



# EVALUACIÓN Y PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN REGIONES ÁRIDAS DE RELIEVE ACENTUADO DEL CENTRO-OESTE DE ARGENTINA

*EVALUATION AND PREDICTION OF HYDRIC EROSION IN ARID  
REGIONS OF STRONG RELIEF OF CENTRAL-WEST ARGENTINA*

ALBERTO I. J. VICH Y A. MARIANI

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), Av. Adrian Ruiz leal s/n,  
Parque General San Martín, 5500 Mendoza, Argentina.  
ajjvich@mendoza-conicet.gov.ar

## RESUMEN

La erosión hídrica es un fenómeno complejo y su magnitud es poco conocida en Argentina, especialmente en áreas silvestres donde prácticamente no existen observaciones cuantitativas sistemáticas. Las mediciones se realizaron al oeste de la ciudad de Mendoza, a 32°52'50"S y 68°52'00"W, sobre suelos poco evolucionados. Las mediciones de pérdidas de suelo (PS) se realizaron en el periodo 1982-95, en parcelas sobre suelo desnudo, con exposición y pendiente variable. Se examina la aplicación y adecuación de la *USLE* como herramienta de predicción, evaluándose sus componentes. Se

la emplea en la predicción de pérdidas de suelos de eventos individuales. Dado que el factor de erosividad de lluvia no explica adecuadamente las variaciones de las pérdidas de suelo se propusieron distintas formas, combinando la intensidad de lluvia y el escurrimiento. El resto de los factores se evaluó con la metodología original, incluyendo en el factor cobertura el efecto protector de los fragmentos de rocas presentes en el suelo y en superficie. El ajuste de la ecuación original se realizó por optimización con datos individuales. Del análisis de sensibilidad se desprende que los parámetros de las ecuaciones poseen un amplio rango de variación para un valor similar de error. La

aplicabilidad de la *USLE*, o las expresiones modificadas para la predicción de erosión de eventos individuales, no es satisfactoria debido al carácter aleatorio de las predicciones, por lo que resulta indispensable recolectar aún mayor cantidad de información.

**Palabras clave:** erodabilidad, pendiente, piedemonte

### **Summary**

*Water erosion, especially in wild areas, is a complex phenomenon whose magnitude has not been properly acknowledged in Argentina. There are practically no systematic quantitative observations, with the exception of those shown here. Measurements were carried out on west of the city of Mendoza (Argentina), at 32° 52' 50" S and 68° 52' 00" W. They were conducted in areas with poorly developed soils with mild arid climate. Measurements of soil losses (PS) were performed during the 1982-95 period on plots with bare soil and varied exposure and slope. Application and adjustment of the USLE as a prediction tool was examined and its components were assessed. It is used to predict soil losses caused by individual events since erosive storms are not frequent. Given the fact that the rainfall erodibility factor does not adequately explain soil loss*

*variations, different forms were proposed that combined rainfall intensity and runoff. The remaining factors were assessed with the original methodology, and the protective effect of rock fragments found in the soil profile and surface was included in the coverage factor. Adjustment of the original equation and proposals was carried out through optimization with individual data. Applicability of the USLE or modified expressions for predicting erodibility from individual events has not proved to be satisfactory due to the random nature of predictions. It is, therefore, essential to collect more information.*

**Key words:** erodibility, piedmont, slope

### **INTRODUCCIÓN**

La predicción de la tasa de erosión, bajo condiciones específicas de manejo en regiones naturales, es de importancia para programar medidas de manejo. Existen numerosos métodos y experiencias para predicción de erosión hídrica, desarrollados a partir de mediciones en áreas agrícolas, pero son muy escasas las realizadas para su validación en áreas silvestres. En Argentina, las mediciones sistemáticas de pérdidas de suelo y producción de sedimentos en la zona cultivada son pocas y, excepto las que se

muestran en el presente trabajo, prácticamente no existen en regiones naturales. La obtención sistemática de información sobre erosión hídrica es costosa y dificultosa en zonas áridas, debido a la variabilidad temporal y espacial de los factores involucrados en el proceso de erosión y al bajo número de eventos erosivos, que en la región difícilmente superan los tres anuales. Al presente, la única disponible en el área es la obtenida como resultado de los trabajos de investigación realizados en Mendoza a partir de 1982 y que continúan a la fecha.

Uno de los métodos de mayor aplicación, es la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) que se desarrolló como un modelo para predecir la pérdida anual de suelo, sobre una pendiente bajo condiciones específicas de uso (Wischmeier & Smith, 1978). La denominación de "universal" proviene del hecho que los factores involucrados representan la influencia del clima, suelo, relieve y manejo. Ha sido analizada y mejorada por numerosos investigadores de los más diversos países. La USLE es:

$$PS = 2240 \cdot R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Donde: PS, pérdida de suelo, en  $kg.ha^{-1}$ ; K, factor de erodabilidad de suelo; R, factor de erosividad; LS, factor topográfico; C, factor de cobertura; y P, factor de prácticas de manejo. En el presente trabajo, se examina su aplicación en regiones áridas para un evento específico, y se plantean modificaciones para su adecuación a la región. Es de destacar que la USLE no ha sido diseñada para predecir pérdidas de suelo de un evento en particular. Su aplicación, se justifica en el hecho que en las regiones áridas y semiáridas las tormentas que generan escurrimiento y pérdidas de suelo son poco frecuentes o raras. Generalmente, una parte sustancial del monto de pérdidas de suelo anual ocurre durante una tormenta, máxime en ausencia o baja cobertura vegetal.

## MATERIAL Y MÉTODO

### *Localización y descripción del área de estudio*

Las experiencias se llevan a cabo en la *Cuenca Aluvional Piloto* del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). Ubicada al oeste de la ciudad de Mendoza, en los  $32^{\circ}52'50''$  S y  $68^{\circ}52'00''$  W. Las parcelas se asientan sobre la Formación Mogotes (Terciario Supe-

rior), que constituye un conjunto espeso de rocas sedimentarias, con estratificación grosera (Chena, 1971). Los suelos -entisoles y aridisoles- muestran perfiles sin diferenciación de horizontes, presencia de material originario y cantidad variables de carbonatos en el subsuelo y dominancia de procesos de erosión de origen hídrico.

El clima es árido templado desértico, con temperatura media anual es de 16.1 °C (serie 1941-60). La precipitación media anual es de

198 mm (serie 1900-79). El régimen de precipitaciones muestra una evidente diferencia entre el periodo invernal, de abril a septiembre, y el estival, de octubre a marzo. La lluvia de verano es principalmente de carácter convectivo, con precipitaciones de corta duración y gran intensidad. En el periodo invernal las lluvias son débiles. La serie presenta fluctuaciones significativas en el periodo estival, con alternancia de periodos húmedos y secos (Compagnucci & Boninsegna, 1979).

Tabla 1. Dimensiones y características granulométricas de las parcelas

Table 1. Size and granulometric characteristics of stands

parcela	long. [m]	pend [%]	Fracción < 2 mm			MO [%]	
			> 2 mm [%]	2 - 0.1 [%]	0.1 - 0.02 [%]		
LV-2	2.0	33.6	42.7	54.5	45.0	0.5	1.73
LV-4	4.0	40.8	40.2	55.0	44.6	0.4	1.78
LV-8	8.0	41.0	45.3	66.5	33.0	0.5	1.16
LP-2	2.0	33.5	63.8	60.0	39.5	0.5	0.96
LP-4	4.0	37.3	47.0	54.0	45.0	1.0	1.70
LP-8	8.0	40.6	48.0	65.0	34.6	0.4	1.08

### Factores de la USLE

El índice R, define en que medida las lluvias erosionan la superficie del suelo desnudo. Resulta de multiplicar la energía cinética total por la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos (I30).

La erodabilidad del suelo (K) es un índice cuantitativo de la resistencia que opone el suelo a ser disgregado por la acción conjunta

de la precipitación y el escurrimiento superficial. Se define como la pérdida de suelo por unidad del índice R, medida en una parcela estándar. La determinación experimental del factor K resulta  $K = PS/R$ ; o  $K = \sum PS_i / \sum R_i$ . Si se trata de parcelas no estándar,  $K = PS / (R L S C P)$  (Romkens, 1985). La medición directa requiere una gran cantidad de tiempo, dinero y esfuerzo. Wischmeier & Mannering

(1969), desarrollaron una ecuación para la estimación del factor K sobre la base de 5 parámetros de suelos sencillos de determinar; se expresa en forma de nomograma, de amplio uso.

Investigaciones recientes indican que el factor K es un parámetro dinámico del suelo. Está fuertemente influenciado en el tiempo, por el contenido de humedad del suelo, características de la precipitación, uso del suelo, etc. (Young *et al.*, 1990; Mutchler & Carter, 1983). Por lo tanto para una predicción satisfactoria, especialmente de eventos individuales, es necesaria una representación dinámica de K. El resto de los factores se usaron según la definición original.

Donde: Q, volumen de escurrimiento, en mm; a, coeficiente ( $0.0 < \alpha < 1.0$ ) que representa la importancia relativa de la energía de la precipitación en comparación con la energía del escurrimiento para producir erosión;  $\beta$ , exponente; el resto, ya definidos.

Los factores de los distintos modelos, considerados como parámetros son: a) factor K y C del modelo original; b) factor K, C y coeficiente  $\alpha$ ; y c) factor K, C y exponente  $\beta$ . El análisis se realizó en cada parcela, denominadas aplicaciones, con la misma serie de registros. En un primer paso, se

seleccionaron 6 funciones objetivo ( $U_k$ ), y se efectuó una calibración preliminar de los tres modelos propuestos por optimización de cada función, para cada una de las 6 aplicaciones. Las funciones objetivos empleadas son:

### **Ajuste de la USLE. Modelos propuestos**

Una superficie se erosiona de forma diferente si se encuentra húmeda o seca, ya que para una misma precipitación el escurrimiento es mayor si se encuentra mojada, y en consecuencia la tasa de erosión. Por lo tanto, la adecuación de la USLE para la estimación de pérdidas de suelos de eventos individuales debe contemplar, en alguna medida, la condición de humedad antecedente del suelo. Para ello se incluyó en el factor de erosividad el escurrimiento, como una medida del efecto mencionado.

En función de la información de campo disponible, el ajuste se realizó con el factor R original (*modelo 1*), como una combinación lineal de R y el escurrimiento (*modelo 2*) y como el producto de I30 y el escurrimiento (*modelo 3*). Los nuevos modelos propuestos son:

$$A = 2240 \cdot K \cdot [\alpha \cdot R + (1 - \alpha) \cdot Q] \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (2)$$

$$A = 2240 \cdot K \cdot (I30 \cdot Q)^\beta \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (3)$$

Donde: Q, volumen de escurrimiento, en mm; a, coeficiente ( $0.0 < \alpha < 1.0$ ) que representa la importancia relativa de la energía de la precipitación en comparación con la energía del escurrimiento para producir erosión;  $\beta$ , exponente; el resto, ya definidos.

Los factores de los distintos modelos, considerados como parámetros son: a) factor K y C del modelo original; b) factor K, C y coeficiente a; y c) factor K, C y exponente  $\beta$ . El análisis se realizó en cada parcela, denominadas aplicaciones, con la misma serie de registros. En un primer paso, se seleccionaron 6 funciones objetivo ( $U_k$ ), y se efectuó una calibración preliminar de los tres modelos propuestos por optimización de cada función, para cada una de las 6 aplicaciones. Las funciones objetivos empleadas son:

$$U_1 = \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \quad (4)$$

$$U_2 = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{2 \cdot (y_i - x_i)}{(y_i + x_i)} \right] \quad (5)$$

$$U_3 = \left( \sum_{i=1}^N |y_i - x_i| \right) / \sum_{i=1}^N y_i \quad (6)$$

$$U_4 = \left| \sum_{i=1}^N (y_i - x_i) \right| / \sum_{i=1}^N y_i \quad (7)$$

$$U_5 = \left[ \left\{ \sum_{i=1}^N (y_i^{1/3} - x_i^{1/3})^2 \right\}^{3/2} \right] / N^{1/2} \sum_{i=1}^N y_i \quad (8)$$

$$U_6 = \left[ \sum_{i=1}^N (y_i^{1/2} - x_i^{1/2})^2 \right] / \sum_{i=1}^N y_i \quad (9)$$

Donde:  $y_i$ , pérdida de suelo observada en el evento i-ésimo;  $x_i$ , pérdida de suelo calculada; N, número de observaciones. El resultado obtenido, para cada tipo de modelo y aplicación, consistió en 6 grupos de parámetros óptimos  $P_j$ .

La metodología empleada para la calibración definitiva de los parámetros se elaboró sobre la base de la desarrollada por Diskin & Simon (1977). Se calcularon nuevamente las 6  $U_k$ , usando los grupos  $P_j$  obtenidos en el paso anterior. Los valores se ordenaron de forma matricial, y cada elemento es denominado  $W_{k,j}$ , donde el subíndice k denota el valor de la función objetivo valuada con el grupo de parámetros  $P_j$ ; se obtuvieron tantas matrices como aplicaciones existían.

En la etapa siguiente, por cada aplicación se construyó una nueva matriz  $R_{k,j}$ , en base a la asignación de un orden o categoría a cada elemento de  $W_{k,j}$ . El valor asignado, función de su magnitud relativa, es 1 para el mas bajo de  $W_{k,j}$ , 2 para el siguiente mas pequeño  $W_{k,j}$  y así sucesivamente hasta completar todos los elementos de una fila; obviamente la categorización se realiza para todas las filas. Se efectúa la suma por columna de los valores de  $R_{k,j}$ ; el grupo de parámetros  $P_j$  que produce el mas bajo valor de  $R_{k+1,j}$ , es el considerado como el adecuado.

Dado que las parcelas poseen características similares, y se asientan sobre una misma formación geológica, muy próximas entre sí, se pretendió obtener un único grupo de parámetros para cada tipo de modelo propuesto que optimice en todas las aplicaciones. Con un procedimiento análogo al descrito anteriormente, se calculó el error cuadrático relativo (ECR) de cada una de las 6 aplicaciones, con los parámetros calibrados en cada una de ellas. Los valores,  $ECR_{k,j}$ , se ordenaron matricialmente, donde el subíndice  $k$  representa el valor del error en la aplicación o parcela valuada con los parámetros calibrados  $P_j$ . A la matriz se la categorizó de la forma antedicha, encontrándose el grupo de

parámetros definitivos para todas las parcelas; es decir, el grupo  $P_j$  que minimiza simultáneamente en todas las parcelas la función error cuadrático relativo, sin que necesariamente el uso de éste grupo de parámetros particulares, produzca el mínimo minimorum ECR en una aplicación específica. Estos valores de parámetros se adoptaron como los óptimos para el conjunto total de observaciones de pérdidas de suelo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Pérdidas de suelo observadas*

Durante el período 1982-95 ocurrieron 36 episodios lluviosos que generaron escurrimiento y erosión hídrica. Las lluvias consideradas erosivas únicamente se presentaron en el período octubre-abril, con mayor concentración en el verano. Las precipitaciones consideradas erosivas poseen un umbral de intensidad máxima en 30 minutos de 15.0 mm.h<sup>-1</sup>. Por debajo de este valor, independientemente de la cantidad de lluvia caída, no se registra escurrimiento. De los 36 eventos ocurridos, únicamente el 28 % posee un monto de lluvia mayor de 30 mm. Por otra parte, el 56 % de los eventos posee un rango de intensidad máxima en 30 minutos entre 15.0 y 30.0 mm.h<sup>-1</sup>. En el período 1985-87 y 1988-89 no se registraron lluvias de carácter

erosivo. En los períodos 1986-87 y 93-96 las observaciones fueron menores a las ocurridas, debido a daños por vandalismo. En total se disponen de 206 registros para las 6 parcelas. El 34 % corresponden a  $PS < 1000.0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ; el 27 % es  $1000.0 < PS < 2000.0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ; y el 39 % es mayor de  $2000.0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  por evento. Pese a las diferencias en pendiente y longitud que poseen las parcelas, las medias de las pérdidas de suelo no muestran diferencias significativas. Es posible que las diferencias obedezcan a aspectos tales como su exposición, variación local de las lluvias, etc. más que a diferencias constructivas.

### **Factores de la EUPS**

Generalmente, (USLE) no se dispone de información tan específica, como la requerida para el cálculo de R. Por tal razón se usó una expresión simplificada desarrollada para el área pedemontana. Su ecuación es:

$$R = 0.0052 \cdot P^{0.91} \cdot I30^{1.38} \quad (10)$$

Donde: P, es la precipitación total del evento, en *mm*. La correlación entre los valores de R calculados con la metodología original y la simplificada, mostró un coeficiente de determinación de 0.85, altamente significativo; la recta de

regresión posee una pendiente de 0.99 y una ordenada al origen muy baja, constituyéndose en un modelo de predicción satisfactorio.

Dado que dicho factor es considerado el mejor estimador de erosión potencial, se efectuó la correlación entre las pérdidas de suelos observadas y el estimador. El análisis fue aplicado a los datos provenientes de cada parcela y al conjunto total de observaciones. Los resultados obtenidos muestran coeficientes de correlación del orden de 0.45, significativos a un nivel del 0.05. Dichos coeficientes no dan una explicación satisfactoria de las variaciones en las pérdidas de suelo en función de R, por lo cual, es evidente la necesidad de buscar un nuevo factor de erosividad para la estimación de las pérdidas de suelo de eventos individuales.

El factor K se estimó con los valores acumulados para la serie 1982-95 según: a) Romkens (1985) para parcelas no estandarizadas (columna A) y b) empleando el nomograma de Wischmeier & Mannering (1969) (columna B). En la Tabla 2 se muestran los valores calculados para las diferentes parcelas.

Los valores de erodabilidad difieren substancialmente de un método a otro, debido a la presencia de fragmentos gruesos en superficie que reduce la erosión hídrica

(McCormack, *et al.*, 1984; Simanton, *et al.*, 1984). El material grueso hace que la rugosidad superficial sea mayor, provocando una disminución de la velocidad de escurrimiento e incremento de la infiltración. El factor K, calculado a partir del nomograma, incluye únicamente partículas menores de 2.0 mm, que constituyen la fracción erodible del suelo, no los fragmentos gruesos, que poseen una gran variación en superficie y perfil. Su presencia, generalmente es

debida al resultado de procesos de erosión ocurridos en el pasado y en otro sitio. Se adoptó el criterio de emplear el factor K calculado por el nomograma, e incluir el efecto protector de los fragmentos gruesos en superficie, como una componente del factor de cobertura C (Renard & Ferreira, 1993). El empleo de un coeficiente de corrección de K, por la presencia de materiales gruesos, implicaría un gran nivel de incertidumbre difícil de evaluar (Box & Meyer, 1984).

Tabla 2. Factores de la USLE para las distintas parcelas  
Table 2. USLE factors for different stands

Parcela	No Obs.	Factor LS	Pérdidas de suelos		Factor R		Factor K	
			media	C.V.	Media	C.V.	A	B
LV-2	35	2.68	2596.4	111.8	15.076	101.3	0.029	0.35
LV-4	34	5.41	2076.1	96.3	14.210	108.1	0.012	0.35
LV-8	36	7.72	2847.0	113.1	14.860	101.8	0.011	0.27
LP-2	33	2.96	2076.1	85.5	15.449	101.4	0.020	0.33
LP-4	32	4.59	2210.2	98.2	14.461	99.7	0.015	0.36
LP-8	36	7.58	2750.6	122.8	14.686	103.7	0.011	0.28

Por otra parte, se verificó la existencia o no de variabilidad de K. Para ello, los valores de K calculados para cada evento fueron correlacionados con el tiempo. Si se postula la hipótesis que la pendiente de la recta de regresión es nula; esta hipótesis, no puede ser rechazada con un nivel de significancia de 0.01, que indicaría que no existen variaciones en el factor K a lo largo del año, en cada una de las parcelas.

El factor topográfico LS empleado, es el propuesto por los autores de la USLE. No ha sido posible verificar la relación potencial para el factor L, dado que la información disponible es insuficiente. El efecto del gradiente es medido por una ecuación cuadrática, que en el caso que se presenta, responde a una relación similar, con exponente muy próximo a 2.0. Por ello, se adoptó la ecuación original para el cálculo del factor LS.

El subfactor de cobertura por vegetación y el factor prácticas conservacionistas P poseen valores unitarios. Ello se debe a que las parcelas se encuentran libres de vegetación y no existe ningún tipo de tratamiento. Por lo tanto, la protección del suelo está dada únicamente por la cobertura de fragmentos gruesos en superficie y su acción reguladora, se denominó subfactor  $C_f$ .

### **Ajuste de los modelos propuestos**

Se emplearon únicamente los datos de pérdidas de suelo que poseían registro de escurrimiento, al solo efecto de poder comparar los distintos modelos. No se consideraron los últimos 3 eventos (18 registros), a fin de verificar la bondad de los modelos. Los valores de los parámetros se muestran en la Tabla 3.

Como se puede observar, el factor K no difiere substancialmente de un modelo a otro para una parcela específica, excepto para LP-4 y en menor medida en LP-2. El subfactor cobertura de gravas,  $C_f$ , presenta valores similares para los tres modelos en las distintas parcelas, excepto en las más cortas. Es importante destacar la influencia

de la acción del escurrimiento en el factor de erosividad modificado, donde el coeficiente  $\delta$  es cercano a 0.5, excepto en LV-2. También se pone de manifiesto en los valores que toma el exponente  $\beta$ , mostrando valores próximos entre sí para las parcelas de 4 y 8 m. y considerablemente más bajos en las parcelas cortas. Las diferencias se pueden explicar a partir de que en parcelas pequeñas, las variaciones del microrelieve poseen gran influencia sobre el escurrimiento superficial y en consecuencia en los subprocesos de disgregación y transporte, principalmente en la parcela LP-2, que es la que mayor contenido de gravas posee.

Por otra parte, todos los modelos muestran errores cuadráticos relativos muy altos; en el grupo de parcelas LV disminuye sensiblemente de valor, a medida que la longitud de las parcelas se incrementa, sin que por ello dejen de ser elevados. El *modelo 3*, es el que presenta menores errores, seguido por el modelo original y *modelo 2*. En tanto, en el grupo de parcelas LP, el error crece, aunque no tan rápidamente, conforme aumenta la longitud de las parcelas; también, el *modelo 3* es el que muestra mejor comportamiento relativo.

Tabla 3. Parámetros de los modelos propuestos  
 Table 3. Parameters of proposed models

Parámetros	Parcelas						
	LV-2	LV-4	LV-8	LP-2	LP-4	LP-8	total
No observaciones	23	22	25	22	23	22	137
PS media [ $kg.ha^{-1}$ ]	1722.6	1724.5	2285.3	1313.2	1455.5	1999.2	1759.4
R [ $kgm.m^{-2}.mm.h^{-1}$ ]	13.3	12.5	12.9	13.1	10.9	13.4	12.7
Q [mm]	10.3	7.3	6.2	6.8	4.9	5.6	6.9
<i>Modelo 1:</i>							
K	0.36	0.27	0.33	0.28	0.36	0.28	0.33
$C_f$	0.07	0.05	0.03	0.07	0.04	0.03	0.03
ECR [%]	50.80	36.50	28.90	48.70	46.40	70.50	48.10
<i>Modelo 2:</i>							
K	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.27	0.33
$C_f$	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04
$\alpha$	0.72	0.41	0.42	0.57	0.67	0.16	0.42
ECR [%]	56.40	37.60	31.70	53.50	55.30	58.40	47.60
<i>Modelo 3:</i>							
K	0.36	0.33	0.33	0.35	0.27	0.28	0.27
$C_f$	0.15	0.04	0.03	0.14	0.05	0.04	0.05
$\beta$	0.28	0.43	0.48	0.24	0.44	0.43	0.44
ECR [%]	47.30	34.70	28.70	43.70	47.50	56.60	43.10

Los modelos propuestos poseen dos parámetros comunes que son K y  $C_f$ , que por lo tanto deberían poseer el mismo valor en todos ellos, que los óptimos obtenidos no verifican esta condición. Se realizó un análisis de sensibilidad con el objeto de verificar la bondad de los modelos y analizar el comportamiento de K,  $C_f$ ,  $\alpha$ , y  $\beta$ . Los parámetros fueron sistemáticamente variados y el cambio en el ECR entre observado y simulado fue analizado. El rango de variación incluyó a los valores de los parámetros óptimos.

Al variar simultáneamente K y  $C_f$  en el *modelo 1* se observa que, la

curva de menor error corresponde a un rango de  $0.27 < K < 0.33$  y  $0.02 < C_f < 0.07$  y una relación inversa entre ambos; el mínimo ECR es poco sensible a las variaciones de K, en el rango de  $\alpha$  considerado. En el *modelo 2*, para un valor fijo de  $K = 0.33$  y  $0.27$ , el subespacio de mínimo error, se encuentran determinados por un rango de  $\alpha < 0.56$  y de  $0.04 < C_f < 0.07$ . En el *modelo 3*, para un valor fijo de  $K = 0.27$ , la curva mínima del ECR, se corresponde para un rango de  $0.26 < \beta < 0.54$  y  $0.02 < C_f < 0.15$ . Al igual que en los otros casos la relación es inversa, pero considerablemente acentuada, con un amplio

rango para  $C_f$  y acotado el rango de  $\beta$ . Al variar individualmente cada parámetro, dejando fijo los otros dos, la curva  $\beta$  vs. ECR, los valores más pequeños se encuentran en un rango de 0.45 a 0.50, con la característica que para valores menores de  $\beta$  se producen cambios poco significativos en el ECR, pero para valores mayores, la velocidad de cambio de ECR, es muy rápida.

Del análisis de sensibilidad se desprende que los parámetros en los distintos modelos poseen un amplio rango de variación, para un valor mínimo o similar del ECR. La selección definitiva se realizó sobre la base de adoptar los parámetros que mejor estiman la media del total de datos. Los resultados para los modelos 1, 2 y 3 son, respectivamente:  $K = 0.27$  y  $C_f = 0.05$ ;  $K = 0.27$ ,  $C_f = 0.05$  y  $\alpha = 0.42$ ;  $C_f = 0.05$ ,  $K = 0.27$  y  $\alpha = 0.49$ .

La recta de regresión entre las pérdidas de suelo observadas y calculadas, para los registros no usados en el ajuste, poseen valores de  $\partial^2$  de 0.74, 0.78 y 0.82 para cada modelo. El *modelo 1* y *2* subestiman casi siempre y el *modelo 3*, sobrestima para valores de  $PS < 1100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Al realizar el cociente entre las pérdidas de suelo calculadas y observadas, para los modelos 1, 2 y 3, únicamente el 28,

17 y 22 % de los 18 registros caen en el rango de 0.70 - 1.30. Es decir, que solamente en el porcentaje señalado existe una estimación razonable de pérdidas de suelo de eventos individuales. En síntesis, los modelos subestiman fuertemente (cociente  $> 1.30$ ), en un 72, 83 y 67 % de los casos, presentan un comportamiento similar y, no son satisfactorios para la predicción de eventos individuales de pérdidas de suelo, ya que los coeficientes de eficiencia presentan valores bajos, del orden de 0.52, 0.26 y 0.47, respectivamente.

## CONCLUSIONES

El índice EI30 no es suficiente para explicar las variaciones en las pérdidas de suelo de eventos individuales que se producen en el área pedemontana. Dichas variaciones se explican ligeramente mejor al reemplazar el factor de erosividad por el producto QI30.

La ecuación adoptada para el cálculo del factor R, arrojó excelentes resultados. Por otra parte, los valores de escurrimientos generalmente no se encuentran disponibles, por lo que es necesario recurrir a otros modelos de simulación para su estimación.

Por definición, el factor K se calcula sobre la base de partículas de suelo menores de 2.0 mm; por lo

tanto, ignora la influencia del contenido de fragmentos gruesos. Es mas adecuado analizar su efecto como un elemento protector del suelo, como un subfactor integrado en el factor C. El contenido de fragmentos gruesos en superficie o en el perfil del suelo, posee una gran variabilidad, sobre todo en suelos de origen aluvial.

La aplicabilidad de la USLE o las modificaciones propuestas para predecir pérdidas de suelo de eventos individuales, no es satisfactoria. La mayor parte de las predicciones muestra un carácter aleatorio, ya que las variaciones en las pérdidas de suelo no se explican totalmente en función de la variación en las características de precipitación y escurrimiento.

## BIBLIOGRAFIA

BOX, J. & L. MEYER, 1984. Adjustment of the USLE for cropland soils containing coarse fragments. En: Erosion and productivity of soils containing rock fragments. *SSSA Special Publications* 13:83-90.

CHENA, O., 1971. Geología. En: *Estudio integral de Defensa Aluvional del Papagayos*. Informe al gobierno argentino sobre la contención de aluviones. FAO - SRH - Gob. de la provincia de Mendoza.

COMPAGNUCCI, R. & J. BONINSEGNA, 1979. Estudio de la serie de precipitación del observatorio meteorológico de la ciudad de Mendoza. Informe de las primeras experiencias de ajuste de defensas, Temporada granicera 1978-79. *Programa Nacional de lucha antigranizo. CNIE*: 9-39.

DISKIN, M. & E. SIMON, 1977. A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models. *J. Hydrol.* 34:129-149.

MCCORMACK, D., K. YOUNG & G. DARBY, 1984. Rock fragments and the K factor of the USLE. In: Erosion and productivity of soils containing rock fragments. *SSSA Special Publications* 13: 73-81.

MUTCHLER, C. & C. CARTER, 1983. Soil erodability variation during the year. *Trans. ASAE* 26(4): 102-104, 108.

RENARD, K. & V. FERREIRA, 1993. RUSLE Model description and database sensitivity. *J. Environ. Qual.* 22: 458-466.

- ROMKENS, M. 1985. The soil erodibility factor: A perspective. En: *Soil Erosion and Conservation*. SCSA. pp 445-461.
- SIMANTON, J., E. RAWITZ & E. SHIRLEY, 1984. Effects of rock fragments on erosion of semiarid rangeland soils. In: *Erosion and productivity of soils containing rock fragments*. *SSSA Special Publications* 13: 65-72.
- WISCHMEIR, W. & J. MANNERING, 1969. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33:131-137.
- WISCHMEIER, W. & D. SMITH, 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA - SEA. *Agriculture Handbook* 537.
- YOUNG, R., M. ROMKENS & D. MCCOOL, 1990. Temporal variations in soil erodibility, pp 41-53. In: R. B. Bryan (editor) *Soil erosion, Experiments and model*.

Recibido: 11/2009

Aceptado: 5/2010