

ESCURRIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN UNA PEQUEÑA CUENCA AGRÍCOLA AFORADA DE ENTRE RÍOS, ARGENTINA: APLICACIÓN DEL MODELO WEPP

JORGE JESUS GVOZDENOVICH^{1-2*}, PEDRO ANIBAL BARBAGELATA¹⁻²,
JOSÉ DANIEL OSZUST², MARIO PÉREZ BIDEGAIN³

Recibido: 30/08/2017

Recibido con revisiones: 30/01/2018

Aceptado: 05/02/2018

RESUMEN

La erosión del suelo es un problema ampliamente reconocido. Sin embargo, resulta muy difícil evaluar de manera fiable y precisa la magnitud y la tasa del proceso a nivel de lote y de cuenca. El modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP) es una herramienta de simulación continua, capaz de cuantificar los procesos de remoción de sedimentación y escurrimiento a nivel de lote y cuenca. El objetivo de este estudio fue comparar el escurrimiento medido en una cuenca con el simulado mediante el modelo WEPP y estimar la producción de sedimentos para diferentes rotaciones. El estudio se realizó en una cuenca agrícola de 27 ha con rotación Trigo/Soja 2^a-Maíz-Soja, y se la comparó con Soja continua, Trigo/Soja 2^a, Maíz continuo, Maíz-Soja-Trigo/Soja 2^a y Cultivo de Cobertura/Maíz-Soja-Trigo/Soja 2^a. Los resultados fueron analizados mediante el coeficiente de eficiencia de Nash & Sutcliffe (E), análisis de regresión (R^2) y análisis de varianza. Al analizar el conjunto de datos para los años 2012 y 2013, con alta variabilidad en el total anual precipitado (1352.6 y 851.6 mm, respectivamente), se observó una buena relación entre los valores de escurrimiento medidos y los simulados por WEPP ($R^2 = 0.79$), mientras que la eficiencia del modelo fue superior a la media de los datos medidos ($E = 0.66$). Esto demuestra que, en el conjunto de los datos, WEPP fue capaz de absorber la variabilidad climática de forma eficiente. La producción de sedimentos estimada mediante WEPP para la rotación actual fue de 4.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹, valor considerado adecuado teniendo en cuenta que la cuenca no presentó signos visibles de erosión hídrica. En las 5 rotaciones simuladas, el monocultivo de soja presentó las mayores pérdidas de agua por escurrimiento y de suelo por erosión. Esto podría deberse a que, al ser elevado los volúmenes escurridos, el agua se encauce provocando además de erosión laminar, erosión en surcos, transportando así mayor cantidad de sedimentos. La rotación que incorporó cultivo de cobertura redujo el escurrimiento y la producción de sedimentos.

Palabras clave: Cuenca, erosión hídrica, escurrimiento, sedimento.

RUNOFF AND SEDIMENT PRODUCTION IN A SMALL AGRICULTURAL WATERSHED GAUGING OF ENTRE RÍOS, ARGENTINA: APPLICATION OF THE WEPP MODEL

ABSTRACT

Soil erosion is a widely recognized problem. However, it is difficult to evaluate, reliably and accurately, the magnitude and rate of soil erosion at a field and watershed level. The Water Erosion Prediction Project (WEPP) is a continuous simulation tool, being capable of quantifying sediment and runoff processes at the field and watershed level. The objective of this study was to compare measured and simulated runoff in a watershed and estimate the sediment yield for different crop rotations using the WEPP model. The study was carried out in a small agricultural watershed of 27 ha, with Wheat/Soybean 2nd-Maize-Soybean crop rotation, near Paraná, Entre Ríos. Estimated soil losses from five crop rotations were compared: Continuous Soybean, Wheat/Soybean 2nd, Continuous Maize, Maize-Soybean-Wheat/Soybean 2nd and Cover crop/Maize-Soybean-Wheat/Soybean 2nd. Nash & Sutcliffe efficiency coefficient of index (E), regression analysis (R^2), and analysis of variance were used for data analysis. Measured runoff water and WEPP simulated values were highly related ($R^2 = 0.79$), when analyzing 2012 and 2013 data set; with high variability in the total annual precipitated rain (1352.6 and 851.6 mm, respectively). Model efficiency was higher than the mean of the measured data ($E = 0.66$), which shows that, in the data set, WEPP was able to take into account climatic variability. Within the actual crop rotation, the agricultural watershed shows no observable signs of water erosion. Sediment yield simulated by WEPP was 4.8 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, indicating an acceptable estimation. In the five crop rotations simulated, soybean monoculture presented the highest water runoff and soil loss. This may be because when higher volumes of water runoff are produced, water tends to concentrate on channels causing further interrill and rill erosion carrying higher amounts of sediments. The crop rotation that included cover crops reduced estimated runoff water and sediment production.

Key words: Watershed, water erosion, sediment, runoff.

1 INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA AGROPECUARIA

2 Facultad Ciencias Agropecuarias – UNER

3 Facultad de Agronomía – Universidad de la República – Uruguay

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

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es un problema grave y ampliamente reconocido. Sin embargo, lo difícil de evaluar de manera fiable y precisa son la extensión, magnitud y tasa de la erosión del suelo y sus consecuencias económicas y ambientales (Lal, 1994). Frente a la creciente presión sobre los recursos naturales provocada por la intensificación de la agricultura, y a un posible aumento e intensificación de los eventos erosivos de lluvias, es necesario contar con herramientas (modelos) que evalúen las distintas alternativas productivas desde el punto de vista ambiental y de su impacto (Jorge *et al.*, 2010) a nivel de cuenca.

Entre los modelos que se han desarrollado para predecir la erosión hídrica, han sido los modelos empíricos, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1978), su versión Modificada (MUSLE) (Williams, 1975), o su versión Revisada (RUSLE) (Renard *et al.*, 1991), los más ampliamente utilizados. La causa de esto es la practicidad para su uso, y la gran accesibilidad de los mismos en todo el mundo. Sin embargo, muchos científicos han llevado a cabo estudios para cuantificar la exactitud de las estimaciones de pérdida de suelo de estos modelos (Wischmeier, 1972; Onstad *et al.*, 1976; Risse *et al.*, 1993), ya que son modelos que no definen factores diferentes para las relaciones que existen entre los procesos hidrológicos fundamentales de lluvia, infiltración y escorrentía, y los procesos erosivos fundamentales de desprendimiento por el impacto de las gotas de lluvia, desprendimiento por el flujo, transporte por salpicadura de la gota, transporte por el flujo y depósitos (Regoyos Sáinz, 2003).

Tanto USLE como RUSLE solo permiten la estimación de pérdida de suelo a nivel de ladera, mientras que MUSLE permite hacerlo a nivel de cuenca, pero con las mismas restricciones de ser de base empírica (Allen, 1981). Estos modelos, debido a su origen empírico y su estructura de ecuaciones agregadas, ven gravemente limitado su potencial para aumentar su precisión y realizar otras mejoras (Foster, 1987).

El conocimiento de los procesos erosivos a partir de los años '80 ha mejorado significativa-

mente y se han desarrollado modelos con base física, que permiten el análisis de gran cantidad de información de forma más eficiente. Los esfuerzos se han dirigido a desarrollar modelos que predigan, además de la escorrentía y pérdidas de suelo totales, la distribución espacial de la escorrentía y sedimentación sobre la superficie del suelo durante una tormenta aislada o a lo largo de un periodo de tiempo determinado (Regoyos Sáinz, 2003). Una estimación ajustada de la producción de sedimentos debe considerar al sistema completo de erosión y sedimentación a nivel de cuenca (Foster, 1982).

El modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP) (Flanagan & Nearing, 1995) fue desarrollado para predecir erosión a nivel de ladera y de cuenca. Es una herramienta de simulación continua que permite la predicción de erosión de tierras cultivables y pastizales. El modelo WEPP de cuenca se basa en los fundamentos de la teoría de la erosión (impacto de la gota de lluvia, desprendimiento de las partículas del suelo, transporte por el escurrimiento superficial y posterior sedimentación), suelo (materia orgánica, porcentaje de limo, arena y arcilla para cada profundidad, erosionabilidad laminar y encauzada en pequeños canalículos, conductividad hidráulica efectiva en flujo saturado, esfuerzo cortante crítico), cultivos y manejo (fechas y tipos de operaciones; la base de datos de operaciones similar a RUSLE (Renard *et al.*, 1991) y la base de datos de vegetación similar al EPIC (Williams, 1990) flujo hidráulico del caudal y relación lluvia-escorrentía. Sus componentes primarios son laderas, canales y embalses. La ladera y el canal se pueden dividir en componentes de hidrología y erosión (Ascough *et al.*, 1996).

El modelo WEPP de cuenca fue originalmente diseñado para ser usado en áreas agrícolas con un tamaño máximo de aproximadamente 260 ha y en cuencas de pastizales de hasta 800 ha (Foster & Lane, 1987), pero Baffaut *et al.* (1997) recomiendan que el modelo no se utilice en cuencas hidrográficas mayores de 40 ha y que las longitudes de las laderas no excedan los 100 m.

El modelo WEPP no contiene un componente de estimación de flujo base, por lo que no se puede utilizar para la predicción de la erosión de

canales con flujo continuo. Además, el modelo para cuenca no puede ser usado para la predicción de erosión en cárcavas, porque carece de un componente para calcular el desprendimiento de la pared lateral de la misma. Sin embargo, este modelo es aplicable a vías de agua construidas (canales de terraza y canales empastados) y al flujo concentrado en campos cultivados (Ascough *et al.*, 1996).

En los últimos años, las investigaciones sobre fenómenos erosivos de pérdida de suelos se han centrado a nivel de lote (Scotta *et al.*, 1991; Chagas, 1995; Becker *et al.*, 2006; Marelli y Arce, 2006; Irurtia *et al.*, 2007; Cisneros *et al.*, 2012; Gvozdenovich *et al.*, 2015), junto con modelos hidrológicos que cuantifican el escurrimiento (Chagas *et al.*, 2008; Behrends Kraemer, 2011; Gvozdenovich y Marizza, 2013; Saluzzio *et al.*, 2016) y en menor medida la estimación de sedimentos a nivel de cuenca (Santanatoglia *et al.*, 1996; Amore *et al.*, 2004; Ares *et al.*, 2014). Siendo escasos los estudios locales de modelos que sean capaces de cuantificar ambos procesos, sedimentos y escurrimiento, a nivel de una cuenca con el modelo WEPP.

Las hipótesis de este estudio fueron: a- el modelo WEPP logra representar el escurrimiento medido en una cuenca agrícola en forma satisfactoria para años con precipitaciones contrastantes. b- el escurrimiento y la producción de sedimentos estimados en la cuenca con el modelo WEPP es diferente para distintas rotaciones de cultivos.

El objetivo de este trabajo fue: a- comparar el escurrimiento medido en una cuenca agrícola y el simulado mediante el modelo WEPP, b- estimar la producción de sedimentos de la cuenca con el modelo WEPP y c- simular diferentes rotaciones de cultivo en la cuenca para evaluar la mejor estrategia productiva desde el punto de vista de la conservación del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó sobre una cuenca agrícola (Figura 1a) ubicada en cercanías de la ciudad de Oro Verde (31° 50' S - 60° 32' O), provincia de Entre Ríos (Argentina). La superficie de la cuenca

obtenida con relevamiento planialtimétrico fue de 27.01 ha y la superficie estimada con el modelo WEPP fue de 26.43 ha. Los datos climáticos se obtuvieron de la estación agrometeorológica de la Estación Experimental Agropecuaria Paraná del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. La precipitación media anual es de 1033 mm, con un rango que varía entre 494 y 1818 mm para el periodo 1934–2016 (83 años de datos). El suelo de la cuenca es clasificado como Argiudol ácuico (Plan Mapa de Suelos, 1998). El manejo es con sistema de siembra directa con rotación Trigo/Soja de segunda-Maíz-Soja, en distinta secuencia para cada lote que integra la cuenca.

Para las estimaciones de caudal se utilizó la información proveniente de los registros de altura de agua efectuados por un limnígrafo freatígrafo (limnígrafo-freatígrafo de lectura continua, modelo L.E. 203) dotado de un sensor piezo-resistivo, colocado en un pozo en un tramo rectilíneo de la vaguada, en el lugar de cierre de la microcuenca (descrito por Castiglioni *et al.*, 2006). La altura de agua por encima del sensor se registró a intervalos de 30 minutos en una memoria tipo EEPROM. Para transformar los valores registrados de altura de agua en caudal, se contó con la información del levantamiento planialtimétrico de ese sector de la vaguada realizado previamente, cuyo objetivo fue conocer la sección transversal y el radio hidráulico del mismo para diferentes alturas de agua. Se analizó la rugosidad del cauce y se verificó periódicamente que estos elementos no sufrieran modificaciones. Posteriormente, utilizando el modelo de Manning (Schwab *et al.*, 1966), se transformó la altura de agua en caudal.

Para alimentar los archivos de entrada del modelo WEPP (WEPP versión v.2012.8), se emplearon datos diarios de precipitación, temperatura mínima y máxima diaria, que comprenden el período 2006 al 2013. Otros datos de entrada del clima requeridos por WEPP (humedad relativa media máxima y mínima, radiación solar media diaria, punto de rocío y velocidad media diaria del viento), se obtuvieron ejecutando el generador climático CLIGEN, ajustado localmente por Gvozdenovich *et al.* (2017a), con una base de 40 años de datos. Como archivos de entrada del modelo para suelo y manejo se usaron los datos

descriptos en apartado "Ajuste local del modelo WEPP" (Gvozdenovich *et al.*, 2017b). Los datos topográficos fueron obtenidos del relevamiento Planialtimétrico de la cuenca (**Figura 1b**).

Para facilitar el análisis y la interpretación, la cuenca se dividió en 6 lotes, 3 canales y una alcantarilla que recolecta el caudal del Canal 2 y Canal 3, y en cada uno se calculó la longitud de la media loma al bajo y la pendiente promedio (**Tabla 1, Figura 1b**).

Las simulaciones con el modelo WEPP se iniciaron en el año 2006, para evitar que comience la aleatorización del modelo directamente en el

año 2012. Se cargaron los datos reales de precipitación, temperatura utilizando la opción "Actual Daily Date" (al seleccionar esta opción, el modelo WEPP lee las precipitaciones diarias, las temperaturas mínima y máxima de un archivo especificado cargado previamente. El resto de las variables climáticas, requeridos por WEPP se obtuvieron ejecutando CLIGEN, localmente ajustado por Gvozdenovich *et al.*, 2017a) y manejo de la cuenca desde el 2006 al 2013. Para realizar la comparación del modelo WEPP con lo realmente precipitado, se usó solamente los archivos de salida del modelo correspondientes al año 7 (2012) y al año 8 (2013) de la simulación.

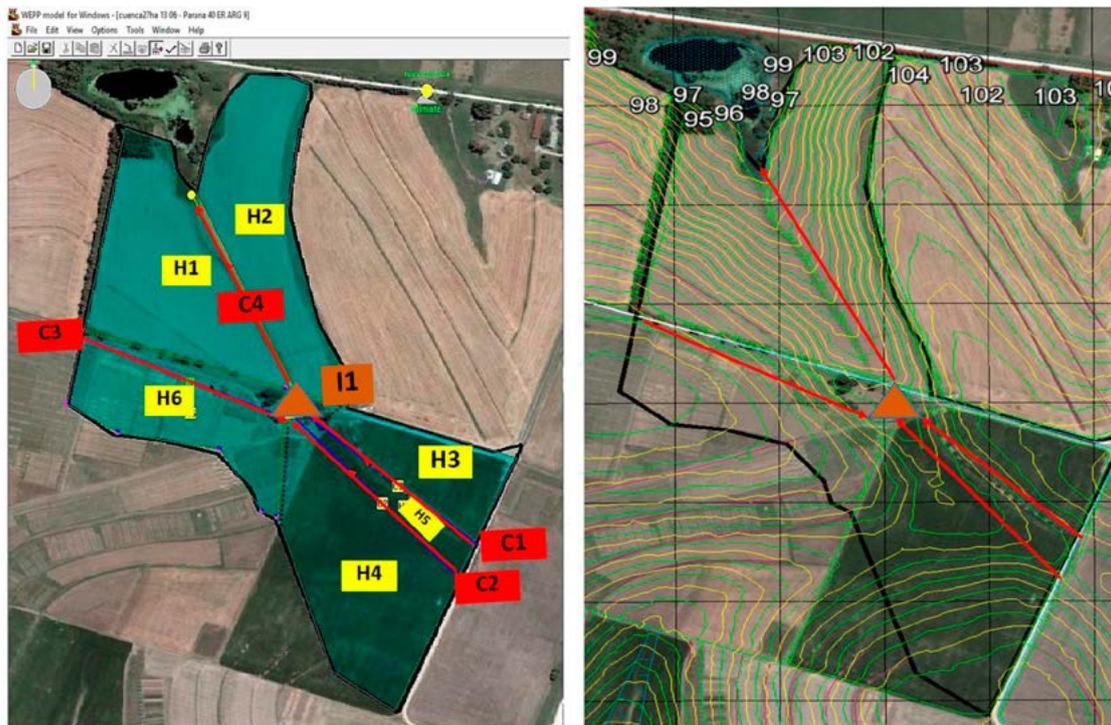


Figura 1. a- Captura de pantalla del modelo WEPP con el diseño de la Cuenca estudiada. H: lotes, I: alcantarilla y C: canales. b- Curvas de nivel a 0.50 m del área de la Cuenca, delimitada en color negro.

Figure 1. a- Screenshot of the WEPP model with the design of the studied watershed. H: fields, I: culvert, and C: channels. b- Level curves at 0.50 m of the watershed area, delimited in black color.

Tabla 1. Longitud y pendiente de cada lote y de los canales de la cuenca

Table 1. Length and slope of each field and channel of the watershed.

Lote	Longitud (m)	Pendiente (%)	Canal	Longitud (m)	Pendiente (%)	Ancho (m)
H1	187,2	6,3	C1	312	5	10
H2	168,0	8,4	C2	363	0,4	5
H3	63,9	4,2	C3	387	2	8
H4	159,4	3,0	C4	344	4	10
H5	37,6	2,5				
H6	170,0	3,8				

Al momento de evaluar los valores de pérdida de suelo estimados por el modelo WEPP, se tomó como valor aceptable el límite máximo tolerable de pérdida de suelo no mayor a 11 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para las diferentes rotaciones, según lo propuesto por diversos autores, 6.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de Hays & Clark (1941), 9 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de Smith (1941), 11 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de Browning *et al.*, (1947), 7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de Puentes (1981), o de 8 Mg ha⁻¹ año⁻¹ por Montgomery (2007). Este límite de 11 Mg ha⁻¹ año⁻¹ es demasiado elevado, teniendo en cuenta que la mayoría de los suelos no tienen la misma tasa de formación como para que puedan reponer esas pérdidas.

Para evaluar los diferentes escenarios de manejo y participación relativa de los diferentes cultivos dentro de la rotación, se usó el informe elaborado por la Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina (FADA, 2014), el cual determinó que en el país se cultivaron 4,7 hectáreas de soja por cada una de maíz en el ciclo agrícola 2013/14, mientras que este índice fue de 1,75 en Brasil y 0,90 en Estados Unidos. En Entre Ríos, la brecha entre soja y maíz es todavía mayor: 5,16 hectáreas de soja por cada hectárea de maíz, esto indica que el cultivo de soja ocupa el 69% de la superficie agrícola de la provincia (FADA, 2014). Por tal motivo, se seleccionaron cinco manejos representativos de la realidad y se usó WEPP para simular el escurrimiento y sedimentación de la cuenca. Estos manejos fueron: Soja continua, Trigo/Soja 2^a, Maíz continuo, Cultivo de Cobertura/Maíz-Soja-Trigo/Soja 2^a y la rotación actual Maíz-Soja-Trigo/Soja 2^a.

Análisis estadístico

Las predicciones del modelo WEPP para el volumen escurrido fueron comparadas con los valores medidos en el período 2006-2013 en la cuenca en estudio. La calidad de la estimación se determinó mediante coeficiente de eficiencia (E) del modelo desarrollado por Nash & Sutcliffe (1970) (Ecuación 1) y eficiencia de ajuste del modelo a través del R². 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.

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

Donde es la media de los valores *observados* de escurrimiento, Q_{tm} son los valores de escurrimiento estimados por el modelo y Q_{to} son los valores de escurrimiento observados.

Los valores de eficiencia (E) pueden tener un rango desde -∞ 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).

Los resultados de escurrimiento y producción de sedimentos anuales estimados en la cuenca a través de WEPP para las diferentes rotaciones de cultivos evaluadas se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA). Para ello se utilizaron como repeticiones los resultados de escurrimiento y producción de sedimentos de los distintos lotes y canales que conforman la cuenca. Cuando el ANOVA fue significativo (P<0.05) se realizó el test de Tukey (α<0.05) para analizar las diferencias entre las rotaciones evaluadas, utilizando el software INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis conjunto precipitación - escurrimiento en la cuenca

(2012 y 2013)

Al analizar el conjunto de datos medidos (2012 y 2013), se observó que la precipitación y el escurrimiento presentaron una alta correlación (R²= 0.84). La correlación entre las precipitaciones y el escurrimiento obtenido por el modelo WEPP fue menor y la precipitación explicó cerca del 50% de la variación del escurrimiento obtenido mediante el modelo WEPP. (**Figura 2a**).

Cuando analizamos el escurrimiento, a pesar de ser dos años atípicos en cuanto al volumen anual precipitado, la eficiencia de ajuste del modelo para la cuenca fue cercana al 80% ($R^2 = 0.79$), mientras que la eficiencia del modelo fue superior a la media de los datos medidos ($E = 0.66$), lo que demuestra que, en el conjunto de los datos, WEPP fue capaz de absorber la variabilidad climática de forma eficiente (**Figura 2b**)

Año 2012

Al analizar la relación precipitación escurrimiento medidos en la cuenca, se observó un buen

ajuste entre estas variables en el año 2012, donde las lluvias registradas fueron superiores a la media en más de un 30 % ($R^2 = 0.91$) (**Figura 3a**). De los 1352.6 mm precipitados, escurrieron 254.1 mm (19%). Estos valores de precipitación se produjeron a partir de un total de 68 tormentas en el año, de las cuales el 40 % produjeron escurrimiento. El modelo WEPP presentó un menor ajuste entre la precipitación y escurrimiento simulado ($R^2 = 0.73$) con respecto al medido (**Figura 3a**). El modelo simuló una precipitación de 1313 mm con un escurrimiento de 179.6 mm (14 %), estos datos corresponden a 62 tormentas de las cuales 32 (52%) fueron erosivas.

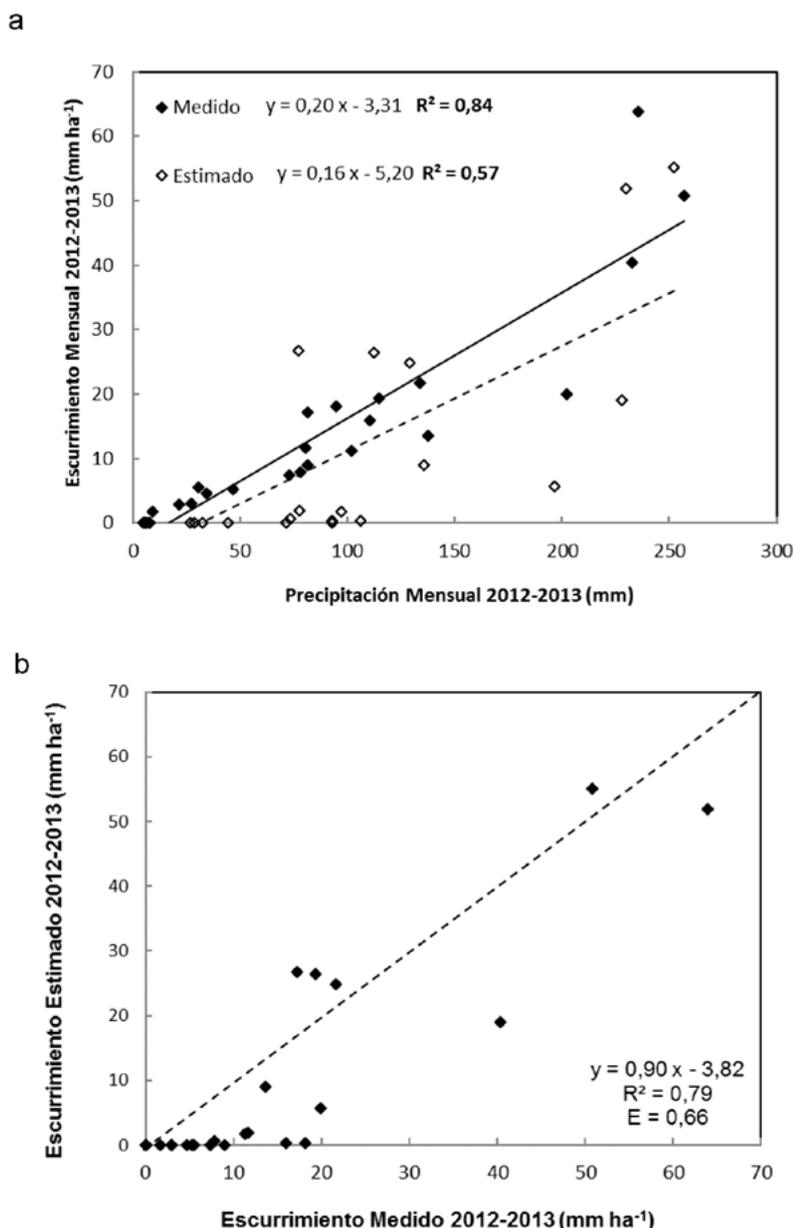


Figura 2. a- Relación entre la precipitación mensual y el escurrimiento medidos y simulados mediante WEPP para los años 2012-2013. Puntos negros y línea entera: datos medidos. Puntos vacíos y línea de puntos: datos simulados. b- Relación entre escurrimiento mensual medido y el mensual simulado con WEPP. E: Índice Nash & Sutcliffe (1970).

Figure 2. a- Relationship between measured and simulated monthly precipitation and runoff in 2012-2013. Black points and line: measured data. Empty points and dotted line: simulated data. B- Relationship between measured and WEPP simulated monthly runoff. Line Points: 1: 1 ratio. E: Nash & Sutcliffe Index (1970).

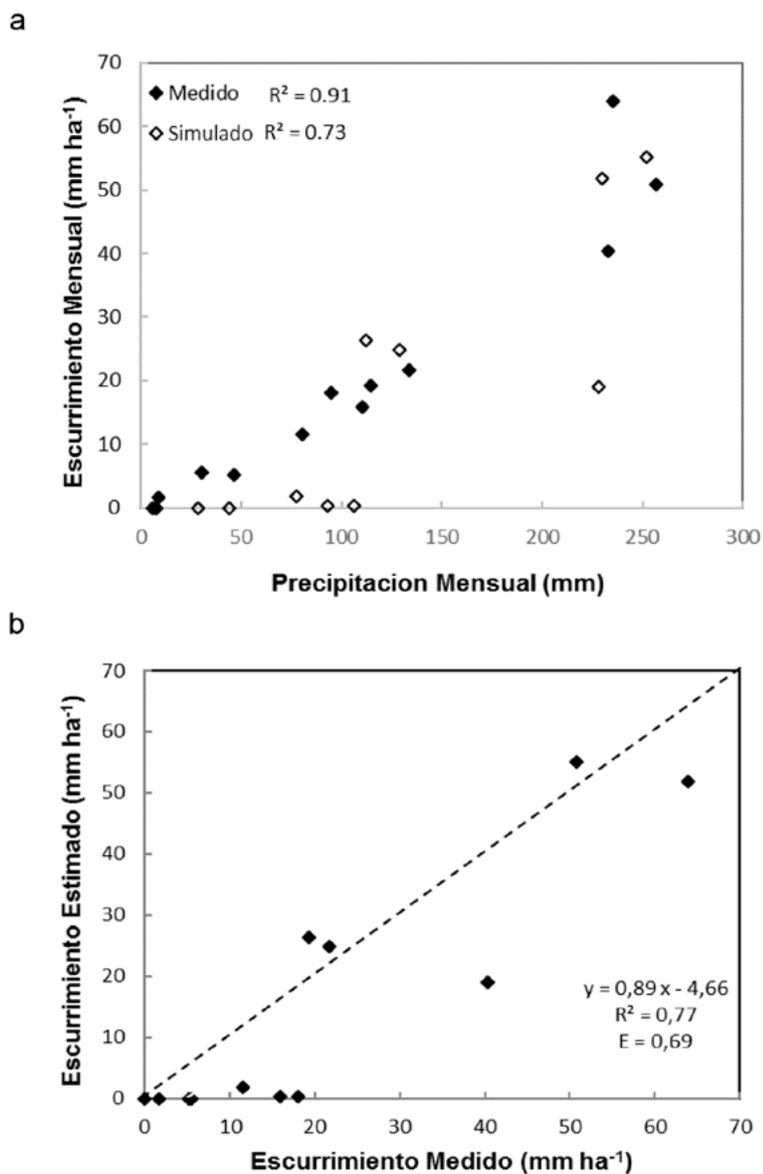


Figura 3. a- Relación entre la precipitación mensual y el escurrimiento medidos (símbolos negros) y simulados mediante WEPP (símbolos vacíos) para el año 2012. b- Relación entre escurrimiento mensual medido y el simulado con WEPP. Línea puntos: relación 1:1. E: Índice Nash & Sutcliffe (1970).

Figure 3. a- Relationship between measured and simulated monthly precipitation and runoff in 2012. Black symbols: measured data. Empty symbols: data simulated using WEPP. b- Relationship between measured and WEPP simulated monthly runoff. Dotted line indicates 1:1 relationship. E: Nash & Sutcliffe Index (1970).

En la **Figura 3b** se analiza la relación entre el escurrimiento medido en la cuenca y el estimado por WEPP, en donde el modelo predijo el escurrimiento en forma satisfactoria ($R^2 = 0.77$). Este buen ajuste se vio reflejado en el análisis de eficiencia del Índice Nash & Sutcliffe (1970), donde la E fue de 0.69, lo que indica que el modelo predice mejor el escurrimiento de la cuenca que la media de los datos observados.

Año 2013

En el segundo año de análisis, la precipitación observada fue menor que la media histórica, en el orden del 17 % (851.6 mm). Los valores de escurrimiento mensuales medidos en la cuenca

estuvieron altamente relacionados con la precipitación observada ($R^2 = 0.84$) (**Figura 4a**), mientras que la misma relación estimada con WEPP no logro explicar el escurrimiento a partir de la precipitación mensual simulada ($R^2 = 0.11$) (**Figura 4a**), similar a lo encontrado en Brasil por Cecilio *et al.* (2004), quienes evaluaron una cuenca de 4 ha con pastura, e informaron que el modelo WEPP no mostró un buen ajuste entre estas variables en pequeños eventos erosivos.

En el año 2013 se registraron 96.8 mm totales escurridos, lo que representó el 11% del total precipitado. Estas precipitaciones se produjeron en 49 tormentas, de las cuales 17 produjeron escurrimiento (35%). El modelo WEPP simuló 55 tormentas para el mismo año (2013), con 15

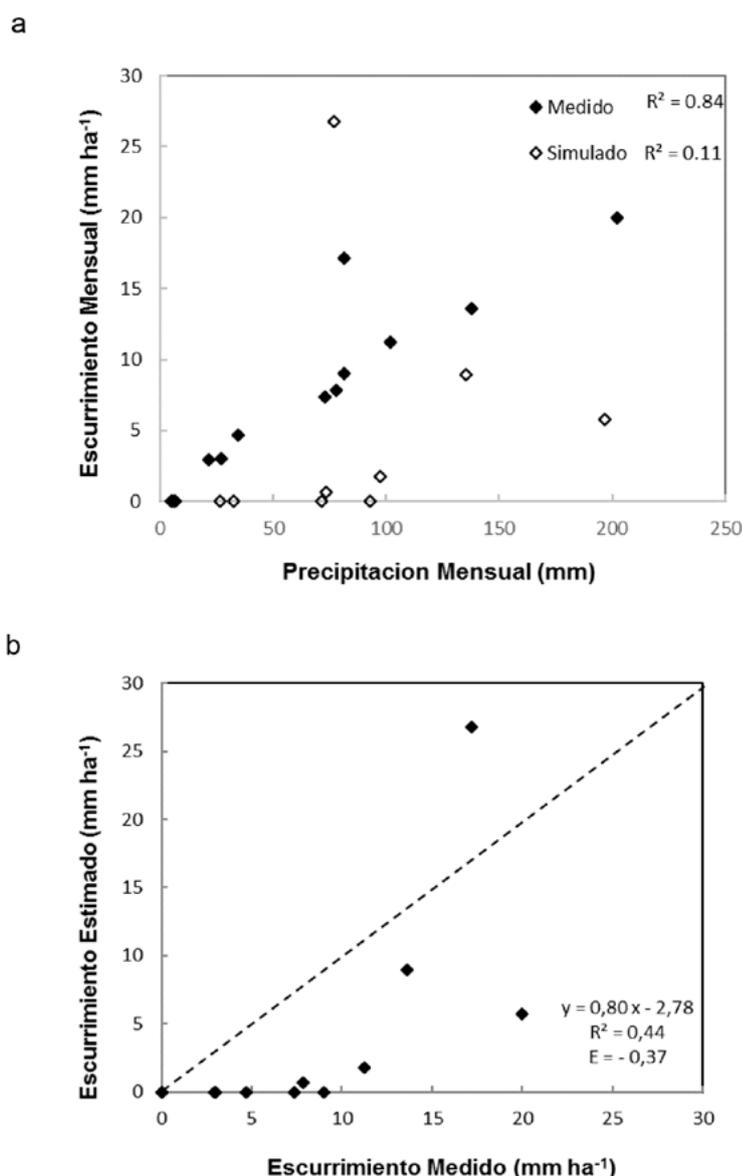


Figura 4. a- Relación entre la precipitación mensual y el escurrimiento medidos (símbolos negros) y simulados mediante WEPP (símbolos vacíos) para el año 2013. b- Relación entre escurrimiento mensual medido y el mensual simulado con WEPP. Línea puntos: relación 1:1. E: Índice Nash & Sutcliffe (1970).

Figure 4. a- Relationship between measured and simulated monthly precipitation and runoff in 2013. Black symbols: measured data. Empty symbols: data simulated using WEPP. b- Relationship between measured and WEPP simulated monthly runoff. Dotted line indicates 1:1 relationship. E: Nash & Sutcliffe Index (1970).

eventos erosivos (27%). Al comparar los escurrimientos observados y simulados, encontramos que hubo un bajo ajuste ($R^2 = 0.44$), y que el modelo estima menos eficientemente que la media de los datos observados ($E = -0.37$) (**Figura 4b**).

Análisis de pérdida de suelo en lotes y canales de la cuenca

El modelo WEPP para cuencas permitió obtener en forma detallada la producción de sedimentos de cada uno de los 6 lotes (**Tabla 2a**), en la zona de la alcantarilla y en los 4 canales (**Tabla 2b**) y la pérdida de suelo por hectárea de la cuenca (**Tabla 2c**).

La menor pérdida de suelo por lote se observó en el H3 y H5, esto se debe a que poseen la menor superficie y menor longitud de la ladera (63.9 y 37.6 m, respectivamente). Al realizar el análisis por hectárea, se observó que todos los lotes se encontraron dentro de los límites tolerables, no superando las $8 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ (**Tabla 2a**).

La pérdida de suelo en los canales estimada por WEPP, está dada por el escurrimiento y por la erosión de cada uno de los lotes que aportan a dicho canal. Se observó que el canal que presentó menor producción de sedimentos es el C3 (**Tabla 2b**), debido a que este canal es una terraza de evacuación que posee una pendiente interna del 0.4%. El canal 4 es el que recoge el escurrimiento

Tabla 2. Estimación de la producción de sedimentos por el modelo WEPP para: a- Lotes (H), b- Canales (C) y alcantarilla (I) y c- la cuenca total.

Table 2. WEPP estimation of sediment yield for: a- field (H1 to 6), b- Channels (C1 to 4) and culvert (I), and c- total watershed.

a				b		c
Lote	Superficie (ha)	Perdida Suelo por lote (Mg año ⁻¹)	Perdida Suelo por lote y hectárea (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Canales - Alcantarilla	Perdida Suelo (Mg año ⁻¹)	Perdida Suelo en la Cuenca (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
H 1	5,9	36,5	6,2	C 1	21.3	
H 2	5,2	38,9	7,4	C 2	32.3	
H 3	2,6	8,6	3,3	C 3	8.4	4.8
H 4	6,2	20,4	3,3	I 1	20.8	
H 5	1,1	3,9	3,7	C 4	126.5	
H 6	4,4	14,3	3,3			

y la producción de sedimentos de toda la cuenca, por eso es el que presentó la mayor producción (126.5 Mg año⁻¹).

Al realizar un análisis global de la producción de sedimentos de la cuenca, con un sistema de siembra directa con rotación Trigo/ Soja de segunda - Maíz - Soja, simulado para 8 años (2006-2013), el modelo WEPP estimó un valor de pérdida total de suelo por erosión de 4.8 Mg ha⁻¹año⁻¹ (**Tabla 2c**). Este valor se encuentra por debajo de los límites tolerables propuestos por los diversos autores citados anteriormente (Hays & Clark, 1941; Smith, 1941; Browning *et al.*, 1947; Puentes, 1981; Montgomery, 2007). Pérdidas por encima de estos valores indicarían que los suelos no son aptos para agricultura con dicho manejo o que dicho sistema no es sustentable.

Otros autores como Pandey *et al.*, (2008), han reportado que el modelo WEPP produjo resultados satisfactorios cuando se simuló la producción de sedimentos en una cuenca de la India ($R^2 = 0.81$ y $E = 0.78$); Shen *et al.*, (2009) en China, concluyen que WEPP podría utilizarse con una confianza razonable para la cuantificación de la pérdida de suelo con resultados aceptables ($E = 0.84$). Liu *et al.* (1997), evaluaron 15 cuencas hidrográficas en EE.UU, y encontraron un buen ajuste entre la producción de sedimento medido y estimada, con valores de $R^2 = 0.91$; y Cecilio *et al.* (2004) en Brasil concluyeron que WEPP predijo satisfactoriamente la pérdida de suelo para las condiciones de praderas.

Simulación de diferentes escenarios de manejo de la cuenca para evaluar la mejor estrategia productiva desde el punto de vista de la conservación del suelo

Escurrimiento de la cuenca para diferentes rotaciones

En la **Tabla 3** se observan los resultados de escurrimientos obtenidos con WEPP para los diferentes lotes y canales en las diferentes rotaciones de cultivos, comparadas con la actual de la cuenca.

En soja continua, la cual tiene el 100% de participación relativa de este cultivo en la rotación, las pérdidas de agua promedio en los 6 lotes fueron 75% superiores a la rotación actual, mientras que en los canales 1, 2 y 3, que tienen en cuenta el aporte de sus respectivos lotes, escurrió 73% más. El monocultivo de soja perdió por escurrimiento, a nivel de cuenca, 118 mm más de agua ha⁻¹ (77%) que la rotación actual.

La rotación trigo/soja 2^a y monocultivo de maíz, presentaron un escurrimiento similar al manejo actual, no superando el 10% el aumento en el agua perdida (9 y 5%, respectivamente), tanto para lotes y canales.

El maíz continuo fue levemente mejor en cuanto a la captación de agua, seguramente debido a que su volumen de biomasa viva es superior a la de Trigo/Soja, como se observa en la figura 5 a y b para los 8 años de simulación, y también a que el maíz presenta un elevado aporte de rastrojos que se degradan más lentamente en el lapso de tiempo que el suelo permanece sin cultivo, desde

Tabla 3. Estimación del escurrimiento en la cuenca con WEPP para diferentes rotaciones en lotes y canales. H: lotes, C: canales, I: alcantarilla, CC: cultivo de cobertura.

Table 3. WEPP estimated water runoff in the watershed for different crop rotations in fields (H), channels (C), and culvert (I). CC: cover crop.

Lote	Superficie (ha)	Rotación real		Simulaciones		
		Mz-Sj-Tr/Sj	Sj continua	Tr/Sj	Mz continuo	CC/Mz-Sj-Tr/Sj
Escurrimento por lote (mm ha ⁻¹)						
H 1	5.9	176.1	318.4	193.2	185.4	170.6
H 2	5.2	183.9	329.4	198.1	192.2	175.7
H 3	2.6	190.9	337.9	206.7	201.0	184.3
H 4	6.2	169.5	305.5	188.1	176.2	165.0
H 5	1.1	214.1	357.7	232.8	224.6	203.5
H 6	4.4	179.4	319.2	194.2	189.1	172.7
Escurrimento por canal (mm ha ⁻¹)						
C 1 (H6)	4.4	181.1	305.0	194.9	190.3	175.5
C 2 (H4+H5)	7.3	174.4	304.2	192.3	181.3	169.7
C 3 (H3)	2.6	185.1	317.8	199.9	194.4	179.7
I 1 (C1+C2+C3)	14.2	145.6	259.4	161.8	152.7	141.4
Escurrimento de la Cuenca (mm ha ⁻¹)						
Total (C4)	26.4	153.0	271.3	168.1	160.4	148.2

fin de abril a principios de septiembre (**Figura 5c y d**).

En cambio, en la rotación trigo/soja 2^a se observaron valores de escurrimiento cercanos al 10% mayores a la rotación actual, esto se debe a que si bien el cultivo de trigo aporta gran volumen de biomasa en períodos de altas intensidades de precipitación (septiembre-octubre), la soja de segunda deja al suelo con escasa cobertura en abril-mayo (**Figura 5b y d**), donde se registra el otro pico de intensidad de precipitaciones para la región. Esta diferencia en biomasa y rastrojos se refleja en el leve aumento del escurrimiento por parte del manejo trigo/soja 2^a (15 mm) con respecto a maíz continuo (7 mm), ambos comparados con la rotación actual (**Figura 5e y f**).

La rotación donde se incorporan cultivos de cobertura presentó menores pérdidas de agua por escurrimiento que la rotación actual, si bien la mejora en la infiltración es menor al 4%, esto se debe principalmente al efecto de la biomasa de cobertura verde después de la soja de segunda.

Al analizar estadísticamente el volumen escurrido, observamos que hay diferencia significativa entre las 5 rotaciones evaluadas (**Figura 6**), sien-

do el monocultivo de soja el que más diferencia presenta. En las cuatro rotaciones restantes los volúmenes escurridos son similares numéricamente, no superando los 25 los mm ha⁻¹ entre los extremos (178.6 y 202.2 mm ha⁻¹). El análisis estadístico nos indica que hay diferencias significativas entre los volúmenes escurridos, siendo la rotación que tiene mayor tiempo el suelo cubierto (CC/Mz-Sj-Tr/Sj) la que presenta el menor escurrimiento.

Producción de sedimentos de la cuenca para diferentes rotaciones

Siguiendo con el análisis del efecto de las diferentes rotaciones de cultivos en la cantidad de suelo perdido por erosión hídrica, observamos que el modelo WEPP estimó para soja continua, una producción promedio de sedimentos en los 6 lotes 5.2 veces mayor, en tanto para los canales fue 2.7 veces mayor, con respecto a la rotación actual (**Tabla 4**). En promedio, la cuenca perdió con el monocultivo de soja 29.9 Mg ha⁻¹año⁻¹ vs los 4.8 Mg ha⁻¹año⁻¹ de la rotación actual, superando así ampliamente los diferentes valores límites de tolerancia propuestos por diversos autores

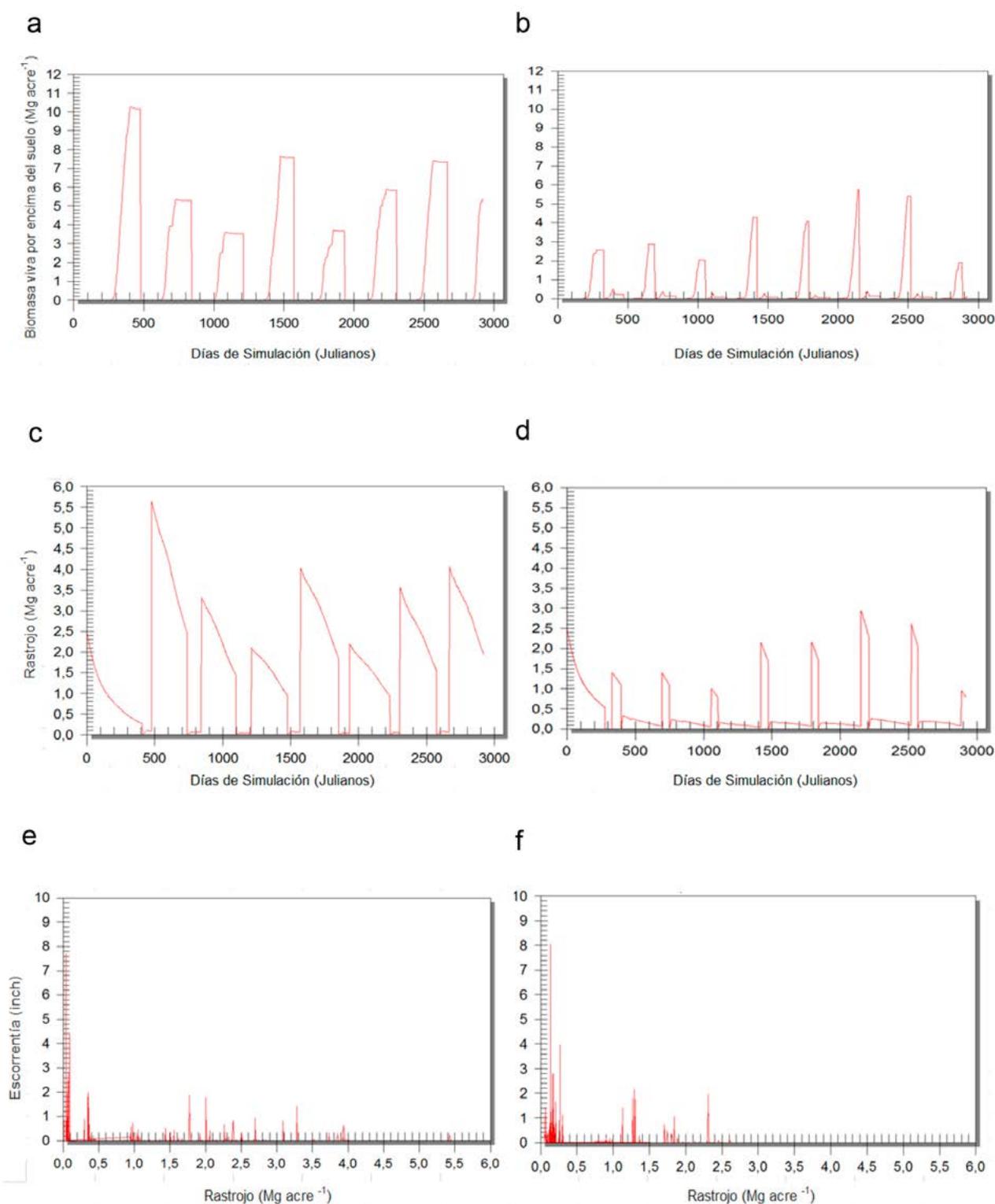


Figura 5. Captura de pantalla de las salidas de simulaciones del modelo WEPP para los 8 años de rotación para: a- biomasa viva sobre el suelo en Maíz continuo, b- en la rotación Trigo/Soja, c- aporte de rastrojos en Maíz continuo, d- aporte de rastrojos en Trigo/Soja, e- relación entre la distribución de rastrojos y la escorrentía para Maíz continuo y f- rotación Trigo/Soja.

Figure 5. Screenshot of WEPP model simulations outputs for the 8 year period of crop rotation for: a- living aboveground biomass in continuous corn, b- living aboveground biomass in Wheat/Soybean rotation, c- crop residues in continuous corn, d- crop residues in Wheat/Soybean, e-relationship between stubble distribution and runoff for continuous maize and Wheat/Soybean rotation.

Figura 6. Estimación de escurrimiento con el modelo WEPP para la rotación Sj continua, Tr/Sj, Mz continuo, Mz-Sj-Tr/Sj y CC/Mz-Sj-Tr/Sj. Letras distintas indican diferencia significativa en el escurrimiento medio estimado para cada rotación (Tukey, $\alpha < 0.05$). Sjcont: Soja continua; Tr/Sj: Trigo/Soja; Mzcont: Maíz continuo; CC: Cultivo de Cobertura.

Figure 6. WEPP model estimation of runoff for the crop rotations evaluated: Sj continuous, Tr/Sj, Mz continuous, Mz-Sj-Tr/Sj and CC/Mz-Sj-Tr/Sj. Different letters indicate significant differences of estimated runoff means in each crop rotations (Tukey, $\alpha < 0.05$). Sjcont: Continuous Soybeans; Tr/Sj: Wheat/ Soybeans; Mzcont: Maize continuous; CC: Cover crop.

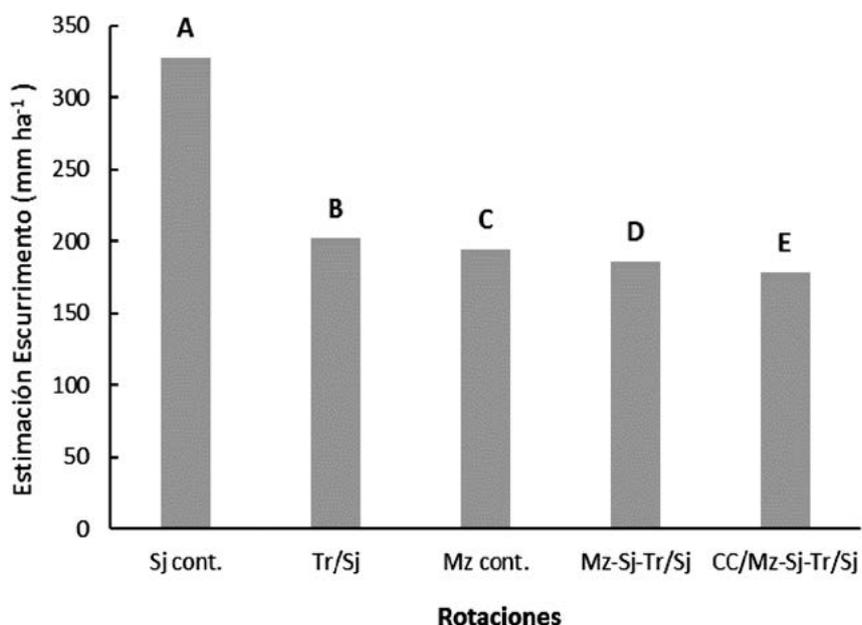


Tabla 4. Estimación de producción de sedimento en la cuenca con WEPP para diferentes rotaciones en lotes y canales. H: lotes, C: canales, I: alcantarilla, CC: cultivo de cobertura.

Table 4. WEPP estimation of sediment yield in the watershed for different crop rotations in fields (H), channels (C), and culvert (I). CC: cover crop.

Lote	Superficie (ha)	Rotación real	Simulaciones			
		Mz-Sj-Tr/Sj	Sj continua	Tr/Sj	Mz continuo	CC/Mz-Sj-Tr/Sj
Pérdida de Suelo por lote (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)						
H 1	5.9	6.2	47.6	4.1	7.2	5.4
H 2	5.2	7.4	56.4	4.9	8.6	6.3
H 3	2.6	3.3	17.6	3.2	3.6	3.0
H 4	6.2	3.3	21.9	2.6	3.6	3.0
H 5	1.1	3.7	14.4	3.8	3.9	3.3
H 6	4.4	3.3	19.7	2.8	3.6	2.9
Pérdida de Suelo por canal (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)						
C 1 (H6)	4.4	4.9	17.3	4.4	5.3	4.5
C 2 (H4+H5)	7.3	4.4	13.9	3.9	4.7	4.2
C 3 (H3)	2.6	3.2	14.5	3.1	3.5	3.0
I 1 (C1+C2+C3)	14.2	1.5	5.3	1.2	1.6	1.4
Pérdida de Suelo en la cuenca (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)						
Total (C4)	26.43	4.8	29.9	3.3	5.6	4.2

(Hays & Clark, 1941; Smith, 1941; Browning *et al.*, 1947; Puentes, 1981; Montgomery, 2007).

En la rotación de maíz continuo, el modelo estimó que se perdió, en promedio para la cuenca, 18% más de sedimento que con la rotación actual, la producción de sedimentos correspondió principalmente a la erosión de los lotes (11%) y, en menor medida, de los canales (7%).

Tanto en la rotación trigo/soja 2ª, como la que incorpora cultivo de cobertura, el modelo estimó que se perdió menos suelo que en la rotación actual, 11 y 7%, respectivamente. Esto se debe a que en dichas rotaciones el suelo se encuentra cubierto durante mayor periodo de tiempo con rastrojo o con biomasa viva (Tabla 4).

Las pérdidas de suelo estimadas en las distintas rotaciones fueron estadísticamente diferentes, siendo monocultivo de soja la que presentó los mayores valores, mientras que las rotaciones restantes no mostraron diferencias entre sí (Figura 7). Ninguna de las rotaciones restantes superó los 6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de suelo perdido. Las rotaciones Mz continuo y Mz-Sj-Tr/Sj perdieron 5.1 y 4.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Las menores pérdidas de suelo se registraron en las rotaciones Tr/Sj y CC/Mz-Sj-Tr/Sj, por debajo de 4 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Al examinar los valores de escurrimiento y de producción de sedimentos en la cuenca, se observó que el monocultivo de soja es el que presentó mayor pérdida de agua por escurrimiento y una

mayor pérdida de suelo, comparando las 5 rotaciones evaluadas (Figura 8). Esto pudo deberse a que, a grandes volúmenes de agua escurrida, la erosión se encauzó provocando además de erosión laminar, erosión en surcos y transportando así mayor cantidad de sedimentos.

Al considerar el resto de las rotaciones, observamos que el aumento en el escurrimiento de agua no significó necesariamente aumentos de la pérdida de suelo, indicando que el modelo WEPP presentó una mayor sensibilidad para el cálculo del escurrimiento, donde existieron diferencias significativas entre todos los tratamientos (Figura 6), que para la producción de sedimentos, donde no hubo diferencias significativas entre las rotaciones (Figura 7), a excepción del monocultivo de soja.

Cabe aclarar que las estimaciones de producción de sedimentos realizadas con el modelo WEPP no se contrastaron con valores de erosión medidos (valores de referencia). A pesar de esto, para tener una idea más acabada de la precisión de los resultados encontrados, en un estudio realizado por Gvozdenovich *et al.* (2017b), en parcelas de escurrimiento sobre el mismo suelo que la cuenca, informaron que el modelo WEPP mostró una alta eficiencia de estimación de sedimentos para monocultivo de soja ($E = 0.50$ para soja a 70 cm entre hileras y $E = 0.58$, para soja a 35 cm), al igual que para maíz continuo, ($R^2 = 0.93$ y $E = 0.61$).

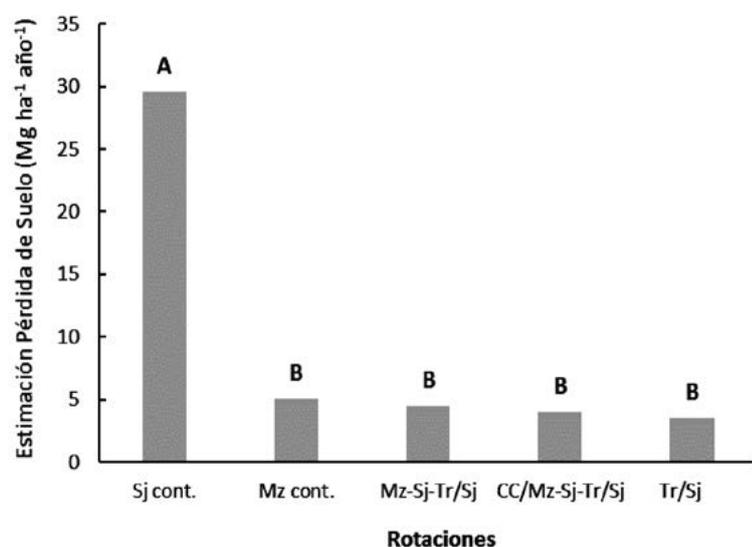


Figura 7. Estimación de Pérdida de Suelo con el modelo WEPP para la rotación Sj continua, Tr/Sj, Mz continuo, Mz-Sj-Tr/Sj y CC/Mz-Sj-Tr/Sj. Letras distintas indican diferencia significativa en la estimación de escurrimiento para cada rotación (Tukey, $\alpha < 0.05$). Sj cont: Soja continua; Tr/Sj: Trigo/Soja; Mzcont: Maíz continuo; CC: Cultivo de Cobertura.

Figure 7. WEPP Model estimation of Soil Loss for crop rotations evaluated Sj continuous, Tr/Sj, Mz continuous, Mz-Sj-Tr/Sj and CC/Mz-Sj-Tr/Sj. Different letters indicate significant difference in the estimated water runoff mean for each crop rotation (Tukey, $\alpha < 0.05$). Sj cont: Continuous Soybeans; Tr / Sj: Wheat/Soybeans; Mzcont: Maize continuous; CC: Cover crop.

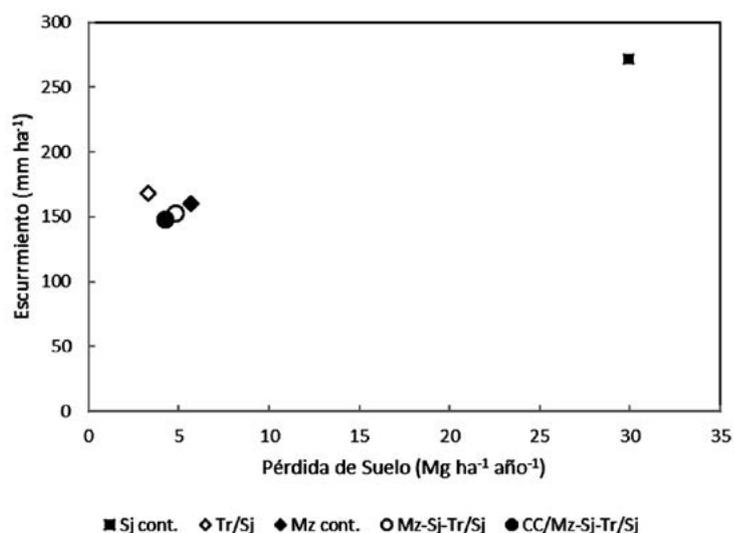


Figura 8. Relación entre la pérdida de suelo y el escurrimiento para Sj continua, Tr/Sj, Mz continuo, Mz-Sj-Tr/Sj y CC/Mz-Sj-Tr/Sj. Sj cont: Soja continua; Tr/Sj: Trigo/Soja; Mz cont: Maíz continuo; CC: Cultivo de Cobertura.

Figure 8. Relationship between soil loss and water runoff for Sj continuous, Tr/Sj, Mz continuous, Mz-Sj-Tr/Sj and CC/Mz-Sj-Tr/Sj. Sj cont: Continuous Soybeans; Tr/Sj: Wheat/Soybeans; Mz cont: continuous Maize; CC: cover crop.

CONCLUSIÓN

En general, el escurrimiento simulado por el modelo WEPP para esta cuenca agrícola en los dos años analizados fue satisfactorio ($R^2 = 0.79$ y $E = 0.66$) comparado con los datos de escurrimiento medidos. En particular, en años lluviosos, como fue 2012, WEPP simuló satisfactoriamente el escurrimiento, mientras que en un año con precipitaciones por debajo de la media histórica, 2013, WEPP mostró baja eficiencia.

La producción de sedimento promedio estimada para la cuenca mediante el modelo WEPP fue de $4,8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Con el manejo actual (Trigo/Soja 2^a-Maíz-Soja) la cuenca agrícola evaluada no presentó síntomas visibles de erosión hídrica, lo cual indicaría que la pérdida de suelo estimada mediante WEPP fue precisa, ya que el valor no superó los límites mínimos tolerables propuestos.

La rotación donde se incorporó cultivo de cobertura redujo la pérdida de agua por escurrimiento en comparación con la rotación actual. El modelo WEPP estimó que el monocultivo de soja es el que mayor escurrimiento y pérdida de suelo ocasionó, superando los 320 mm ha^{-1} y los $25 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente. En el resto de las rotaciones, el modelo WEPP presentó una mayor sensibilidad para estimar escurrimiento, el cual no significó necesariamente aumentos de la pérdida de suelo.

El modelo WEPP fue capaz de representar la variabilidad de cobertura del suelo, con una correcta estimación del escurrimiento y de pro-

ducción de sedimentos, al permitir diferenciar situaciones contrastantes como el monocultivo de soja y tratamientos con rotaciones de cultivos que mantuvieron una mayor cobertura del suelo. Desde el punto de vista de la conservación del suelo, las mejores estrategias productivas fueron aquellas que mantuvieron cubierto el suelo en los periodos de alta intensidad de las precipitaciones.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración del Ing. Agr. Dr. Marcelo Wilson en el aporte de los datos de la cuenca y discusión, y a la Ing. Agr. Carolina Gregorutti en el análisis de estadísticos de los datos y discusión.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen PB. 1981. Measurement and prediction of erosion and sediment yield. Agricultural Reviews and Manuals, S-15, U.S. Department of Agriculture, New Orleans, LA, 1981.
- 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.
- Ares, MG; M Varni; & CI Chagas. 2014. Erosión Hídrica En Una Microcuenca Agrícola Bajo Siembra Directa Del Centro De La Provincia De Buenos Aires. Ciencia del Suelo, 32(2), 259-270.
- Ascough, II; C Baffaut; MA Nearing & DC Flanagan. 1995. Watershed model channel hydrology and erosion processes. USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope

- Profile and Watershed Model Documentation, edited by DC Flanagan and MA Nearing.
- 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.
- Behrends Kraemer, F; CI Chagas; G Vázquez Amábile; EA Palacín; OJ Santanatoglia; MG Castiglioni & MJ Massobrio. 2011. Aplicación del Modelo Hidrológico-Swat-en una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo*, 29(1), 75-82.
- Browning, GM, Parish, CL & J Glass. 1947. Method for determining the use of limitations of rotation and conservation practices in the control of soil erosion in Iowa. *Journal of the American Society of agronomy*.
- Castiglioni, MG; CI Chagas; MJ Massobrio; OJ Santanatoglia & A Buján. 2006. Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de Pampa Ondulada bajo diferentes sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo*, 24(2), 169-176.
- Cecilio, RA; RG Rodriguez; LGN Baena; FG Oliveira; FF Pruski; AM Stephan & JMA Silva. 2004. Analysis of the RUSLE and WEPP models for a small watershed located in Vicosá, Minas Gerais state, Brazil. In 13th International Soil Conservation Organisation Conference, Brisbane.
- Chagas, CI. 1995. Efectos de la rugosidad superficial, el tamaño de agregados y la estabilidad estructural sobre la erosión entre surcos en un Argiudol. *Ciencia del Suelo*, 13(2), 85-90.
- Chagas, CI; OJ Santanatoglia; MG Castiglioni; MJ Massobrio; A Buján & C Irurtia. 2008. Número de curva de escurrimiento para una microcuenca de Pampa Ondulada bajo labranza convencional y siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 26(1), 63-69.
- Cisneros, J; C Cholaky; A Gutiérrez; J González; M Reynero; A Diez & L Bergesio. 2012. Erosión Hídrica: Principios y Técnicas de Manejo. Editora UniRio. Colección Académico Científico, 74-81.
- 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. URL: <http://www.infostat.com.ar>.
- FADA – Fundación agropecuaria para el desarrollo de Argentina. 2014. Agricultura. La cosecha 2013/14 de la oleaginosa será récord en la Argentina. <http://www.eldiario.com.ar/diario/rural/112899-la-soja-avanza-y-se-deteriora-la-indispensable-rotacion-de-cultivos.htm> [Verificación: octubre 2015].
- Gvozdenovich, JJ; M Pérez Bidegain, PA Barbagelata & LE Novelli. 2017a. Validación del generador climático CLIGEN para predecir erosión en el norte de la pampa argentina. *Ciencia del Suelo*. 35(1): 105-116, 2017.
- Gvozdenovich, JJ; M Pérez Bidegain, LE Novelli & PA Barbagelata. 2017b. ¿Puede WEPP mejorar la predicción de la erosión de suelos respecto a USLE? *Ciencia del Suelo*. 35(2): 259-272, 2017.
- Gvozdenovich, JJ; C Pioto & O Paparotti. 2015. Variación del rendimiento del cultivo de soja debido a la erosión hídrica en Entre Ríos. INTA EEA Paraná Serie Extensión Digital – Actualización Técnica Soja. Pp 45-49.
- Gvozdenovich, JJ & M Marizza. 2013. Sistemas de Información Geográfica y Modelación Hidrológica para evaluar el riesgo de Erosión Hídrica en Diamante, Argentina. *Actas de la Jornada Argentina de Conservación de Suelos*.
- Hays DE & N Clark. 1941. Cropping systems that help control erosion. Bull. 452. Soil Cons. Comm., University Wisconsin Madison.
- 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.
- Lal, R. 1994. Soil erosion: research methods. Ankeny: Soil and Water Conservation Society.
- Liu, BY; MA Nearing; C Baffaut & JC Ascough II. 1997. The WEPP watershed model: III. Comparisons to measured data from small watersheds. *Transactions of the ASAE*, 40(4), 945-952.
- Marelli, H & J Arce. 2006. Conservación sustentable del suelo y el agua. INTA EEA Marcos Juárez. Córdoba. Información para Extensión N° 99. ISSN 0327-697X.
- Montgomery, DR. 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(33), 13268-13272.
- Onstad, CA; RF Piest & KE Saxton. 1976. Watershed erosion model validation for Southwest Iowa. In Proc. 3rd Federal Inter-Agency Sedimentation Conf., 22-34, 22-25. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey.
- Pandey, A; VM Chowdary; BC Mal & M Billib. 2008. Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model. *Journal of Hydrology*, 348(3), 305-319.
- Puentes, R. 1981. A framework for the use of the universal soil loss equation in Uruguay. Doctoral dissertation, Texas A&M University.
- Regoyos Sáinz, MD. 2003. Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo GEOWEPP a dos pequeñas cuencas en

- Madrid. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Renard, KG; GR Foster; GA Weesies & JP Porter. 1991: "Revised Universal Soil Loss Equation". *J. of Soil and Water Conservation, USA*, 46: 30-33.
- Risse, LM; MA Nearing; JM Lafflen & AD Nicks. 1993. Error assessment in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57(3): 825-833.
- Saluzzio, M; JJ Gvozdenovich; A Kinderknecht & J Noir. 2016. Tiempo de concentración para el diseño de terrazas de evacuación. *Actas del XXV Congreso argentino de la Ciencia del Suelo. Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo.*
- Santanatoglia, OJ; CI Chagas & EA Rienzi. 1996. Características de los sedimentos producidos por erosión hídrica en una microcuenca del arroyo del Tala (Provincia de Buenos Aires-Argentina). *Ciencia del Suelo*, 14(1), 42-46.
- Scotta, ES; R Gogo & D Herrera. 1991. Rendimiento de soja con y sin terrazas. En *jornada de información técnica para productores*. INTA EEA Paraná. Pp 8-9.
- Schwab, G; R Frevert; T Edminster & K Barnes. 1966. *Soil and Water Conservation Engineering*. Ed. J. Wiley, Inc. NY, 683 pp.
- Shen, ZY; YW Gong; YH Li; Q Hong; L Xu & RM Liu. 2009. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. *Agricultural Water Management*, 96(10), 1435-1442.
- Smith, DD. 1941. Interpretation of soil conservation data for field use. *Agricultural Engineering*, 22(5), 173-175.
- Williams, IR. 1975. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service (Report S-40), pp. 244-252.
- Williams, JR. 1990. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 329(1255), 421-428.
- Wischmeier, WH. 1972. Upland erosion analysis. In *Environmental Impact on Rivers*, 15-1 to 15-26. Fort Collins, Colo.: H. W. Shen Publisher, CSU.