

¿PUEDE WEPP MEJORAR LA PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN DE SUELOS RESPECTO A USLE?

JORGE JESÚS GVOZDENOVICH^{1-2*}; MARIO PÉREZ BIDEGAIN³; LEONARDO ESTEBAN NOVELLI²⁻⁴
& PEDRO ANIBAL BARBAGELATA¹⁻²

Recibido: 04-01-17

Recibido con revisiones: 27-04-17

Aceptado: 27-04-17

RESUMEN

La degradación de los suelos por erosión hídrica afecta su potencial productivo. En el área agrícola argentina este problema está magnificado por la presencia de paisajes ondulados, lluvias intensas y elevada frecuencia de soja. Para estudiar este fenómeno se han desarrollado modelos como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) y Water Erosion Prediction Project (WEPP). Localmente se ha ajustado y validado USLE, aunque es necesario contar con modelos que estimen con mayor precisión la producción de sedimentos y escurrimiento. Los objetivos de este estudio fueron comparar el escurrimiento medido en parcelas con el estimado por WEPP y la producción de sedimentos en parcelas de escorrentía con la estimada con USLE y WEPP. El estudio se realizó sobre parcelas de escorrentía ubicadas en Paraná (Argentina), en cuatro tratamientos: suelo desnudo, maíz, soja a 70 y a 35 cm entre hileras. Para evaluar los modelos se utilizaron el índice Nash-Sutcliffe (E), el R^2 , el intervalo de confianza y el coeficiente de variación. Al comparar los datos promedios anuales de las parcelas con los estimados mediante WEPP, no se encontró diferencia estadísticamente significativa para ningún tratamiento, mientras que los estimados mediante USLE fueron significativamente mayores en los tratamientos de suelo desnudo y maíz continuo. El modelo físico WEPP presentó muy buena eficiencia en la estimación de la producción de sedimentos (E de 0,17 a 0,61), superior a las predicciones del modelo USLE (E de -8,94 a 0,14) para los cuatro tratamientos. En soja continua, WEPP exhibió alta eficiencia de estimación de sedimentos para altos valores de pérdida de suelo, mientras que USLE en valores extremos bajos y altos los sobre y subestimó, respectivamente. La estimación de escurrimiento con el modelo WEPP fue satisfactoria para los cuatro tratamientos (E de 0,27 a 0,44). El uso del modelo físico WEPP permitió representar mejor la realidad de la susceptibilidad a la erosión hídrica de distintos sistemas productivos de la Región pampeana Argentina.

Palabras clave. Erosión hídrica, sedimento, escurrimiento.

MAY WEPP IMPROVE SOIL EROSION PREDICTION COMPARED TO USLE?

ABSTRACT

Soil degradation due to water erosion affects the productive potential of arable lands. This problem is magnified by undulated landscapes, intense rains, and high frequency of soybean crops in Argentinean agricultural fields. A number of models were developed to study this phenomenon, including the Universal Soil Loss Equation (USLE) and the Water Erosion Prediction Project (WEPP). Locally, USLE has been adjusted and validated, yet it is necessary to ensure models that allow us to account for sediment production and runoff with a higher level of precision. The objectives of this study were to compare measured and WEPP estimated water runoff and measured sediment yield in runoff plots with those estimated with USLE and WEPP. The study was carried out in Paraná (Argentina), in four runoff plots: bare soil, maize, soybean at 70 and 35 cm between rows. Nash-Sutcliffe index (E), R^2 , confidence interval, and coefficient of variation were used to evaluate the models. Comparing average annual soil loss there were no statistical differences between measured and WEPP estimated values, while USLE overestimated soil loss in continuous corn and bare soil treatments. Likewise, annual sediment estimation results indicated a low efficiency of USLE model for all the treatments (E from -8.94 to 0.14), whereas WEPP showed good to very good efficiency (E from 0.17 to 0.61). Runoff water was successfully estimated using WEPP model for the four treatments evaluated (E from 0.27 to 0.44). USLE failed to predict extreme low and high soil loss values measured in continuous soybean plots. The use of the WEPP physical model allowed to better represent the reality of the water erosion susceptibility for different productive systems of Argentinean pampas region.

Key words. Water erosion, sediment, runoff.

1. INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUARIA

2. FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS UNER, Argentina

3. Facultad de Agronomía - Universidad de la República - Uruguay

4. INTA, CONICET, EEA Paraná, Oro Verde, Argentina

* Autor de contacto: gvozdzenovich.jorge@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

La capacidad productiva de los suelos se ve disminuida por procesos de degradación, entre los cuales la erosión (hídrica y eólica), es uno de los más importantes (FAO-Unesco, 1975; Gligo, 1995; Stocking & Murnaghan, 2003). En los países de América Latina, la degradación de los suelos por erosión es el problema ecológico más grave, lo que ha contribuido a generar estados más pobres y con mayores riesgos ambientales (Abasto, 2004). En la Argentina, el área afectada por erosión hídrica, creció significativamente en los últimos 60 años, pasando de 18 millones de hectáreas en 1956, a más de 64 millones en 2015 (Casas, 2005; Casas & Albarracín, 2015).

El incremento del área sembrada con el cultivo de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] observada en los últimos años ha contribuido a crear condiciones favorables para la acción erosiva del agua, debido a que el suelo permanece desprotegido durante mayor período de tiempo, lo cual coincide con la ocurrencia de precipitaciones intensas (FAO, 2000; Paruelo *et al.*, 2005; Castiglioni *et al.*, 2013). De esta forma, el arrastre de sedimentos y la formación de surcos y cárcavas son contingencias frecuentes en los campos cultivados. Asimismo, la ampliación de la frontera agropecuaria incorporó tierras de menor aptitud agrícola y con mayor susceptibilidad a erosionarse (Viglizzo *et al.*, 2002). Esto pondría en evidencia la gravedad e importancia actual del problema de la degradación de suelos en general y la erosión hídrica en particular.

Para estudiar este fenómeno se han desarrollado diversos modelos que representen el proceso de erosión, entre los cuales la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978) es el más difundido universalmente. Este es un modelo empírico que estima pérdidas medias anuales de suelo por erosión laminar y en micro surcos para períodos largos de tiempo. Tiene utilidad para el diseño de estructuras de control de erosión, evaluación del uso de la tierra, prácticas de gestión y planificación ambiental (Scotta *et al.*, 1986; Tiwari *et al.*, 2000).

Sin embargo, el modelo USLE posee algunas limitaciones ya que requiere experimentación previa (ajuste y calibración) para cada clima, suelo y manejo (con parcelas de escorrentía), y los resultados no pueden ser extrapolados a sitios con características diferentes. El modelo USLE sólo permite estimar tasas de erosión promedio anual, no de eventos individuales de precipitación. Tampoco puede utilizarse para estimar erosión a nivel de cuenca, solo a nivel de ladera (Jorge *et al.*, 2010). Estas limitaciones fueron

estudiadas por Yoder *et al.* (1992), quienes realizaron modificaciones que fueron incorporadas en su versión Revisada (RUSLE) (Renard & Ferreira, 1993). Sin embargo, estas revisiones tuvieron poco efecto sobre la eficiencia en la estimación del modelo RUSLE respecto a USLE (Rapp, 1994).

Dado que los modelos empíricos no tienen en cuenta la depositación de sedimentos en la ladera, se ha producido una tendencia a desarrollar modelos de simulación basados en procesos físicos (Lane & Nearing, 1989; Nearing *et al.*, 1990). El modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP) (Flanagan & Nearing, 1995) surge para intentar suplir el déficit de los anteriores. Este modelo tiene la capacidad de predecir la erosión (escurrimiento y sedimento) en tormentas individuales, incluyendo eventos catastróficos, y los riesgos asociados con el transporte de sustancias químicas llevadas en los sedimentos. Además, WEPP puede estimar eventos extremos, períodos de retorno, tiempo real de erosión y el riesgo de escorrentía (Lafren *et al.*, 2004). Este modelo es sensible a las diferencias observadas en las prácticas de cultivos, labranza y otras formas de manejo, ya que estima diariamente el estado del suelo y de la vegetación, y si hay precipitación, calcula infiltración y escurrimiento. Ha sido estudiado en una amplia gama de ambientes y países (Tiwari *et al.*, 2000; Pandey *et al.*, 2008; Demény *et al.*, 2010; Jorge *et al.*, 2012, 2015).

En la Argentina, hay escasos antecedentes del uso de este modelo (Becker *et al.*, 2006; Echeverría *et al.*, 2006; Chartier & Rostagno, 2010). Los mismos ponen en evidencia la necesidad de contar con mayor información para ajustar localmente modelos que se adapten a los escenarios actuales de la agricultura y que tengan en cuenta el avance tecnológico, que puedan combinar distintos tipos de suelos asociados a diferentes paisajes y volúmenes de agua escurrida.

A nivel local, USLE ha sido ampliamente utilizado para estimar erosión hídrica (Scotta *et al.*, 1986; Echeverría *et al.*, 2006; Irurtia *et al.*, 2007; Cisneros *et al.*, 2012). Sin embargo, es necesario continuar generando investigaciones que nos permitan predecir no solo la producción de sedimentos, sino también de escurrimiento con mayor nivel de detalle para contribuir a mejorar el manejo de cuencas hídricas y prácticas asociadas al control de la erosión, así como cuantificar los riesgos de contaminación. Los objetivos de este estudio fueron comparar: i) el escurrimiento medido en parcelas con el estimado por WEPP, y ii) la producción de sedimentos en parcelas de escorrentía con la estimada con USLE y WEPP.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó sobre parcelas de escorrentía ubicadas en la EEA Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (31°50'S - 60°32'O), provincia de Entre Ríos (Argentina). Los datos climáticos se obtuvieron de la estación agrometeorológica de la EEA Paraná, ya que es la que tiene la mayor cantidad de registros continuos diarios termo-pluviométricos (Saluso, 2008). La precipitación media anual es de 1030 mm (período 1934-2010), con un rango de 494 a 1818 mm. La distribución mensual de la precipitación indica que el 47 y el 34% de las lluvias se concentran en los meses de enero a abril y de octubre a diciembre, respectivamente. La temperatura mínima promedio es 13,3 °C y la temperatura máxima promedio es de 23,6 °C (período 1934-2010).

El suelo pertenece a la Serie Tezanos Pinto, familia "fina, mixta, térmica" clasificada como Argiudol ácuico. Estos son suelos profundos, moderadamente bien drenados, con un epipedón oscuro, franco arcillo limoso a franco limoso, y un horizonte argílico oscuro, franco arcillo limoso a arcillo limoso, con moteados de hierro-manganeso. Están desarrollados sobre loess calcáreo, de textura franco limosa, con concreciones de calcáreo y calcáreo libre hasta 5% (Plan Mapa de Suelos, 1998).

Las parcelas de escorrentía se construyeron en el año 1970 en la EEA Paraná de INTA para medir los coeficientes de cultivos (factor C) con el fin de ajustar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Convenio FAO-INTA 1969-1974). Las mismas tienen 25 m de largo y 4 m de ancho (100 m²), y están provistas en su extremo de dos piletas colectoras. En dichas piletas, luego de cada lluvia, se midió el volumen total de agua escurrida y se extrajeron tres alícuotas de 1 L cada una y en laboratorio

se determinó el peso del sedimento mediante secado de las muestras en estufa a 105 °C hasta peso constante (Fig 1).

Tratamientos evaluados

Se evaluaron cuatro tratamientos: suelo desnudo, maíz continuo, soja a 35 cm y soja a 70 cm (Tabla 1 y Fig 2).

Ajuste local del modelo USLE

La obtención del factor de erosividad de la lluvia, expresado en MJ.mm.ha⁻¹hr⁻¹año⁻¹ (R), se realizó a través de la ecuación obtenida por Wischmeier & Smith (1958). Se seleccionaron todas las fajas pluviográficas correspondientes a tormentas mayores a 13,5 mm. Luego para cada tormenta se evaluó la energía cinética total (Ec), mediante la ecuación 1.

$$Ec = 210 + 89 \log_{10} * I \quad 1)$$

donde I es la intensidad de las precipitaciones (mm h⁻¹)

$$IE = I_{\max 30} * Ec \quad 2)$$

En la ecuación 2, el índice de erosividad (IE) se obtiene de producto de Ec por la intensidad máxima en 30 minutos (I_{max30}) para cada lluvia individual. La sumatoria de los IE permite obtener el valor de erosividad estacional o anual para una localidad dada.

A partir del uso de esta metodología se obtuvo para la EEA Paraná, un R de 621 (Tonelámetros ha⁻¹ año), para el período 1950-2005 (Saluso, 2008).

El valor de erodabilidad (factor K) se calculó usando los datos del suelo de las parcelas, de acuerdo con la metodología propuesta por Wischmeier & Smith (1965), para los suelos en

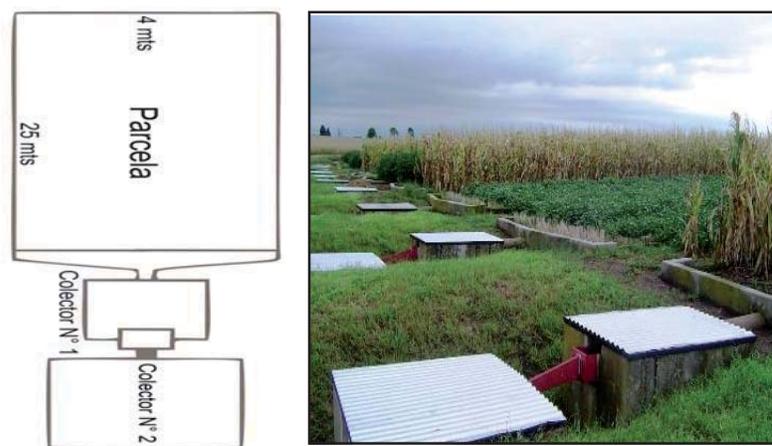


Figura 1. Esquema de una parcela de escurrimiento del INTA EEA Paraná.

Figure 1. INTA EEA Paraná runoff plot scheme.

Tabla 1. Resumen de la base de datos de las parcelas de escorrentía del INTA EEA Paraná en el período 1971-1999.
Table 1. Summary of INTA EEA Paraná runoff plots database from 1971 to 1999.

Parcela	Período julio-junio	Años de evaluación	Labores	Nº días con lluvia > 13.5 mm	Nº de eventos con Escurrimiento	Nº de eventos con Sedimento
Suelo desnudo	1971-1997	27	Barbecho con laboreo a fin de otoño y fin de primavera	1373	578	405
Maíz continuo	1985-1998	14	Siembra 15/09 al 15/10 Cosecha marzo	638	143	103
Soja 70 cm	1983-1999	16	Siembra 15/11 al 05/01 Cosecha abril	736	220	117
Soja 35 cm	1983-1999	16		732	188	114
TOTAL				3479	1129	739



Figura 2. Parcelas de escorrentías ubicadas en INTA EEA Paraná. a) parcela de suelo laboreado y sin cobertura. b) paso de cincel para preparar la siembra de maíz continuo. c) pileta de la parcela de soja continua recolectando agua de escurrimiento.

Figure 2. Runoff plots located at INTA EEA Paraná. a) bare soil. b) chisel plowing to prepare seeding bed for continuous corn. c) continuous soybean pool collecting runoff water.

los que la fracción limo + arena muy fina (2-100 μm) no supera el 70% (Ecuación 3).

$$100 K = 1.292 * [2,1 M^{1.14} (10^{-4}) (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5(c-3)] \quad 3)$$

M = (% Limo + % Arena muy Fina) * (100 - % Arcilla)
a = % Materia orgánica. b = estructura. c = permeabilidad.

El factor K calculado con esta metodología y con la información de la serie Tezanos Pinto, publicada por el Plan Mapa de Suelos (1998), fue de 0,47.

Para determinar el factor LS de la ULSE (Ecuación 4), se utilizó la ecuación propuesta por Wischmeier & Smith (1978).

$$LS = L^{0.3} (28,832 * S^2 + 1,8009 * S + 0,0257) - \text{pendientes de 1 a 3\%} \quad 4)$$

Para una pendiente (S) del 3,5% y longitud (L) de 25 m, se obtuvo un LS de 0,32.

El factor C utilizado, correspondió a los registros obtenidos en el período comprendido entre 1971-2000, en los que se midieron las pérdidas de agua por escurrimiento superficial y de sedimentos en cada evento de precipitación: C suelo desnudo = 1, maíz continuo = 0,10, C soja a 70 cm = 0,18 y C soja a 35 cm = 0,15 (Scotta *et al.*, 1986; Gvozdenovich *et al.*, 2013; Scotta & Gvozdenovich, 2014), siguiendo el procedimiento propuesto por Wischmeier & Smith (1962). Dichos valores se obtuvieron a partir del ajuste de las pérdidas de suelo medidas en estas mismas parcelas, por lo tanto las estimaciones calculadas empleando USLE en el presente trabajo, no serían totalmente independientes de las pérdidas de suelo medidas en estas mismas parcelas.

Ajuste local del modelo WEPP

A partir de la información proveniente de la caracterización de las parcelas de escurrimiento y de las características climáticas de la zona, se completaron los diferentes archivos requeridos por el modelo WEPP (WEPP versión v.2012.8): a) clima (datos diarios de temperatura máxima y mínima, precipitación máxima y mínima, duración, tiempo al pico máximo de intensidad, radiación solar, velocidad del viento y punto de rocío), b) topografía (longitud de la ladera y pendiente), c) suelo (materia orgánica, porcentaje de limo, arcilla y arena en cada profundidad de los horizontes, conductividad hidráulica efectiva en flujo saturado, esfuerzo cortante crítico, erosionabilidad entre surcos y en surcos) y d) manejo (fechas y tipos de operaciones, componentes ecofisiológicos de los cultivos).

Para los archivos de entrada de clima y precipitaciones, se alimentó el generador climático CLIGEN, usando la información climática correspondiente al período 1970-2010. Este modelo fue ajustado localmente por Gvozdenovich *et al.* (2017), quienes procesaron y ajustaron parámetros atmosféricos de temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar, punto de rocío y velocidad del viento.

Para topografía, se usaron como archivos de entrada los datos de las parcelas de escurrimiento relevados a campo. Para cargar los componentes del suelo requeridos por WEPP, se tuvo en cuenta las propiedades del mismo que influyen en los procesos básicos de erosión hídrica, infiltración y escurrimiento superficial, utilizando las ecuaciones desarrolladas por Risse *et al.* (1994) y las descritas en el manual del usuario de WEPP (Alberts *et al.*, 1995).

El parámetro de erosionabilidad entre surcos (Ecuación 5) (K_i), se expresa en kg s m^{-4} y refleja la susceptibilidad del suelo a ser desprendido por el impacto de la gota de lluvia y los flujos superficiales.

$$K_i = 6054000 - 55130 * \% \text{ arcilla} \quad 5)$$

En este caso se utilizó la ecuación para suelos con menos de 30% de arena, para la serie Tezanos Pinto (arcilla = 27%), obteniendo un $K_i = 4532412$, considerado dentro del rango aceptable (Risse *et al.*, 1994, Alberts *et al.*, 1995).

El parámetro de erosionabilidad en surcos (K_r) se expresa en s m^{-1} , y refleja la susceptibilidad del suelo a ser desprendido por el agua que fluye en el surco (Ecuación 6).

$$K_r = 0,0069 + 0,134 * \text{EXP}^{-0,20 * \text{arcilla}} \quad 6)$$

Se usó la ecuación para suelos con menos del 30% de arena y más del 10% de arcilla, obteniendo para el suelo evaluado un valor de erosionabilidad en surcos de 0,0074

El corte crítico (τ_c) se expresa en N m^{-2} , y es un valor umbral por debajo del cual no se produce desprendimientos en surcos. Para suelos con menos de 30% de arena se usa el valor de $\tau_c = 3,5$.

Otro parámetro clave para el modelo WEPP es la conductividad hidráulica efectiva de Green y Ampt (K_e), que se utiliza para estimar la infiltración. El modelo se ejecutó mediante el uso de la conductividad efectiva base (K_b), que se ajustó automáticamente dentro de los cálculos de simulación continua en función de las características de manejo del suelo y del cultivo (Ecuación 7).

$$K_b = -0,265 + 0,0086 * \text{Arena}^{1,8} + 11,46 * \text{CEC}^{-0,75} \quad 7)$$

En este trabajo se utilizó la ecuación para suelos con menos de 40% de arcilla, obteniendo un $K_b = 4,02$

Análisis estadístico

Las predicciones del modelo para el volumen escurrido (WEPP) y la producción de sedimentos (USLE y WEPP), fueron comparadas con los valores medidos a campo sobre las parcelas de escurrimiento en los distintos tratamientos evaluados. La calidad de la estimación se determinó mediante coeficiente de eficiencia (E) del modelo desarrollado por Nash & Sutcliffe (1970) (Ecuación 8), eficiencia de ajuste del modelo a través del R^2 , intervalo de confianza propuesto por Laflen *et al.* (2004), y el coeficiente de variación para parcelas de escurrimiento (Nearing, 1998, 2000; Nearing *et al.*, 1999). El coeficiente de eficiencia del modelo de Nash & Sutcliffe (1970) se utiliza para evaluar el poder predictivo de modelos hidrológicos y es destacado por su sensibilidad a los valores extremos.

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_o)^2} \quad 8)$$

Donde,

Q_o es la media de los valores observados,
 Q_m^t son los valores obtenidos por el modelo,
 Q_o^t son los valores observados.

Los valores de eficiencia (E) pueden tener un rango desde $-\infty$ a 1. Una eficiencia de $E = 1$, corresponde a un ajuste perfecto entre los valores observados y estimados. Una eficiencia de $E = 0$, indica que las predicciones del modelo son tan precisas como el promedio de los datos observados, mientras que una eficiencia negativa ($E < 0$), indica que la media observada es mejor que la predicción obtenida a partir del modelo, en otras palabras, cuando la varianza residual (descrito por el numerador en la expresión anterior), es mayor que la varianza de los datos (descrito por el denominador).

La metodología propuesta por Nearing (1998, 2000) y Nearing *et al.* (1999) (Ecuación 9) demostró que el coeficiente de variación (CV) para parcelas de escurrimiento es una fun-

ción del valor de la erosión del suelo medido, expresado en Mg ha^{-1} (M).

$$CV = 0,73 M^{-0,306} \quad 9)$$

Se analizó el intervalo de confianza (IC) y los límites superior e inferior (Laflen *et al.*, 2004) (Ecuación 10). El intervalo de confianza se establece sobre los valores de pérdidas de suelo medidos, donde un valor de pérdida de suelo predicho probablemente cae dentro del intervalo. Suponiendo que la variabilidad en las tasas de erosión del suelo se distribuye normalmente sobre el valor de medición, el intervalo de confianza sobre el valor medido está dado por:

$$IC = t_{(\alpha+1)/2} M * CV (\text{Mg ha}^{-1}) \quad 10)$$

Donde,

t: es el valor de distribución acumulativa para $(\alpha + 1) / 2$, para un número infinito de puntos, á: es el nivel de probabilidad seleccionado).

Para un intervalo de confianza de 0,95 (Ecuación 11) y utilizando la ecuación 9 para CV, el IC puede calcularse como:

$$IC_{95} = 1,43 M^{0,694} \quad 11)$$

También se calculó el límite inferior (LB) y límite superior (UB), con un intervalo de confianza del 95, ecuación 11

$$LB = M - IC_{95} \text{ y } UB = M + IC_{95} \quad 12)$$

Para comparar las pérdidas de suelo de las parcelas de escorrentía con aquellas estimadas mediante con WEPP y USLE, se usó el análisis de la varianza, y cuando las diferencias entre tratamientos fueron significativas, las medias se separaron a través de un test de Duncan. Todos los análisis se realizaron con el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación de escurrimiento con WEPP

El modelo WEPP estimó el escurrimiento en forma satisfactoria para suelo desnudo, maíz continuo, soja a 70 cm y soja a 35 cm ($E = 0,28; 0,27; 0,44$ y $0,41$, respectivamente).

En las cuatro parcelas, el modelo WEPP mostró una leve tendencia a sobreestimar a bajos valores de escorrentía (16, 14, 17 y 14%, respectivamente), similar a lo encontrado por Ghidry & Alberts (1996), Pieri *et al.* (2007), Chartier & Rostagno (2010) y Jorge *et al.* (2010). Sin

embargo, con valores de escurrimiento mayores a 200 mm en suelo desnudo (Fig 3a), mayores a 300 mm en maíz (Fig 3b) y valores cercanos a los 400 mm en soja a 70 y 35 cm (Fig 3c y 3d), el modelo estimó satisfactoriamente, logrando una relación entre datos observados y predichos cercana a la relación 1:1.

Las pérdidas de agua por escorrentía en ambas parcelas de soja continua fueron superiores a las de maíz continuo. Este mayor escurrimiento podría deberse a que en nuestra región el período de lluvias intensas comienza en octubre, fecha en la cual el cultivo de maíz ya se encuentra proporcionando cobertura al suelo, mientras que, en el caso de la soja, el suelo se encuentra descubierto o con poca cobertura de rastrojos ya que se siembra a partir de noviembre.

Estimación de sedimentos con USLE

La parcela de suelo desnudo analizada abarcó un período de 27 años en el que se registraron 1373 eventos de lluvia, 578 mediciones de escorrentía y 405 datos de sedimentos. En esta parcela, el modelo USLE sobreestimó los valores de pérdida de suelos, excepto para los extremos altos donde los subestimó, encontrándose muy baja eficiencia del modelo ($R^2 = 0,04$ y $E = -8,94$) (Fig 4a). Esto coincide con lo reportado por numerosos autores (Risse *et al.*, 1993; Nearing, 1998; Tiwari *et al.*, 2000), quienes señalaron que el modelo USLE tiende a sobreestimar la pérdida de suelo a bajos valores de erosión y a subestimar con altos valores.

La parcela con maíz continuo, similar a lo observado en la de suelo desnudo, presentó baja eficiencia ($R^2 = 0,14$) (Fig 4b), en tanto que la E mostró que la varianza residual fue mayor que la varianza de los datos ($E = -1,39$), indicando la baja eficiencia de predicción de USLE. Este modelo tendió a sobreestimar a bajos valores de erosión y a subestimar la pérdida de suelo con altos valores, similar a lo encontrado por Risse *et al.* (1993) y Nearing (1998). Los resultados obtenidos en maíz mediante USLE en este trabajo, coinciden con lo informado por Tiwari *et al.* (2000), quienes trabajaron con parcelas de escorrentía en 20 sitios de Estados Unidos, con diferentes suelos, longitud y grado de la pendiente, clima y manejo. Ellos reportaron un bajo ajuste entre USLE y datos de pérdidas de suelo observados pero mayor que en este trabajo ($E = 0,38$ vs $E = -1,39$), lo que pudo deberse a que los sitios con alta pérdida media de suelo resultaron en eficiencias comparativamente altas del modelo en maíz.

Al analizar las parcelas de monocultivo de soja a 70 cm y soja a 35 cm (Fig 4c y 4d) con el modelo USLE, la estimación de la erosión media anual tuvo una baja eficiencia,

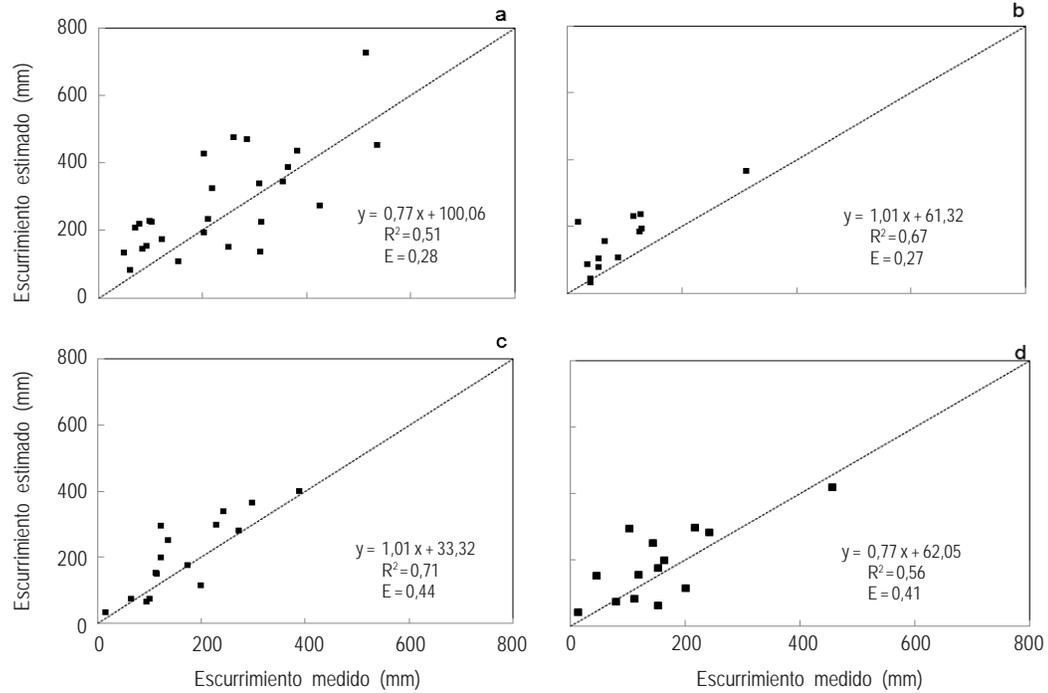


Figura 3. Esgurrimiento medido vs. estimado con WEPP para los cuatro tratamientos evaluados: a) suelo desnudo; b) maíz continuo; c) soja a 70 cm y d) soja a 35 cm. "E" indica la eficiencia del modelo de acuerdo a Nash-Sutcliffe (1970). La línea de puntos indica la relación 1:1.

Figure 3. Measured vs. WEPP estimated runoff for the four treatments evaluated: a) bare soil; b) continuous corn; c) soybean at 70 cm and d) soybean at 35 cm. "E" indicates model efficiency, according to Nash-Sutcliffe (1970). Dotted line indicates 1:1 relationship.

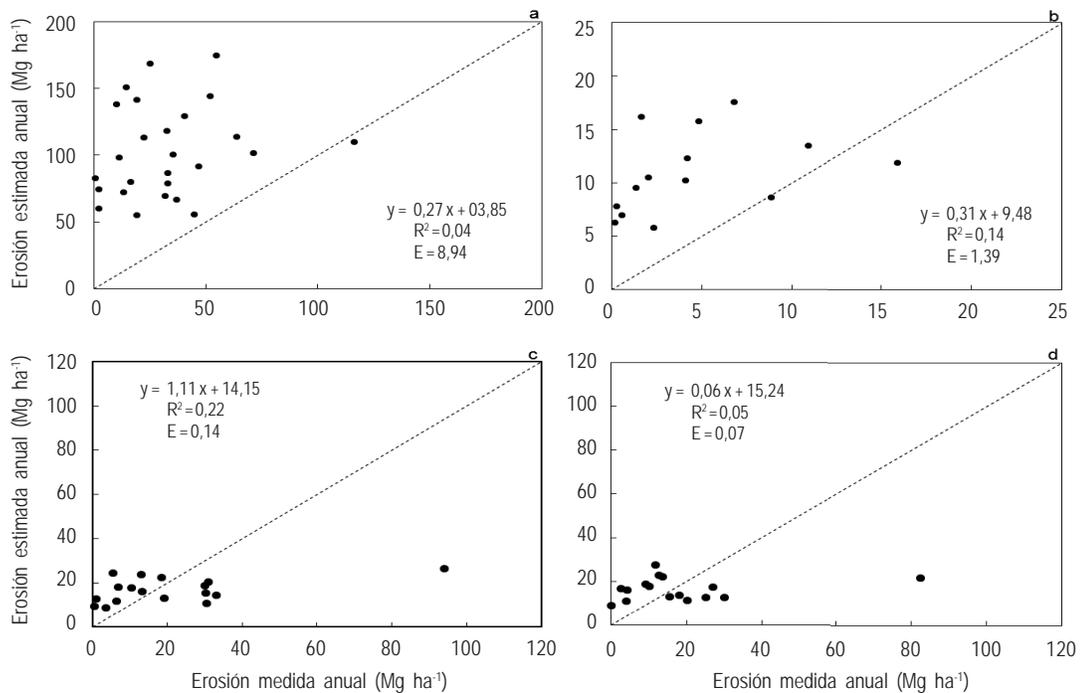


Figura 4. Erosión promedio anual medida vs. estimada mediante USLE (Mg ha⁻¹) para: a) parcela de suelo desnudo, b) parcela de maíz continuo, c) soja a 70 cm y d) soja a 35 cm. "E" indica la eficiencia del modelo de acuerdo a Nash-Sutcliffe (1970). La línea de puntos indica la relación 1:1.

Figure 4. Average annual measured soil erosion versus simulated by with USLE (Mg ha⁻¹) for: a) bare soil, b) continuous corn, c) soybean at 70 cm, and d) soybean at 35 cm. "E" indicates model efficiency, according to Nash-Sutcliffe (1970). Dotted line indicates 1:1 relationship.

$R^2=0,22$ y $R^2=0,05$, respectivamente. Mientras que, al utilizar la E, observamos que la estimación de la erosión anual con el modelo USLE fue tan precisa como la media de los datos observados ($E = 0,14$ y $E = 0,07$, respectivamente). También se observó en ambos manejos que, con valores de erosión debajo de 13 Mg ha^{-1} , el modelo sobreestimó las pérdidas de suelo y cuando las pérdidas superaron dicho valor, hasta llegar a los 35 Mg ha^{-1} , el modelo subestimó las pérdidas, hasta con valores de más de 80 Mg ha^{-1} . Este resultado es coincidente con lo informado por los autores citados anteriormente que trabajaron con distintos tipos de suelos, rotaciones de cultivos, diferentes pendientes y años de ensayos (Risse *et al.*, 1993; Nearing, 1998; Tiwari *et al.*, 2000; Laflen *et al.*, 2004).

Estimación de sedimento con WEPP

Se comparó la producción de sedimentos anual y mensual medida en las parcelas de escorrentía bajo suelo desnudo con la estimada mediante WEPP (Fig 5). En el promedio anual, WEPP (Fig 5a) siguió el patrón de sobre y subestimación evidenciado por USLE, con una baja eficiencia (aunque mayor que USLE) ($R^2 = 0,12$ y $E = 0,17$). De manera similar Ghidey & Alberts (1996), encontraron que el modelo WEPP sobreestimó la pérdida de suelo promedio para suelo laboreado en un 27%.

Comparando ambos modelos, WEPP estimó mejor la pérdida de sedimentos que USLE, observando una marcada diferencia en la eficiencia anual de los modelos, $E = 0,17$ vs $E = -8,94$, respectivamente.

Analizando los datos mensuales (Fig 5b), se procesaron 324 meses de datos (27 años), lo que permitió determinar que el modelo WEPP fue menos eficiente que la media de los datos observados para la parcela de suelo desnudo ($E = -0,43$). Estos resultados indican que para suelo desnudo es más confiable usar WEPP con el promedio anual de pérdida de suelo que con los datos obtenidos de la media mensual, lo cual se debe a que al promediar los datos anuales se minimizan el impacto de los valores extremos mensuales. El modelo WEPP estimó volúmenes de sedimentos más altos que los valores medidos, de la misma forma que a escala anual. La estimación de valores extremos, mayores a 80 Mg ha^{-1} , fue mejor simulada por WEPP en relación a USLE. Amore *et al.* (2004) comparando WEPP y USLE en diferentes escalas de cuencas, con distintos suelos y múltiples usos de la tierra, encontraron que la estimación de WEPP fue mucho más cercana al valor medido que el valor estimado por USLE.

Al analizar la parcela de maíz continuo (Fig 6), donde se registraron 638 lluvias erosivas (14 años), la eficiencia de WEPP aumentó con respecto a la de suelo desnudo. El modelo WEPP predijo muy eficientemente la producción anual de sedimentos ($R^2 = 0,93$ y $E = 0,61$), sobreestimándola levemente para bajos y altos valores observados (Fig. 6a). Tiwari *et al.* (2000) quienes evaluaron maíz continuo, también reportaron una alta eficiencia de WEPP ($E = 0,54$).

Otros autores como Ghidey & Alberts (1996); Laflen *et al.* (2004), trabajando en maíz continuo, encontraron

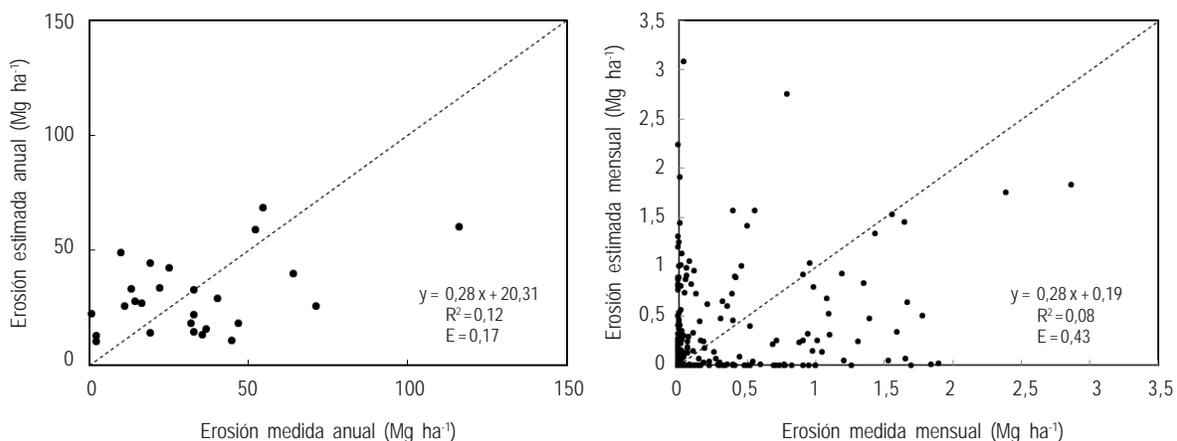


Figura 5. Erosion medida en parcela de suelo desnudo vs simulada con WEPP, en base a) anual y b) mensual. “E” indica la eficiencia del modelo de acuerdo a Nash-Sutcliffe (1970). La línea de puntos indica la relación 1:1.

Figure 5. Soil erosion measured in bare soil plot vs estimated using WEPP, on a) annual and b) monthly basis. “E” indicates model efficiency, according to Nash-Sutcliffe (1970). Dotted line indicates 1:1 relationship.

que WEPP sobreestimó entre un 13 y un 22% la producción de sedimentos a bajas tasas de erosión, mientras que la subestimó a altas tasas. Por otro lado, Pieri *et al.* (2007), quienes también evaluaron monocultivo de maíz, encontraron que WEPP tendió a subestimar la producción de sedimentos en todo el rango de datos observados, atribuido por los autores a la falta de calibración de los parámetros de erodabilidad del suelo del modelo. Para la estimación mensual de erosión (Fig 6b) (168 datos) el modelo WEPP mostró menor eficiencia que la estimación anual ($R^2 = 0,29$ y $E = 0$) en esta parcela de maíz.

En la Figura 7a y 7b, se presenta la producción anual de sedimentos para las parcelas de Soja continua, sembradas a 70 cm y 35 cm, respectivamente, en base a un análisis de más de 730 tormentas erosivas, de las cuales menos del 16 % produjeron sedimentos. En ambos manejos no se observó tendencia a sobreestimar a bajos valores de erosión medida. Mientras que, entre 10 y 35 $Mg\ ha^{-1}$ se observó que el modelo WEPP subestimó la producción de sedimentos. Para ambos espaciamientos entre hileras, el modelo mostró una alta eficiencia ($E = 0,50$, para soja a 70 cm y $E = 0,58$, para soja a 35 cm). Se observó que, para

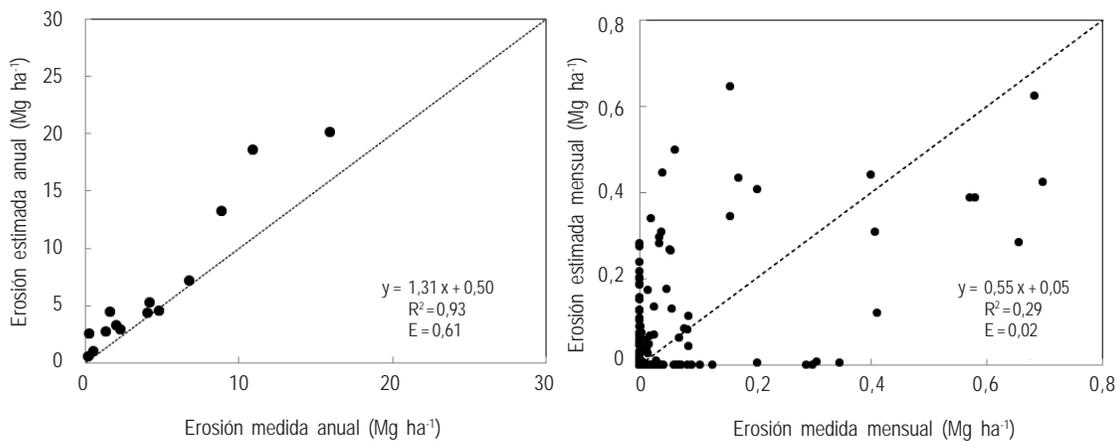


Figura 6. Erosion medida en parcela de maíz continuo vs simulada con WEPP, en base a) anual y b) mensual. “E” indica la eficiencia del modelo de acuerdo a Nash-Sutcliffe (1970). La línea de puntos indica la relación 1:1.

Figure 6. Soil erosion measured in continuous maize vs simulated by WEPP, on a) annual and b) monthly basis. “E” indicates model efficiency, according to Nash-Sutcliffe (1970). Dotted line indicates 1:1 relationship.

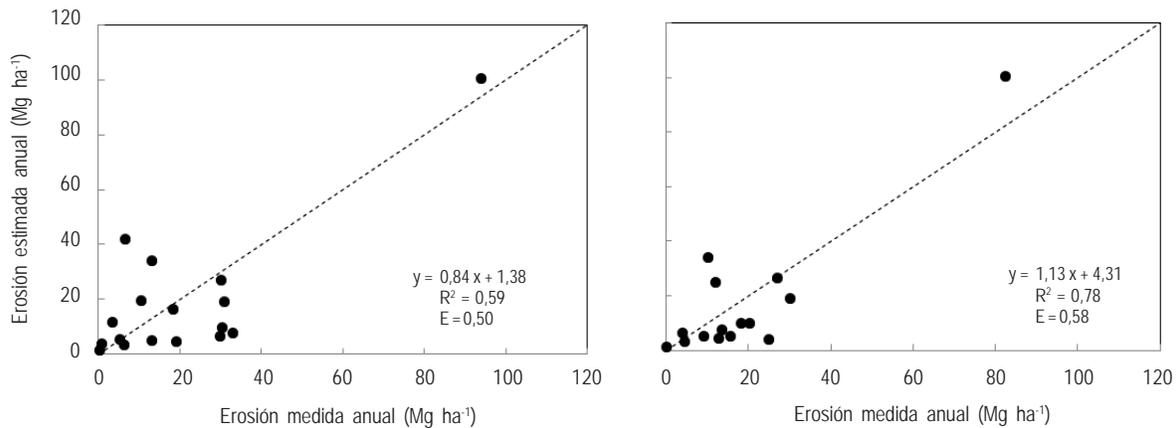


Figura 7. Erosion anual medida en parcelas de soja vs estimada con WEPP en los tratamientos a) soja a 70 cm y b) soja a 35 cm. “E” indica la eficiencia del modelo de acuerdo a Nash-Sutcliffe (1970). La línea de puntos indica la relación 1:1.

Figure 7. Annual erosion measured in soybean plots vs estimated by WEPP for treatments: a) soybean at 70 cm and b) soybean 35 cm. “E” indicates model efficiency, according to Nash-Sutcliffe (1970). Dotted line indicates 1:1 relationship.

valores extremos de pérdida anual de suelos mayores a 80 Mg ha⁻¹, el modelo WEPP estimó la erosión anual en forma satisfactoria, cercano a la relación 1:1. Ghidry & Alberts (1996) y Laflen *et al.* (2004), trabajando en parcelas de soja, observaron que WEPP sobreestimó la producción de sedimentos con respecto a los datos medidos en un 28 y 87%, respectivamente.

En el análisis mensual de los datos para ambas parcelas de soja se utilizaron 192 meses de datos (Fig 8), el modelo WEPP fue tan preciso en la estimación de la erosión como la media de los datos medidos ($E = 0$), no presentando en este caso una tendencia a sobreestimar a bajos valores de erosión y a subestimar en altos valores medidos.

Intervalo de confianza y coeficiente de variación

Al evaluar los datos de producción de sedimentos a través del IC, se analizó el porcentaje de los valores predichos que se encontraron dentro del intervalo construido con las formulas propuestas por Nearing (1998, 2000) y Nearing *et al.* (1999).

Para el tratamiento de suelo desnudo, se observó que el 8 y 38% de los valores estimados mediante el modelo USLE y WEPP, estuvieron contenidos dentro del IC respectivamente. Las estimaciones realizadas con WEPP no superaron los 70 Mg ha⁻¹ para ninguno de los eventos registrados, mientras que para USLE ninguna estimación es-

tuvo por debajo de las 45 Mg ha⁻¹, llegando a predecir hasta 175 Mg ha⁻¹ (Fig 9a).

En maíz continuo, el 29 y 79% de los datos estimados con USLE y WEPP se ubicaron dentro del IC respectivamente. Las predicciones se mantuvieron cercanas a la relación 1:1 hasta 7 Mg ha⁻¹. Por encima de ese valor, WEPP sobreestimó los valores de pérdidas de suelo. En tanto USLE sobreestimó todos los valores de pérdidas de suelo hasta 7 Mg ha⁻¹ (Fig 9b), por encima de dicho valor, USLE estimó en forma más eficiente que WEPP.

En la parcela de soja a 70 cm, el 47% de los valores estimados con ambos modelos estuvieron contenidos dentro del IC. El modelo WEPP realizó una predicción muy eficiente del valor extremo observado (100,2 Mg ha⁻¹ vs 94,2 Mg ha⁻¹), mientras que USLE fue poco eficiente (26,3 Mg ha⁻¹ vs 94,2 Mg ha⁻¹) para predecir dicho valor (Fig 9c).

En soja a 35 cm, el 50 y 63% de los datos se ubicaron dentro del IC para USLE y WEPP respectivamente. Asimismo, WEPP predijo de forma más eficiente el valor extremo observado, mientras que USLE subestimó marcadamente dicho valor (Fig 9d).

Utilizando el coeficiente de variación para evaluar la eficiencia de los modelos se observó que este indicador tendió a ser mayor cuando los valores medidos de pérdida de suelo fueron relativamente pequeños (Tabla 2), coincidente por lo reportado por Nearing *et al.* (1999). Sin

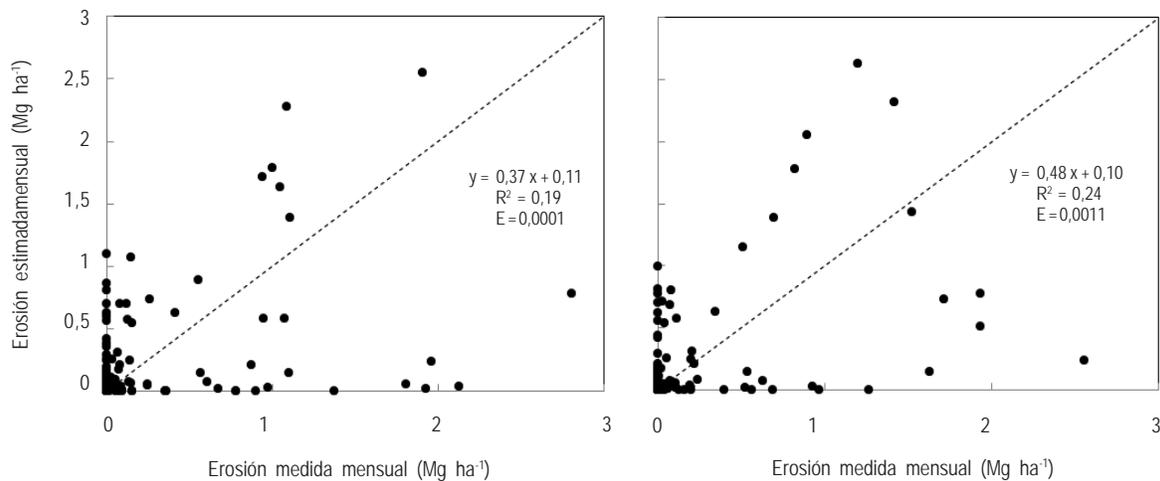


Figura 8. Erosion mensual medida en parcelas de soja vs. simulada usando WEPP (Mg ha⁻¹) para: a) soja a 70 cm y b) soja 35 cm. "E" indica la eficiencia del modelo de acuerdo a Nash-Sutcliffe (1970). La línea de puntos indica la relación 1:1.

Figure 8. Monthly erosion measured in soybean plots vs. simulated by WEPP (Mg ha⁻¹) for: a) soybean at 70 cm and b) soybean at 35 cm. "E" indicates model efficiency, according to Nash-Sutcliffe (1970). Dotted line indicates 1:1 relationship.

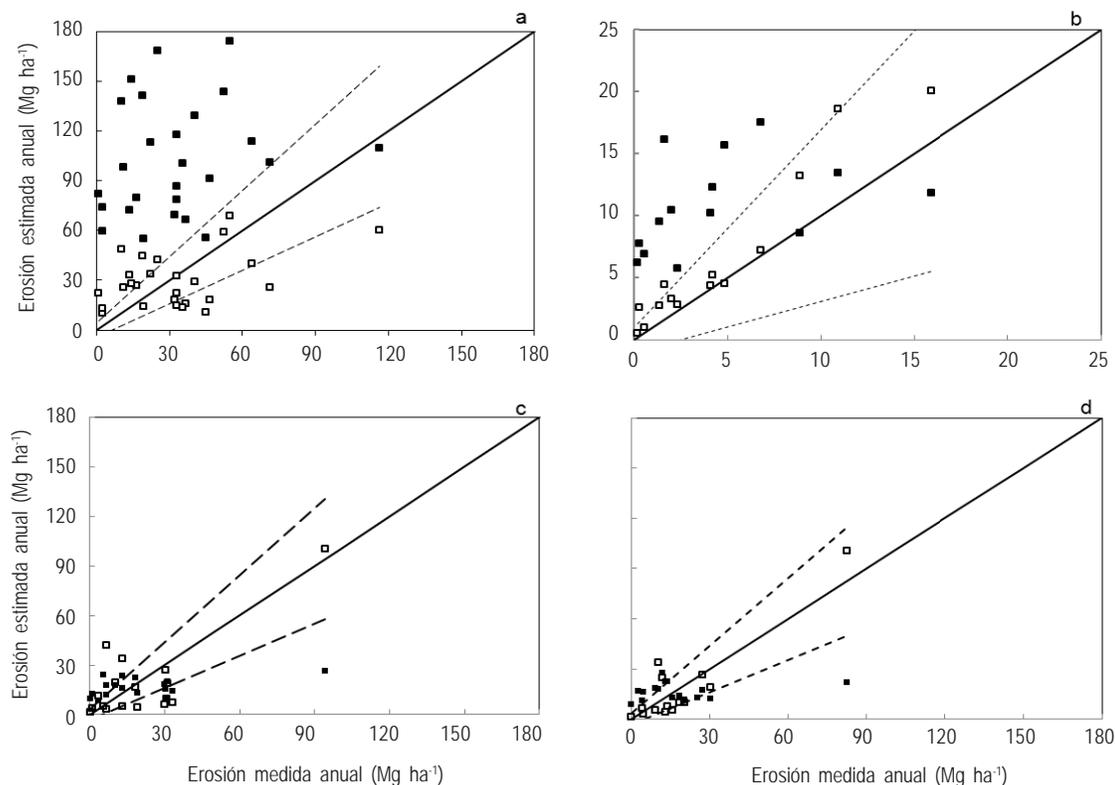


Figura 9. Intervalo de Confianza del sedimento medido vs estimado (Mg ha^{-1}) mediante WEPP (cuadrados vacíos) y USLE (cuadrados llenos) para los cuatro tratamientos evaluados: a) suelo desnudo. b) maíz continuo. c) soja a 70 cm y d) soja a 35 cm. Línea de puntos indican Intervalo de Confianza.

Figure 9. Confidence Interval of measured vs. estimated sediment delivery (Mg ha^{-1}) using WEPP (empty squares) and USLE (filled squares) models for the four treatments evaluated: a) bare soil. b) continuous corn. c) soybean at 70 cm and d) soybean 35 cm. Línea de puntos indican Intervalo de Confianza.

Tabla 2. Coeficiente de variación (CV), intervalo de confianza del 95% (IC) y límites superiores (UB) e inferiores (LB) para las mediciones de pérdida del suelo calculadas en las parcelas de escorrentía del INTA EEA Paraná en el período 1971-1999.

Table 2. Coefficient of variation (CV), 95% confidence interval (CI), and upper (UB) and lower (LB) limits for soil loss measurements from INTA EEA Paraná runoff plots (1971-1999).

Pérdida de Suelo (Mg ha^{-1})	IC del 95%	Coeficiente de Variación (CV)			Límite Inferior (LB) 95% IC (Mg ha^{-1})	Límite Superior (UB) 95% IC (Mg ha^{-1})
		Medido	WEPP	USLE		
0,1	0,29	1,48	0,68	0,30	-0,19	0,39
10	7	0,36	0,49	0,28	2,9	17,1
20	11	0,29	0,35	0,33	8,6	31,4
40	18	0,24	0,44	0,30	21,5	58,5
60	25	0,21	0,51	0,37	35,5	84,5
80	30	0,19	0,23	0,34	50,1	109,9
100	35	0,18	0,30	0,38	65,1	134,9
120	40	0,17	0,25	0,28	80,3	159,7
140	44	0,16	0,45	0,32	95,9	184,1
160	48	0,15	0,31	0,29	111,6	208,4
180	53	0,15	0,47	0,27	127,5	232,5
200	57	0,14	0,42	0,36	143,5	256,5

embargo, Wendt *et al.* (1986) encontraron que los coeficientes de variación de los eventos fueron, relativamente constantes para la escorrentía y pérdida de suelo, y las tormentas más erosivas tendían a mostrar el menor grado de variabilidad.

Erosión anual promedio en parcelas de escorrentía vs WEPP y USLE

En las cuatro parcelas analizadas, WEPP predijo siempre mejor la pérdida de suelo comparado con USLE. En coincidencia con nuestros resultados, Amore *et al.* (2004), utilizando un Sistema de Información Geográfica como herramienta para manejar y administrar los datos para la aplicación de los modelos, encontraron que WEPP tuvo un mejor comportamiento para estimar la producción de sedimentos comparado con USLE.

La pérdida de sedimento real en la parcela de suelo desnudo fue 12 veces mayor que en la de maíz continuo y de 1,9 a 2,6 veces más que en las de soja a 70 y a 35 cm, respectivamente (Fig 10). La pérdida de suelo en la soja continua a 70 cm fue 6,6 veces mayor a la del maíz continuo, en tanto la de soja a 35 cm fue 4,7 veces mayor. Estos resultados indican que la pérdida de suelo fue muy sensible al efecto de los cultivos y prácticas de manejo, como sostienen numerosos autores (Scotta *et al.*, 1986; Wischmeier & Smith, 1978; Castiglioni *et al.*, 2013).

Al comparar los datos promedio anuales de las parcelas con los estimados mediante WEPP, observamos que no se encontró diferencia estadísticamente significativa para ningún tratamiento (Fig 10). Sin embargo, los promedios anuales de pérdidas de suelo estimados mediante USLE fueron significativamente mayores en los tratamientos de suelo desnudo y maíz continuo, mientras que para soja a 70 y a 35 cm fue tan preciso en la estimación como la media de los datos observados ($E = 0,14$ y $E = 0,07$, respectivamente) (Fig 10).

CONCLUSIÓN

El modelo WEPP estimó adecuadamente el escurrimiento para todos los tratamientos analizados, presentando mayor eficiencia para el cultivo de soja a 70 cm y maíz continuo respecto a suelo desnudo y soja a 35 cm. Sin embargo, este modelo mostró una leve tendencia a sobreestimar el escurrimiento a bajos valores registrados.

La producción de sedimentos fue mejor estimada por el modelo WEPP en comparación con el modelo USLE para los cuatro tratamientos analizados. En las parcelas de soja continua, USLE sobreestimó la producción de sedimentos para valores bajos medidos y los subestimó para valores altos, mientras que WEPP mantuvo una alta eficiencia de estimación de sedimentos aun para altos valores de pérdida de suelo.

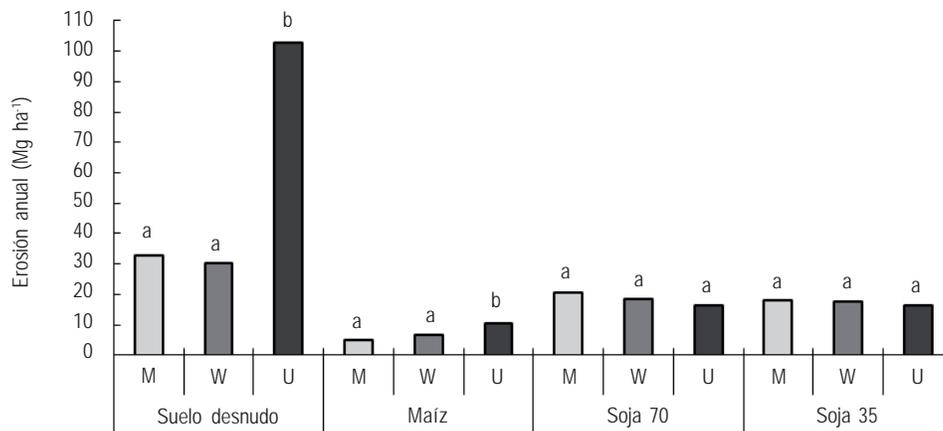


Figura 10. Erosión anual promedio (Mg ha⁻¹) para las parcelas Suelo desnudo, Maíz continuo, Soja a 70 cm y Soja a 35 cm. Datos medidos en parcelas de escorrentía (M), estimados con WEPP (W) y USLE (U). Letras iguales en cada tratamiento indican que no hay diferencias significativas (Duncan, $\alpha=0,05$).

Figure 10. Annual erosion (Mg ha⁻¹) for bare soil, continuous maize, soybean 70 cm, and soybean 35 cm treatments. Comparison of measured data in runoff plots (M), estimated with WEPP (W), and USLE (U). Same letters in each treatment indicates that there are no significant differences (Duncan, $\alpha=0,05$).

Estos resultados indican que el uso del modelo físico WEPP representó mejor la realidad de la erosión hídrica de sistemas de producción agrícolas de nuestra región, destacándose como una herramienta útil para diseñar alternativas productivas más eficientes que contribuyan en la toma de decisiones estratégicas para la conservación de suelos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abasto, CD. 2004. Una investigación sobre los efectos negativos de la erosión hídrica en Aldea Santa María, provincia de Entre Ríos. <http://erosionhidrica.blogspot.com.ar>
- Alberts, EE; MA Nearing; MA Weltz; LM Risse; FB Pierson; XC Zhang & JR Simanton. 1995. Ch. 7. Soil component. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation.
- Amore, E; C Modica; MA Nearing & VC Santoro. 2004. Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. *Journal of Hydrology* 293(1): 100-114.
- Becker, AR; E Díaz; MP Cantú; C Meyers & C Cholaky. 2006. Aplicación del modelo WEPP en la predicción de erosión hídrica en el Suroeste de Córdoba, Argentina. In: XX Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. CD. 5 pp.
- Casas, RR. 2005. Efecto de la intensificación agrícola sobre los suelos. *Ciencia Hoy* Vol. XV. 87:42-43.
- Casas, RR & GF Albarracín. 2015. El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Argentina) Centro para la promoción de la conservación del suelo y el agua (PROSA).
- Castiglioni, MG; F Behrends Kraemer; M Morras & H José. 2013. Efecto de la secuencia de cultivos bajo siembra directa sobre la calidad de algunos suelos de la región Pampeana. *Ciencia del Suelo* 31(1): 93-105.
- Cisneros, J; C Cholaky; AC Gutiérrez; J González; M Reynero; A Diez & L Bergesio. 2012. Erosión Hídrica: Principios y Técnicas de Manejo. Editora UniRio. Colección Académico Científico, 74-81.
- Chartier, MP & CM Rostagno. 2010. Evaluación del modelo WEPP para predecir la erosión hídrica en pastizales semiáridos del noreste de la Patagonia. *Ciencia del Suelo* 28(1): 91-103.
- Convenio FAO-INTA. 1969-1974. Determinación de las Pérdidas de Suelo y Agua en Parcelas con diferentes cultivos, Prácticas de Manejo y Longitud de Pendientes. Informe provisional. AGL: DP/ARG/68/526.
- Demény, K; C Centeri & G Jakab. 2010. Soil loss calculations with WEPP and USLE models on sloping arable land near Isaszeg, Hungary. Conference Title Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil solutions for a changing world, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010. URL <http://www.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/0189>. Record Number 20113349019
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2011. InfoStat Versión 2011 Grupo InfoStat. FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Echeverría, NE; AG Vallejos & JC Silenzi. 2006. Erodabilidad de suelos del sur de la región semiárida argentina. *Ciencia del Suelo* 24: 49-57.
- FAO-Unesco. 1975. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO, Roma. <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S0b.htm>. Última visita 24-04-2017.
- FAO. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Boletín de tierras y aguas de la FAO N° 8. ISSN 1020-8127. Roma.
- Flanagan, DC & MA Nearing, eds. 1995. Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. West Lafayette, Ind.: National Soil Erosion Research Laboratory.
- Ghidey, F & EE Alberts. 1996. Comparison of measured and WEPP predicted runoff and soil loss for midwest claypan soil. *Transactions of the ASAE* 39(4): 1395-1402.
- Gligo, N. 1995. Situación y perspectivas ambientales en América Latina y el Caribe. ONU: LC/G.1858-P. Publicado en: *Revista de la CEPAL* No.55 p. 107-122.
- Gvozdenovich, J; PA Barbagelata & G López. 2013. Aplicación de la USLE on-line para el Cálculo de la Pérdida de Suelo en Entre Ríos, Argentina. Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos. <http://inta.gov.ar/documentos/jornadas-argentinas-de-conservacion-de-suelos-2013/>
- Gvozdenovich, J; M Pérez Bidegain, PA Barbagelata & LE Novelli. 2017. Validación del generador climático CLIGEN para predecir erosión en el norte de la pampa argentina. *Ciencia del Suelo* "en prensa".
- Irurtia, C; G Cruzate & F Gaspari. 2007. Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires para establecer tasas de erosión hídrica. Instituto Nacional de Suelos del INTA y Universidad Nacional de La Plata.
- Jorge, G; M Vazquez; M Perez Bidegain; J Sawchik & J Terra. 2010. Empleo de un modelo físico para la estimación de escurrimiento y erosión en Uruguay: primera aproximación. Taller SUCS-ISTRO "Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos". Colonia del Sacramento 12-14 julio, 2010. Uruguay.
- Jorge, G; M Pérez Bidegain; J Terra & J Sawchik. 2012. WEPP as a tool for enabling a more comprehensive analysis of the environmental impacts of soil erosion. *Agrociencia* 16(3): 268-273.
- Jorge G; M Pérez Bidegain; J Terra & J Sawchik. 2015. Ajuste del modelo de erosión WEPP para un Argisol Subéutrico y un Brunosol Éutrico en el Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. Versión On-line ISSN 2301-1548.
- Lafren, JM; C Dennis; DC Flanagan & AE Bernard. 2004. Soil Erosion and Sediment Yield Prediction Accuracy Using WEPP. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 40(2): 289-297.
- Lane, LJ & MA Nearing (eds). 1989. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation. NSERL Report No. 2. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS.
- Nash, J & JV Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I A discussion of principles. *Journal of hydrology* 10(3): 282-290.
- Nearing, MA; GR Foster; LJ Lane & SC Finkner. 1989. A process based soil erosion model for USDA water erosion prediction project. *Transactions of the ASAE* 32(5): 1587-1593.
- Nearing, MA; L Deer-Ascough & JM Lafren. 1990. Sensitivity analysis of the WEPP Hillslope Profile Erosion Model. *Transactions of the ASAE* 33(3): 839-849.

- Nearing, MA. 1998. Why Soil Erosion Models Over-Predict Small Soil Losses and Under-Predict Large Soil Losses. *Catena* 32:15-22.
- Nearing, MA; G Govers & LD Norton. 1999. Variability in soil erosion data from replicated plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(6): 1829-1835.
- Nearing, MA. 2000. Evaluating Soil Erosion Models Using Measured Plot Data: Accounting for Variability in the Data. *Earth Surf. Process. Landforms* 25:1035-1043.
- Pandey, A; VM Chowdary; BC Malc & M Billib. 2008. Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model. *Journal of Hydrology* 348 (3-4): 305-319.
- Paruelo, JM; JP Guerschman & SR Verón. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy* 15(87): 14-23
- Pieri, L; M Bittelli; JQ Wu; S Dun; DC Flanagan; PR Pisa & F Salvatorelli. 2007. Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. *Journal of hydrology* 336(1): 84-97.
- Plan Mapa de Suelos. 1998. Convenio INTA-Gobierno de Entre Ríos. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Paraná, Provincia de Entre Ríos. Escala 1:100.000. Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 17, 114 pp.
- Rapp, JF. 1994. Error assessment of the Revised Universal Soil Loss Equation using natural runoff plot data. M.S. thesis. Tucson, Ariz.: University of Arizona.
- Renard, KG & VA Ferreira. 1993. RUSLE model description and data base sensitivity. *J. Environ. Qual.* 22(3): 458-466.
- Risse, LM; MA Nearing; JM Laflen & AD Nicks. 1993. Error assessment in the universal soil loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57(3): 825-833.
- Risse, LM. 1994. Validation of WEPP using natural runoff plot data. Unpub. Ph.D. diss. West Lafayette, Ind.: Purdue University.
- Saluso, JH. 2008. Actualización del Factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) para una amplia zona del país. Período 1950/2005. G. R Naturales Paraná. Serie extensión. EEA Paraná, (51).
- Scotta, E; L Nani; A Conde; A Rojas; H Castañeira & O Paparotti. 1986. Manual de sistematización de tierras para control de erosión hídrica y aguas superficiales excedentes. Serie Didáctica N° 17.
- Scotta, E & JJ Gvozdenovich. 2014. Factores C para el modelo USLE. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo - II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Producción sustentable en ambientes frágiles. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Stocking, M & N Murnaghan. 2003. Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra. Mundi-Prensa Libros.
- Tiwari, AK; LM Risse & MA Nearing. 2000. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *Transactions of the ASAE* 43(5): 1129-1135.
- Viglizzo, EF; AJ Pordomingo; MG Castro & F Lértora. 2002. La sustentabilidad ambiental del agro pampeano. Programa Nacional de Gestión Ambiental Agropecuaria Edic. INTA, Pág, 84.
- Wendt, RC; EE Alberts & AT Hjelmfelt. 1986. Variability of runoff and soil loss from fallow experimental plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50(3): 730-736.
- Wischmeier, WH & DD Smith. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 39(2): 285-291.
- Wischmeier, WH & DD Smith. 1962. Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning. Contribution from the soil and water conservation. U.S. Department of Agricultural (A.R.S.) and Purdue A.E.S.H. N° 59: 148-159.
- Wischmeier, WH & DD Smith. 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. USDA Agric. Handbook 282. Washington, D.C.: GPO.
- Wischmeier, WH & DD Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA. Agricultural Research Service Handbook 537. 58 pp.
- Yoder, DC; AJ Ketchem; DA Whittemore; JP Porter; GA Weesies & KG Renard. 1992. RUSLE User Guide. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Dept. Agricultural Handbook No. 703. Washington, D.C.: GPO.