Análisis comparativo de la evaluación de la erosividad de la lluvia en la cuenca del Guadalentín.

J. Pérez Sánchez, J. Senent Aparicio
Departamento de Ciencias Politécnicas, Escuela Universitaria Politécnica, UCAM
Universidad Católica San Antonio de Murcia, Campus de los Jerónimos,
nº 135, 30107 Murcia

1. Introducción

La erosión del suelo es un proceso de desagregación, transporte y deposición de los materiales que lo componen por acción del agua (erosión hídrica) o el viento (erosión eólica). Si además las condiciones climáticas de la región son de carácter árido o semiárido, como es el caso de la cuenca estudiada, donde el suelo es pobre y de escasa protección vegetal, el fenómeno derivará en un proceso de desertificación del territorio. Dicha desertificación, influye directamente en las zonas cultivables (Wijitkosum, 2012) imponiéndole, entre otros, la utilización de abonos y fertilizantes encareciendo así la producción agrícola. Dentro de los factores que provocan la erosión de un suelo, la erosividad de la lluvia constituye un factor físico elemental para la comprensión de los procesos geomorfológicos que se producen en una cuenca. En muchos lugares del mundo, se ha demostrado que el factor de erosividad R del modelo USLE tiene una alta correlación con la pérdida de suelo (Wischmeier, 1959; Wischmeier y Smith, 1978).

La principal dificultad para la obtención de este factor es la disponibilidad de datos pluviográficos de precipitación subhorarios. En Europa, así como en la mayoría de las estaciones meteorológicas del mundo, históricamente sólo han contado con pluviómetros con capacidad para registrar la lluvia para periodos de 24 horas (De Santos Loureiro y de Azevedo Coutinho, 2001). Como consecuencia de ello, han sido muchos los autores quienes han propuesto diversas ecuaciones que proporcionan una aproximación del factor R mediante la utilización de información con la que se contara en las estaciones existentes, fundamentalmente las precipitaciones en 24 horas. Uno de los parámetros más utilizados en gran parte de las expresiones propuestas debido a su sencillez en el cálculo y escasa necesidad de datos ha sido el índice de Fournier (1960) basado únicamente en la precipitación del mes más lluvioso y la precipitación media anual, posteriormente modificado por Arnoldus (1977) llamado Índice Modificado de Fournier (MFI). De forma similar, Renard y Freimund (1994) establecen otras expresiones con la utilización del índice modificado de Fournier también de forma exponencial ($R=0.07397MFI^{1.847}$) y cuadrática ($R=95.77-6.081MFI+0.477MFI^2$). Más recientes investigaciones han utilizado este mismo

índice y estructura exponencial aunque con coeficientes muy diferentes a los anteriores (Apaydin et al., 2006). Estructuras más complejas en las que se introducen funciones sinusoidales y variables dependientes de longitud y latitud del lugar analizado se encuentran en expresiones como la de Davison et al. (2005), en las que ya se tienen en cuenta posibles variaciones mensuales (Posch y Rekolainen, 1993) o estacionales (Richardson et al., 1983).

Algunos autores han encontrado buenas relaciones utilizando funciones lineales, exponenciales o polinómicas como $R = aP+b$, $R=aP^b$, or $R= aP^2+bP+c$, respectivamente; donde P es la precipitación mensual o anual, y a, b, y c son constantes. Tales son los casos de los estudios de Grimm et al. (2003) en la Toscana o como la correlación obtenida por Torri et al. (2006) en el Mediterráneo. Por otro lado, Diodato y Bellocchi (2010) proponen bajo el nombre de Mediterranean Rainfall Erosivity Model (MedREM) el cálculo de la erosividad de la lluvia mediante la utilización de la máxima precipitación diaria anual, longitud, latitud y la precipitación anual.

En España el antiguo Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA, 1988) proponía dividir la península Ibérica en tres zonas para las cuales planteaba tres ecuaciones diferentes para el cálculo del factor R. En el caso de la zona estudiada expresión propuesta era la siguiente:

$$R = e^{-1.235} (PMEX)^{1.297}(MR)^{-0.511}(MV)^{0.366} (F24)^{0.414} \qquad [1]$$

Donde MV es la lluvia media del período junio-septiembre (mm), MR es la lluvia media del período octubre-mayo (mm), PMEX es la lluvia media de la máxima mensual de cada uno de los años de la serie (mm), y F24 es el factor concentración de la máxima lluvia diaria definido como.

F24= (máxima precipitación diaria anual)^2 / (∑ máxima precipitación en 24 h de todos los meses del año) [2]

2. Metodología.

La zona de estudio (Cuenca del río Guadalentín) se localiza en el sureste de España (Figura 1). Tiene una extensión de 3340 km^2 y está situada en la zona suroccidental de la Región de Murcia, con altitud media de 1000 m. La cuenca del río Guadalentín ha sido centro de atención en las últimas décadas por parte de numerosos investigadores. Diversos programas y proyectos de investigación nacionales (LUCDEME, HISPASED,…) e internacionales, financiados por la Comisión Europea (MEDALUS, MEDACTION, DESERTLINKS,…) incluyen esta cuenca como área – piloto para el estudio de la erosión y desertificación en la región mediterránea. Ésta necesita de forma imperiosa incrementar los recursos hídricos (trasvases, desaladoras, reutilización de aguas depuradas, etc.) con el fin de alcanzar un mayor desarrollo económico y social en un mundo cada vez más globalizado y competitivo. Dentro de la cuenca estudiada se localizan 12 estaciones, distribuidas como muestra la Figura 1. Los datos proporcionados por el Organismo de Cuenca consisten en una base de

datos con registros de precipitación cada 5 minutos desde el año hidrológico 1992-1993 hasta el año 2012-2013 (serie de 20 años).

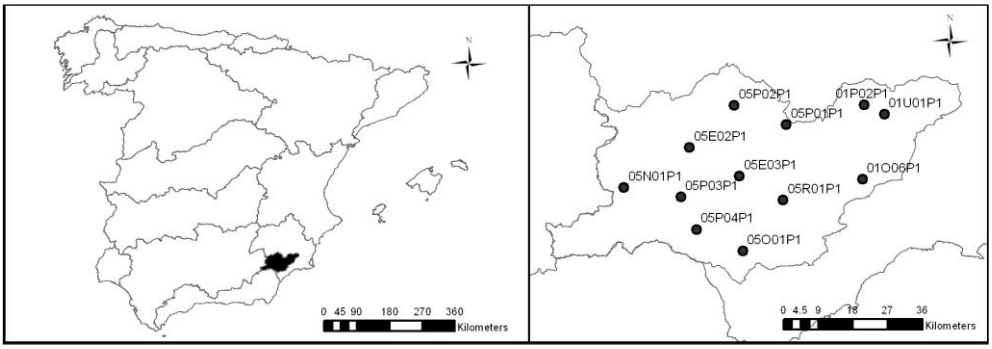

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y localización de las estaciones pluviométricas.

El cálculo del factor R de una tormenta erosiva es calculado mediante la expresión R= [$\Sigma(e_j)$ (I_j T_j)] I_{30} (MJ ha-1 mm h-1) donde T_j es la longitud del período estimado para cada intensidad de lluvia I_j , I_{30} es la máxima intensidad de lluvia en 30 minutos y e_i es la energía cinética de la tormenta, siendo e_j= 0.119 + 0.0873 log10 I_j si $I_j \leq$ 76 mm/h o e_j= 0.283 si $I_j \geq$ 76 mm/h. Son muchos los investigadores que han evaluado el ajuste de diversas ecuaciones para predecir la energía cinética de una tormenta y han encontrado que la formulación de Wischmeier y Smith proporciona razonables resultados en climas similares a los del área de estudio (Domínguez-Romero et al., 2007, Petan et al., 2010). Para cada estación, la Tabla 1 lista el resumen estadístico básico relativo a la precipitación, duración intensidad e I_{30}.

En primer lugar, cada tormenta de duración superior a 6 horas es evaluada individualmente. A continuación, toda tormenta con una lluvia superior a 12.7 mm son seleccionadas, de las cuales se catalogan como erosivas aquéllas con precipitación superior a 12.5 mm en 30 minutos, siempre que cumplan un mínimo de 6.5 mm en 15 min.

La erosividad en períodos más largos (diaria, mensual, anual) es obtenida como la suma de la erosividad de las tormentas incluidas en el período estudiado. De hecho, el factor R de la estación se calcula como el promedio de la erosividad anual de la serie de precipitaciones disponible.

Por otro lado, con el fin de encontrar una expresión que obtuviera una correlación entre los valores obtenidos y los resultantes de aplicar las expresiones simplificadas del cálculo del mismo se han confeccionado una serie de expresiones dependientes de los parámetros que aparecen en la Tabla 2. Los modelos de ajuste estudiados fueron el polinómico, lineal, exponencial, potencial y logarítimico.

Estación	Tamaño	Estadístico	Variable			
			Lluvia (mm)	Duración (h)	Intensidad (mm h^{-1})	I_{30} (mm h^{-1})
01O06P1	71	Máximo	88.9	13.4	117.7	71.9
		Mínimo	12.8	2.0	0.3	3.6
		Media	23.7	5.9	4.2	18.8
		C.V.(%)	62.5	18.9	209.5	85.9
01P02P1	94	Máximo	76,8	10,8	119,2	78,0
		Mínimo	12,7	1,3	0,7	4,0
		Media	22,4	5,9	3,8	15,0
		C.V.(%)	50,4	18,5	186,5	86,7
01U01P1	80	Máximo	80,4	6,5	158,4	105,2
		Mínimo	12,7	2,9	0,2	3,6
		Media	25,9	5,9	4,6	21,1
		C.V.(%)	64,4	8,6	227,9	94,3
05E02P1	96	Máximo	108,6	6,3	276,5	102,3
		Mínimo	12,0	1,1	0,0	3,2
		Media	23,0	5,7	4,2	17,2
		C.V.(%)	62,7	16,0	256,9	90,5
05E03P1	87	Máximo	95,1	6,5	214,1	94,6
		Mínimo	12,7	0,2	0,1	3,5
		Media	23,3	5,7	4,1	17,9
		C.V.(%)	52,8	20,2	221,3	90,3
05N01P1	94	Máximo	93,3	11,9	137,9	78,6
		Mínimo	12,7	0,9	0,4	2,4
		Media	22,4	5,9	4,0	15,6
		C.V.(%)	60,4	19,0	207,1	84,4
05O01P1	75	Máximo	153,0	6,5	204,1	133,1
		Mínimo	12,7	1,0	0,0	4,7
		Media	23,3	5,6	4,0	17,5
		C.V.(%)	76,1	17,6	232,4	106,1
05P01P1	87	Máximo	67,1	6,3	110,8	76,1
		Mínimo	12,8	0,3	0,4	3,6
		Media	22,2	5,7	3,9	16,8
		C.V.(%)	46,6	18,2	212,6	76,3
05P02P1	101	Máximo	69,7	6,0	178,5	63,3
		Mínimo	12,9	0,3	0,1	4,0
		Media	21,6	5,6	3,7	18,0
		C.V.(%)	43,5	16,3	236,3	66,6
05P03P1	91	Máximo	129,5	6,0	166,9	73,1
		Mínimo	12,7	0,3	0,3	3,3
		Media	22,9	5,6	3,9	18,7
		C.V.(%)	68,8	22,0	231,8	79,0
05P04P1	80	Máximo	162,5	11,8	213,7	85,7
		Mínimo	12,7	0,3	1,9	3,6
		Media	24,5	5,7	4,4	18,0
		C.V.(%)	82,6	24,4	238,9	97,9
05R01P1	65	Máximo	55.6	6.5	220.8	58.5
		Mínimo	12,8	0,5	0,3	3,5
		Media	23,0	5,7	3,9	16,0
		C.V.(%)	45,4	15,6	221,5	80,6

Tabla 1.*Estadísticos de las tormentas erosivas en la cuenca del Guadalentín durante el período 1992–2012 (C.V. = coeficiente de variación)*

Tras el análisis de los ajustes realizados y la selección de la estructura más adecuada de la ecuación simplificada del cálculo de la erosividad se confeccionan unos mapas guía de los parámetros necesarios para la obtención del parámetro R en cualquier punto de la zona estudiada.

Parámetro	Definición	Unidades
PA	Precipitación anual	mm
PMD	Máxima precipitación diaria anual	mm
PM	Precipitación mensual	mm
PMM	Precipitación media mensual	mm
PMmax	Precipitación máxima mensual	mm
MFI	Índice Modificado de Fournier	mm
MV	Lluvia media Junio-Septiembre	mm
MR	Lluvia media Octubre-Mayo	mm
PMEX	Lluvia media de la máxima mensual de cada uno de los años de la serie	mm
F24	Factor de concentración de maxima lluvia diaria	mm
ICONA	Erosividad por la fórmula ICONA	MJ $ha^{-1}mm\ h^{-1}yr^{-1}$

Tabla 2. *Parámetros usados en las expresiones para la obtención de R.*

3. Resultados y discusión.

Tras evaluar el parámetro R, los resultados obtenidos para cada estación son los que se muestran en la Tabla 3. Como se puede comprobar, el valor de la erosividad de la zona oscila entre 385 y 830 MJ ha-1 mm h-1 con unos valores anuales extremos que distan mucho del valor medio de la serie estudiada. Ésta es una de las consecuencias de, por un lado, la no uniformidad de la distribución de precipitaciones y, por otro lado, de los elevados valores que en determinados años tiene este parámetro, asociado a las altas intensidades de lluvia que, de manera puntual, suelen ser características de un clima semiárido como éste donde se encuentra la cuenca del Guadalentín. Igualmente, como síntesis de los resultados obtenidos se ha confeccionado un mapa de la distribución geográfica del valor de R en la cuenca estudiada (Figura 2) con el que se comprueba que, pese a los valores extremos obtenidos, se obtiene una media del factor R de erosividad en torno a 620 MJ ha-1 mm h-1 mientras que los valores extremos, se localizan en zonas con una altitud superior a 1000 m.

Hasta el momento, y debido a que la información sobre lluvia caída en períodos inferiores a 30 minutos no estaba disponible en la mayor parte de las estaciones, el cálculo de la erosividad de la lluvia se realiza mediante la utilización de expresiones que requieran datos que fueran disponibles en las mismas, como se ha comentado previamente.

En España, la determinación de la erosividad de la lluvia se realiza en gran parte del territorio mediante la utilización de la formulación del ICONA (1988), la cual se ha aplicado en cada una de las estaciones consideradas. Los valores que se obtienen mediante la utilización de la fórmula recomendada por este organismo para el sureste español arroja valores muy superiores (300%) a los que se obtienen como erosividad media de la serie de años estudiados con la formulación de Wischmeier y Smith (1978). La formulación del ICONA

(1988) sobrevalora la erosividad duplicándola y triplicándola con respecto a la obtenida por USLE, acercándose generalmente a los valores extremos más que a los valores medios calculados.

Estación	R_{medio}	$R_{máximo}$	$R_{mínimo}$
01O06P1	524,602	1.674,642	9,546
01P02P1	530,719	1.502,927	53,659
01U01P1	830,349	2.765,552	85,717
05E02P1	722,533	3.317,699	21,523
05E03P1	657,629	2.272,988	33,272
05N01P1	593,599	1.812,679	58,120
05O01P1	716,847	5.698,645	58,768
05P01P1	522,241	1.319,669	58,887
05P02P1	617,235	1.152,034	14,260
05P03P1	663,322	1.748,167	20,747
05P04P1	717,074	2.733,979	14,669
05R01P1	385,317	879,854	52,478

Tabla 3. *Valores medios, máximos y mínimos (MJ ha^{-1} mm h^{-1}) en las estaciones de la cuenca del Guadalentín en el período 1992-2013.*

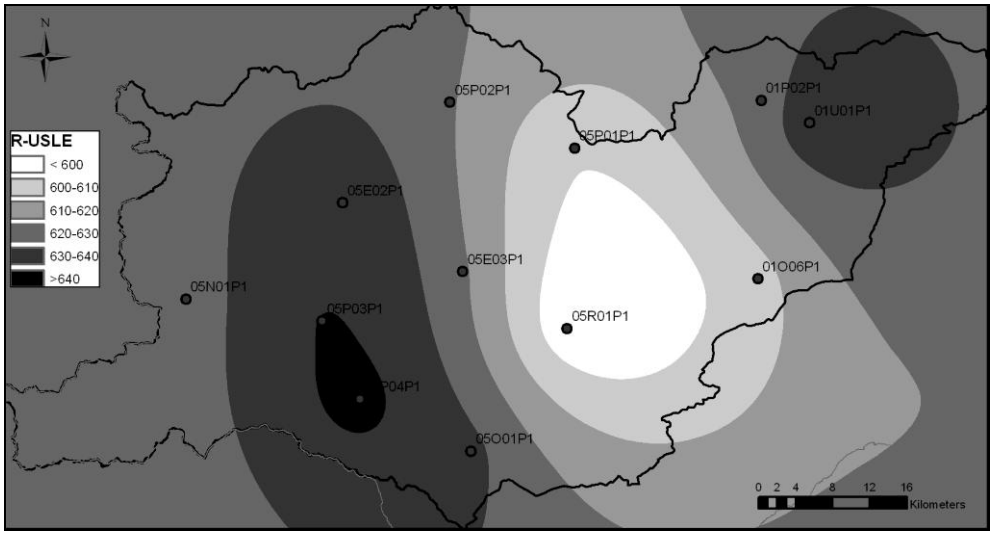

Figura 2. *Distribución de los valores de R-USLE en la cuenca del Guadalentín.*

Basada en los parámetros de la expresión de ICONA, se ha obtenido la siguiente ecuación $R=e^{-1.235}$ (-11.92) $(PMEX)^{1.297}$+ (10,538.88) $(MR)^{-0.511}$+ (549.33) $(MV)^{0.336}$ + (624.42) $(F24)^{0.414}$, la cual da un coeficiente de correlación r=0.936, así como NSE (Coeficiente de Nash-Sutcliffe) de 0.887 y un RMSE (raíz cuadrada del error medio cuadrático) de 38.545 demostrando el buen ajuste que ofrece la estructura de la ecuación del ICONA al R-USLE.

De igual manera, dado el buen resultado que se consigue con expresiones similares a las del ICONA, se ha correlacionado lineal y polinómicamente (grado 2) la erosividad obtenida con el USLE y el valor obtenido con el ICONA alcanzando coeficientes de correlación de 0.7058 y 0.7188 respectivamente, inferiores a los conseguidos con las modificaciones realizadas sobre la expresión del ICONA. Asimismo, se han testado otras expresiones de tipo lineal, exponencial, polinómica, logarítmica y potencial con el resto de parámetros indicados anteriormente (Tabla 4), no llegándose a coeficientes de correlación superiores a 0.30 en el caso del total de la serie analizada, así como de 0.60 para períodos anuales.

A la vista de los buenos resultados de la utilización de la expresión $R= e^{a(1.235)}$(PMEX)1.297+b(MR)-0.511+c(MV)0.366+d(F24)0.414, se han evaluado de forma independiente los coeficientes a, b, c y d de la anterior ecuación para cada una de las estaciones. Se han realizado una serie de mapas (Figura 3) mediante krigeado de cada parámetro para la obtención del valor espacial del factor R en la cuenca del río Guadalentín.

4. Conclusiones

La escasez de datos a escala subhoraria en las estaciones meteorológicas ha propiciado la creación de una serie de expresiones que permiten la obtención del valor de la erosividad de la lluvia mediante la utilización de parámetros más fácilmente obtenibles.

Para la cuenca analizada, con un total de 12 estaciones pluviométricas con información cincominutal se han calculado los valores de R según el método de USLE obteniendo medias en torno a los 600 MJ ha-1 mm h-1, pese a contar con valores extremos que alcanzaban los 5700 MJ ha-1 mm h-1, propios del clima semiárido en el que nos encontramos con precipitaciones muy elevadas en períodos cortos de tiempo.

Se constata que expresiones basadas en un único parámetro como el MFI o medias de precipitaciones anuales y/o mensuales ofrecen correlaciones muy bajas con los valores obtenidos mediante el método de USLE. Sin embargo, es la estructura de la expresión del ICONA (1988), simple en la información requerida, la que alcanza un ajuste más alto (r=0.936, NSE=0.887, RMSE=38.545) para las estaciones que integran la cuenca estudiada, modificando para ello, los coeficientes que acompañan a los parámetros seleccionados. Por ello, se han elaborado para toda la extensión de la cuenca del Guadalentín una serie de mapas con la interpolación mediante kriging de cada uno de los coeficientes ajustados en cada estación para los parámetros que componen la expresión finalmente seleccionada con

los que se puede obtener el valor de la erosividad media de la lluvia para un punto perteneciente a la misma.

	Coeficientes de correlación		Empirical coefficients			
Parámetro	**Curva de regresión**	**r**	**a**	**b**	**c**	**Curvas de ajuste**
ICONA	Lineal	0.607	0.21	273.10	----	R=a ICONA+b
ICONA	Exponencial	0.589	339.40	0.00	----	R= a $e^{b\ ICONA}$
ICONA	Polinómica	0.638	0.00	1.27	-664.3	R= a $ICONA^2$+b ICONA+c
ICONA	Potencial	0.596	5.19	0.64	----	R=a $(ICONA)^b$
MFI	Lineal	0.273	5.84	185.10	----	R=a MFI+b
MFI	Exponencial	0.305	265.10	0.01	----	R= a*e^{b*MFI}
MFI	Polinómica	0.286	-0.31	52.16	-1543.0	R= a MFI^2+b MFI+c
MFI	Logarítmica	0.275	441.10	12.80	----	R= a Ln(MFI)+b
MFI	Potencial	0.309	16.01	0.84	----	R=a $(MFI)^b$
PA	Lineal	0.355	1.54	166.20	----	R=a PA + b
PA	Exponencial	0.403	251.40	0.00	----	R= a e^{b*PA}
PA	Polynomial	0.437	-0.04	25.57	-3320.0	R= a PA^2+b PA+c
PA	Potential	0.415	3.70	0.90	----	R=a (PA)^b
PMEX	Linear	0.187	2.83	383.40	----	R=a PMEX+b
PMEX	Exponential	0.207	388.90	0.01	----	R= a e^{b*PMEX}
PMEX	Polynomial	0.207	0.17	-26.00	-1597.0	R= a $PMEX^2$+b PMEX+c
PMEX	Potential	0.202	87.41	0.44	----	R=a $(PMEX)^b$
MR	Linear	0.089	4.26	500.00	----	R=a MR+b
MR	Exponential	0.151	430.90	0.01	----	R= a $e^{b\ MR}$
MR	Polynomial	0.644	-13.26	770.70	-10491.0	R= a MR^2+b MR+c
MR	Potential	0.178	157.00	0.40	----	R=a $(MR)^b$
MV	Linear	0.430	14.94	364.80	----	R=a MV+b
MV	Exponential	0.465	378.60	0.03	----	R= a $e^{b\ MV}$
MV	Polynomial	0.474	-2.65	104.90	-369.20	R= a MV^2+b MV+c
MV	Potential	0.478	161.10	0.47	----	R=a $(MV)^b$
F24	Linear	0.499	21.76	272.40	----	R=a F24+b
F24	Exponential	0.430	364.50	0.03	----	R= a $e^{b\ F24}$
F24	Polynomial	0.558	2.82	-80.09	1162.00	R= a $F24^2$+b F24+c
F24	Potential	0.401	143.60	0.52	----	R=a $(F24)^b$

Tabla 4. *Resultados de ajustes del factor R lineales, polinómicos y exponenciales en la cuenca del Guadalentín.*

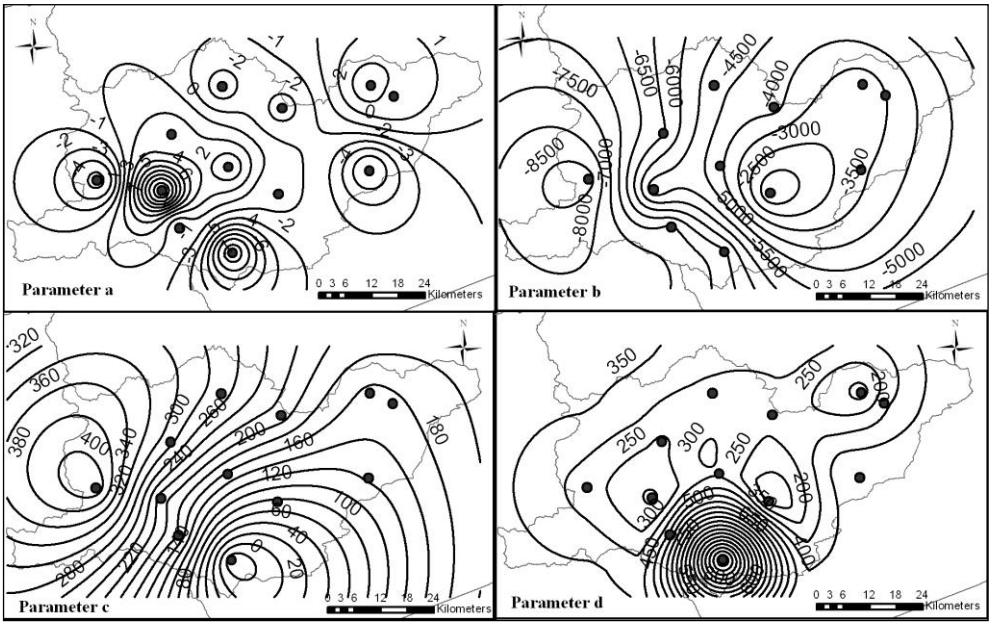

Figura 3. Parámetros para el cálculo de R en la expresión
$R= e^{a(1.235)}(PMEX)^{1.297}+b(MR)^{-0.511}+c(MV)^{0.366}+d(F24)^{0.414}$.

Referencias

Apaydin H., Erpul G., Bayramin I., Gabriels D. 2006. Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: a case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. J. of Hydrology, 328: 726–732.

Arnoldus J.M.J. 1977. Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. Food. Agric. Org., Soils Bull, 34: 39–51.

Davison P., Hutchins M.G., Anthony S.G., Betson M., Johnson M., Lord E.I. 2005. The relationship between potentially erosive storm energy and daily rainfall quantity in England and Wales. Sci. Total Environ, 344: 15–25.

De Santos Loureiro N., De Azevedo Coutinho M. 2001. A new procedure to estimate the RUSLE EI (sub30) index, based on monthly rainfall data and applied to the Algarve region, Portugal. J. of Hydrology, 250: 12-18.

Diodato N., Bellocchi G. 2010. MedREM, a rainfall erosivity model for the Mediterranean region. J. of Hydrology, 387: 119–127.

Domínguez-Romero L., Ayuso-Muñoz J.L., García-Marín A.P. 2007. Annual distribution of rainfall erositivity in western Andalusia, southern Spain. J. of Soil and Water Conservation, 62 (6): 390-403.

Fournier F. 1960. Climat et erosion. Presses Universitaires de France, Paris.

ICONA. 1988. Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo. Servicio de publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ed. Ariel, S.A. Barcelona, Madrid.

Grimm M., Jones R., Rusco E., Montanarella L. 2003. Soil Erosion Risk in Italy: a revised USLE approach. European Soil Bureau Research Report No.11, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Petan S., Rusjan S., Vidmar A., Mikoš M. 2010. The rainfall kinetic energy-intensity relationship for rainfall erositivity estimation in the mediterranean part of Slovenia. J. of Hydrology, 391: 314-321.

Posch M., Rekolainen S. 1993. Erosivity factor in the universal soil loss equation estimated from Finnish rainfall data. Agricultural Science in Finland, 2: 271–279.

Renard K.G., Freimund J.R.1994. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. J. of Hydrology, 157: 287–306.

Richardson C.W., Foster G.R., Wright D.A. 1983. Estimation of Erosion Index from Daily Rainfall Amount. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 26: 153–160.

Torri D., Borselli L., Guzzetti F., Calzolari M.C., Bazzoffi P., Ungaro F., Bartolini D., Salvador-Sanchis M.P. 2006. Italy. In: Boardman, J., Poesen, J. (Eds.), Soil Erosion in Europe. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, United Kingdom, 245–261.

Wijitkosum S. 2012. Impacts of Land Use Changes on Soil Erosionin Pa Deng Sub-district, Adjacent Area of KaengKrachan National Park, Thailand. Soil & Water Res., 7 : 10–17

Wischmeier W.H. 1959. A Rainfall Erosion Index for a Universal Soil- Loss Equation. Soil Sci. Soc. Am. J, 23-3: 246-249.

Wischmeier W.H., Smith D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook. No 537. USDA-SEA, US. Govt. Printing Office, Washington, DC.