

DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE LLUVIAS PARA LA INTRODUCCIÓN DE DATOS EN EL MODELO EUROSEM

Design for Storm Input for the EUROSEM Model

Peter Strauss^{1§}, Freddy Sancho², Christian Prat³ y Gustavo Arévalo⁴

RESUMEN

El estudio de la erosión se topa con el costo que representa su seguimiento, con la representatividad y con la duración en general corta de los experimentos. Por eso, se desarrollaron modelos como el Modelo Europeo de Erosión de Suelos (EUROSEM) que predice los efectos de la erosión de suelos a escala de una cuenca. Uno de los problemas para hacer andar este tipo de modelos hidrológicos es muchas veces la ausencia de las características de las lluvias basadas sobre una escala temporal fina (minutos) y no larga (días, horas). Por eso, se desarrolló un modelo de diseño de tormentas que genera los datos de lluvia faltantes necesarios a EUROSEM. Para comprobar la validez de tal modelo, primero, se compararon las características de las lluvias medidas en dos estaciones meteorológicas en Costa Rica y México con las obtenidas con el modelo de generación de tormenta. En una segunda etapa, se averiguó si las cantidades de suelo erosionado calculadas con EUROSEM para dos cuencas con base en datos arbitrarios de pérdidas de suelos y de lluvias registradas eran las mismas que las calculadas con base en los mismos datos arbitrarios de pérdidas de suelo, pero con las lluvias generadas por el modelo de diseño de tormentas. Los resultados mostraron que a pesar de tener en Costa-Rica y en México, lluvias con características muy diferentes, el modelo de diseño de tormentas era válido en ambas situaciones. Luego, se mostró que estos datos de lluvias reales o modelados

utilizados en EUROSEM conducían a las mismas estimaciones de erosión para ambas cuencas. Entonces, se puede considerar que el modelo de diseño de tormenta propuesto aquí puede servir para generar las características de las lluvias necesarias para el funcionamiento del modelo EUROSEM que simula la erosión de suelos a largo plazo.

Palabras clave: Modelación de lluvias, características de lluvias.

SUMMARY

To obtain reliable results for field studies of soil erosion by water, much time and money is needed. This is the main reason that models such as the European Soil Erosion Model (EUROSEM) have been developed. One major problem for the use of EUROSEM in long-term simulation studies is the lack of rainfall input data with high temporal resolution. In order to use EUROSEM as a tool for prediction of long-term soil erosion and associated effects such as a decrease in soil productivity, it is necessary to have a long record of rainfall data. For long-term evaluation of erosion effects, we therefore developed a storm design model to generate the missing rainfall input data necessary for EUROSEM. To test the validity of the proposed design model we first compared rainfall data recorded at two stations in Costa Rica and Mexico with rainfall data generated with the storm model. Second, we applied the storm design model on two watersheds in Mexico and Costa Rica with arbitrarily chosen but typical input data information for EUROSEM. For this set of input data we simulated soil erosion twice: the first time with recorded rainfall data, the second time using rainfall data generated with the storm design model. Results showed, that although rainfall characteristics of Costa Rica and Mexico are quite different, the storm design model was able to reproduce the statistical properties for both situations. Recorded rainfall input data and rainfall data generated with the storm design model resulted in the same amounts of modeled soil erosion

¹ Institute for Land and Water Management Research, Federal Agency for Water Management, Pollnbergstrasse 1, A-3252 Petzenkirchen, Austria. (peter.strauss@baw.at)

[§] Autor responsable.

² Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, 2060 San Pedro, Costa Rica.

³ Institut de Recherche pour le Développement. 911 Avenue Agropolis, 34032 Montpellier cedex 1, France.

⁴ Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, estado de México.

losses for both stations. Therefore, it can be concluded, that the proposed storm design model can generate rainfall data that can be used as input information for long-term calculations of erosion using the EUROSEM model.

Index words: EUROSEM, rainfall generation, rainfall model, rainfall characteristics.

INTRODUCCIÓN

El estudio de campo de la erosión hídrica de los suelos implica un alto costo para asegurar su seguimiento, su representatividad y su duración. Por lo anterior, se han desarrollado modelos como el Modelo Europeo de Erosión de Suelos (EUROSEM, Quinton y Rodríguez, 1999), que predice los efectos de la erosión de suelos de una cuenca. Uno de los problemas para hacer andar este tipo de modelos hidrológicos es muchas veces la ausencia de las características detalladas a escala de 1 minuto, de las lluvias. En efecto, EUROSEM es un modelo basado en eventos que requiere información de lluvias de alta resolución temporal para eventos de lluvia independientes. Para realizar estimaciones del efecto de la erosión de suelos como el cambio en la productividad de suelos, también se hace necesario correr modelaciones a largo plazo. Por eso, se desarrolló un modelo de diseño de tormentas que genera los datos de lluvia faltantes necesarios a EUROSEM.

Existen varios enfoques metodológicos para modelar lluvia con alta resolución temporal. Nguyen y Rousselle (1981) y Katz y Parlange (1995) consideraron a la lluvia como un proceso continuo donde las diferentes intensidades pueden ser representadas usando cadenas de Markov. En contraste, Rodríguez-Iturbe (1988) y Glasbey *et al.* (1995) modelaron las intensidades de lluvia como procesos puntuales independientes. Estos enfoques tienen el inconveniente de una excesiva demanda de parámetros de entrada. Además, la resolución temporal alcanzada no es menor que una hora, lo cual no es suficiente para ser usada como parámetro de entrada en EUROSEM. Otra posibilidad ampliamente usada con propósitos hidrológicos es el uso de un diseño de tormentas que ofrece información sobre la secuencia de intensidades de lluvia dentro de los eventos de lluvia. Existen varias categorías de dichas metodologías que Koutsoyiannis (1994) ha resumido. Este tipo de modelos tiene una menor demanda de

parámetros de entrada. Por otro lado, la naturaleza estocástica de los datos de lluvia de alta resolución temporal y más aún los picos de máxima intensidad dentro del aguacero difícilmente pueden ser cubiertos con enfoques de diseño de curvas de tormentas como el propuesto por Huff (1967).

De acuerdo con las necesidades de EUROSEM, fue necesario desarrollar una nueva metodología utilizando un enfoque estadístico que combina la metodología de diseño de tormentas con metodologías estocásticas. Este enfoque se beneficia por las bajas demandas de parametrización y las características aleatorias que toman en cuenta los picos de alta densidad dentro de los eventos de lluvia. Este modelo se diseñó y se comprobó con base en los datos de lluvias registradas en Costa Rica y México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos de Lluvia Utilizados

El análisis de las lluvias se realizó con bandas de pluviógrafo de registros diarios, controlados por el Instituto Meteorológico de Costa Rica en la estación Aeropuerto Juan Santamaría (CR), y con los obtenidos de un proyecto anterior (Prat, 1997) en San Miguel Tlaixpan en México (MEX). En el Cuadro 1, se presentan características generales de las estaciones investigadas. Prat (1997) mencionó información sobre las características de la lluvia en la estación MEX. Las estaciones seleccionadas presentan características contrastantes en relación con la precipitación total, la distribución de la precipitación y el número de eventos que pueden considerarse erosivas.

Como se ha observado en diferentes climas, la erosión frecuentemente es el resultado de relativamente poco eventos (Tropeano, 1984; Lal, 1990; Zuzel *et al.*, 1993; Prat *et al.*, 1997). Wischmeier (1959) consideró el valor de 12.5 como el límite de cantidad de lluvia (mm) e intensidad

Cuadro 1. Características generales de las estaciones meteorológicas Aeropuerto Juan Santamaría (Costa Rica) y San Miguel Tlaixpan (México).

	Costa Rica	México
Periodo analizado	1987 a 1997	1992 a 1995
Latitud	10° 00' N	19° 30' N
Longitud	84° 12' O	98° 48' O
Altitud	932 m	2555 m
Lluvia anual	2001 mm	639 mm
Temperatura promedio anual	22.9 °C	13.0 °C

(mm h⁻¹) en la cual las lluvias pueden ser potencialmente erosivas. Wilkinson (1975) y Sabel-Koschella (1988) han confirmado este valor. En contraste, Deumlich (1989) reportó fuertes pérdidas de suelo empezando con eventos mayores que 15 mm y Hudson (1965) encontró un mejor desempeño del índice de erosividad cuando se utilizaron lluvias superiores a 25 mm h⁻¹. Morgan (1974) también reportó resultados similares. Para estar en el intervalo de los valores reportados y para obtener un número práctico de eventos para cada año de la modelación, se consideraron sólo eventos con una precipitación mayor que 15 mm para Costa Rica. Para México, se disponía de sólo cuatro años de datos de lluvia con suficiente resolución temporal; por esto, fue necesario reducir el límite de 15 mm a 10 mm con el fin de obtener suficientes eventos de lluvia para el análisis estadístico. Los eventos se consideraron como eventos de lluvia independientes cuando no se presentó ninguna precipitación por más de una hora.

Enfoque Estadístico

La suposición básica de nuestro modelo es que el poder erosivo de la lluvia puede ser correctamente modelado, utilizando parámetros particulares de la lluvia (Strauss *et al.*, 1999). Una combinación de estos parámetros, con un procedimiento adecuado que tome en cuenta la estructura interna de la tormenta, resultará en la generación de un diseño de tormentas que puede usarse satisfactoriamente para modelar la erosión de suelos. Para caracterizar básicamente el poder erosivo de la lluvia, los eventos preseleccionados se disgregaron en periodos de precipitación menor que 5 mm h⁻¹. Para representar las características erosivas de los picos de lluvia, se escogió la duración del pico (*d*), cantidad de lluvia en el pico (*a*) y máxima intensidad en el pico (*p_i*). La duración y la cantidad de lluvia son consideradas como propiedades básicas del evento. Muchos autores desde Wischmeier (1959) han reportado la evidencia de la importancia de estas características particulares, así como de las intensidades máximas de la lluvia.

Modelación de la Erosión

EUROSEM es un modelo que está diseñado para predecir el escurrimiento total y la erosión del suelo, basándose en la distribución de eventos y mediante la descripción de varios procesos fundamentales. Los procesos más importantes son:

- Intercepción de la lluvia por la cobertura vegetal.
- Volumen de la capacidad de almacenamiento de las depresiones de superficie.
- Desprendimiento de las partículas de suelo por el impacto de las gotas de agua y por el escurrimiento.
- Depósito de sedimentos.
- Capacidad de transporte del escurrimiento.

Para simular el escurrimiento superficial, EUROSEM utiliza los mismos algoritmos que se emplean en el modelo KINEROS (Woolhiser *et al.*, 1990). Para el uso de EUROSEM en una cuenca, ésta se divide en varias unidades o componentes, los cuales están conectados entre sí. Los valores de propiedades, como la pendiente, el tipo de suelo y la cobertura de vegetación son requeridos para cada unidad de la cuenca. Una descripción más completa del modelo EUROSEM se encuentra en Morgan *et al.* (1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Elaboración del Modelo de Diseño de Tormentas

Para derivar el número de eventos por año, se utilizó el promedio de eventos por mes. La selección de la mejor distribución estadística para representar las características del pico se hizo mediante la prueba de varias distribuciones que comúnmente se usan en estudios hidrológicos (Clark, 1994). El número de picos (*p_{no}*) que ocurren dentro de un evento se estimó usando una distribución de Poisson. Pruebas preliminares han mostrado que ésta es superior a una distribución geométrica. La distribución está dada por:

$$f(p_{no}) = \frac{\omega^{p_{no}} e^{-\omega}}{p_{no}!} \quad \omega > 0 \quad (1)$$

Donde: *p_{no}* = número de picos, ω = valor esperado de *p_{no}* (promedio aritmético), *e* = base de logaritmo natural.

Para representar *d*, se usó una distribución normal de la forma:

$$f(d') = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{d'-\bar{d}'}{\sigma}\right)^2} \quad (2)$$

Después de transformar d a $d' = \log_{10}(d)$, lo cual probó ser superior a la distribución Gamma o a la distribución Weibull. La cantidad de lluvia se ajustó a una distribución exponencial:

$$f(a') = \lambda e^{-\lambda a'} \quad \lambda > 0 \quad (3)$$

Donde a' se refiere al exceso de lluvia sobre un límite de 5 mm. Para probar la independencia estadística entre cada una de las características erosivas, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman (Cuadro 2)

Para ambas estaciones, la correlación entre los parámetros de duración (d) y la cantidad del pico (a) no fue significativa a 5%. La máxima intensidad al pico (p_i) fue significativamente correlacionada con la duración (d) y la cantidad (a) para las dos estaciones. Analizando ambas estaciones, las mayores correlaciones se observaron entre la máxima intensidad al pico (p_i) y la intensidad promedio del pico (m_i), aunque el valor de correlación entre d y m_i para la estación de México era la mayor de todas en la tabla. Para mantener el mismo procedimiento de estimación de los parámetros para ambas estaciones, se decidió estimar la máxima intensidad en dependencia de la intensidad promedio (m_i), donde:

$$m_i = \frac{a}{d} \quad (4)$$

Una transformación de p_i en $p_i \cdot \log_{10}(p_i)$ y m_i en $m_i \cdot \log_{10}(m_i)$ resultó aproximadamente en una distribución normal de los valores. Análisis posteriores revelaron una relación de la forma:

$$p_i' = c + k m_i' + \varepsilon \quad (5)$$

Donde: c, k = constante, ε = término de error

Una prueba de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) señaló que ε era normalmente distribuida con medio cero (Figura 1).

Habiéndose escogido una metodología apropiada para la modelación de las características erosivas de la lluvia, todavía fue necesario hacer algunas suposiciones sobre la distribución de la lluvia dentro de cada evento. Existen varias posibilidades para la representación de pares de tiempo-intensidad (Redaño y Lorente, 1993). En este caso, se escogió una función

Cuadro 2. Coeficiente de correlación de Spearman y niveles de significancia (P) para los parámetros duración del pico (d), precipitación pico (a), máxima intensidad pico (p_i) e intensidad pico promedio (m_i) de las estaciones en Costa Rica (CR, n = 4462) y México (MEX, n = 63).

MEX		d	a	p_i	m_i
d		1.00			
	P	-			
a		-0.19	1.00		
	P	0.132	-		
p_i		-0.61	0.60	1.00	
	P	0.000	0.000	-	
m_i		-0.86	0.59	0.79	1.00
	P	0.000	0.000	0.000	-
CR		d	a	p_i	m_i
d		1.00			
	P	-			
a		0.07	1.00		
	P	0.078	-		
p_i		-0.30	0.78	1.00	
	P	0.000	0.000	-	
m_i		-0.60	0.72	0.83	1.00
	P	0.000	0.000	0.000	-

doble exponencial para representar la distribución de las intensidades de lluvia en el diseño de tormentas. Nicks y Lane (1989) también han usado una función similar en el desarrollo del modelo de erosión WEPP:

$$i = p_i e^{\lambda(t-\frac{d}{2})} \quad t \leq 0.5 d \quad (6)$$

$$i = p_i e^{-\lambda(t-\frac{d}{2})} \quad t > 0.5 d \quad (7)$$

Donde: i = intensidad de lluvia, t = tiempo, λ = parámetro de la distribución y d = duración total. La combinación e integración de las Ecuaciones 6 y 7 resulta en la función (Haberlandt, 1996):

$$f(\lambda) = \frac{1}{\lambda} p_i \left[2 - e^{-\lambda \frac{d}{2}} - e^{\lambda \frac{d}{2}} \right] - a = 0 \quad (8)$$

la cual puede ser resuelta numéricamente usando el algoritmo de bisección descrito por Mathews (1995). Una representación gráfica de las variables de entrada usadas en nuestro enfoque de diseño de tormentas se muestra en la Figura 2.

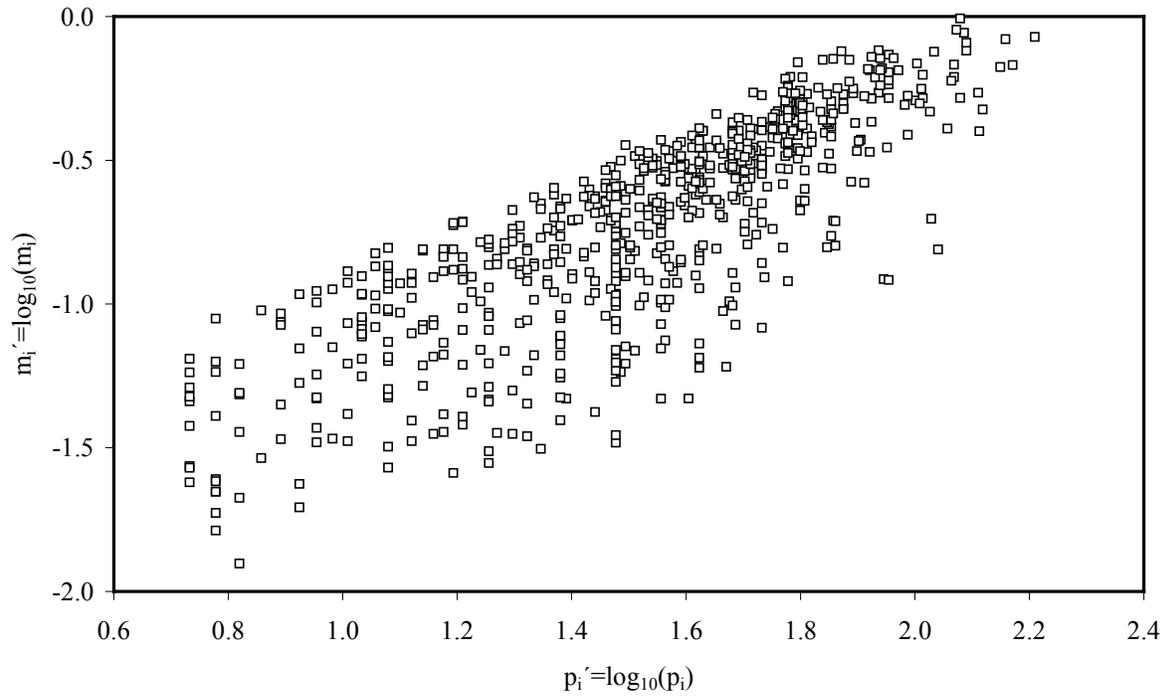


Figura 1. Relaciones entre los valores transformados a logaritmos de intensidad media del pico (m_i') e intensidad pico máxima (p_i') para Costa Rica.

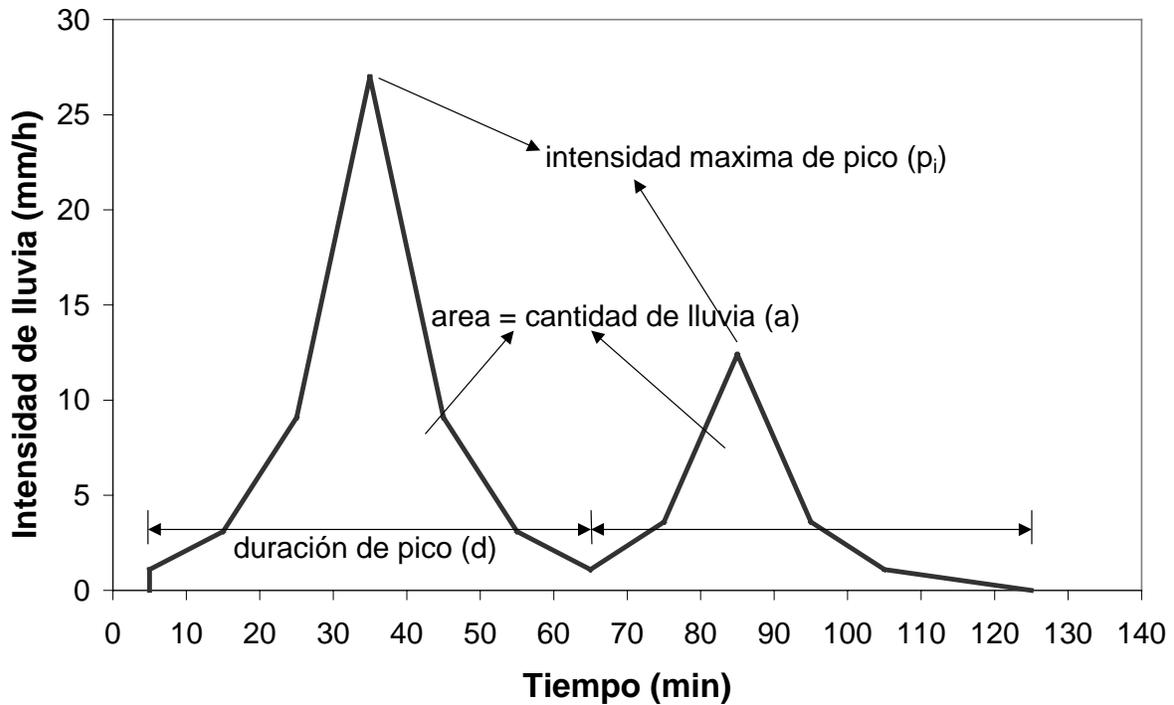


Figura 2. Representación gráfica de los parámetros de entrada para el diseño de tormentas en un evento de lluvia con dos picos.

Cuadro 3. Características específicas de los eventos de lluvia estudiados para Costa Rica (CR) y México (MEX).

Característica	CR	MEX
Número total de eventos	2296	711
Número de eventos evaluados [†]	462	63
Duración media de los eventos evaluados (min)	293	208
Desviación estándar	168	182
Lluvia media de los eventos evaluados (mm)	29.8	15.9
Desviación estándar	14.1	6.4
Intensidad media de la lluvia (mm h ⁻¹)	2.9	71.1
Desviación estándar	2.3	58.3

[†] Eventos de lluvia sobre un umbral de precipitación e intensidad (CR = 15 mm h⁻¹, MEX = 10 mm h⁻¹)

Ajuste de la Distribución del Modelo de Diseño de las Lluvias Registradas

En los Cuadros 1 y 3 puede observarse que las dos estaciones investigadas muestran características muy diferentes. Las lluvias en la estación de Costa Rica tienen una mayor duración, mayor precipitación y menores intensidades pico en comparación con la estación utilizada en México. La cantidad total de lluvia (Cuadro 1) es también reflejada por el número de eventos sobre el umbral límite (Cuadro 3), aunque los datos no son directamente comparables, debido a los diferentes límites usados en las dos estaciones.

El ajuste de los datos usando las metodologías descritas en la sección "Elaboración del Modelo de Diseño de Tormentas" resultó en los valores de los parámetros que se presentan en el Cuadro 4.

Como el término de error de la Ecuación 5 fue similar para las dos estaciones, se escogió mantener ϵ constante con un valor de 0.2. En los Cuadros 5 y 6, se comparan algunos estadísticos seleccionados de los valores de los parámetros erosivos para eventos observados y modelados. El valor del estadístico de Kolmogorov-Smirnov entre valores observados y modelados para el número de picos (p_{no}) y la precipitación al pico (a) no detectó diferencias a un

nivel de significancia de $P = 0.05$ para ninguna de las estaciones. En contraste, la duración del pico (d) falló en la misma prueba para la estación de Costa Rica. Sin embargo, para México no se detectaron diferencias a un nivel de significancia de $P = 0.05$ entre lluvias observadas y modeladas para la duración del pico. Una comparación de cuartiles mínimos y máximos para esos parámetros también muestra una muy buena relación entre valores observados y modelados. La comparación de los cuartiles para los valores observados y modelados de máxima intensidad al pico (p_i) revela que la modelación tiende a bajar las intensidades para ambas estaciones (Cuadros 5 y 6), pero, en especial, para los datos de la estación en México.

Capacidades Predictivas del Modelo

Para probar la capacidad del modelo de diseño de tormenta a ser usado en EUROSEM, se seleccionaron dos pequeñas cuencas (< 100 ha) en Costa Rica y México y los resultados obtenidos se compararon con lluvias reales y las diseñadas. Para cada unidad, los valores de los parámetros requeridos por EUROSEM se derivaron de mediciones en campo o estimados según algunas tablas preestablecidas (Veihe *et al.*, 2001). La erosión de suelos para cada una de las unidades de las cuencas seleccionadas se calculó primero usando los datos reales de lluvia en las cuencas (Costa Rica: 10 años; México: 4 años) y, posteriormente, utilizando los datos de lluvia generados con el enfoque de diseño de tormentas para el mismo periodo. Los resultados se compararon para cada unidad de la respectiva cuenca en términos de pérdidas de suelo por hectárea por año (Figuras 3 y 4).

En general para las dos cuencas, los valores de pérdida de suelo con las lluvias modeladas se aproximan bastante a los valores calculados con las lluvias reales. Puesto que las unidades en las cuencas tenían valores diferentes en los parámetros

Cuadro 4. Valores de los parámetros de las distribuciones seleccionadas para las lluvias de Costa Rica (CR) y México (MEX).

Característica	Distribución	Parámetros-CR	Parámetros-MEX
p_{no} [†]	Poisson	$\omega = 1.60$	$\omega = 0.50$
d'	Normal	$\bar{X} = 1.888, s = 0.260$	$\bar{X} = 1.522, s = 0.305$
a	Exponencial	$\lambda = 12.10$	$\lambda = 6.60$
p_i	Regresión lineal	$c = 2.063, k = 0.764, s_e = 0.19^{\ddagger}, r^2 = 0.70$	$c = 2.137, k = 0.763, s_e = 0.22^{\ddagger}, r^2 = 0.61$

[†] p_{no} = número de picos; d' = \log_{10} de la duración del pico; a = precipitación del pico; p_i = máxima intensidad al pico. [‡] s_e = desviación estándar del término de error.

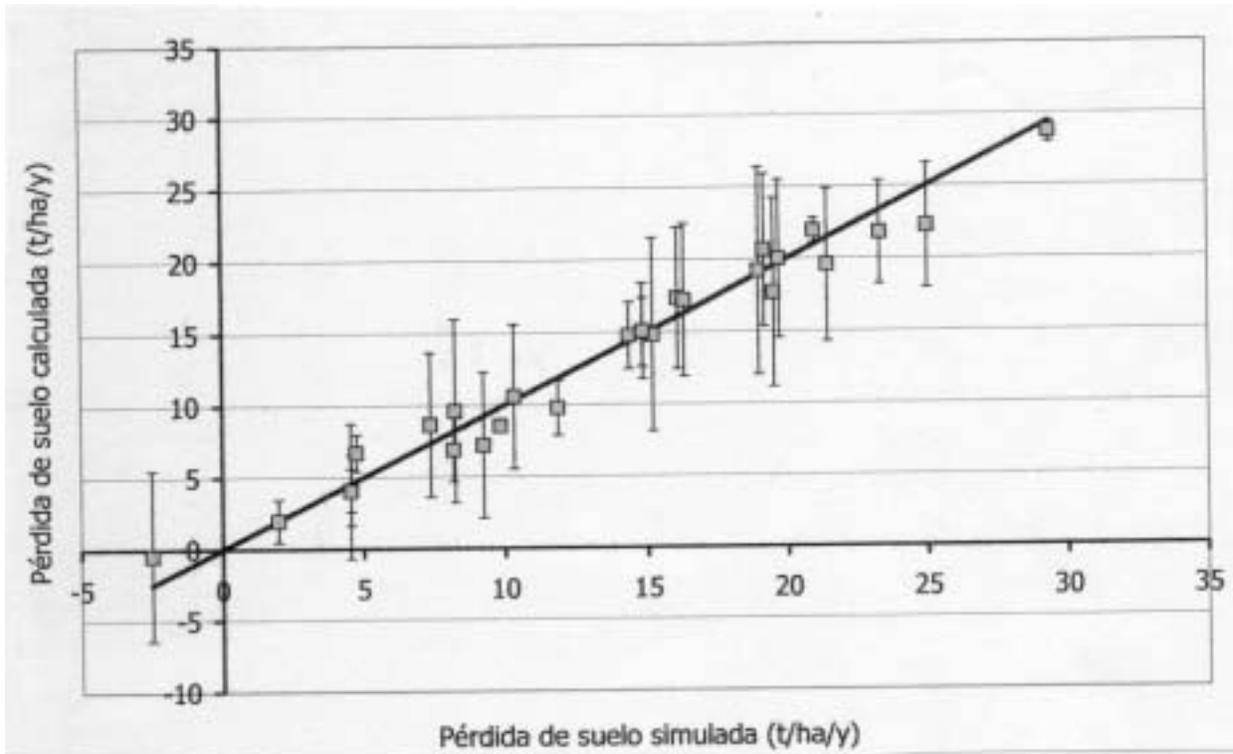


Figura 3. Pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$) calculada con lluvia observada *versus* pérdida de suelo calculada con lluvia modelada para 28 unidades de una cuenca de prueba en México. Los resultados de la modelación son el promedio de cinco repeticiones independientes; las líneas verticales indican la desviación estándar de la media, valores negativos indican acumulación de suelo.

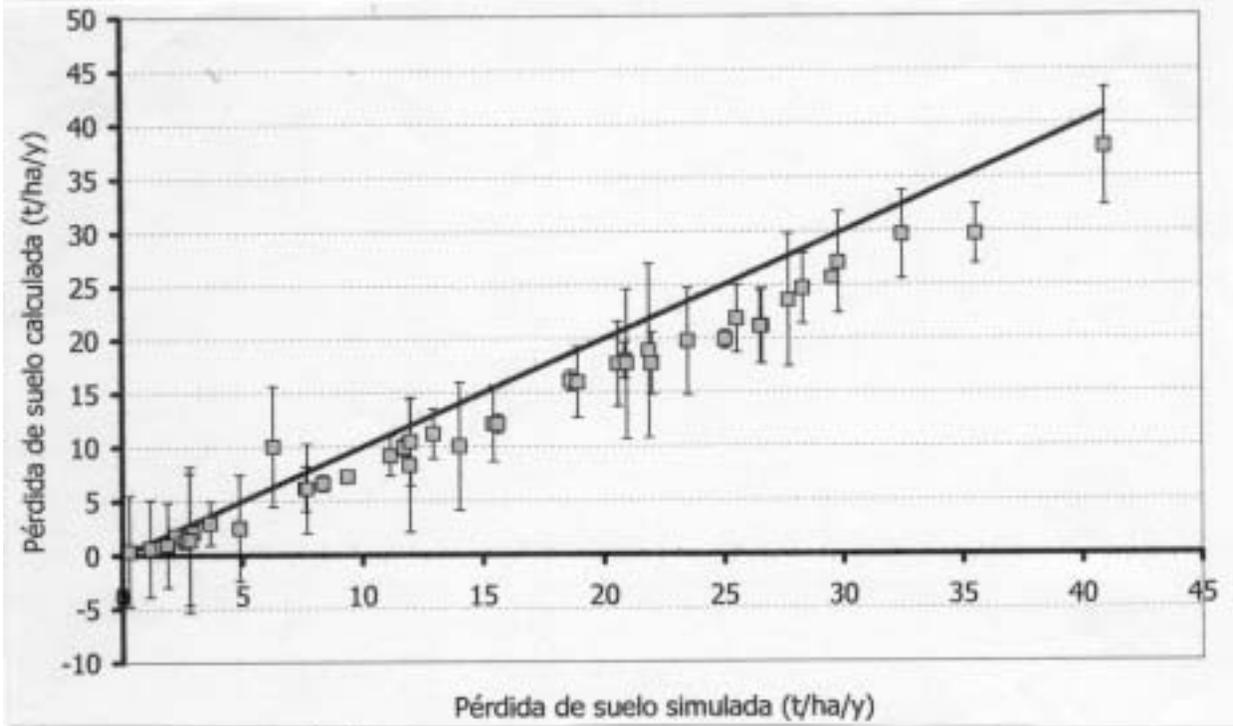


Figura 4. Pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$) calculada con lluvia observada *versus* pérdida de suelo calculada con lluvia modelada para 42 unidades de una cuenca de prueba en Costa Rica. Los resultados de la modelación son el promedio de cinco repeticiones independientes; las líneas verticales indican la desviación estándar de la media, valores negativos indican acumulación de suelo.

Cuadro 5. Estadísticos para los picos de lluvia observados en eventos preseleccionados en las estaciones meteorológicas de Costa Rica (CR) y México (MEX).

MEX (n = 68)	p _{no}	d [†]	a	p _i
		min	mm	mm h ⁻¹
Desviación estándar	.26	37	6.1	61.1
Mínimo	1	7	5.2	2.7
Máximo	2	173	45.7	330.0
Porcentajes	25	1.0	21	7.5
	50	1.0	27	10.7
	75	1.0	50	14.0
CR (n = 687)				
Desviación estándar	.74	65.8	12.0	27.5
Mínimo	1	20	5.1	3.0
Máximo	5	550	69.3	162.0
Porcentajes	25	1.0	50	8.4
	50	1.0	70	14.0
	75	2.0	110	22.5

[†] P_{no} = número de picos; d = duración del pico; a = precipitación pico; p_i = máxima intensidad pico.

utilizados por EUROSEM, los resultados obtenidos también señalan la habilidad del modelo de diseño de tormentas de reflejar correctamente diferentes condiciones ambientales.

En total, la desviación media entre las pérdidas de suelo con lluvias modeladas y reales fue de +0.1 t ha⁻¹ año⁻¹ ($s_{\bar{x}} = 1.3$) para la cuenca en México y +2.51 t ha⁻¹ año⁻¹ ($s_{\bar{x}} = 1.7$) para la cuenca en Costa Rica. Los resultados para la cuenca en Costa Rica exhiben una ligera tendencia a sobreestimar los valores totales de pérdida de suelo. Para probar si esto

Cuadro 6. Estadísticos para los picos de lluvias generadas en México (periodo de modelación = cuatro años) y Costa Rica (periodo de modelación = 10 años).

MEX (n = 75)	p _{no}	d	a	p _i
		min	mm	mm h ⁻¹
Desviación estándar	0.33	27	4.6	55.4
Mínimo	1	10	5.1	8.9
Máximo	3	235	71.8	395.7
Porcentajes	25	1	23	6.7
	50	1	38	9.2
	75	1	59	12.9
CR (n = 666)				
Desviación estándar	0.64	60	10.8	35.3
Mínimo	1	10	5.0	5.0
Máximo	5	540	95.5	355.2
Porcentajes	25	1	53	8.4
	50	1	79	13.0
	75	2	118	20.8

[†] P_{no} = número de picos; d = duración del pico; a = precipitación pico; p_i = máxima intensidad pico.

se debió a un menor desempeño del modelo de diseño de tormentas para Costa Rica, o a una tendencia general de EUROSEM de sobreestimar los resultados a mayores valores de pérdida de suelo, se corrió un segundo experimento de modelación para Costa Rica. En la segunda modelación, se utilizó un grupo diferente de parámetros para incrementar el valor de pérdida de suelo.

Los resultados indican que hubo una subestimación general en las sumas de pérdida de suelo para las condiciones del segundo experimento (Figura 5). Por eso, el modelo de diseño de tormentas puede usarse para diferentes valores de pérdida de suelo sin incrementar sustancialmente los errores asociados. De todas maneras, la desviación estándar en los valores calculados de pérdidas de suelo con las lluvias modeladas y reales fue de -2.2 t ha⁻¹ año⁻¹ ($s_{\bar{x}} = 3.9$), lo cual es aún menor que el error en el experimento con las lluvias reales y muy pequeño en comparación con los errores generales reportados en modelaje de erosión de suelos (Wischmeier y Smith, 1978; Throw, 1999).

CONCLUSIONES

- Aun cuando los datos climáticos utilizados mostraron marcadas diferencias en las condiciones ambientales de las cuencas utilizadas en Costa Rica y en México, el modelo de diseño de tormentas fue capaz de modelar lluvias de manera bastante realista para ambos sitios. Esto demuestra que el modelo desarrollado fue efectivo y puede utilizarse como generador de lluvias en la aplicación de modelos de estimación de erosión de suelos. Sería conveniente comprobar el modelo con un mayor número de estaciones meteorológicas y con datos de mayor resolución y con más años de registro para ampliar la información sobre los valores de entrada de los parámetros y sus cambios en diferentes condiciones de clima en el trópico. Los valores de los parámetros para el número de picos por evento o aguacero y la duración del pico, por ejemplo, sugieren que existe una relación entre estos parámetros y la cantidad de lluvia anual. Si tal relación puede ser establecida, se podría incrementar en forma drástica el uso práctico de modelos de erosión como EUROSEM.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto SPIES (Índices de productividad de suelos y su sensibilidad a

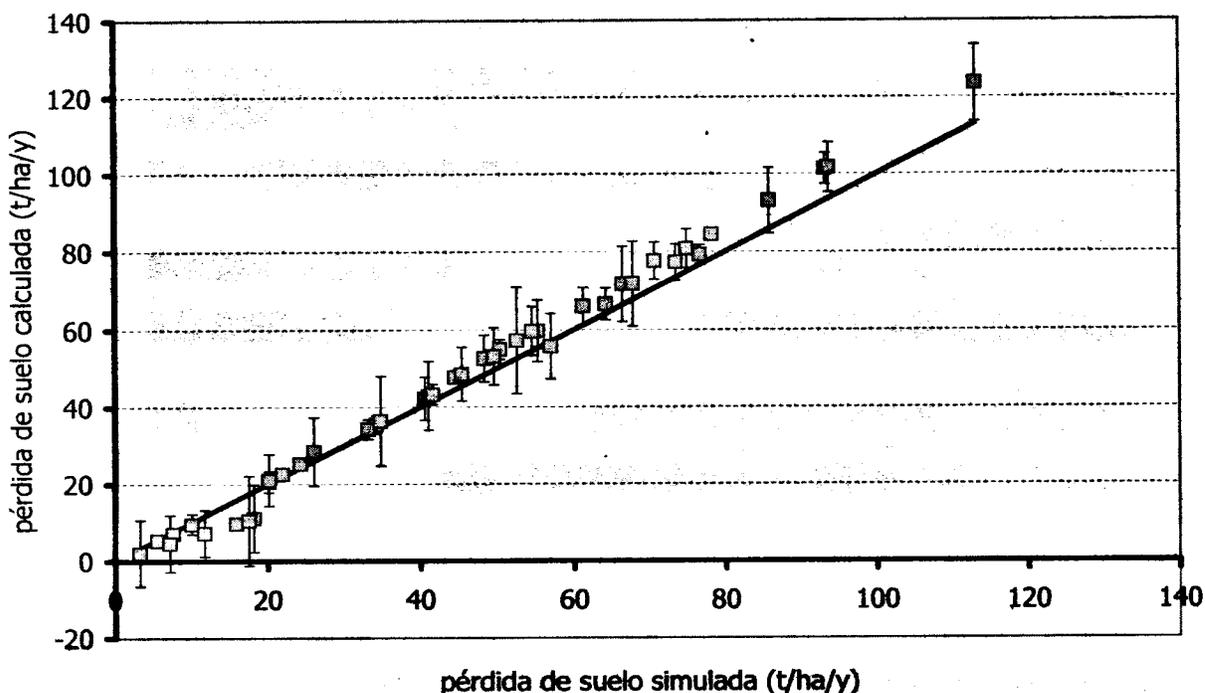


Figura 5. Segundo experimento de modelación: pérdida de suelo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$) calculada con lluvia observada *versus* pérdida de suelo calculada con lluvia modelada para 42 unidades de una cuenca de prueba en Costa Rica. Los resultados de la modelación son el promedio de cinco repeticiones independientes; las líneas verticales indican la desviación estándar de la media, valores negativos indican acumulación de suelo.

la erosión), contrato ERBIC18CT960096, financiado por la Unión Europea a la cual agradecemos ampliamente su apoyo. Partes de este trabajo también se han realizado bajo los contratos ENV4-CT97-0687 y TS3-CT96-0252 (coordinado por el IRD, ex-ORSTOM), cuyo financiamiento también se realizó a través de la Unión Europea. Además, agradecemos la colaboración del Instituto Meteorológico de Costa Rica que facilitó las bandas pluviográficas para su análisis.

LITERATURA CITADA

- Clark, R.T. 1994. Statistical modelling in hydrology. John Wiley. Chichester, UK.
- Deumlich, D. 1989. Untersuchungen zu Schwellenwerten erosionsauslösender Niederschläge im Jungmoränengebiet der DDR. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. 33(11): 709-716.
- Glasbey, C.A., G. Cooper y M.B. McGechan. 1995. Disaggregation of daily rainfall by conditional simulation from a point-process model. J. Hydrol. 165: 1-9.
- Haberlandt, U. 1996. Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen. Mitteilungen des Institutes für Wasserbau. Universität Stuttgart. Stuttgart, Germany.
- Hudson, N.W. 1965. The influence of rainfall on the mechanics of soil erosion with particular reference to Southern Rhodesia. M.Sc. thesis. University of Cape Town. South Africa.
- Huff, F.H. 1967. Time distribution rainfall in heavy storms. Water Res. Res. 3(4): 1007-1019.
- Katz, R.W. y M.B. Parlange. 1995. Generalisations of chain dependant processes: Application to hourly precipitation. Water Res. Res. 31(5): 1331-1341.
- Koutsoyiannis, D. 1994. A stochastic disaggregation method for design storm and flood synthesis. J. Hydrol. 156: 193-225.
- Lal, R. 1990. Soil erosion in the tropics: Principles and management. McGraw-Hill. New York.
- Magagna, B., A. Folly, K. Hoenninger, A. Muhar, J. Quinton, F. Sancho y P. Strauss. 2000. The SPIES model: Data flow and GIS linkage between a soil erosion and a soil productivity model. pp. 259-268. In: Fullerton, K. (ed.). Proc. 5th EC GIS Workshop Stresa. 1999. Space Applications Institute, EC Joint Research Centre, Ispra, EUR 19018 EN, Italy.
- Mathews, J.H. 1995. Numerical Methods: FORTRAN programs: Algorithm 2.2. In: NUMERICAL METHODS for mathematics, science and engineering. Prentice Hall. Englewood Cliffs, UK.
- <http://scicomp.ewha.ac.kr/netlib/textbook/mathews/>
- Morgan, R.P.C. 1974. Estimating regional variations in soil erosion hazard in Peninsular Malaysia. Malay. Nat. J. 29: 94-106.
- Morgan, R.P.C., J.N. Quinton, R.E. Smith, G. Govers, J.W.A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri y M.E. Styczen. 1998. The European soil erosion model

- (EUROSEM): A process based approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 527-544.
- Nguyen, V.T.V. y J. Rousselle. 1981. A stochastic model for the time distribution of hourly rainfall depth. *Water Res. Res.* 17(2): 399-409.
- Nicks, A.D. y L.J. Lane. 1989. Weather generator. pp. 2.1-2.19. *In: Lane, L.J. y M.A. Nearing (eds.). USDA-Water erosion prediction project: Hillslope profile model. NSERL Report 2. US Department of Agriculture-ARS. West Lafayette, IN.*
- Prat, Ch. 1997. Análisis de las características de las precipitaciones de 1992 a 1995 en San Miguel Tlaixpan (Texcoco, México). pp. 359-370. *In: Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos Volcánicos Endurecidos. Quito, Ecuador.*
- Prat, Ch., A. Báez y A. Márquez. 1997. Erosión y escurrimiento en parcelas de tepetate t3 en Texcoco, México. pp. 371-383. *In: Zebrowski, C., P. Quantin y G. Trujillo (eds.). Memorias del III Simposio Internacional sobre Suelos Volcánicos Endurecidos. Quito, Ecuador.*
- Quinton, J.N. y F. Rodriguez. 1999. Modelling the impact of live barriers on soil erosion in the Pairumani sub-catchment, Bolivia. *Mountain Res. Dev.* 19: 292-299.
- Redaño, A. y J. Lorente. 1993. Modelling the spatial and temporal distribution of rainfall intensity at local scale. *Theor. Appl. Climatol.* 47: 25-32.
- Rodríguez-Iturbe, I. 1988. Scale of fluctuation of rainfall models. *Water Res. Res.* 22(9): 15-37.
- Sabel-Koschella, U. 1988. Field studies on soil erosion in the southern Guinea Savanna of Western Nigeria. PhD thesis. Lehrstuhl für Bodenkunde. TU München, Germany.
- Strauss, P., F. Konecny y W.E.H. Blum. 1999. A rainfall generation procedure for the European soil erosion model (EUROSEM). *Hydrology Earth Syst. Sci.* 3(2): 213-222.
- Throw, T. 1999. Vetiver grass hedgerows likely to be key solution for stabilization of Central American watersheds. *Vetiver Network Newsletter* 20: 3-5.
- Tropeano, D. 1984. Rate of soil erosion processes in vineyards in Central Piedmont (NW Italy). *Earth Surface Processes Landforms* 9: 253-266.
- Veihe, A., J. Rey, J.N. Quinton, P. Strauss, F.M. Sancho y M. Somarriba. 2001. Modelling of event-based soil erosion in Costa Rica, Nicaragua and Mexico: Evaluation of the EUROSEM model. *Catena* 44(3): 187-203.
- Wilkinson, G.E. 1975. Rainfall characteristics and soil erosion in the rainforest area of Western Nigeria. *Expl. Agric.* 11: 247-255.
- Wischmeier, W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23: 246-249.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *USDA Agricultural Handbook* 537. Washington, D.C.
- Woolhiser, D.A., R.E. Smith y D.C. Goodrich. 1990. KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual. *USDA Agricultural Research Service ARS-USDA No. 77. Washington, D.C.*
- Zuzel, J.F., R.R. Allmaras y R.N. Greenwalt. 1993. Temporal distribution of runoff and soil erosion at a site in north-eastern Oregon. *J. Soil Water Conserv.* 48: 373-378.