

**UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY
FACULTAD DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE POSGRADO**

**INCORPORACIÓN DEL EFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA EN
EL SUELO EN EL MODELO USLE/RUSLE PARA ESTIMAR
EROSIÓN EN URUGUAY**

Mariana Hill Lavista

Tesis presentada como parte de las exigencias de Posgrado de la Facultad de Agronomía en la opción Ciencias del Suelo para la obtención del título de Magíster en Ciencias del Suelo

Montevideo, Uruguay

Diciembre de 2007

**UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY
FACULTAD DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE POSGRADO
MAESTRIA EN CIENCIAS AGRARIAS**

Mariana Hill Lavista, Ingeniera Agrónoma

Tesis dirigida por
Ing. Agr. Fernando García Préchac (PhD)
Prof. Titular de Manejo y Conservación de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía

Aprobada el 30 de noviembre de 2007 por:

Ing. Agr. Mario Perez Bidegain (PhD) _____
Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía

Ing. Agr. José Terra (PhD) _____
Investigador Principal de INIA, INIA Treinta y Tres

Ing. Agr. Jorge Sawchik (PhD) _____
Director del Programa Nacional de Investigación Producción y Sustentabilidad
Ambiental de INIA

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Agr. (PhD) Fernando García Préchac por la orientación en este trabajo así como en la Maestría en general.

A los Ings. Agrs.(PhD) Fernando García Préchac, José Terra y Jorge Sawchik por proporcionar los datos de las parcelas de escurrimiento que fueron generadas en sus años de investigación así como la revisión crítica de este trabajo.

A los Ing. Agr. (PhD) Mario Pérez Bidegain y al Ing. Agr. Carlos Clérici por su colaboración y aportes en la realización de este trabajo.

A mi compañero Alfonso y nuestras hijas Agustina y Sofía por todo el apoyo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Resumen	5
Summary	6
Índice de Cuadros	7
Índice de figuras	8
I. PRESENTACION	10
II. INTRODUCCION	10
II.a. El Modelo USLE/RUSLE	12
II.b. Adaptación del Modelo USLE/RUSLE a Uruguay	16
II.c. Principales limitantes para su uso en Uruguay	19
II.d. Bibliografía	21
III. INCORPORACIÓN DEL EFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO EN EL MODELO USLE/RUSLE PARA ESTIMAR EROSIÓN EN URUGUAY	26
Resumen	26
Summary	27
Introducción	28
Materiales y métodos	29
Resultados y discusión	39
Conclusiones	51
Agradecimientos	52
Bibliografía	52
IV. ANEXOS	57

RESUMEN

Desde 1980 se ha trabajado para adaptar y validar el modelo USLE/RUSLE a Uruguay, pero existen sobreestimaciones respecto a resultados experimentales. La hipótesis es que ello se debe a que no considera el efecto del contenido de agua en el suelo. Los objetivos de este estudio fueron comprobar la hipótesis y proponer y validar un procedimiento para estimar el subfactor “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 regresión entre valores estimados y medidos pasó de 1.21 a 0.99 y 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.

SOIL WATER CONTENT EFFECT IN THE USLE/RUSLE MODEL TO ESTIMATE EROSION IN URUGUAY

SUMMARY

USLE/RUSLE has been used and developed in Uruguay since 1980, but erosion is overestimated in relation with experimental long-term data. It is hypothesized that this is due to not considering the effect of soil water content (SWC). 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 subfactor (CA), with experimental SWC data, and using it in the model, the slope 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, 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 a 4, respectively.

Índice de cuadros

Núm.		Página
1	Coordenadas geográficas, Factor K, Factor R, suelos dominantes de la Unidad y su correspondiente en el Soil Taxonomy	31
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)	32
3	Erosión estimada por el modelo USLE/RUSLE y medida experimentalmente para distintos tratamientos, usos y manejos del suelo en los tres sitios experimentales de Uruguay.	40
4	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	41
5	Valores de los métodos estadísticos utilizados para la validación del modelo USLE/RUSLE pre y luego de considerar el subfactor CA y rangos estadísticos recomendados como aceptables (Moríais et al., 2007)	50

Índice de figuras

Núm.		Página
1	Relación entre erosión estimada mediante el modelo USLE/RUSLE sin considerar el contenido de agua medido en el suelo y erosión medida experimentalmente en parcelas de escurrimiento de tres localidades.	42
2	Relación entre erosión estimada mediante el modelo USLE/RUSLE sin considerar el contenido de agua medido en el suelo y erosión medida experimentalmente en parcelas de escurrimiento localizadas en los sitios experimentales AB y PAP	43
3	Relación entre erosión estimada mediante el modelo USLE/RUSLE incorporando el subfactor CA y erosión medida experimentalmente en parcelas de escurrimiento localizadas en los sitios experimentales AB y PAP	44
4	Contenido promedio de agua en el suelo a una profundidad de 75 cm, en la parcela de CN, en cada estación en la Unidad Experimental Palo a Pique.	45
5	Relación entre la estimación promedio mensual del contenido de agua en el suelo estimado por el método de balance indicado 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	46

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.	47
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.	47
8	Relación entre erosión medida en parcelas experimentales y erosión estimada por USLE/RUSLE, considerando el contenido de agua en el suelo estimado por el modelo TG.	49
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.	50

I. PRESENTACIÓN

El presente trabajo consta de dos partes, Una de ellas, una introducción ampliada que presenta la justificación y los principales antecedentes de la temática del trabajo, así como el estado actual del uso del modelo USLE/RUSLE en el Uruguay. En segundo lugar se presenta un artículo científico en formato Revista Agrocencia. El artículo Científico constituye la parte fundamental de esta tesis.

II. INTRODUCCION

Para lograr la sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuarios y del medio ambiente, es básico controlar la erosión de los suelos, que es uno de los principales problemas ambientales en el Uruguay, relacionado a las actividades agropecuarias. Considerando esta situación, el incremento general de la producción agropecuaria y su creciente importancia, es necesario introducir una dimensión ambiental a la actividad para que sea sostenible. Esto implica mantener o aumentar la producción en actividades económicamente viables y socialmente aceptables, reduciendo el nivel de riesgo y protegiendo el potencial de los recursos naturales (Dumanski y Smyth, 1994).

Por lo anterior, el desarrollo y perfeccionamiento de métodos de estimación de la misma son de gran importancia en cualquier programa de monitoreo del estado de la calidad de los suelos, de extensión y de fiscalización sobre conservación de recursos naturales así como de predicción de cambios futuros debidos a clima o, como en la actualidad, al explosivo crecimiento del cultivo de soja.

Los daños que provoca la erosión, no solo se manifiestan donde ella se produce, sino en diferentes posiciones del paisaje y del ecosistema en el que el suelo se

encuentra. Además de daños ambientales, existen costos relacionados a efectos de excesos de agua (inundaciones), sedimentos y productos químicos asociados a éstos, que se depositan en las zonas bajas y en los cuerpos de agua superficiales. Aunque en muchos casos, los daños ocurridos (en el sitio y en el ambiente circundante) no se manifiestan en el corto plazo, son reales y crecen a lo largo del tiempo (Brady y Weil, 2002). También, la oxidación acelerada de la materia orgánica del suelo removido in situ por la erosión, así como del sedimento durante su transporte y deposición, introducen CO₂ en la atmósfera, contribuyendo al efecto invernadero (Lal et al., 1998). De acuerdo con FAO (Ongley, 1997), los sedimentos son el principal contaminante de las aguas superficiales y provienen mayoritariamente de las actividades agropecuarias. Los resultados del estudio para Uruguay, sobre el estado general de erosión de los suelos de Uruguay, basado en la interpretación del relevamiento aerofotográfico de 1966, indicaban que algo más del 30% del territorio nacional había sufrido algún grado de degradación por erosión (Cayssials et al., 1978). La distribución espacial de las zonas afectadas mostraba alta correlación con la distribución del cultivo de trigo, que era el principal cultivo agrícola de la época (Griffin, 1972). Como la localización de los sistemas agrícola-ganaderos en los que predominan los cultivos de grano no ha cambiado mayormente, los resultados de nuevos estudios del estado de erosión en Uruguay (Sganga et al., 2005) realizados en la zona Litoral del río Uruguay y del de la Plata, no muestran mayores diferencias con el estudio de Cayssials et al (1978). El área de cultivos extensivos de secano ha aumentado 52 % en los últimos 5 años, pasando de 459.000 ha sembradas en el año 2000 a 697.000 ha en el año 2004. No todos los cultivos evolucionaron en la misma proporción, destacándose un aumento muy importante en el cultivo de soja que pasó de 29.000 ha sembradas a 184.000 ha en el período citado (DIEA, 2005). De acuerdo al anuario 2006 la superficie

sembrada de soja de dicho año fue 309.000 ha (DIEA, 2006). Estimaciones realizadas para Uruguay indican que del 60 al 95 % de las pérdidas de Carbono en sistemas de rotación que incluyen cultivos anuales y pasturas, son debidas a la erosión (Clérici et al. 2004).

Por lo anterior, es de gran utilidad contar con herramientas, que permitan estimar objetivamente, a priori, la erosión de diferentes escenarios de uso y manejo de suelos, para guiar la toma de decisiones. Adicionalmente, los modelos de estimación de erosión, pueden complementar otros modelos como el CENTURY (Metherel et al., 1993) y el EPIC, (Williams et al., 1983), que estiman efectos sobre otras variables afectadas por la erosión. A su vez, una variante de USLE a escala de cuencas (MUSLE) es utilizada en el modelo SWAT - Soil and Water Assessment Tool- (Neitsch et al., 2002), que es el más reciente y más utilizado para evaluar suelo y agua en los EEUU. (Durán y García Préchac, 2007)

Estas herramientas también pueden usarse para el contralor legal por parte de la autoridad en la materia o como parte de un plan de monitoreo. García Préchac y Durán (1998 y 2001), presentaron un procedimiento para estimar la pérdida de productividad estimada por el Índice CONEAT (carne y lana), en función de la erosión estimada con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). La expresión de las pérdidas físicas de suelo en términos de pérdida de productividad o valor de la tierra, son la única manera de incluir el deterioro de los recursos naturales en los cálculos económicos, que hasta el presente se manejan como si los recursos naturales fueran un bien inagotable.

II.a. El Modelo USLE RUSLE

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Modelo USLE) y su versión revisada (RUSLE) constituyen el modelo de estimación de erosión más utilizado en el mundo. El

modelo se desarrolló en los Estados Unidos de Norteamérica, donde fue publicada su primera versión en 1960 (Wischmeier y Smith, 1960), a pesar de existir esfuerzos e inversiones realizadas por el Agricultural Research Service del United States Department of Agriculture (USDA), para sustituirlo por un modelo más avanzado como el Water Erosion Prediction Project -WEPP (Foster y Lane, 1987; Lane y Nearing, 1989). La razón de la no adopción generalizada del WEPP, radica en la familiaridad que los especialistas en suelos, trabajando directamente con productores, tienen con USLE, así como la mayor comprensión de su funcionamiento y del significado y manera de plantearse diferentes escenarios. Esto llevó al USDA a mantener una línea de trabajo que culminó con la publicación de la versión revisada y actualizada del modelo, llamada RUSLE (Renard et al., 1997), que ha tenido gran éxito y se ha convertido en la herramienta técnica oficial utilizada en el contralor legal de la erosión en los Estados Unidos (Durán y García Préchac, 2007)

Para el desarrollo del modelo, se utilizó información experimental, desarrollada en la década del 50, de unas 10.000 combinaciones de parcelas de escurrimiento - año obtenidas en eventos de lluvia natural (Wischmeier y Smith, 1960). El modelo surge en una primera versión (Wischmeier, 1955), luego de creado el Centro Nacional de Datos de Erosión y Escurrimiento en la Universidad de Purdue en 1954, donde se concentró la información generada desde que se instalaron las primeras parcelas en 1914 en la Universidad de Missouri (Durán y García Préchac, 2007),

Posteriormente, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) publicó manuales agrícolas con la información necesaria para el uso del modelo USLE en todo Estados Unidos. (Wischmeier y Smith, 1965 y 1968)

A fines de la década del 70 y con gran impulso a partir de 1980 se comenzó a extender el uso del modelo en diferentes partes del mundo donde se realizaron

trabajos para calibrar y validar el modelo en distintas regiones, como por ejemplo en África (Hudson, 1981) (Lal, 1976), Brasil (Bertoni y Lombardi Neto, 1993) (Wünsche y Velloso, 1982). Los trabajos de adaptación también comenzaron en el Uruguay en la década del 80 y serán detallados más adelante.

El modelo estima la erosión anual promedio en una determinada situación de uso y manejo del suelo teniendo en cuenta la erosividad de la lluvia en la región bajo estudio, las características físicas y topográficas del suelo, el sistema de uso y manejo del suelo, y las medidas mecánicas de control. Presenta la siguiente estructura (García Préchac, 1992):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde,

A - Es la pérdida promedio de suelo por unidad de superficie y durante el período de interés, en planificación agropecuaria generalmente un año. Sus dimensiones son $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

R - Es el Factor Erosividad de la Lluvia. Es el producto acumulado para el período de interés, con cierta probabilidad de ocurrencia (normalmente 50% o promedio), de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 minutos de las lluvias. Sus dimensiones son $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

K - Es el Factor Erodabilidad del Suelo. Es la cantidad promedio de suelo perdido por unidad del Factor R ($\text{Mg hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de la pendiente, con una longitud de pendiente estándar de 22.1 m y una pendiente de 9%.

L - Es el Factor 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.

S - Es el Factor 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.

C - Es el Factor Uso y Manejo. Es la relación entre la erosión de un suelo con un determinado sistema de uso y manejo y la que ocurre en el mismo suelo puesto en las condiciones estándar en que se definió el Factor K, a igualdad de los demás factores.

P - Es el Factor 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.

La versión revisada del modelo RUSLE (Renard et al., 1997), mejora la estimación de los distintos factores de USLE. Incluye un submodelo para estimar el factor C (uso y manejo del suelo), a partir de 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. (García Préchac, 1992)

Como limitantes, se indica que los métodos para estimar los seis factores no se encuentran disponibles en muchos lugares fuera de los Estados Unidos de Norteamérica. Su aplicación en praderas es limitada. Está basado sobre el supuesto de pendiente de terreno, suelos, cultivo y manejo uniformes. Es un procedimiento estadístico (empírico o "agrupado") que no contempla los procesos físicos de separación, transporte y sedimentación en forma mecánica. Finalmente, no fue diseñado para estimar rendimientos de sedimentación en cuencas complejas. (García Préchac, 1992)

II.b. Adaptación del Modelo USLE RUSLE a Uruguay

En nuestro país se han incorporado los avances de RUSLE para el cálculo del factor L, S y C por lo que el modelo, es denominado USLE/RUSLE (Clérici y García Préchac, 2001)

Desde principios de 1980 hasta la fecha, se han realizado avances para adaptar y validar el modelo a Uruguay y la región sur de la cuenca del Plata (García Préchac, 1992; García Préchac et al., 1997 y 1999; Clérici y García Préchac, 2001).

En el esfuerzo inicial (1979 a 1986), participaron la Dirección de Suelos (DS), la División Uso y Manejo del Agua (DUMA), la Estación Experimental La Estanzuela del Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto A. Boerger (LE - CIAAB) y la Facultad de Agronomía.

Con el apoyo del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura – Organización de Estados Americanos (IICA – OEA), la DUMA obtuvo información nacional sobre el Factor R (erosividad de las lluvias), del modelo (Rovira et al., 1982; Pannone et al., 1983). En la actualidad se posee información que cubre todo el territorio nacional, las provincias de Corrientes, Entre Ríos, Santa Fe, Córdoba y Buenos Aires de Argentina, y el Estado de Río Grande do Sul de Brasil, compilada en un mapa de isoerodentas (García Préchac et al., 1999, Clérici y García Préchac, 2001).

Por otro lado, la DS obtuvo información nacional sobre el factor K, erodabilidad de los suelos (Puentes, 1981).

Se asumió que la información sobre los factores topográficos (LS) y de control mecánico de la erosión (P) se podían adoptar directamente, ya que sus efectos en la erosión son universales; actualmente se utilizan los definidos por Renard et al. (1997).

El factor C, uso y manejo del suelo, que evalúa el efecto sobre la erosión de la sucesión de cultivos y/o pasturas, manejo de residuos, niveles de producción, sistemas de laboreo, etc., determina que los parámetros utilizados en la determinación de este factor varíen a medida que hay cambios en sistemas de producción o niveles de tecnología aplicada. Por otra parte, no se disponía en la bibliografía de datos sobre una importante cantidad de situaciones de sistemas de producción locales. En la década del 80, se adoptó y adaptó la información existente, por lo que hasta 1992, la información para estimar el Factor C resultó de seleccionar de la bibliografía internacional valores de sistemas de uso y manejo comparables a los de nuestro país (Puentes, 1981; García y Baetghen, 1982; García Préchac, 1982; Puentes y Szogi, 1983).

Paralelamente, se creó un programa nacional de medición experimental de erosión a largo plazo en parcelas de escurrimiento bajo lluvia natural, que con altibajos fue continuado en varios proyectos durante los años 90 (García Préchac, 1992; Terra y García Préchac, 2001; Clérici y García Préchac, 2001), sobre cuya base de datos se desarrolla el presente trabajo. Las mencionadas parcelas han funcionado en INIA La Estanzuela (desde 1984 por más de 10 años), INIA Treinta y Tres (6 años, 1994-2000) y Aguas Blancas (4 años, 1982-1986). La información generada por estas parcelas, al tratarse de mediciones directas, se utilizó y puede utilizarse para validar el modelo en cuestión o cualquier otro alternativo. Esto ha permitido realizar varias campañas de determinaciones de estas variables en los principales sistemas de producción del Uruguay, con sus variantes de manejo de suelos, habiéndose publicado una síntesis de la mayoría de los resultados obtenidos (García Préchac et al., 1997) y elaborado un programa de computación que contiene la información disponible sobre todos los factores y las rutinas de cálculo, para facilitar su aplicación por los usuarios que en la

actualidad cuenta con una nueva versión, EROSION 5.0, (García Préchac et al., 2005) que se encuentra disponible en la página Web: <http://www.fagro.edu.uy/~manejo/>.

Los trabajos de investigación y desarrollo del modelo han sido el fruto de varios proyectos de investigación. A continuación se plantean los principales avances.

Para el factor K, que refiere a la erodabilidad del suelo, las estimaciones de Puentes (1981) han sido validadas con determinaciones experimentales realizadas con lluvia simulada en 7 suelos de texturas contrastantes y el coeficiente de correlación encontrado entre los K estimados por Puentes y los medidos con lluvia simulada, fue 0,99 (García Préchac et al., 1999).

Las estimaciones del Factor C realizadas con RUSLE, han sido validadas tanto en microparcels con lluvia simulada, como bajo lluvia natural en las parcelas de escurrimiento de la Unidad Experimental Palo a Pique del INIA - Treinta y Tres. En el primer caso, la correlación obtenida entre los valores medidos experimentalmente y los estimados con RUSLE fue 0.74, y en el segundo 0.91 (García Préchac et al., 1998). Más importante aún, en este último caso el intercepto fue 0.03 y la pendiente 1.08 es decir, las dos variables presentan una relación casi 1:1, indicando que las estimaciones tienen un buen ajuste con los valores experimentales.

El resto de los factores del modelo sobre los que no se trabajó individualmente en su validación, pueden igualmente ser validados en conjunto con los anteriormente discutidos, usando los datos promedios anuales de información experimental, proveniente de las parcelas de escurrimiento de Aguas Blancas, Estanzuela y Palo a Pique. La erosión se expresa en valores promedio anual porque, en su estado actual de desarrollo, es lo que se obtiene del modelo. El coeficiente de correlación entre las estimaciones y las determinaciones experimentales fue 0.98, con intercepto de -1,1 y pendiente de 1.009 (García Préchac, 2003).

II.c. Principales limitantes para su uso en Uruguay

Si bien los resultados de investigación de largo plazo son provisorios, tienen algunas limitantes que se pretenden solucionar con el presente trabajo. El rango de las determinaciones experimentales y estimaciones con el modelo involucra las situaciones de máxima erodabilidad de los suelos de los tres sitios (completamente desnudos y laboreados a favor de la pendiente principal). Dos de esos tres valores están alrededor de $50\text{Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ y el tercero alrededor de $90\text{Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$ y estos tres puntos caen muy cercanos de la relación 1:1 entre determinaciones experimentales y estimaciones. Entre todos los demás casos, que constituyen las situaciones representativas del estado de los suelos bajo reales situaciones de uso y manejo agropecuario, ninguno de los valores fue mayor a $20\text{Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$. En el rango de valores entre 0 y $20\text{Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$, que son los de interés real, el modelo genera una sobreestimación en relación a las medidas experimentales. Esta aparente incongruencia surge del hecho de que si el suelo permanece desnudo, solo se seca en unos pocos cm. cercanos a la superficie, permaneciendo en el conjunto de su perfil a capacidad de campo (García Préchac, 1992), mientras que cuando hay crecimiento vegetal, las plantas desecan el suelo en toda su profundidad de arraigamiento en períodos con evapotranspiración mayor a las precipitaciones. Los datos de las parcelas de escurrimiento muestran que la erosión en las parcelas con vegetación casi se anula durante el verano. Es durante esta época del año que el modelo genera su sobreestimación (Durán y García Préchac, 2007). RUSLE propone un procedimiento sencillo para considerar el contenido de agua del suelo en las estimaciones del modelo, a través de un algoritmo para estimar valores de RPS, El valor de una RPS se calcula a partir del producto de varios subfactores: $RPS = UP.CV.CR.R.CA$, donde: UP

es el subfactor que evalúa el efecto del uso previo del suelo, CV es el subfactor que evalúa el efecto de la cobertura vegetal, CR es el que evalúa la cobertura por residuos, R es el que evalúa el efecto de la rugosidad y CA es el que evalúa el efecto del contenido de agua del suelo. El subfactor CA, vale 1.0, cuando el contenido de agua a 1.2 m ($\theta_{1.2m}$) es igual o mayor a Capacidad de Campo, vale 0.0, cuando $\theta_{1.2m}$ es igual o menor al Punto de Marchitez Permanente. Entre ambos extremos, CA varía linealmente (Renard et al., 1997).

La información obtenida en dos de los cuatro años en las parcelas de escurrimiento de Aguas Blancas en los que se realizaron medidas de agua en el suelo, permitió calcular el subfactor dependiente del contenido de agua en el suelo según la RUSLE para el noroeste de los EEUU. Agregando el mismo a la estimación del modelo de las cuatro alternativas de uso y manejo ensayadas en ese sitio, excluyendo suelo desnudo, se obtuvo una disminución de la sobreestimación del orden de 20% y una mejora del R^2 de 0.88 a 0.97 entre lo estimado y lo medido (García Préchac, 1992).

La hipótesis de este trabajo es que, el modelo USLE/RUSLE, sobreestima la erosión promedio anual, en particular con sistemas de producción con alta participación de cultivos de verano en los que el contenido de agua en el suelo están por debajo de capacidad de campo (García Préchac et al., 1992).

Los objetivos de este trabajo son probar dicha hipótesis utilizando la información experimental de erosión de largo plazo obtenida en el país con parcelas de escurrimiento bajo lluvia natural en tres suelos y localidades y si la hipótesis es probada, 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 nuestras condiciones regionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Brady, N. and Weil, R. 2002. The nature and properties of soils. 13th Ed., Prentice May. New Jersey. 960 p.
- Bertoni, J. y Lombardi Neto, F. 1993. Conservação do solo. Cone Ed., São Paulo, 355p.
- Cayssials, R., Liesegang, J. y Piñeyrúa, J. 1978. Panorama de la erosión y conservación de suelos en Uruguay. Dirección de Suelos y Fertilizantes-MAP. Boletín Técnico No. 4.
- 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. Nº 1. pp: 92 - 103.
- Clérici, C.; Baetghen, W.; García Préchac, F. y Hill, M. 2004. Estimación del impacto de la Soja sobre erosión y carbono orgánico en suelos agrícolas del Uruguay. In. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. Entre Ríos, 7p.
- DIEA - MGAP, (2005). [en línea]. Anuario 2005. Estadísticas de importaciones de productos fitosanitarios. Datos anuales de importaciones. www.mgap.gub.uy. 10/07/2007
- DIEA - MGAP, (2006). [En línea]. Anuario 2005. Estadísticas de importaciones de productos fitosanitarios. Datos anuales de importaciones. www.mgap.gub.uy. 10/07/2007
- Dumanski, J. and Smyth, A. 1994. The segues and challenges of sustainable land management. Proc. International workshop on sustainable land management for the 21st century In. Vol. 2 Plenary papers Agricultural Institute of Canada. Ottawa 381p.

- Durán, A. y García Préchac, F. 2007. Suelos del Uruguay. Origen, clasificación, manejo y conservación. Vol II. Ed., Hemisferio Sur. Montevideo. Uruguay. Pp. 58:89.
- Foster, G.R., and Lane, L.J. 1987. User requirements USDA - Water erosion prediction project (WEPP). U.S. Dept. of Agric., Agric. Res. Serv. NSERL Rep. N° 1. West Lafayette. Indiana.
- 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. 63p.
- 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. y Durán, A. 1998. Propuesta de estimación del impacto de la erosión sobre la productividad del suelo en Uruguay, Agrociencia (Rev. de la FA-UDELAR), II, p: 26-36.
- García Préchac, F. y A. Durán, A. 2001. Estimating soil productivity loss due to erosion in Uruguay in terms of beef and wool production on natural pastures. In Stott, D.E. et al. (Eds.) Sustaining the Global Farm, Selected Papers from the 10th Int. Soil Cons. Org. Meeting, Mayo 24-29, 1999, Purdue Univ. y Nat. Soil Erosion Res. Lab., p: 040-045.
- 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 María, 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^o Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón. Chile. CD ROM. Comisión VIII. 17 pp,
- 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.
- Griffin, E.C. 1972. Agricultural Land use in Uruguay. Ph.D. Thesis. Michigan State University.
- Hudson, N.W. 1981. Soil Conservation, Second Ed., Cornell Univ. Press. 324 p.
- Lal, R. 1976. Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria III. Effects of rainfall characteristics. Geoderma 16: 389-401.
- Lal, R.; Kimble, J.M.; Follet, R. F. and Cole, C. V. 1998. The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Ann Arbor Press. 128p.
- Lane, L.J. and Nearing, M. A. 1989. USDA - Water Erosion Prediction Project: Hill slope Profile Version. NSERL Rep. No 2. U.S. Dep. Agric. Agric. Res. Serv. West Lafayette, Indiana.
- Metherell, A.K.; Harding, L.A.; Cole, C.V. and Parton, W.J. 1993. CENTURY. Soil organic matter model environment. Tech. Doc. Agroecosystem V. 4.0. Great plains System Res. U. Tech. Rep. No. 4. USDA-ARS. Fort. Collins. Colorado.

- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G; Kinry, J.R.; Williams, J.R. y King, K.W. 2002. Soil and water assessment tool. Theoretical documentation. Texas Water Res. Inst. College Station. Texas. TWRI Report TR-191. 506 p.
- Ongley, E.D. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje No. 55. 115 p.
- Pannone, J.C.; García Préchac, F. y Rovira, L.A. 1983. Índice de erosividad de las lluvias en el Uruguay (Factor R de la ecuación universal de pérdida de suelo). MAP-INC-IICA. Montevideo. Uruguay. 36 p.
- 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. Nº 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.
- Rovira, L.A.; Corsi, W.; García Préchac, F. y Hofstadter, R. 1982. Erosividad de las lluvias en las zonas de influencia de las estaciones agroclimáticas La Estanzuela. Paysandú. Bella Unión y Treinta y Tres. MAP-IICA. Montevideo. 15 p.
- Sganga, J.C., Vítora, C.D. y Cayssials, R. 2005. Plan de acción nacional de lucha contra la desertificación y la sequía, ROU, DINARA-MOTVMA, RENARE-MGAP. Proyecto GM2/020/CCD, 168p.

- 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. Serie Técnica No. 125, 100 p.
- Williams, J.R.; Renard, K.G. y Dyke, P.T. 1983. EPIC. A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation*. 38(5): 381-383.
- Wischmeier, W.H. 1955. Punched cards record runoff and soil-loss data. *Agric. Eng.* 36: 664-666.
- 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. 1965. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. USDA Agric. Handbook. Nº 282.
- Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook Nº 537, 58p.
- Wünsche, W.A. Y J.A. Velloso. 1982. Situação, importância e aplicação do cultivo reduzido no Rio Grande do Sul. In Caballero. H. Y R.M. Díaz (Eds.) *Labranza reducida en el Cono Sur*. IICA-CIAAB. La Estanzuela. Colonia. Uruguay. p: 16-22

III. INCORPORACIÓN DEL EFECTO DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO EN EL MODELO USLE/RUSLE PARA ESTIMAR EROSIÓN EN URUGUAY

HILL, M.¹

RESUMEN

Desde 1980 se ha trabajado para adaptar y validar el modelo USLE/RUSLE a Uruguay, pero existen sobreestimaciones respecto a resultados experimentales. La hipótesis es que ello se debe a que no considera el efecto del contenido de agua en el suelo. Los objetivos de este estudio fueron comprobar la hipótesis y proponer y validar un procedimiento para estimar el subfactor “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 regresión entre valores estimados y medidos pasó de 1.21 a 0.99 y 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: Estimación de erosión, USLE-RUSLE, agua en el suelo

¹ Ing. Agr. Departamento de suelos y Aguas. Facultad de Agronomía. Garzón 780. Montevideo, Uruguay. E-mail: mhill@fagro.edu.uy

SOIL WATER CONTENT EFFECT IN THE USLE/RUSLE MODEL TO ESTIMATE EROSION IN URUGUAY

SUMMARY

HILL, M.²

USLE/RUSLE has been used and developed in Uruguay since 1980, but erosion is overestimated in relation with experimental long-term data. It is hypothesized that this is due to not considering the effect of soil water content (SWC). 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 subfactor (CA), with experimental SWC data, and using it in the model, the slope 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, 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 a 4, respectively.

KEY WORDS: Erosion estimation, USLE/RUSLE, soil water content

² Ing. Agr. Departamento de suelos y Aguas. Facultad de Agronomía. Garzón 780. Montevideo, Uruguay. E-mail: mhill@fagro.edu.uy

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 como guía para la toma de decisiones en la planificación del uso y manejo de suelos para minimizar la erosión a nivel predial. El modelo fue desarrollado inicialmente en la década de 1950, utilizando información experimental de unas 10.000 combinaciones de parcelas de escurrimiento, obtenida en eventos de lluvia natural durante varios años.

Desde principios de 1980, se han realizado avances para adaptar y validar el modelo a Uruguay y la región sur de la cuenca del Plata (Puentes, 1981; García y Baetghen, 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 cuya base de datos se elaboró el presente trabajo.

El modelo, desarrollado en el hemisferio Norte, asume 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. Este contenido de agua se mantiene alto durante los períodos de mayor riesgo de erosión de los suelos, que van 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, es muy probable el suelo no permanezca sin cubrir y presente 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 lo tanto, la hipótesis de este trabajo es que, la incorporación del subfactor “contenido de agua del suelo” al modelo mejorará la performance estimativa del modelo.

Los objetivos de este trabajo fueron comprobar dicha hipótesis, utilizando la información experimental de erosión de largo plazo obtenida en el país con parcelas de escurrimiento bajo lluvia natural en tres suelos y localidades 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 13mm, 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 un estándar y no tienen 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 el mismo suelo puesto 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 combinación tipo de suelo - localidad - uso y manejo del suelo, se utilizó el programa EROSION 5.0 (García Préchac et al., 2005), que estima pérdidas de suelo a partir del modelo USLE/RUSLE adaptado para Uruguay y la cuenca sur del Río de la Plata. La versión actual del programa asume que el contenido de agua del suelo es alto y constante.

Sitios. Parcelas de escurrimiento

Se trabajó con los datos de parcelas de escurrimiento bajo lluvia natural existente en el país. Dichas parcelas generaron información experimental de erosión en Aguas Blancas (AB, Lavalleja), en el período 1982-1986; Unidad Experimental Palo a Pique (PAP, Treinta y Tres), en el período 1994-1999 y Estación Experimental La Estanzuela (LE, Colonia), en el período 1984-1989. El tamaño estándar de las parcelas de escurrimiento fue de 22.1 m de largo por 3.5 m de ancho (Wünsche, 1978), 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 metodología de muestreo y trabajo de laboratorio fue la descrita por Cogo (1978) y Wünsche (1983). La erosión generada en cada evento climático individual se determinó a partir de la medición del escurrimiento superficial 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.

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 hr ⁻¹ año ⁻¹	Factor R ² Mghraño MJ ⁻¹ mm ⁻¹	Pendiente %	Suelo dominante ³	Soil Taxonomy ⁴
AB	34° 20' S 55° 0' W	0.390	382	4	Brunosol Éútrico	Tipic 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	Hor¹	LI² cm.	CC³	PMP⁴ mm.
AB	Ap	14	55.4	26.5
	B _{t1}	47	134.5	91.9
	B _{t2}	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 como 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 mais*) 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 4Mg 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 o moha. 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 (*Festuca arundinacea*). 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 (*Sorghum bicolor*) 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 (*Helianthus annuus*) 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, doble 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 Higney y Evett, (2002), en tubos de acceso, ubicados en cada parcela de escurrimiento. 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

Variables Climáticas

Los datos de precipitación utilizados para la estimación de agua en el suelo se tomaron de INIA Gras para LE y los 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 realizó por el método de Penman (Doorembos y Pruitt, 1988). 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 humedad (S_i). Además, dada una precipitación (P_i) y una evapotranspiración potencial (ETP_i), el almacenamiento de humedad al final del período viene dado por:

$$S_i = \min(P_i - ETP_i + S_{i-1}, 0) \quad \text{si } P \geq ETP_i$$

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

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

$$T_i = (P_i - ETP_i) + S_{i-1} - 0 \quad \text{si } S_i = 0$$

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

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,

P_i es la precipitación del mes i

T_i es el excedente del mes i

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

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

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 en el mes i

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

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

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

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), 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). Éste subfactor, fue calculado en base al contenido de agua promedio medido y estimado en el suelo hasta 120 cm de profundidad, en cada período. 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 cada período en el que la vegetación presente se considera uniforme (“período de cultivo”, Wischmeier y Smith, 1968). Estos períodos son 5: barbecho rugoso, siembra - emergencia, establecimiento, crecimiento - maduración y rastrojo, (Brady y Weil, 2002).

El procedimiento seguido en este trabajo es multiplicar la RPS de cada período de crecimiento por el subfactor CA promedio anual, de cada período definido por el mismo.

Validación de los modelos

Para analizar la relación entre los valores estimados y medidos del contenido de agua en el suelo se realizó una regresión lineal simple y su ajuste con intercepto 0.

Para analizar la relación entre la erosión medida y la estimada se realizó 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

Las mayores pérdidas de suelo se midieron y estimaron en las parcelas de suelo desnudo, con valores de erosión de de 43 a 102 Mg ha⁻¹ año⁻¹, entre los 3 sitios experimentales.

Otras situaciones de alta erosión fueron el sistema “Maíz Tradicional” de AB, y el sistema de CC con LR en PAP con $24 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de pérdida de suelo estimada. El primero se debe a que al ser un sistema con LC, de baja producción de materia seca y baja cobertura, resulta altamente erosivo con una pérdida de suelo estimada de $32 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El segundo se debe al alto valor de erodabilidad del suelo, ya que el Factor K del suelo de Palo a Pique es alto (0.480), debido a su textura con alto contenido de limo y a una alta diferenciación textural entre los horizontes A y B, lo que determina su alta erodabilidad. La erosión estimada en el resto de los sistemas es menor a $12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El Cuadro 3 presenta los datos de erosión medida y estimada para los demás tratamientos en las diferentes localidades.

La mayor erosión medida respecto a la estimada en CN para AB, se debió fundamentalmente a que dicha parcela se encontraba compactada lo que provocó un alto escurrimiento (García Préchac, com. pers.).

Cuadro 3. Erosión estimada por el modelo USLE/RUSLE y medida experimentalmente para distintos tratamientos, usos y manejos del suelo en los tres sitios experimentales de Uruguay.

Sitio	Tratamiento	Erosión (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	
		Medida	Estimada
AB	Campo natural	3.9	1.2
AB	Maíz – cobertura invernal de avena con LC ¹	5.6	11.5
AB	Rotación cultivo pastura con LC	5.7	8.1
PAP	Campo natural	1.8	2.0
PAP	Doble continuo anual con SD ²	3.5	5.8
PAP	Rotación cultivo pastura con LR ³	3.7	8.7
PAP	Rotación cultivo pastura con SD	1.7	3.7
LE	Campo natural	0.5	0.9
LE	Doble cultivo anual con SD	0.7	2.0
LE	Doble cultivo anual en LR	3.0	8.8
LE	Rotación cultivo pastura con LR	1.8	2.8
LE	Rotación cultivo pastura con SD	0.7	1.8

¹Laboreo Convencional, ²Siembra Directa, ³ Laboreo Reducido

De acuerdo a los criterios de Puentes (1981), la pérdida tolerable para los suelos de los tres sitios es 7 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Cuadro 4. 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

Los valores presentados en el Cuadro 4 son coincidentes con las estimaciones realizadas en el país para sistemas similares de uso y manejo del suelo (Clérici y García Préchac, 2001)

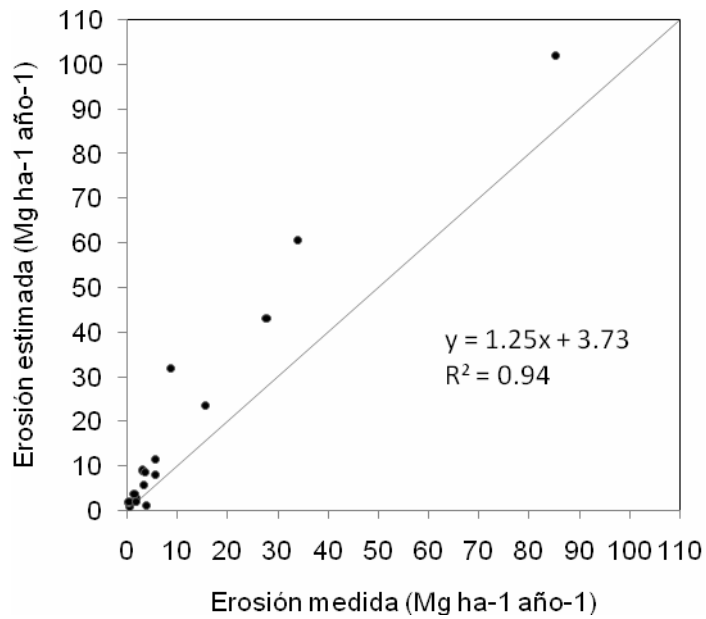


Figura 1. Relación entre erosión estimada mediante el modelo USLE RUSLE sin considerar el contenido de agua medido en el suelo y erosión medida experimentalmente en parcelas de escurrimiento de tres localidades.

La Figura 1 muestra que existe una sobreestimación del orden de 25% de la erosión promedio anual medida. Esta es muy importante en situaciones de alta erosión, ya que dicha sobreestimación 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.

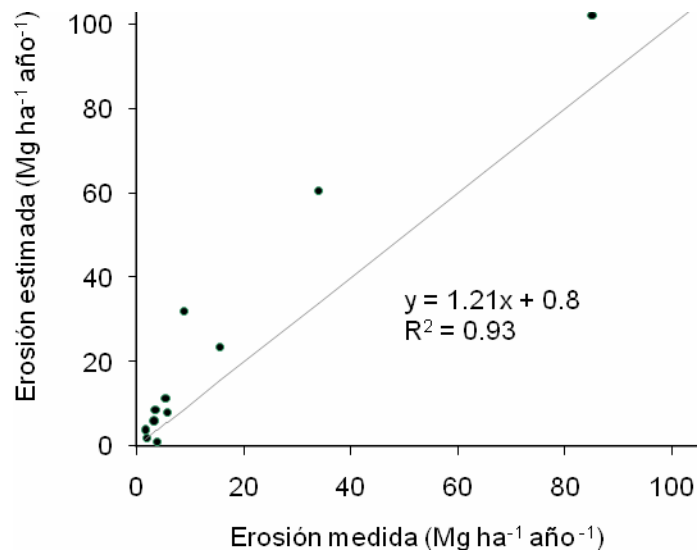


Figura 2. Relación entre erosión estimada mediante el modelo USLE RUSLE sin considerar el contenido de agua medido en el suelo y erosión medida experimentalmente en parcelas de escurrimiento localizadas en los sitios experimentales AB y PAP

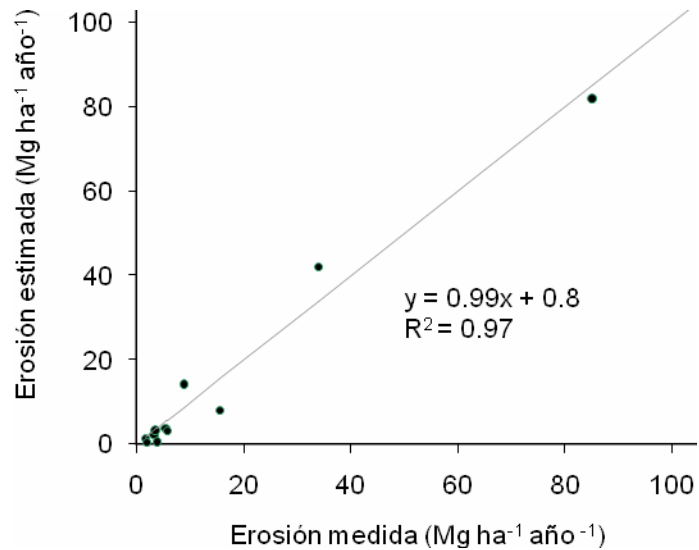


Figura 3. Relación entre erosión estimada mediante el modelo USLE RUSLE incorporando el subfactor CA y erosión medida experimentalmente en parcelas de escurrimiento localizadas en los sitios experimentales AB y PAP

La Figura 2 muestra una sobreestimación de la pérdida de suelo es de 22% para los sitios AB y PAP, coincidiendo con los valores de sobreestimación encontrados cuando se consideraron las tres localidades ya que no se contó con datos de agua medida experimentalmente para LE. 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)

Este procedimiento es importante en condiciones como las de Uruguay, donde existe una alta variación del contenido de agua del suelo en las distintas situaciones de uso y manejo. (García Préchac, 1992). (Figura 4)



Figura 4. Contenido promedio de agua en el suelo a una profundidad de 75 cm en la parcela de CN, 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

Estimación del contenido de agua en el suelo

Se buscó encontrar un procedimiento de balance hídrico adecuado y sencillo para estimarlo, que permita ser utilizado para el cálculo del subfactor “contenido de agua” en el suelo (CA) en las mismas condiciones en que se realizó la estimación de erosión.

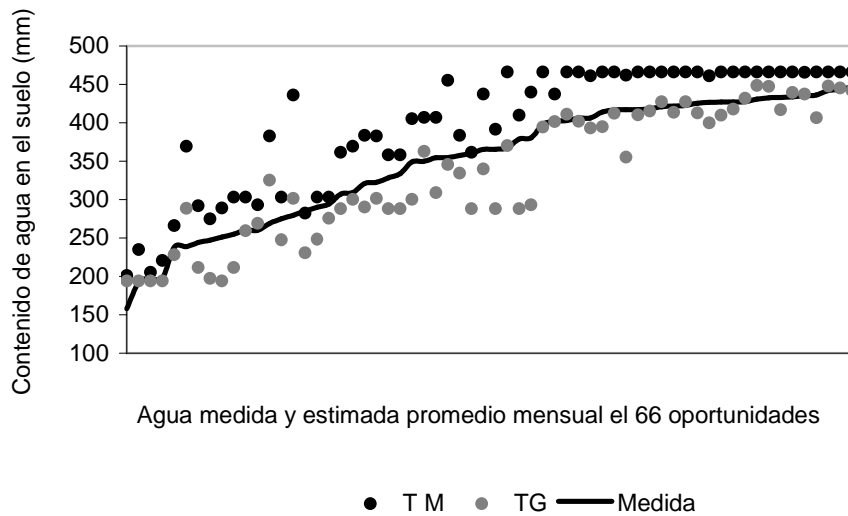


Figura 5. Relación entre la estimación promedio mensual del contenido de agua en el suelo estimado por el método de balance indicado y el promedio mensual del contenido de agua medido experimentalmente con sonda de neutrones, hasta 120 cm. de profundidad, en 66 oportunidades, en las parcelas bajo campo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

Se destaca en todos los casos, una sobreestimación del contenido de agua en el suelo respecto al agua medida en el caso del método de TM. Esto significaría una sobreestimación de la erosión en forma sistemática. Para el caso del modelo TG, no se observa un sesgo sistemático. (Figura 5)

Cuando el contenido de agua en el suelo se estimó por el modelo TM, existió en promedio un 13% de sobrestimación del contenido de agua en el suelo. El agua estimada con el modelo TG fue en promedio 4% inferior que la medida, lo que indica una leve subestimación (Figuras 6 y 7).

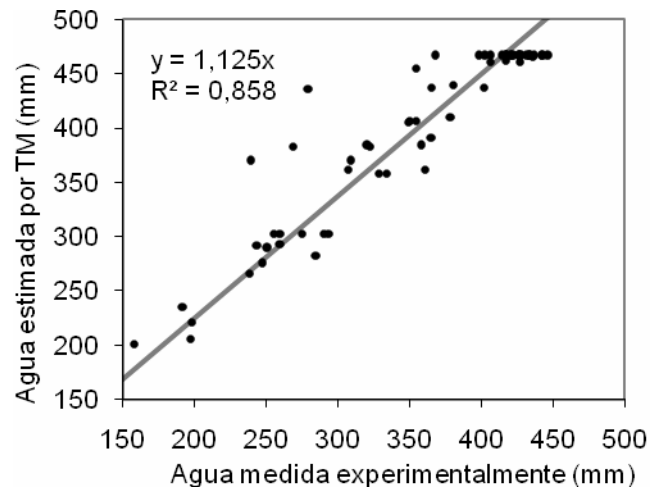


Figura 6. Relación entre contenido de agua en el suelo en mm estimada a partir del método TM y contenido de agua en el suelo medido experimentalmente en las parcelas de escurrimiento.

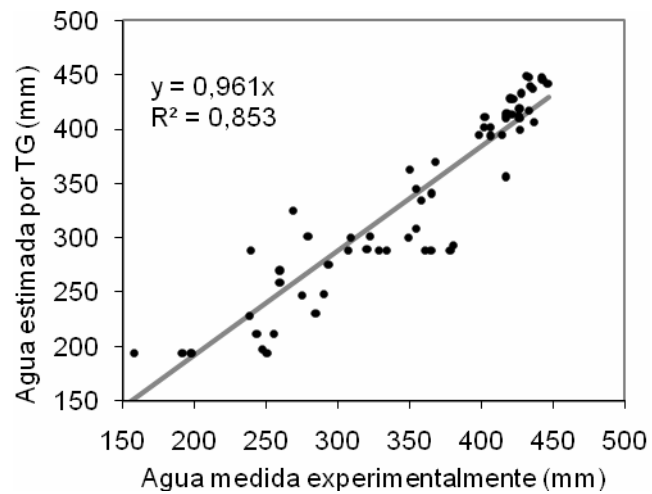


Figura 7. Relación entre contenido de agua en el suelo en mm estimada a partir del método TG y contenido de agua en el suelo medido experimentalmente en las parcelas de escurrimiento.

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 sume 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. La precipitación estaría disponible para ser evapotranspirada. 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 de 25% para el período considerado. 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 con el 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, por lo que se logra mejorar la estimación de pérdida de suelo logrando eliminar la sobreestimación, tal como se logró considerando el agua medida experimentalmente.

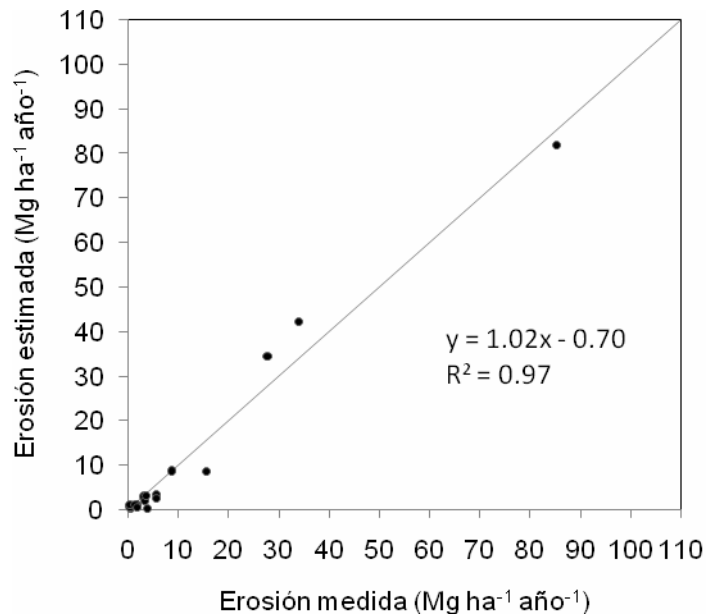


Figura 8. Relación entre erosión medida en parcelas experimentales y erosión estimada por USLE/RUSLE, considerando el contenido de agua en el suelo estimado por el modelo TG.

La erosión medida 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 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.

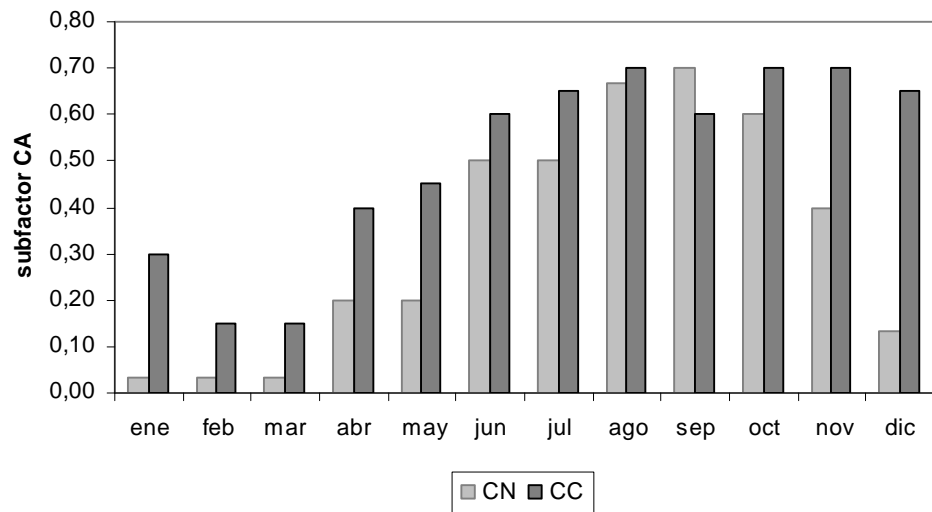


Figura 9. Subfactor CA promedio calculado en base al contenido de agua estimado por TG para las parcelas de campo natural (CN) y cultivo continuo (CC) en AB, PAP y LE.

Validación del Modelo

Si bien los valores de intercepto y pendiente, así como el R^2 son altamente satisfactorios, por las limitantes anteriormente mencionadas, numerosos autores han señalado que no es suficiente esta única prueba para considerar en la validación de este tipo de modelos (Legates y McCabe, 1999; Moriasi et al., 2007)

Cuadro 5. 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 (Moríais 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

Aunque los valores de referencia aceptables son para promedios mensuales y no anuales como los datos analizados en este estudio, se observa un buen ajuste para el modelo USLE/RUSLE, que considera el contenido de agua en el suelo con el subfactor CA. En todos los casos 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 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-escorrentía 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.

La 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 los Ings. Agrs. (PhD) Fernando García, José Terra y Jorge Sawchik quienes aportaron los datos de las parcelas de escurrimiento, que fueron fruto de un largo período de dedicación a sus respectivos trabajos en investigación.

A los anteriores y al Ing. Agr. (PhD) Mario Pérez Bidegain y la Ing. Agr. (PhD) Mónica Barbazán por la lectura crítica de este trabajo

BIBLIOGRAFIA

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Dirksen, R. and Smeyers-Bebe, M. 1988. 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.; Benatti, R. (Jr.). 1975. Equação da perdas do solo. Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo. Boletín Técnico Nº 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. Nº 1. pp: 92 - 103.
- Cogo, N.; Drews, C; 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. Nº 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 Nº26. INIA. Uruguay 63pp.
- 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 Nº. 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 María, 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^o 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.
- Moriasi, 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. Nº 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, 58p.
- Wünsche, W.A. Y J.A. Velloso. 1982. Situação, importância e aplicação do cultivo reduzido no Rio Grande do Sul. In Caballero. H. Y R.M. Díaz (Eds.) Labranza reducida en el Cono Sur. IICA-CIAAB. La Estanzuela. Colonia. Uruguay. p: 16-22
- 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.

IV. ANEXOS

IV.a. Descripción morfológica y datos analíticos del suelo de la Unidad Alférez según

La Carta de Reconocimiento de suelos del Uruguay (MGAP.- DSF, 1976). Suelo de la Estación Experimental Aguas Blancas.

UNIDAD: Valle Aiguá

SUELO: Brunosol Subéutrico Típico LAc.

POSICION TOPOGRAFICA: Interfluvio convexo

MATERIAL GENERADOR: Sedimentos limo arcillosos con cantos rodados.

Hor.	Prof. (cm)	Descripción Morfológica
A _p	0 - 16	Gris muy oscuro (10YR 3/1); moteado escaso y pequeño, color naranja; franco pesado con guijas comunes; masivo; ligeramente duro a friable; raíces abundantes; transición clara.
B _{t1}	16 - 40	Pardo muy oscuro (10YR 2/2); arcilloso con guijas abundantes; bloques angulares grandes, fuertes; películas de arcilla continuas, de espesor medio, en todos los agregados, color negro (10YR 2/1), firme; raíces comunes; transición gradual.
B _{t2}	40 - 58	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); arcilloso con guijas abundantes; bloques angulares grandes prismática gruesa moderada que rompe en bloques angulares gruesos, fuertes, fuertes; películas de arcilla continuas, de espesor medio, en todos los agregados, del mismo color (10YR 3/2); pocas concreciones de calcio, duras, raíces comunes; transición gradual.
C _k	72 +	Pardo (7.5YR 5/4); franco arcillo limosa con pocas guijas; películas de arcilla discontinuas del mismo color; concreciones de calcio comunes, friables y grandes; pocas raíces.

Datos analíticos

Hor.	Prof. (cm)	Análisis granulométrico %			pH		M.O %	% sat. bases	
		Ar.	Li	Arc.	H2O	KCl		pH7	pH8,2
A _{u1}	0 – 14	24.1	48.2	27.7	5.5	4.3	2.85	78	-
B _{t1}	14 – 47	18.0	33.8	48.2	6.9	4.9	2.31	96	-
B _{t2}	47 – 66	16.1	36.1	47.8	8.1	6.5	0.62	100	-
C	66 +	14.3	56.1	29.6	8.7	7.2	0.53	100	-

Complejo de intercambio meq 100gr ⁻¹							
Ca	Mg	K	Na	Bases	Al	CIC pH 7	CIC pH 8
10.5	3.5	0.1	0.5	14.6	-	18.8	-
22.3	8.0	0.1	1.0	31.4	-	32.7	-
23.2	9.6	0.2	1.1	34.1	-	34.1	-
15.3	10.1	0.2	1.9	27.3	-	27.5	-

IV.b. Descripción morfológica y datos analíticos del suelo de la Unidad Alférez según La Carta de Reconocimiento de suelos del Uruguay (MGAP.- DSF, 1976). Suelo de la Unidad experimental Palo a Pique,

UNIDAD: Alférez

SUELO: Argisol Subéutrico Melánico L

POSICION TOPOGRAFICA: Ladera

MATERIAL GENERADOR: Sedimentos limo arcillosos (Formación Libertad).

Hor.	Prof. (cm)	Descripción Morfológica
A _{u1}	0 - 16	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) húmedo, pardo grisáceo (10YR 5/2) seco; franco limoso; bloques angulares gruesos; moderados a débiles que rompen en bloques angulares medios, moderados; friable a firme; raíces abundantes; transición abrupta y plana.
B _{t1}	16 - 40	Negro (10YR 2/1); arcillo limoso; prismática, gruesa, moderada a fuerte, muy firme; películas de arcilla; comunes a abundantes moderadas; revestimientos gris muy oscuro (10YR 3/1); caras de deslizamiento comunes, moderadas; transición gradual a clara.
B _{t2}	40 - 58	Gris muy oscuro a pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/1.5); arcilloso; prismática gruesa moderada que rompe en bloques angulares gruesos, fuertes, firme a muy firme; películas de arcilla; abundantes, moderadas; revestimientos; caras de deslizamiento abundantes, moderadas; reacción débil al HCl; transición clara y ondulada.
BC _k	58 - 72	Pardo oscuro (10YR 3/3); arcillosa, bloques angulares gruesos; moderados, firme; películas de arcilla, comunes, moderadas; caras de deslizamiento pocas, débiles; concreciones de carbonato de calcio, pequeñas y grandes, abundantes, duras; reacción débil al HCl; transición clara y ondulada.
C _k	72 +	Pardo a pardo oscuro (7.5YR 4/5); franco arcillosa a franco arcillo limosa; bloques angulares gruesos; moderados a débiles; firme; películas de arcilla pocas, débil; concreciones de carbonato de calcio, pequeñas y grandes, abundantes, duras y friables; concreciones de hierro y manganeso, pequeñas, abundantes y friables; reacción moderada al HCL.

Datos analíticos

Hor.	Prof. (cm)	Análisis granulométrico %			pH		M.O %	% sat. bases	
		Ar.	Li	Arc.	H2O	KCl		pH7	pH8,2
A _{u1}	0 - 16	20.1	58.5	21.4	6.1	5.0	4.82	83	67
B _{t1}	16 - 40	12.5	40.5	47.0	6.5	5.3	2.41	95	75
B _{t2}	40 - 58	11.0	39.0	50.0	7.7	6.3	1.70	100	82
BC	58 - 72	14.6	37.9	47.5	8.1	6.5	1.03	100	100
C _k	72 +	13.5	46.5	40.0	8.4	6.5	-	100	100

Complejo de intercambio meq 100gr ⁻¹							
Ca	Mg	K	Na	Bases	Al	CIC pH 7	CIC pH 8
9.5	4.8	0.4	1.1	15.8	-	19.0	23.6
20.7	11.4	0.5	1.6	34.2	-	36.0	44.5
24.9	12.0	0.3	4.0	41.2	-	41.2	50.0
-	-	0.3	3.6	32.7	-	32.7	32.7
-	-	0.3	3.4	25.4	-	25.4	25.4

IV.c. Descripción morfológica y datos analíticos del suelo de la Unidad Elcilda Paullier - Las Brujas según La Carta de Reconocimiento de suelos del Uruguay (MGAP.- DSF, 1976). Suelo de la Estación Experimental La Estanzuela.

UNIDAD: Elcilda Paullier Las Brujas

SUELO: Brunosol Éútrico Típico Fr

POSICION TOPOGRAFICA: Interfluvio Convexo, ladera media.

MATERIAL GENERADOR: Sedimentos limo arcillosos de la formación Raigón.

Hor.	Prof. (cm)	Descripción Morfológica
A _{u1}	0 - 24	Pardo muy oscuro (10YR2/2.); franco arcilloso con pocas gravillas, bloques angulares pequeños, débiles; raíces abundantes; transición clara.
B _t	24 - 56	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2); arcilloso, con pocas gravillas; bloques angulares pequeños, fuertes; películas de arcilla medias; raíces abundantes; transición gradual.
BC	56 - 82	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2) y pardo grisáceo (7.5YR5/4); arcilloso, con pocas gravillas; bloques angulares, pequeños, fuertes; películas de arcilla medias; pocas raíces; transición gradual.
C _k	82 +	Pardo (7.5YR5/4); arcilloso, con pocas gravillas; reacción al HCL moderada

Datos analíticos

Hor.	Prof. (cm)	Análisis granulométrico %			pH		M.O %	% sat. bases	
		Ar.	Li	Arc.	H2O	KCl		pH7	pH8,2
A _{u1}	0 a 24	25.1	43.0	31.9	6.9	5.7	5.45	96.3	78.0
B _t	24 a 56	17.7	33.7	48.6	7.0	5.5	2.62	100.0	80.6
BC	56 a 82	17.1	33.3	49.6	8.4	7.2	1.53	100.0	92.5
C _k	82 +	17.9	35.5	46.6	8.9	7.5	0.75	100.0	100

Complejo de intercambio meq 100gr ⁻¹								
Ca	Mg	K	Na	Bases	Al	CIC pH 7	CIC pH 8	
20.9	3.4	1.0	0.6	25.9	-	26.9	-	
23.7	7.0	0.8	1.0	32.5	-	32.5	-	
22.5	8.3	0.8	0.6	32.2	-	32.2	-	
19.3	8.2	0.6	1.1	1.229.0	-	29.0	-	

IV. d. Ejemplo de salida de EROSION 5.0 para doble cultivo anual en laboreo reducido en la Unidad Experimental Palo a Pique.

EROSION VERSION 5 - INFORME DE RESULTADOS

Caso CCLR

COMPONENTES

Componente 1

Cultivo	SorgoMaíz	
Manejo del Suelo	Arado Cincel superficial como única labor (pend < 12%)	
Rendimiento	MEDIO - 3.740 k/ha MS de residuos en superficie en el momento del laboreo	
% de suelo Cubierto luego de la Siembra		30
% de suelo cubierto por Parte Aérea en el Período 3		90
% de suelo cubierto por Residuos en el Período 4		-

PC	MI	MF	EI30	RPS	ERP	C	A
1	11	12	0,214	0,230	1,000	0,049	5,032
2	1	1	0,127	0,210	1,000	0,027	2,727
3	2	2	0,129	0,180	1,000	0,023	2,374
4	3	3	0,084	0,260	1,000	0,022	2,233

Componente 2

Cultivo	Cereales de Invierno
Manejo del Suelo	Laboreo reducido
Rendimiento	TODOS
% de suelo Cubierto luego de la Siembra	30
% de suelo cubierto por Parte Aérea en el Período 3	80
% de suelo cubierto por Residuos en el Período 4	40

PC	MI	MF	EI30	RPS	ERP	C	A
1	4	5	0,128	0,350	1,000	0,045	4,580
2	6	6	0,056	0,270	1,000	0,015	1,546
3	7	9	0,195	0,150	1,000	0,029	2,990
4	10	10	0,067	0,300	1,000	0,020	2,055

IV. e. Ejemplo del procedimiento empleado en la incorporación del efecto del contenido de agua en el suelo en la estimación de erosión en el sistema doble cultivo anual es LR en PAP,

Componente

Sorgo o Maíz

Período de cultivo	Mes inicial	Mes final	RPS (EROSION 5.0)	SCA (Prom. para el período)	RPS corregido
1	11	12	0,23	0,3	0,069
2	1	1	0,21	0,4	0,084
3	2	2	0,18	0,4	0,072
4	3	3	0,26	0,0	0,000

Verdeo de invierno

Período de cultivo	Mes inicial	Mes final	RPS (EROSION 5.0)	SCA (Prom. para el período)	RPS corregido
1	4	5	0,35	0,3	0,105
2	6	6	0,27	0,4	0,108
3	7	9	0,15	0,4	0,060

