

Incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en el modelo USLE/RUSLE para estimar erosión en Uruguay

Hill, M.¹; García Prechac¹, F.; Terra, J.²; Sawchik, J.³.

¹Universidad de la República Facultad de Agronomía Departamento de Suelos y Aguas Av. Gral. Eugenio Garzón 780 Montevideo – Uruguay Correo electrónico: mhill@fagro.edu.uy

²Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Ruta 8 km 282 Treinta y Tres - Uruguay

³Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Ruta 50 km 11 Colonia - Uruguay

Recibido: 16/6/08 Aceptado: 29/12/08

Resumen

Desde 1980 se ha trabajado para adaptar y validar el modelo USLE/RUSLE a Uruguay, pero existen sobreestimaciones de pérdida de suelo respecto a resultados experimentales. La hipótesis es que ello se debe a que el modelo no considera el efecto del contenido de agua en el suelo. El objetivo de este estudio fue comprobar la hipótesis y proponer y validar un procedimiento para estimar el factor «contenido de agua del suelo» e incluirlo en las estimaciones del modelo USLE/RUSLE. Se comprobó una mejora en la estimación al incorporar el efecto del agua del suelo a partir de datos medidos experimentalmente con la incorporación del subfactor «contenido de agua en el suelo» del modelo RUSLE eliminándose la sobreestimación. La pendiente de la regresión entre valores estimados y medidos pasó de 1.21 a 0.99 y el R^2 de 0.93 a 0.97. El modelo de balance hídrico que mejor estimó el contenido de agua del suelo fue el de Témez (1977), calibrado para Uruguay por Genta *et al.*, (2005). Estimando el contenido de agua en el suelo por Témez, se logró pasar de una sobreestimación de la erosión en USLE/RUSLE de 25 % a una leve subestimación de 4 %, con cambios en los valores de R^2 , Índice de Nash - Sutcliffe y PBIAS de 0.94 a 0.97, de 0.73 a 0.97 y de -56 a 4, respectivamente.

Palabras clave: erosión, USLE-RUSLE, agua en el suelo

Summary

Soil water content effect in the USLE/RUSLE model to estimate erosion in Uruguay

USLE/RUSLE has been tested and used in Uruguay since 1980, but erosion is overestimated when compared with experimental long-term data. It is hypothesized that this is due to not considering the effect of soil water content. The objectives of this work were to prove the hypothesis and to develop a procedure to include the effect of SWC into the erosion estimation with the model. Calculating the RUSLE soil water content subfactor, with experimental data, and including it in the model, the linear regression coefficient between estimated and measured data changed from 1.21 to 0.99 and R^2 from 0.93 to 0.97. The best soil water balance procedure to estimate SWC was the one of Témez (1977) calibrated in Uruguay by Genta *et al.* (2005). Using this balance estimates to calculate the CA subfactor and including it in erosion estimations with USLE/RUSLE, soil erosion overestimation changed from 25 % to 4 %, and R^2 , Nash-Sutcliffe index and PBIAS changed from 0.94 to 0.97, 0.73 to 0.97 and -56 to 4, respectively.

Key words: erosion, USLE/RUSLE, soil water content

Introducción

El modelo Universal Soil Loss Equation - Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, USLE (Wischmeier y Smith, 1960) y su versión revisada RUSLE (Renard *et al.*, 1997), es el más utilizado en el mundo para la toma de decisiones en planificación de uso y manejo de suelos para minimizar la erosión a nivel predial. El modelo fue desarrollado en la década de 1950, utilizando información experimental de 10.000 combinaciones de parcelas de escurrimiento, con eventos de lluvia natural durante varios años. Desde 1980, se avanzó en adaptar y validar el modelo a Uruguay (Puentes, 1981; García y Baethgen, 1982; García Préchac, 1982; Puentes y Szogi, 1983; García Préchac, 1992 y 2003; García Préchac *et al.*, 1997, 1998, 1999; Clérici y García Préchac, 2001). El trabajo incluyó un programa nacional de medición experimental de erosión a largo plazo en parcelas de escurrimiento bajo lluvia natural, continuado en varios proyectos hasta 2000, con cuyos datos se elaboró el presente trabajo. El modelo, desarrollado en el hemisferio Norte, asume, explícitamente, que el contenido de agua en el suelo siempre permanece alto, ya que la principal estación de crecimiento comienza con el suelo completamente saturado de agua luego del deshielo primaveral. Esto se mantiene durante los períodos de mayor riesgo de erosión de los suelos, desde el comienzo de la preparación del suelo para la siembra hasta la cobertura del suelo por la parte aérea de los cultivos. En nuestras condiciones donde la siembra de cultivos de verano se realiza a mitad de primavera, generalmente el suelo no permanece desnudo y puede presentar bajos contenidos de agua, al menos en la parte superficial, lo que reduce el riesgo de erosión. La información experimental obtenida durante dos años en parcelas de escurrimiento de Aguas Blancas, Lavalleja, permitió calcular el subfactor «contenido de agua en el suelo» según RUSLE (Renard *et al.*, 1997). Agregando este subfactor a la estimación de erosión para las cuatro alternativas de uso y manejo ensayadas en ese sitio, excluyendo suelo desnudo, se obtuvo una disminución de la sobreestimación del modelo del orden de 20 % y una mejora del R^2 entre lo estimado y lo medido de 0.88 a 0.97 (García Préchac, 1992). Por tanto, la hipótesis de este trabajo es que, la incorporación del subfactor «contenido de agua del suelo» al modelo, mejorará la performance estimativa del mismo. El objetivo de este trabajo fue comprobar dicha hipótesis, utilizando la información experimental de erosión de largo plazo obtenida en el país y desarrollar un procedimiento de balance hídrico para estimar

el contenido de agua del suelo promedio anual e incorporarlo al modelo de estimación de erosión para las condiciones de Uruguay.

Materiales y métodos

Estimación de la pérdida de suelo: Modelo USLE y su versión revisada RUSLE

El modelo se basa en la ecuación: $A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$, donde A, es la pérdida de suelo promedio anual por unidad de superficie y se expresa en $Mg \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El Factor R, erosividad de la lluvia, es el producto acumulado promedio anual de la energía cinética por la máxima intensidad de las lluvias erosivas en 30 minutos (mayores a 13 mm, según Wischmeier y Smith, 1960), en $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El Factor K, erodabilidad del suelo, es la cantidad promedio de suelo perdido por unidad de Factor R ($Mg \text{ hr}^{-1} \text{ año}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de la pendiente. Los demás factores son relaciones a estándares sin unidades. El Factor L, longitud de la pendiente, es la relación entre la erosión con una longitud de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 22.1 m de longitud, a igualdad de los demás factores. El Factor S, inclinación de la pendiente, es la relación entre la erosión con una inclinación de pendiente dada y la que ocurre en el estándar de 9 % de inclinación, a igualdad de los demás factores. El Factor C, uso y manejo, es la relación promedio anual entre la erosión de un suelo con un determinado sistema de uso y manejo y la que ocurre en las condiciones estándar en que se definió el Factor K, a igualdad de los demás factores. El Factor P, práctica mecánica de apoyo es la relación entre la erosión que ocurre con una determinada práctica mecánica de apoyo y la que ocurre con la condición estándar de laboreo a favor de la pendiente, a igualdad de los demás factores.

Para estimar la pérdida de suelo en cada caso, se utilizó el programa EROSION 5.0 (García Préchac *et al.*, 2005), que estima pérdidas de suelo a partir del modelo USLE/RUSLE. La versión actual del programa asume que el contenido de agua del suelo, promedio anual, es alto y constante.

Sitios. Parcelas de escurrimiento

Se trabajó con datos de parcelas de escurrimiento bajo lluvia natural existente en el país, que se generaron en experimentos de erosión en Aguas Blancas (AB, Lavalleja), en el período 1982-1986; en la Unidad Ex-

perimental Palo a Pique (PAP, Treinta y Tres), en el período 1994-1999 y en la Estación Experimental La Estanzuela (LE, Colonia), en el período 1984-1989. El tamaño estándar de las parcelas fue de 22.1 m de largo por 3.5 m de ancho (Wünsche, 1983), localizadas con su largo en el sentido de la pendiente. El cálculo de la capacidad de captación del sistema se hizo de acuerdo a Bertoni *et al.* (1975). La metodologías de muestreo y de laboratorio fueron las descritas por Cogo *et al.* (1978) y Wünsche (1983). La erosión generada en cada evento climático individual se midió del escurrimiento su-

perficial y la concentración de sedimentos. En el período considerado, se registraron en total 144, 137 y 89 tormentas de más de 13mm que implicaron, en promedio, 29, 27 y 36 tormentas por año, para LE, PAP y AB, respectivamente. En los cuadros 1 y 2 se presenta las características de los suelos dominantes de las Unidades de Suelo de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay en las que se encontraban las parcelas de escurrimiento, la ubicación geográfica de las mismas y los parámetros hídricos de dichas unidades.

Cuadro 1. Coordenadas geográficas, Factor K, Factor R, suelos dominantes de la Unidad y su correspondiente en el Soil Taxonomy.

Sitio	Coordenadas geográficas	Factor K ¹ MJ mm ha ⁻¹ rr ⁻¹ año ⁻¹	Factor R ² Mghr año MJ ⁻¹ mm ⁻¹	Pendiente %	Suelo dominante ³	Soil Taxonomy ⁴
AB	34° 20' S 55° 0' W	0.390	382	4	Brunosol Éútrico	Typic Argiudoll
PAP	33° 12' S 54° 22' W	0.480	462	3,5	Argisol Subéútrico	Abruptic Argiudoll
LE	34° 25' S 58° 0' W	0.230	532	3	Brunosol Éútrico	Vertic Argiudoll

¹Factor K (Puentes, 1981), ²Factor R (García Préchac *et al.*, 1999), ³Carta de Reconocimiento de suelos del Uruguay 1:1.000.000 (MGAP-DSA, 1976), ⁴Soil Taxonomy (Durán *et al.*, 1999).

Cuadro 2. Agua retenida a capacidad de campo y punto de marchitez permanente de los suelos de las parcelas de escurrimiento calculados en base a Silva *et al.*, (1988).

SITIO	Hor ¹	LI ² cm.	CC ³	PMP ⁴ mm.
AB	Ap	14	55.4	26.5
	B _{1t}	47	134.5	91.9
	B ₁₂	66	82.3	56.1
	BC	120	193.5	113.2
	Total		466	288
PAP	A _{u1}	16	72.9	25.6
	B _{21t}	40	97.4	65.9
	B _{22t}	58	77.7	53.5
	B _{3k}	75	72.8	49.4
	C _k	120	185.7	119.5
Total		507	314	
LE	A	24	99.4	47.4
	B _t	56	129.1	88.4
	BC	75	80.9	55.8
	C _k	120	191.1	129.3
	Total		501	321

¹: horizonte, ² límite inferior del horizonte desde la superficie del suelo, ³: capacidad de campo de todo el horizonte, ⁴: punto de marchitez permanente de todo el horizonte

Sistemas de uso y manejo de suelos

En los tres sitios existieron dos parcelas de referencia: una con el suelo pronto para una siembra convencional a favor de la pendiente, uso y manejo de referencia según Wischmeier y Smith, (1978) y otra con el suelo bajo la pastura natural del sitio, manejada bajo corte. Los demás sistemas de uso y manejo en cada sitio-parcela se detallan a continuación.

Sistemas de uso y manejo en Aguas Blancas (García Préchac, 1982)

- Agricultura continua de Maíz (*Zea mays*) tradicional para la época. Se define como un cultivo realizado sin fertilización, baja densidad de plantas (menor a 30000 plantas ha⁻¹), control de malezas mecánico, con rendimiento promedio de 1Mg ha⁻¹ de grano.

- Rotación anual Maíz – Cobertura de invierno anual de avena (*Avena sativa*) manejada bajo corte. El Maíz se realizó con fertilización, población de 50.000 pl ha⁻¹, control químico de malezas y rendimiento promedio de 4 Mg ha⁻¹ de grano.

- Rotación cultivo (2 años) – pastura (2 años). La parte agrícola fue idéntica a la realizada en el sistema de agricultura continua con cobertura de invierno anual y una pastura de 2 años de duración, mezcla de trébol rojo (*Trifolium pratense*) y raigrás (*Lolium multiflorum*).

Todos los sistemas se realizaron con laboreo convencional (LC), que consistió en arada con inversión como laboreo primario y laboreo secundario realizado en base a rastras de discos y de dientes.

Sistemas de uso y manejo en Palo a Pique (Terra y García Préchac 2001)

- Agricultura continua, con doble cultivo anual. Como especies de invierno se sembraron avena o trigo en mezcla con raigrás, y en verano sorgo (*Sorghum bicolor*) o moha (*Setaria italica*). Tanto los cultivos de invierno como los de verano se cosecharon por corte y retiro de restos. Uno de los sistemas se realizó con siembra directa (SD) y otro con laboreo reducido (LR), que consistió en dos pasadas de excéntrica y una pasada de vibrocultivador.

- Rotación de seis años de duración con un ciclo de dos años de cultivo igual al sistema anterior y cuatro años de pastura de trébol blanco (*Trifolium repens*), lotus (*Lotus corniculatus*), dactylis (*Dactylis glomerata*) y festuca (*Schedonorus arundinaceus*). Esta rotación se realizó usando dos sistemas de laboreo, LR y SD. Estas rotaciones, al realizarse en 3 parcelas cada una, determinaron que en cada año se encuentren la mitad de los componentes de cada rotación al mismo tiempo, los correspondientes a los años pares en un año y los correspondientes a los años impares en el otro.

Sistemas de uso y manejo en La Estanzuela (García Préchac, 1992)

- Agricultura continua, con doble cultivo anual bajo LR y SD. Se sembró sorgo en la primera quincena de octubre en todos los sistemas. A este le siguió un cultivo de invierno: cebada (*Hordeum vulgare*) o trigo (*Triticum aestivum*) y luego girasol (*Heliaantus annus*) de segunda, sembrado inmediatamente después del cultivo de invierno.

- Rotación de cultivos anuales (3 años) con pasturas (3 años). La etapa de cultivo fue similar a la descrita para el sistema anterior, y la pastura consistió de una mezcla de festuca, trébol blanco y trébol rojo. La rotación se realizó en LR y en SD.

Por lo tanto, la base de datos combinada de los tres sitios experimentales definió 17 sistemas de uso y manejo en 24 parcelas: campo natural, suelo desnudo, do-

ble cultivo anual en LR, doble cultivo anual en SD, rotación cultivo pastura en LR, rotación cultivo pastura en SD, rotación cultivo pastura con LC y agricultura continua con LC.

Medidas de agua en el suelo

En los sitios experimentales AB y PAP se realizaron determinaciones de contenido de agua en el suelo con sonda de neutrones según el método de Hignett y Evett, (2002), en tubos de acceso, ubicados en cada parcela. La frecuencia de medición fue variable para cada localidad. Las mediciones se hicieron hasta una profundidad de 120 cm.

Estimaciones de agua en el suelo

Variabes Climáticas

Los datos de precipitación utilizados para estimar agua en el suelo se tomaron de INIA GRAS para LE (www.inia.org.uy/GRAS) y de estaciones meteorológicas instaladas en los sitios experimentales donde se encontraban las parcelas para AB y PAP. La evapotranspiración de referencia (ET_0) para el cálculo de la evapotranspiración real (ETR) de cultivos y como ETR de campo natural y praderas permanentes, se calculó por el método de Penman (Doorembos y Pruitt, 1976). Los coeficientes de cultivo (K_c), que multiplicados por la ET_0 , estiman la ET_R de cada cultivo o pastura en cada etapa del crecimiento, se utilizaron para estimar la evapotranspiración respecto al cultivo de referencia (Allen *et al.*, 1998), en ambos procedimientos de estimación de contenido de agua en el suelo.

Modelos de balance hídrico utilizados

Se realizaron balances hídricos climáticos, mensuales, según los modelos de Thornthwaite y Mather (1955) (TM) y de Témez (1977). Este último calibrado para el uso en cuencas en Uruguay por Genta *et al.* (2005), (TG), para el período considerado en cada localidad. Se consideró la variación de almacenaje de agua en el suelo hasta 120cm de profundidad.

El modelo TM, propuesto originalmente en 1955 (Pizarro *et al.*, 2005) asume que el suelo tiene una capacidad de almacenamiento de agua (S_i). Además, dada una precipitación (P_i) y una evapotranspiración potencial (ETP_i), el almacenamiento de humedad al final del período (S_i) viene dado por:

$$S_i = \min(P_i - ETP_i + S_{i-1}, \emptyset) \quad \text{si } P \geq ETP_i$$

$$S_i = S_{i-1} \times e^{P-ETP/CAAD} \quad \text{si } P < ETP_i$$

Se producirá excedente cuando el agua total del suelo exceda su capacidad de almacenamiento siendo este excedente T_i , el que se expresa por:

$$T_i = (P_i - ETP_i) + S_{i-1} - \emptyset \quad \text{si } S_i = \emptyset$$

$$T_i = 0 \quad \text{si } S_i < \emptyset$$

El modelo de Témez, (Pizarro *et al.*, 2005), supone que el perfil del suelo está dividido en una zona superior insaturada, y otra inferior que se halla completamente saturada, asemejando su comportamiento a un embalse subterráneo que desagua en la red superficial. El agua precipitada (P_i), se divide en evapotranspiración (ET_i) y excedente (T_i), cuyo cálculo se efectúa según la siguiente ecuación:

$$T_i = 0 \quad \text{si } P \leq P_0$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_0)^2}{P_i - \delta_i - 2P_0} \quad \text{si } P > P_0$$

Donde:

T_i es el excedente del mes i

P_i es la precipitación del mes i

$$= H_{\max} - S_{i-1} + ETP_i$$

$$P_0 = CP_0 \times (H_{\max} - S_{i-1})$$

CP_0 es la precipitación mínima para que exista escurrimiento

H_{\max} es la máxima capacidad de almacenamiento en la capa superior del suelo

S_{i-1} es el contenido de agua en el suelo en el mes $i-1$

ETP_i es la evapotranspiración potencial del mes i

La ETR, con la condición de que la máxima es la ETP es:

$$ETR_i = \min\{H_{i-1} + P_i - T_i, ETP_i\}$$

$$ETP_{\text{Penman}} = 1.38 \times ETP_{\text{Thorntwaite}}$$

La humedad en el suelo al final del mes está representada por:

$$S_i = \max\{0; -S_{i-1} - P_i - T_i - ETP_i\}$$

Los parámetros que utiliza el modelo fueron calibrados para Uruguay por Genta *et al.*, (2005) y son los siguientes:

$$H_{\max} = 0.916 \times \text{Agua disponible (AD)}$$

$$CP_0 = 0.30$$

Incorporación del efecto del contenido de agua en el modelo

La relación de pérdida de suelo (RPS), pérdida de suelo de un determinado uso y manejo respecto al estándar, se estimó con el modelo USLE/RUSLE para cada período de cultivo. USLE proporciona tablas de datos de pérdida de suelo basados en información empírica. RUSLE proporciona un submodelo basado en ecuaciones que estiman un valor concreto de RPS a partir de información cuantitativa basada en determinaciones experimentales directas de las siguientes variables: cobertura por residuos, cobertura y altura vegetal, rugosidad superficial, uso previo y contenido de agua en el suelo. Las variables generan subfactores que multiplicados dan el RPS del período en consideración. Una de esas variables genera el subfactor «contenido de agua» (CA). Este subfactor, fue calculado en base al contenido de agua promedio medido y estimado en el suelo. Dicho subfactor vale 0 cuando el contenido de agua del suelo es igual o menor al punto de marchitez permanente (PMP), 1 cuando es igual o mayor a capacidad de campo (CC) y varía linealmente entre 0 y 1 con contenidos de agua en el suelo en el rango de agua disponible. Este subfactor se calculó para períodos en el que la vegetación presente es uniforme («período de cultivo», Wischmeier y Smith, 1978). Estos períodos son: barbecho rugoso, siembra - emergencia, establecimiento, crecimiento - maduración y rastrojo, (Brady y Weil, 2002).

El procedimiento seguido en este trabajo es multiplicar la RPS promedio anual de cada período de crecimiento, por el subfactor CA promedio anual de cada uno de esos mismos períodos.

Validación de los modelos

Se compararon los valores estimados y medidos del contenido de agua en el suelo mediante el ajuste de una regresión lineal simple y su ajuste con intercepto 0.

La erosión medida y la estimada se comparó mediante una regresión lineal y se estudió la bondad de ajuste del modelo a través del coeficiente de determinación (R^2). El procedimiento es altamente sensible a valores

extremos, poco sensible a diferencias proporcionales entre valores medidos y estimados y se pueden obtener altos valores de R^2 aún cuando los valores estimados y medidos sean diferentes (Legates y McCabe, 1999). Por lo anterior, se utilizaron además, otros dos procedimientos estadísticos:

Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash y Sutcliffe, 1970), que determina la relación entre la magnitud de la varianza del error (CME) y la varianza de los valores observados.

Sesgo en % (PBIAS) (Gupta *et al.*, 1999), que indica la tendencia promedio de los valores estimados a ser mayores o menores a los valores medidos.

Moriasi *et al.* (2007) recomienda la metodología propuesta para datos diarios o promedios mensuales. En el presente trabajo se utilizaron promedios anuales. Los procedimientos citados se aplican a los modelos antes y después de la incorporación del efecto del contenido de agua en las estimaciones de erosión.

Resultados y discusión

Erosión medida experimentalmente versus erosión estimada

En el cuadro 3 se presentan los valores de Factor C para los sistemas de uso y manejo de los sitios estudiados. Estos son coincidentes con las estimaciones realizadas en el país para sistemas similares de uso y manejo del suelo (Clérici y García Préchac, 2001).

De acuerdo a los criterios de Puentes (1981), la pérdida tolerable para los suelos de los tres sitios es $7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

La Figura 1 muestra que existe una sobreestimación de la erosión promedio anual medida, cuya magnitud depende de la erosión real. Por ejemplo para una erosión medida de $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ la erosión estimada es

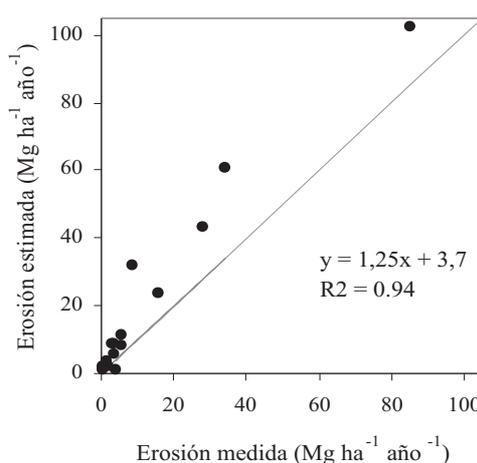


Figura 1. Relación entre erosión promedio anual estimada mediante el modelo USLE/RUSLE sin considerar el contenido de agua medido en el suelo y erosión promedio anual medida experimentalmente en parcelas de escurrimiento de tres localidades (la línea recta representa ajuste perfecto).

Cuadro 3. Valores de Factor C generados por el generados por el modelo USLE/RUSLE para cada sistema de uso y manejo del suelo en cada sitio experimental

Sitio	Uso y Manejo del suelo	Factor C
AB	Maíz tradicional con laboreo convencional	0.527
	Maíz – cobertura invernal con laboreo convencional	0.190
	Rotación cultivo pastura con siembra directa	0.134
PAP	Cultivo continuo con laboreo reducido	0.230
	Cultivo continuo con siembra directa	0.057
	Rotación cultivo pastura con laboreo reducido	0.085
	Rotación cultivo pastura con siembra directa	0.036
LE	Cultivo continuo con laboreo	0.203
	Cultivo continuo con siembra directa	0.076
	Rotación cultivo pastura con laboreo reducido	0.096
	Rotación cultivo pastura con siembra directa	0.041

16 Mg ha⁻¹ año⁻¹, o sea 60 % más alta. Esta es muy importante en situaciones de alta erosión, ya que puede llevar a tomar la decisión de no adopción de determinados sistemas de uso y manejo del suelo por superar los límites tolerables de pérdida de suelo.

Introducción del subfactor «contenido de agua en el suelo» en modelo USLE/RUSLE, calculado con el contenido de agua medida experimentalmente.

La Figura 2 muestra una sobreestimación de la pérdida de suelo para los sitios AB y PAP, coincidiendo con los valores de sobreestimación encontrados cuando se consideraron las tres localidades. En este caso no se incluye LE debido a que no habían datos de conteni-

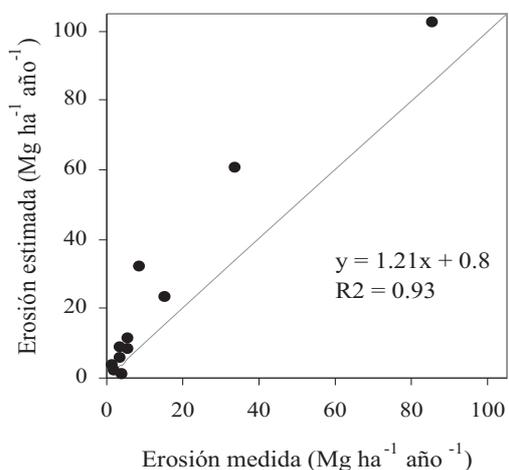


Figura 2. Relación entre erosión promedio anual estimada mediante el modelo USLE RUSLE sin considerar el contenido de agua medido en el suelo y erosión promedio anual medida experimentalmente en parcelas de escurrimiento localizadas en los sitios experimentales AB y PAP.

do de agua en el suelo lo que impidió calcular el subfactor CA para dicha localidad. Sin embargo, cuando se incorpora el subfactor CA calculado en base al contenido de agua en el suelo medido experimentalmente, para el cálculo del Factor C, se elimina la sobreestimación. (Figura 3). Esta mejoría en la estimación de erosión es importante para Uruguay, donde existe una alta variación del contenido de agua del suelo en las distintas situaciones de uso y manejo (Figura 4).

Estimación del contenido de agua en el suelo

Se buscó un procedimiento de balance hídrico adecuado y sencillo para estimarlo, que permita ser utili-

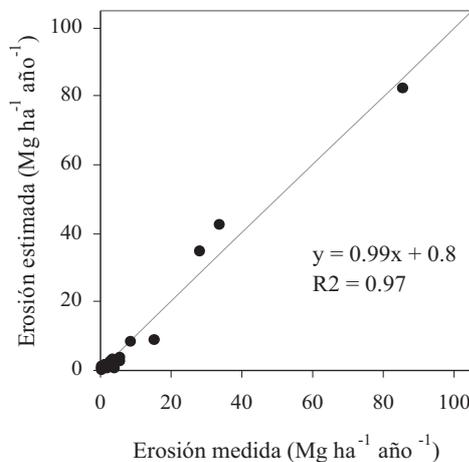


Figura 3. Relación entre erosión promedio anual estimada mediante el modelo USLE RUSLE incorporando el subfactor CA y erosión promedio anual medida experimentalmente en parcelas de escurrimiento localizadas en los sitios experimentales AB y PAP.

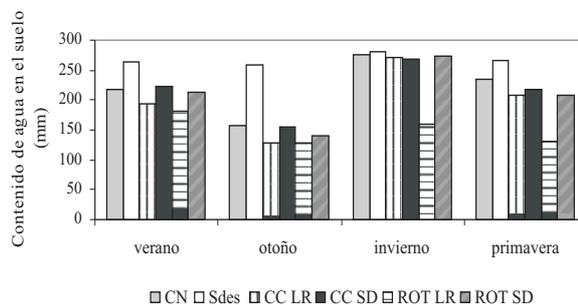


Figura 4. Contenido promedio de agua en el suelo a una profundidad de 75 cm, en cada estación en la Unidad Experimental Palo a Pique.

CN: campo natural, Sdes: suelo desnudo, CCLR, cultivo continuo con LR, CCSD: cultivo continuo en SD, ROT LR: Rotación cultivo pastura con LR, ROT SD: rotación cultivo pastura con SD.

zado para el cálculo del subfactor «contenido de agua» en el suelo (CA) en las mismas condiciones en que se realizó la estimación de erosión.

En todos los casos, existe una sobreestimación del contenido de agua en el suelo respecto al agua medida en el caso del método TM. Esto resultaría en una sobreestimación de la erosión. Para el caso del mode-

lo TG, no se observa un sesgo sistemático (Figura 5), siendo el agua estimada con el modelo TG en promedio 4 % inferior que la medida, indicando una leve subestimación (Figuras 6 y 7).

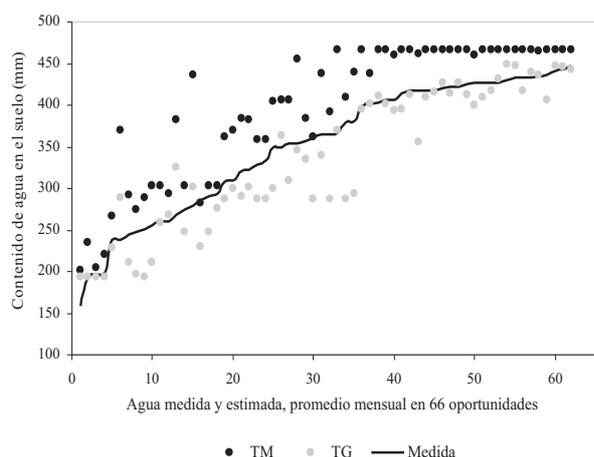


Figura 5. Relación entre la estimación del promedio mensual de contenido de agua en el suelo estimado por el método de balance indicado (TM y TG) y el promedio mensual del contenido de agua medido experimentalmente con sonda de neutrones, hasta 120 cm. de profundidad, en 66 oportunidades, en las parcelas bajo campo natural en PAP y AB.

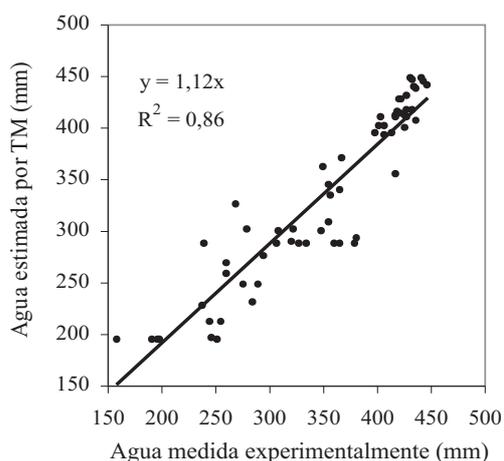


Figura 6. Relación entre contenido de agua en el suelo en mm estimada a partir del método TM y contenido de agua en el suelo medido experimentalmente en las parcelas de escurrimiento.

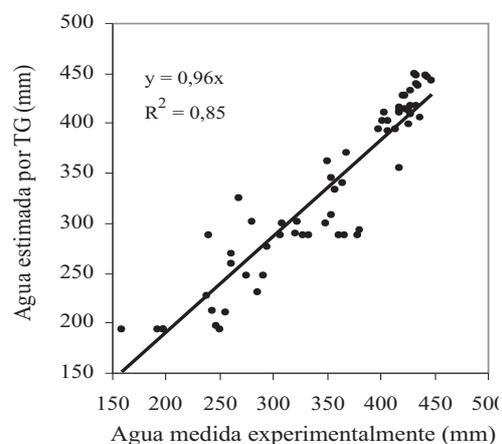


Figura 7. Relación entre contenido de agua en el suelo en mm estimada a partir del método TG y contenido de agua en el suelo medido experimentalmente en las parcelas de escurrimiento.

El mejor ajuste del modelo de TG para estimar el agua en el suelo, se debe a que éste considera el escurrimiento superficial, a diferencia del de TM, que asume que toda la precipitación es igualmente efectiva, no existiendo escurrimiento superficial ni drenaje profundo en tanto no se haya colmado primero el almacenaje en el suelo. Esto es probablemente la razón de la sobreestimación ya que, de acuerdo a los datos experimentales en parcelas de campo natural, para PAP, el coeficiente de escurrimiento superficial fue en promedio para el período considerado de 25 %. Esto, es de suma importancia en años de abundantes precipitaciones, con mayor probabilidad de escurrimiento.

Se destaca la facilidad de aplicación del método de balance mencionado en nuestras condiciones a partir del trabajo de adaptación a las condiciones de Uruguay.

Introducción del subfactor «contenido de agua en el suelo» en modelo USLE/RUSLE, calculado en base al contenido de agua estimado por el modelo TG.

La Figura 8 muestra que la pérdida de suelo estimada considerando el contenido de agua en el suelo estimado a partir del modelo TG, tiene una relación con la erosión medida cercana a 1 a 1, lo que logra mejorar la estimación de pérdida de suelo eliminando la sobreestimación, tal como se logró considerando el agua medida experimentalmente.

La erosión en las parcelas con vegetación disminuyó durante el verano y comienzo del otoño. En el período estival, el subfactor CA toma valores bajos, sobre todo cuando hay vegetación densa en activo crecimiento

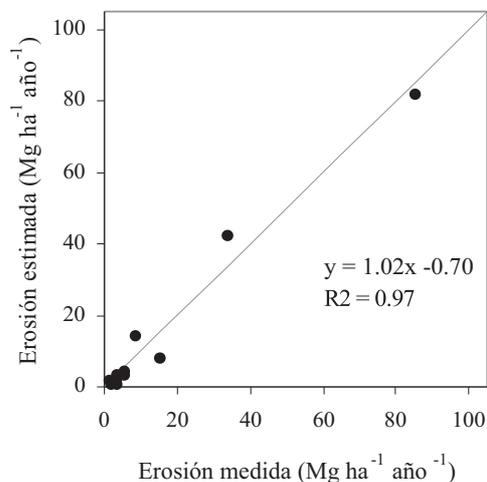


Figura 8. Relación entre erosión promedio anual medida en parcelas experimentales y erosión promedio anual estimada por USLE/RUSLE, considerando el contenido de agua en el suelo estimado por el modelo TG.

como el caso del CN (Figura 9). Para el caso de los cultivos anuales, el contenido de agua en el suelo responde al estado fenológico siendo noviembre y diciembre el período de implantación, de bajo consumo de agua, lo que determina que el subfactor CA sea en promedio 0.7.

Validación del Modelo

Si bien los valores de intercepto y pendiente, así como el R² son altamente satisfactorios, por las limitantes anteriormente mencionadas, se presentan en el cuadro 4 los estadísticos utilizados.

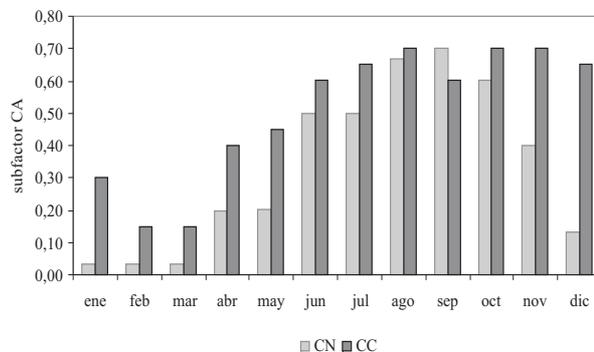


Figura 9. Subfactor CA promedio calculado en base al contenido de agua estimado por TG para las parcelas de campo natural (CN) y cultivo continuo (CC) en AB, PAP y LE.

Se observa un buen ajuste para el modelo USLE/RUSLE, que considera el contenido de agua en el suelo con el subfactor CA. Los índices para el modelo ajustado por contenido de agua en el suelo, entran en el rango «muy bueno». De acuerdo a PBIAS, el modelo ajustado muestra una leve subestimación dentro del rango «muy bueno». El nivel de sobreestimación del modelo cuando no se tiene en cuenta el contenido de agua en el suelo está fuera del rango que los autores indican como «buenos» y «muy buenos».

Conclusiones

El modelo USLE/RUSLE aplicado en nuestras condiciones sin tener en cuenta el contenido de agua del suelo produce una sobreestimación de pérdida de suelo.

Lo anterior se comprueba al incorporar el efecto del contenido de agua en las estimaciones, logrando una relación estrecha entre la pérdida de suelo medida y

Cuadro 4. Valores de los métodos estadísticos utilizados para la validación del modelo USLE/RUSLE pre y luego de incluir el subfactor CA y rangos estadísticos recomendados como aceptables (Moriais *et al.*, 2007).

Estadístico	Sin subfactor CA	Con Subfactor CA	Rango muy bueno ¹	Rango bueno ²
R ²	0.94	0.97		
Intercepto	3.70	- 0.69		
Pendiente	1.25	1.02		
NASH	0.73	0.97	0.75<NSE<1	0.65<NSE<0.75
PBIAS	- 56	4	< 15	15 < PBIAS<20

¹= Los valores de los rangos se refieren a promedios mensuales.

²= Para producción de sedimentos.

estimada, lo que soluciona la actual tendencia a la sobreestimación que muestra el modelo.

La sobreestimación se debe a que el contenido de agua en el suelo varía según las estaciones del año, siendo en promedio bajos durante el verano y comienzo del otoño a diferencia de las regiones en que se generaron la mayoría de los datos experimentales con los que el modelo original fue desarrollado, en los cuales los suelos en invierno están congelados y cubiertos de nieve, que en el deshielo generan un alto contenido de agua en el suelo en primavera - verano.

El método de Balance Hídrico Thornthwaite y Mather (1957) mostró una sobreestimación promedio del orden de de 13 % del contenido de agua en el suelo en todas las situaciones. La estimación del contenido de agua en el suelo, a través del modelo precipitación-escorrimento de Témez (1977), calibrado para Uruguay por Genta *et al.* (2005), ha mostrado un buen ajuste con el contenido de agua medido experimentalmente por lo que se incorpora como metodología para el cálculo del subfactor contenido de agua a ser usado en la estimación de pérdida de suelo por erosión en el modelo USLE/RUSLE. Esto se debe a que tiene en cuenta el escurrimiento superficial que puede generarse previo al ingreso de agua al suelo, sobre todo en situaciones de altas precipitaciones que son a su vez las que provocan mayores pérdidas de suelo por erosión.

Lo validación del modelo con la incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo, en base a las estadísticas utilizadas, es consistente y permite ser utilizado en las condiciones de Uruguay.

Agradecimientos

A la Comisión Sectorial de Investigación Científica por la financiación del proyecto que dio origen a este trabajo.

Al Ing. Agr. (Ph.D) Mario Pérez Bidegain y la Ing. Agr. (Ph.D) Mónica Barbazán por la lectura crítica de este trabajo.

Bibliografía

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Dirk, R. and Smith, M.** 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper. N° 56. Crop evapotranspiration. (Guidelines for computing crop water requirements) pp 89 – 101.
- Brady, N. and Weil, R.** 2002. The nature and properties of soils. 13 Th. Ed., Prentice May. New Jersey. 960 p.
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. e Benatti, R. (Jr.)** 1975. Equação da perdas do solo. Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo. Boletín Técnico N° 21. Instituto Agronómico.
- Clérici, C. y García Préchac, F.** 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas de suelo por erosión en Uruguay y la región sur de la cuenca del Río de la Plata. Agrociencia. (Revista Científica de la Facultad de Agronomía - UDELAR). Montevideo. Uruguay. Vol. 5. N° 1. pp: 92 - 103.
- Cogo, N.; Drews, C. e Gianello, C.** 1978. Índice de erosividade das chuvas dos municípios de guaiba, Ijuí e Passo Fundo no Estado do rio Grande do Sul. II Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservacao do solo. Anais Passo fundo.
- Doorembos, J. y Pruitt, C.** 1976 Las necesidades de agua de los cultivos. Serie Riego y Drenaje. N° 24. Roma. FAO.
- Durán, A.; Califra, A. y Molfino, J.H.** 1999. Suelos del Uruguay según Soil Taxonomy. [En línea]. www.fagro.edu.uy: Dpto. de Suelo y Aguas, Edafología. 20/4/2007
- García Préchac, F.** 1982. Predicción de pérdidas de suelo por erosión hídrica. Facultad de Agronomía. Universidad de la República O. del Uruguay. Depto. de suelos, 57 p.
- García Préchac, F.** 1992. Conservación de suelos. Serie Técnica N°26. INIA. Uruguay 63 pp.
- García Préchac, F.** 2003. Propiedades físicas y erosión en los trabajos de larga duración de La Estanzuela. In Morón, A. y Díaz, R. Simposio 40 años de rotaciones agrícolas-ganaderas. INIA-La Estanzuela. Serie Técnica N°. 134. pp. 19-23.
- García Préchac, F. y Baethgen, W.** 1982. Utilización de la información disponible en conservación de suelos y aguas. Anales del congreso de ingeniería agronómica 1982. Inédito.
- García Préchac, F.; Clérici, C. y Denis, V.** 1997. Actualización de la información para el uso del modelo USLE-RUSLE en Uruguay. In F. García Préchac (Ed.) Curso de Actualización Técnica sobre Siembra Directa y Conservación de Suelos. FA (UDELAR). U. de Ed. Perm. Cód. No. 438. pp: 1-10

- García Préchac, F.; Terra, J. A. y Clérici, C.** 1998. Validación del factor uso y manejo del suelo (C) de la RUSLE en Uruguay. In II Reunião Brasileira do Ciencia do Solo, Sociedade Brasileira do Conservação do Solo, Santa Maria, p: 223-226.
- García Préchac, F.; Clérici, C. y Terra, J. A.** 1999. Avances con USLE-RUSLE para estimar erosión y pérdidas de productividad en Uruguay. In 14° Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón. Chile. CD ROM. Comisión VIII. 17 p.
- García Préchac, F.; Clérici, C.; Hill, M. y Hill, E.** 2005. EROSION versión 5.0, Programa de computación para el uso de la USLE/RUSLE en la Región Sur de la Cuenca del Plata. Versión operativa en Windows. DINAMA-UNDP. Proyecto URU/03/G31 y CSIC, disponible en <http://www.fagro.edu.uy/~manejo/>. Dpto. de Suelo y Aguas. Manejo y Conservación.
- Genta, J.L.; Charbonier, F.; Failache, N. y Alonso, J.** 2005. Modelo precipitación - escurrimiento de paso mensual. Curso de Hidrología Superficial de pequeñas cuencas, Instituto Mecánico de los Fluidos de Importancia Ambiental. UDELAR.
- Gupta, H.V.; Sorooshian, S. and Yapo, P.O.** 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models. Optimization algorithms, catchment conditions, and model structure. *J. Hydrology Eng.* 4(2): 135-143.
- Hignett C. and Evett, R.S.** 2002. Neutron Thermalization. In *Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods.* Book Series: 5. ASA-SSSA. pp 501-521.
- Legates, D.R. and McCabe, G.J.** 1999. Evaluating the use of «goodness of fit» measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Res.* 35 (1): 233 -241.
- MGAP - DSF. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Tomo III. Descripción de las unidades de suelos, Min. de Agric. Y Pesca / Dirección de Suelos y Fertilizante. Montevideo, Uruguay, 452 p.
- Moriassi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bigner, R.L. and Veith, T.L.** 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, ISSN 0001 - 2351 Vol. (50): 885 – 900
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V.** 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. *J. Hydrology* 10(3) 282-290.
- Pizarro, T.R.; Soto, M.B.; Farias, C.D. y Jordan, C.D.** 2005. [en línea] Aplicación de dos modelos de simulación integral hidrológica para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile Central. Nota Técnica. In. *Bosque* 26(2):123 – 129. 20/11/2007.
- Puentes, R.** 1981. A framework for the use of the Universal Soil Loss Equation in Uruguay. M.Sci. Thesis. Texas A & M University. 80 p.
- Puentes, R. y Szogi, A.** 1983. Manual para la Utilización de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo en Uruguay. Serie: Normas Técnicas en Conservación de suelos. N° 1. DS - MAP. Montevideo. Uruguay. 80p.
- Renard, K.G.; Foster, G.R.; Weesies, G. A.; Mc Cool, D.K. and Yonder, D.C.** 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United State Department of Agriculture. Agricultural Research Service. Agriculture Handbook Number 703.
- Silva, A.; Ponce de León, J.; García, F. y Durán, A.** 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Boletín de investigación N° 10. Facultad de Agronomía. 20 p.
- Témez, J.** 1977. Modelo Matemático de transferencia, precipitación y aportación. ASINEL. **Terra, J.A. y García Préchac, F.** 2001. Siembra directa y rotaciones forrajeras en las lomadas del este: Síntesis 1995-2000. INIA Treinta y Tres. Ser. Téc. No. 125, 100 p.
- Thorntwaite, C.W. and Mather, J.R.** 1955. The water balance. Centerton. N.J. Laboratory of Climatology.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D.** 1960. A Universal Soil Loss Equation to Guide Conservation Farm Planning. In. 7th International Congress of Soil Science. Madison. U.S.A. 418 - 425 p.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D.** 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook N° 537, 58 p.
- Wünsche, W.A.** 1983. Misión de asistencia preparatoria para un proyecto de conservación de suelos y aguas en el Uruguay (RU/82/003/02/12). Informe final. Archivo DUMA.