do DAEE localizada na área de estudo.

2 A ÁREA DE ESTUDO

As séries pluviográficas foram obtidas no interior e em áreas marginais dos sistemas cársticos da bacia do Rio Betari, região da Serra da Paranapiacaba, Município de Iporanga (SP) (Figura 1).

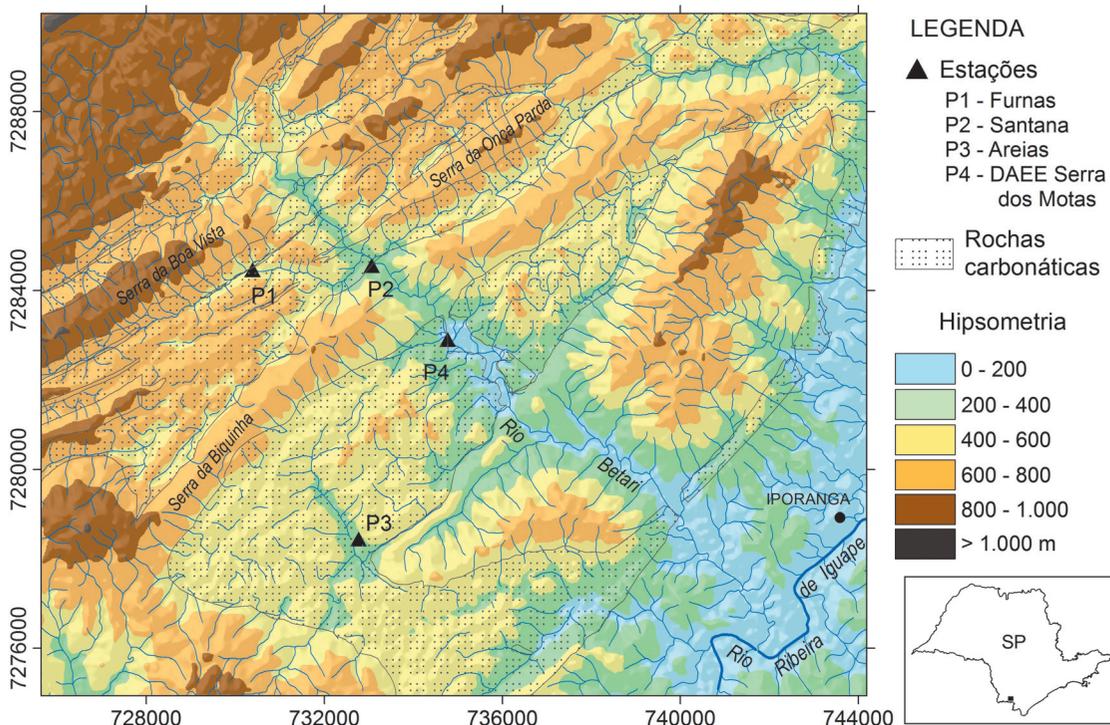


FIGURA 1 – Mapa hipsométrico da área de estudo com a localização das estações de monitoramento.

O vale do Rio Betari, alinhado segundo a direção NW-SE, intercepta planaltos carbonáticos dispostos na direção NE-SW, constituindo a zona de descarga dos aquíferos cársticos. As superfícies cársticas nos topos dos planaltos encontram-se rebaixadas em relação às serras marginais – compostas por rochas pelíticas e psamíticas – e são caracterizadas pela ocorrência de dezenas de dolinas e vales cegos, onde o escoamento concentrado em pontos de absorção promove boa parte da recarga dos aquíferos. Sistemas de cavernas associados aos aquíferos cársticos constituem um importante componente da atividade econômica local, o turismo.

A área está situada no clima regional subtropical permanente úmido controlado por massas tropicais e polares marítimas (MONTEIRO 1973). Nesta unidade regional a Massa Polar Atlântica atua durante mais de 60% do tempo, em oposição aos 40% da Massa Tropical Atlântica. A maior frequência dos sistemas extratropicais (anticiclones e frente polar) e, sobretudo, a maior atividade frontal neste trecho do estado conferem a esta área características subtropicais e condições de umidade permanente (praticamente sem estação seca, à exceção dos anos anômalos).

A distância entre a Serra da Paranapiacaba e a linha de costa, a orientação do vale do Rio Ribeira de Iguape e a presença de pequenos maciços e serras isoladas criam diferentes condições para a variação da chuva neste espaço. A faixa mais úmida da costa, sobretudo aquela das vertentes diretamente expostas aos fluxos atmosféricos oceânicos, cede lugar a uma faixa menos úmida ao longo do curso do Rio Ribeira de Iguape, voltando a aumentar na escarpa da Serra da Paranapiacaba. As variações topográficas possibilitam a diversificação de climas locais (MONTEIRO 1973). As temperaturas médias anuais oscilam na faixa de 20 a 22°C e a precipitação média anual é de 1.585 mm (Posto DAEE Serra dos Motas, 1973-2004), dos quais, mais de 60% concentrados entre outubro e março.

Este clima permite o desenvolvimento da Floresta Perenifolia Hidrófila Costeira (ALONSO 1977), que apresenta fisionomia alta e densa, consequência da variedade de espécies pertencentes a várias formas biológicas e estratos. Seus elementos mais altos podem alcançar 25 a 30 m. O grande número de lianas, epífitas, fetos arborescentes e palmeiras dão a esta floresta um caráter tipicamente tropical. Em algumas áreas o relevo é recoberto por mata secundária, pastos e pequenas roças de subsistência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A erosividade é um índice baseado na energia cinética da chuva (MORGAN & DAVIDSON 1986). Ela é função da intensidade e duração da chuva e da massa, diâmetro e velocidade de suas gotas. LAWS & PARSON (1943), com base em estudos de chuvas nos Estados Unidos, mostraram que as características das gotas variam de acordo com a intensidade da chuva. Baseado nesses estudos, WISCHMEIER & SMITH (1958) desenvolveram uma equação (Equação 2), que relaciona a energia cinética com a intensidade da chuva:

$$KE = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I \quad [\text{Eq. 2}]$$

onde: KE = energia cinética (MJ ha⁻¹ mm⁻¹), I = intensidade da chuva (mm h⁻¹).

Experimentos mostraram que o tamanho médio das gotas de chuva deixa de aumentar quando a intensidade excede 76,2 mm/h. Assim, para intensidades acima deste valor, KE será sempre igual a 0,283 MJ ha⁻¹mm⁻¹.

De acordo com WISCHMEIER & SMITH (1958), quando todos os outros fatores da erosão são mantidos constantes, a perda de solo por unidade de área em um terreno desprotegido de vegetação é diretamente proporcional ao produto de duas características da chuva: energia cinética e sua intensidade máxima em 30 minutos. Para melhor compreensão do cálculo da erosividade é apresentado na tabela 1 um exemplo extraído de WISCHMEIER & SMITH (1978).

Etapas para o cálculo da erosividade:

- intensidade da chuva em mm/h: coluna 5 = (60/col3) X col4.
- os valores da coluna 6 são obtidos pela equação 1.
- energia cinética total em MJ ha⁻¹: col7= col4 X col6.
- precipitação máxima em 30 minutos consecutivos: de 4:36 a 4:57= 27 mm.
- intensidade máxima em 30 minutos: I₃₀= 27 X 2 = 54 mm h⁻¹.
- erosividade: EI₃₀= total da coluna 7 X I₃₀ = 8,603 x 54 = 464,6 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

A aplicação do método pressupõe ainda as seguintes condições: a) para chuvas com duração inferior a 30 minutos, o valor de I₃₀ é igual ao dobro do total precipitado; b) períodos de 6 horas ou mais com precipitação abaixo de 12,7 mm foram definidos como intervalo entre tempestades; c) chuvas com menos de 12,7 mm, separadas de outras por 6 horas ou mais, foram consideradas insignificantes, a menos que por um período de pelo menos 15 minutos sua intensidade tenha excedido 24 mm h⁻¹.

TABELA 1 – Procedimento para o cálculo da erosividade a partir de um evento de chuva (WISCHMEIER & SMITH 1978).

<i>col1</i>	<i>col2</i>	<i>col3</i>	<i>col4</i>	<i>col5</i>	<i>col6</i>	<i>col7</i>
Tempo (min)	Precipitado (mm)	Duração (minutos)	Precipitado no período (mm)	Intensidade da chuva (mm h ⁻¹)	Energia Cinética - KE (MJ ha ⁻¹ mm ⁻¹)	Energia Cinética Total (MJ ha ⁻¹)
4:00	0					
4:20	1	20	1	3	0,161	0,161
4:27	3	7	2	17	0,226	0,452
4:36	9	9	6	40	0,259	1,554
4:50	27	14	18	77	0,283	5,094
4:57	30	7	3	26	0,242	0,726
5:05	32	8	2	15	0,222	0,444
5:15	32	10	0	0	-	0
5:30	33	15	1	4	0,172	0,172
<i>Totais</i>		90	33			8,603

Neste trabalho, pluviogramas registrados nas estações Areias (2001 e 2002) e Santana e Furnas (2010 e 2011) foram utilizados para o cálculo da erosividade pelo método proposto por WISCHMEIER & SMITH (1978). A localização dos pluviôgrafos é mostrada na figura 1. Em cada estação foi instalado um pluviômetro com resolução de 0,2 mm conectado a um registrador digital de eventos. A erosividade foi calculada a partir de dados contínuos, como no exemplo apresentado na tabela 1, sem discretização da série em intervalos de tempo regulares.

As erosividades foram caracterizadas quanto ao seu modelo de distribuição estatística, com o objetivo de calcular a probabilidade de ocorrência de eventos. A escolha do modelo de distribuição baseou-se no melhor ajuste da correlação entre os valores observados e esperados para diferentes distribuições teóricas.

Correlações estatísticas entre os valores mensais de erosividade e os coeficientes de chuva foram testadas, com o objetivo de estabelecer modelos locais para o cálculo de EI₃₀ a partir de dados de simples aquisição. O modelo estatístico com o melhor índice de determinação foi escolhido para a estimativa da erosividade.

As erosividades anuais dos diferentes postos para diferentes períodos foram utilizadas para calcular a erosividade média da região. Estes procedimentos devem ser considerados dentro de uma perspectiva exploratória, uma vez que são caracterizações preliminares para uma região com carência de monitoramentos de longo prazo. De acordo

com WISCHMEIER E SMITH (1978), o índice de erosividade anual médio para uma localidade específica resulta de monitoramentos ao longo de 20 a 25 anos.

Para fins de comparação, aplicou-se os modelos obtidos neste trabalho e o proposto por LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1981, 1992) aos totais pluviométricos do posto DAEE Serra dos Motas (Figura 1), que registrou totais pluviométricos diários entre 1972 e 2004.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da erosividade nos postos Areias, Santana e Furnas

A análise das séries pluviográficas dos postos Areias, Santana e Furnas para os diferentes anos de amostragem registrou um total de 220 chuvas significativas, considerando os critérios de WISCHMEIER & SMITH (1978). A erosividade média das precipitações é de 213,4 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, com desvio padrão de 296,7 e coeficiente de variação de 139%. O histograma de distribuição das erosividades é apresentado na figura 2. Correlações realizadas entre os valores observados e esperados para diferentes distribuições teóricas mostram que as erosividades seguem a distribuição log-normal. Baseado neste modelo, a probabilidade de ocorrência de eventos com erosividade abaixo da média e acima de 510 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ (média + desvio padrão) é, respectivamente, de 70,6% e de 8,7%; a probabilidade de ocor-

rência de eventos mais intensos, ou seja, acima de 1000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, é de apenas 2,32%. De acordo com CARVALHO *et al.* (1989), a distribuição log-normal é típica de eventos hidrológicos, como observado por esses autores ao analisar as erosividades anuais na região de Mococa.

As análises mensais e anuais das erosividades obtidas com os pluviogramas são apresentadas na tabela 2. O valor médio da erosividade anual, considerando todos os postos em todos os períodos, é de 6776,2 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

Considerando os postos monitorados no mesmo período, o de Furnas apresentou totais pluviométricos muito superiores aos de Santana durante os dois anos de observação. É possível que o fato do posto Furnas situar-se próximo à base da Serra da Boa Vista e num ponto mais elevado da topografia tenha favorecido a maior ocorrência de chuvas que Santana, localizado em cota mais baixa na vertente de um vale encaixado. A discrepância é tão notória, que em 2011, enquanto Furnas apresentou chuva anual acima da média (DAEE Serra dos Motas), o total registrado em Santana ficou abaixo desta referência. Os valores anuais de EI₃₀ também são sempre superiores em Furnas.

Cabe destacar que o monitoramento no posto Areias (2001 e 2002), localizado próximo ao fundo de uma grande depressão cárstica, foi realizado num dos períodos de maior estiagem já registrados na região (DAEE Serra dos Motas), com totais pluviométricos abaixo da média.

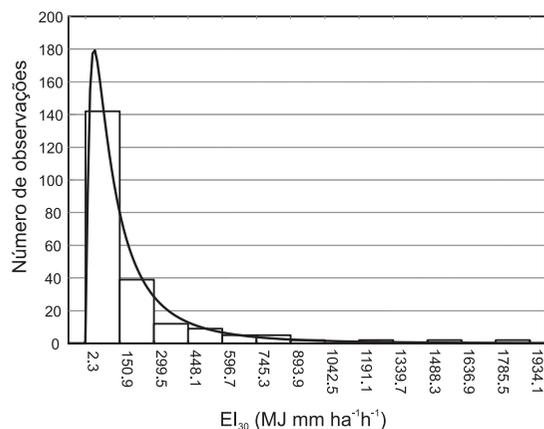


FIGURA 2 – Distribuição da erosividade na área de estudo, a partir de dados extraídos dos pluviogramas Areias 2000-2001 e Santana e Furnas 2010-2011.

Os resultados da tabela 2 também mostram que o aumento da precipitação anual implica no aumento da erosividade; para esta relação, o modelo linear (EI₃₀ ano = 6,5838x - 4122,7, onde x é a precipitação anual, n = 6) apresenta índice de determinação de 85%. A dinâmica mensal mostra que nos três pontos de monitoramento, a erosividade é maior no período que engloba a primavera e o verão, temporada que concentra o maior volume de chuvas; o outono e o inverno apresentam os valores mais baixos de erosividade, inclusive nula.

4.2 Ajuste de modelos locais para o cálculo da erosividade a partir de RC

Para avaliar a viabilidade de um modelo local para estimar a erosividade a partir de variáveis de aquisição simples, os valores de EI₃₀ e de RC da tabela 2 foram correlacionados. Adotou-se o modelo linear, pois apresentou os melhores índices de determinação.

A síntese dos modelos obtidos (Tabela 3) mostra que o pior índice de determinação foi observado no posto Areias, associado a uma chuva de grande intensidade ocorrida em fevereiro de 2001. Este evento, com duração inferior a uma hora, foi responsável por 68% da erosividade registrada no mês, que atingiu em 2001 1947,40 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹; trata-se do maior valor registrado em fevereiro, considerando todos os postos. Este evento causou uma grande desproporção entre EI₃₀ e RC, diminuindo a linearidade do modelo. Este tipo de perturbação é reduzido quando séries de longa duração são utilizadas para calcular as médias das variáveis. Por outro lado, os elevados valores de R² observados em Furnas e Santana indicam que não foram registrados eventos extremos no período monitorado.

Na última linha da tabela 3 é apresentada uma correlação considerando os dados mensais dos três postos para todos os períodos. Este modelo engloba maior variabilidade temporal da precipitação, pois considera anos com totais pluviométricos acima e abaixo da média, bem como incorpora parte da variabilidade topográfica da região, uma vez que representa setores distintos do relevo.

4.3 Comparação com o modelo de LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1992)

Considerando que o modelo da equação 1 é amplamente utilizado em regiões desprovidas de pluviógrafos no Estado de São Paulo, a título de comparação, o mesmo foi aplicado aos valores de

TABELA 2 – Postos Areias, Santana e Furnas – pluviosidade, coeficiente de chuva (RC) e erosividade (EI₃₀) pelo método WISCHMEIER & SMITH (1978).

<i>Areias</i>						
<i>Mês</i>	<i>2001</i>			<i>2002</i>		
	<i>Chuva (mm)</i>	<i>RC</i>	<i>EI₃₀ (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)</i>	<i>Chuva (mm)</i>	<i>RC</i>	<i>EI₃₀ (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)</i>
Jan	170,00	19,50	1.250,05	212,80	35,30	419,59
Fev	168,40	19,13	1.947,40	139,20	15,10	1.009,00
Mar	78,80	4,19	47,59	193,80	29,27	1.167,81
Abr	60,40	2,46	161,40	37,40	1,09	0,00
Mai	159,20	17,10	598,25	89,40	6,23	76,50
Jun	147,00	14,58	225,06	13,60	0,14	0,00
Jul	73,00	3,60	178,44	61,40	2,94	119,69
Ago	57,80	2,25	187,00	63,80	3,17	26,57
Set	91,20	5,61	424,56	111,00	9,60	258,62
Out	140,60	13,34	65,08	91,20	6,48	325,12
Nov	138,20	12,89	610,24	153,80	18,44	550,14
Dez	197,60	26,34	1144,69	115,60	10,42	217,18
<i>TOTAL</i>	1.482,20 ↓		6839,76	1283,00 ↓		4.170,22
<i>Santana</i>						
<i>Mês</i>	<i>2010</i>			<i>2011</i>		
	<i>Chuva (mm)</i>	<i>RC</i>	<i>EI₃₀ (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)</i>	<i>Chuva (mm)</i>	<i>RC</i>	<i>EI₃₀ (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)</i>
Jan	490,80	135,68	3.146,39	291,40	60,59	2.384,07
Fev	115,60	7,53	335,13	101,20	7,31	661,87
Mar	208,60	24,51	757,12	177,80	22,56	822,12
Abr	118,40	7,90	230,35	52,00	1,93	33,93
Mai	74,00	3,08	217,38	18,60	0,25	0,00
Jun	50,40	1,43	0,00	82,00	4,80	53,01
Jul	73,20	3,02	0,00	137,80	13,55	307,51
Ago	63,60	2,28	0,00	134,80	12,97	48,74
Set	73,20	3,02	178,47	35,00	0,87	0,00
Out	160,20	14,46	614,52	184,00	24,16	264,86
Nov	105,40	6,26	704,36	68,20	3,32	27,88
Dez	242,00	32,99	1.219,33	118,60	10,04	290,32
<i>TOTAL</i>	1.775,40 ↑		7.403,04	1.401,40 ↓		4.894,31
<i>Furnas</i>						
<i>Mês</i>	<i>2010</i>			<i>2011</i>		
	<i>Chuva (mm)</i>	<i>RC</i>	<i>EI₃₀ (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)</i>	<i>Chuva (mm)</i>	<i>RC</i>	<i>EI₃₀ (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)</i>
Jan	581,60	156,46	4.879,54	336,20	61,82	3.039,83
Fev	142,80	9,43	662,71	135,80	10,09	292,89
Mar	210,20	20,44	884,43	226,20	27,98	808,09
Abr	135,00	8,43	324,94	95,00	4,94	264,52
Mai	91,60	3,88	263,17	30,00	0,49	0,00
Jun	65,40	1,98	0,00	97,00	5,15	79,52
Jul	104,00	5,00	28,45	182,20	18,16	34,11
Ago	101,20	4,74	131,99	126,60	8,77	42,95
Set	107,20	5,32	504,75	49,40	1,33	0,00
Out	223,60	23,13	831,58	253,80	35,23	687,56
Nov	111,00	5,70	692,91	107,80	6,36	227,82
Dez	288,40	38,47	1.610,25	188,40	19,41	748,72
<i>TOTAL</i>	2.162,00 ↑		10.814,71	1.828,40 ↑		6.535,02

* Precipitação anual acima ↑ ou abaixo ↓ da média anual (1.575 mm) registrada no posto DAEE Serra dos Motas (1972-2004).

TABELA 3 – Funções para a estimativa mensal da erosividade a partir dos coeficientes de chuva (RC).

<i>Posto/Período</i>	<i>R²</i>	<i>Função</i>
Areias 2001-2002	0,57	$EI_{30} = 40,164 RC - 8,45$
Santana 2010-2011	0,97	$EI_{30} = 27,881 RC + 42,511$
Furnas 2010-2011	0,98	$EI_{30} = 35,803 RC + 2,8436$
Santana e Furnas 2010-2011	0,98	$EI_{30} = 32,078 RC + 24,76$
Areias 01-02, Santana e Furnas 10-11	0,94	$EI_{30} = 31,884 RC + 48,194$

RC apresentados na tabela 2. O objetivo foi avaliar a correlação entre os valores de EI_{30} medidos diretamente dos pluviogramas dos postos Areias, Santana e Furnas e aqueles estimados indiretamente a partir do modelo derivado das chuvas de Campinas. Os

resultados apresentados na tabela 4 mostram que os valores de EI_{30} são em média 18% maiores, quando calculados pelo modelo de Lombardi Neto & Moldenhauer. A maior diferença foi observada no posto de Santana e a menor em Furnas.

TABELA 4 – Comparação entre os valores de EI_{30} medidos nos postos Areias, Santana e Furnas a partir dos pluviogramas (média dos valores da tabela 3) e aqueles estimados para os mesmos postos, utilizando valores de RC e o modelo de LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1992).

<i>Posto/Período</i>	<i>Método de cálculo</i>		<i>Diferença dos resultados</i>
	<i>EI₃₀ Pluviograma (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)</i>	<i>EI₃₀ Lombardi Neto & Moldenhauer (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)</i>	
Areias 2001-2002	5.505,0	6.305,3	14,54%
Santana 2010-2011	6.148,7	8.048,3	30,89%
Furnas 2010-2011	8.674,9	9.418,3	8,57%
Santana e Furnas 2010-2011	7.411,8	8.741,4	17,94%
Areias, Santana e Furnas	6.776,2	8.031,0	18,52%

O posto pluviométrico DAEE - Serra dos Motas é o mais antigo da área de estudo e registra apenas o total pluviométrico diário. A estimativa da erosividade para este posto, calculada a partir do modelo de LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1992), é de 7.550,1 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ (Tabela 5), superior à média das erosvidades obtidas nos

pluviogramas dos postos Areias, Santana e Furnas (6.776,2 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹). Apesar das diferenças metodológicas e dos períodos de análise, os resultados das tabelas 2 e 5 mostram que os valores de erosividade mínimo e máximo ocupam, respectivamente, a faixa de 4.000 e 10.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹.

TABELA 5 – Índice de erosividade média anual e parâmetros estatísticos associados, calculados a partir dos dados do posto DAEE - Serra dos Motas, pelo método de LOMBARDI NETO & MOLDENHAUER (1992) (Equação 1).

<i>POSTO DAEE - Serra dos Motas</i>	
<i>N</i>	33 anos
<i>Média</i>	7.550,1 MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
<i>Desvio padrão</i>	1.401,7 MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
<i>Coefficiente de Variação</i>	18,57 %
<i>Máximo</i>	10.485,4 MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹
<i>Mínimo</i>	4.038,2 MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹

Com o intuito de se comparar a resposta dos modelos locais com o modelo baseado na dinâmica das chuvas de Campinas, todas as equações da tabela 3 foram aplicadas aos registros do posto DAEE Serra dos Motas (Tabela 6).

Testes realizados com os valores anuais (n = 33 anos) para cada um dos modelos mostraram que em todos os casos a erosividade anual segue a distribuição normal. Esta condição permitiu a aplicação do teste de hipótese e significância para verificar se existem diferenças significativas entre

os resultados dos diferentes modelos. Observou-se que ao nível de significância de 0,05, a erosividade calculada pelo modelo de Lombardi Neto & Moldenhauer é efetivamente mais alta que as obtidas pelos demais modelos. Ao se comparar os valores anuais de EI_{30} obtidos pelo modelo de Lombardi Neto & Moldenhauer e pelo modelo Areias, Santana e Furnas (última linha da tabela 3) ao longo dos anos (Figura 3), observa-se que a diferença entre eles diminui principalmente nos anos em que a precipitação ficou abaixo da média.

TABELA 6 – Valores de erosividade média anual em $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$ calculados a partir dos registros do posto DAEE Serra dos Motas, utilizando o modelo de Lombardi Neto & Moldenhauer e os modelos locais apresentados na tabela 3.

Modelos	EI_{30} Serra dos Motas	
	EI_{30}	Coefficiente de Variação
Lombardi Neto & Moldenhauer – Tabela 2	7.550,1	18,57%
Areias 2001-2002	5.424,4	24%
Santana 2010-2011	4.299,1	21,1%
Furnas 2010-2011	6.631,4	22,7%
Santana e Furnas 2010-2011	6.208,0	21,7%
Areias 01-02, Santana e Furnas 10-11	6.453,5	20,7%

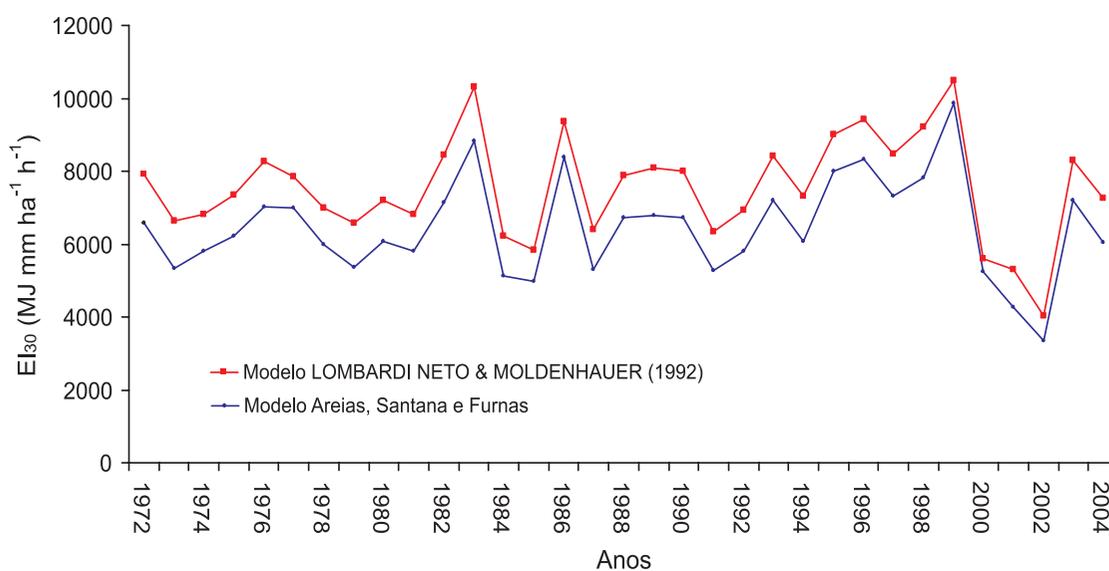


FIGURA 3 – Erosividade anual no posto DAEE Serra dos Motas, calculada pelo modelo de Lombardi Neto & Moldenhauer (Eq. 2) e pelo modelo Areias, Santana e Furnas (última linha da tabela 5).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta os primeiros índices de erosividade para a região dos planaltos cársticos da borda do Planalto Atlântico, calculados a partir da análise direta de pluviogramas; até então, as únicas referências eram resultados obtidos a partir de dados indiretos, utilizando o modelo estabelecido para a região de Campinas - SP. Espera-se que a aplicação dos novos índices contribuam para refinar modelos de vulnerabilidade à erosão nesta área.

A análise das chuvas significativas mostrou que a distribuição dos eventos erosivos na região segue a distribuição lognormal, com 70,6% de probabilidade de ocorrência de eventos abaixo de 213,4 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, sendo que no outono e inverno, chuvas muito pouco concentradas podem resultar em meses com erosividade nula.

Os índices de erosividade na região podem apresentar grande variabilidade em distâncias relativamente curtas, como comprovam os valores obtidos no mesmo período para os postos Santana e Furnas, separados cerca de 2,5 km; este comportamento deve estar associado à topografia acidentada da região. Apesar do curto período de monitoramento, os valores obtidos nos diferentes postos mostram que o aumento da precipitação anual implica no aumento da erosividade.

O valor médio da erosividade estimado a partir dos pluviogramas dos postos em diferentes períodos é de 6.776,2 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹, com variação de 31%. Considerando os períodos amostrados (anos mais úmidos e mais secos) e as localizações dos postos, este valor deve representar a variabilidade temporal e espacial da erosividade na área de estudo. Este valor está abaixo da estimativa da erosividade obtida pelo modelo de Lombardi Neto & Moldenhauer (7.550,1 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹), calculada a partir dos registros de precipitação mensal e anual ao longo de 33 anos do posto DAEE Serra dos Motas. A aplicação deste modelo aos postos monitorados neste trabalho também resultou em valores superiores aos obtidos pelos pluviogramas.

Quanto ao estabelecimento de modelos locais para o cálculo da erosividade, o modelo linear é o que melhor se ajusta para a correlação EI₃₀ X RC. Os melhores índices de determinação foram obtidos nos postos Furnas, Santana e Furnas/Santana, respectivamente, 0,98, 0,98 e 0,97. A função ajustada considerando os dados de todos os postos obteve índice um pouco menor (0,94). O pior valor foi obtido no posto Areias (0,57), devido a um evento extremo.

Verificou-se que, ao nível de significância de 0,05, a estimativa de EI₃₀ calculada pelo modelo de Lombardi Neto & Moldenhauer é efetivamente maior que a obtida pelos modelos elaborados neste trabalho, considerando a série de 33 anos de registros do posto DAEE Serra dos Motas. Esta diferença pode estar relacionada aos seguintes fatores: curto período de amostragem nos postos Areias, Santana e Furnas, interferência do relevo acidentado na distribuição das chuvas e/ou falta de ajuste do modelo de Campinas à dinâmica das chuvas da região.

6 AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo financiamento da pesquisa (Processos: 99/12672-4 e 09/05115-5).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, M.T.A. 1977. Geografia do Brasil - Região Sudeste. IBGE, Rio de Janeiro, 667 p.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. 1990. Conservação do solo. Ícone, São Paulo, 3 ed., 355 p.
- CARVALHO, M.P.; LOMBARDI NETO, L.; VASQUES FILHO, J.; CATANEO, A. 1989. Erosividade da chuva de Mococa analisada pelo índice EI₃₀. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 13: 243-249.
- DAEE – Posto Serra dos Motas – Iporanga – F5-042. 2011. Banco de dados pluviométricos do Estado de São Paulo. Disponível em <http://www.sigrh.sp.gov.br>. Acessado em 01/mar./2011.
- FERRARI, J.A. 2009. A dinâmica da drenagem subterrânea nos planaltos cársticos do rio Betari, Vale do Ribeira – SP. Projeto de Pesquisa – Proc. FAPESP 09/05115-5.
- FERRARI, J.A.; KARMANN, I. 2008. Comportamento hidrodinâmico de sistemas cársticos na Bacia do Rio Betari, Município de Iporanga - SP. *Geologia USP, Série Científica*, 8: 1-13.
- LAWS, J.O.; PARSONS, D.A. 1943. The relationship of raindrop size to intensity. *Transactions American Geophysical Union*, 24: 452-60.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. 1981. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *In: SBCS, ENCONTRO NACIONAL DE*

- PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3, Recife, *Anais*, p. 158.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. 1992. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Bragantia*, 51(2): 189-196.
- MONTEIRO, C.A.F. 1973. A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: Estudo Geográfico sob a forma de Atlas. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 129 p.
- MORGAN, R.P.C.; DAVIDSON, D.A. 1986. Soil erosion and conservation. Longman Scientific & Technical, England, 298 p.
- ROQUE, C.G.; CARVALHO, M.P.; PRADO, R.M. 2001. 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*, 25(1): 147-156.
- SILVA, R.B; IORI, P.; SILVA, F.A.M. 2009. Proposição e validações de equações para estimativa da erosividade de dois municípios do Estado de São Paulo. *Irriga*, 14(4): 533-547.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D.D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions American Geophysical Union*, 39,285-91.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1962. Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning. *International Association of Scientific Hydrology Publication*, 59: 148-159.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC (Agriculture Handbook, 537).

Endereço dos autores:

José Antonio Ferrari, Rosângela do Amaral, Gustavo Armani, Silvio Takashi Hiruma – Instituto Geológico – Secretaria de Estado de Meio Ambiente de São Paulo, Av. Miguel Stéfano, 3900, Água Funda, CEP: 04301-903, São Paulo, SP. E-mails: ferrari@igeologico.sp.gov.br; rosangela.amaral@igeologico.sp.gov.br; gustavo@igeologico.sp.gov.br; hiruma@igeologico.sp.gov.br