

EVALUACIÓN DEL MODELO WEPP PARA PREDECIR LA EROSIÓN HÍDRICA EN PASTIZALES SEMIÁRIDOS DEL NORESTE DE LA PATAGONIA

MARCELO P CHARTIER^{1*} & CÉSAR M ROSTAGNO²

1 Cátedra de Ecología General, FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba–CONICET, Vélez Sarsfield 229, CP 5000 Córdoba, Argentina.

2 Unidad de Investigación Ecología Terrestre, CENPAT–CONICET, Boulevard Brown 2915, CP 9120 Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

* Correo electrónico: marcechartier@yahoo.com.ar

Recibido: 28-11-09

Aceptado: 03-05-00

RESUMEN

Los modelos matemáticos son herramientas útiles para la predicción de las pérdidas de suelo por erosión hídrica. El desarrollo reciente del modelo WEPP y su utilización para evaluar los riesgos de erosión en pastizales naturales ha significado un avance interesante en el campo de la erosión y la conservación de suelos de estos ecosistemas. En este trabajo examinamos la eficiencia del modelo WEPP para predecir los procesos hidrológicos y de erosión del suelo en los pastizales naturales semiáridos del noreste de la provincia de Chubut. Se identificaron tres comunidades de plantas ubicadas a lo largo de un gradiente de degradación del suelo: estepa herbácea con arbustos aislados (EH), estepa herbáceo-arbustiva (EHA) y estepa arbustiva degradada (EA). En cada una de estas comunidades se aplicó una lluvia simulada (100 mm h^{-1} durante 30 min) sobre parcelas de 1 m^2 ($0,6 \times 1,67 \text{ m}$) y se colectó el escurrimiento y los sedimentos totales. A partir de los datos de la condición superficial de cada parcela se estimó el escurrimiento y la producción de sedimentos mediante el modelo WEPP. En este trabajo se observó una baja eficiencia del modelo WEPP para predecir el escurrimiento (Eficiencia, $E = 0,14$) y la erosión del suelo ($E = -0,93$). La predicción del escurrimiento y pérdida de suelo del modelo WEPP mostró mayor sensibilidad a cambios en los parámetros de lluvia y pendiente del terreno y una sensibilidad moderada a cambios en la cobertura, textura, erodabilidad del suelo y conductividad hidráulica efectiva. El escurrimiento y la producción de sedimentos estimados por WEPP fueron significativamente diferentes en las distintas comunidades de plantas ($p < 0,05$). La diferencia entre los valores medios estimados y observados varió en las distintas comunidades. Así, el escurrimiento medio estimado fue un 55,5% más elevado en la EH y la producción de sedimentos fue un 69,6; 62,7 y 17,5% más baja en la EH, EHA y EA, respecto a los valores observados. El uso del modelo WEPP en los ecosistemas de pastizales naturales constituye una importante herramienta para estimar la erosión. Sin embargo, estos resultados sugieren que es necesario calibrar el modelo para las condiciones locales e incorporar una estratificación de los pastizales de acuerdo a las diferentes unidades de suelo y vegetación.

Palabras clave. Modelos de erosión del suelo, análisis de sensibilidad, variabilidad espacial, pastizales naturales, Patagonia.

EVALUATION OF THE WEPP MODEL TO PREDICT SOIL EROSION IN NORTHEASTERN PATAGONIAN RANGELANDS

ABSTRACT

Mathematical models are useful tools to predict soil loss by water erosion. The recent development of the WEPP model and its use in assessing the risks of erosion in rangelands has led to significant advances in the field of erosion and soil conservation of these ecosystems. In this work we examine the efficiency of the WEPP model in predicting the hydrological processes and soil erosion in semiarid rangelands of the northeast Chubut Province. Three plant communities along a soil degradation gradient were identified: grass with scattered shrubs (EH), grass-shrubs (EHA), and degraded shrub steppes (EA). In each of these communities simulated rainfall (100 mm h^{-1} for 30 min) was applied on 1 m^2 ($0.6 \times 1.67 \text{ m}$) plots and total runoff and sediment production were collected. Using the soil surface condition data from each plot, runoff and sediment production were estimated by means of the WEPP model. We found a low efficiency of the WEPP model to predict runoff (Efficiency, $E = 0.14$) and soil erosion ($E = -0.93$). The WEPP-estimated runoff and soil losses showed high sensitivity to changes in rainfall and slope parameters and moderate sensitivity to changes in soil cover, texture, soil erodability and effective hydraulic conductivity. The runoff and sediment production estimated by the WEPP model were significantly different among plant communities ($p < 0.05$). The difference between the estimated and observed mean values varied in the different plant communities: runoff according to the WEPP model was 55.5% greater in the EH and sediment production was 69.6, 62.7 and 17.5% lower, respectively, in the EH, EHA, and EA than the observed values. These results suggest that it is necessary to calibrate the model for local conditions and to incorporate rangeland stratification according to the different soil-vegetation units.

Key words. Soil erosion models, sensitivity analysis, spatial variability, rangelands, Patagonia.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica, inducida y acelerada por efecto del pastoreo, ha sido reconocida como uno de los principales procesos de degradación de los suelos en los ecosistemas áridos y semiáridos (Ares *et al.*, 1990; Bestelmeyer, 2006; Villagra *et al.*, 2009). El mantenimiento a largo plazo de elevadas tasas de erosión representa una de las más importantes causas de cambios irreversibles del suelo y la vegetación de los pastizales naturales (Bestelmeyer *et al.*, 2003; Chartier & Rostagno, 2006). En estos ambientes, el desarrollo de programas de manejo sustentable debe ir acompañado de evaluaciones que reflejen fehacientemente el impacto de las acciones de manejo sobre la estabilidad de los suelos (SRM Task Group, 1995). Con la finalidad de responder a esta necesidad, las agencias de manejo del suelo de algunos países adoptaron diferentes técnicas de evaluación del riesgo de erosión del suelo en los ecosistemas de pastizales naturales (Nearing *et al.*, 1990a). En este sentido, la utilización de los modelos matemáticos se ha convertido en una herramienta útil en la predicción de las pérdidas de suelo por erosión hídrica. Lograr una rápida determinación del riesgo de erosión, acompañada de un monitoreo de las tasas de erosión de suelos, tiene una importancia relevante en torno a la conservación de los recursos, sobre todo donde la pérdida de unos pocos centímetros de suelo puede implicar una pérdida irreversible del potencial productivo de los pastizales áridos y semiáridos (Schlesinger *et al.*, 1990; SRM Task Group, 1995).

El modelo WEPP y la predicción de la erosión hídrica

Conjuntamente al avance de la computación, se ha enfatizado en la necesidad de desarrollar tecnologías basadas en los procesos físicos para predecir y evaluar las tasas de erosión y sedimentación (Lane & Nearing, 1989). En este sentido, en 1985 el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) se abocó a la generación del modelo Water Erosion Prediction Project–WEPP (Nearing *et al.*, 1989; Flanagan & Nearing, 1995) para desarrollar una nueva tecnología de predicción de la erosión del suelo. WEPP es un modelo de simulación continua que permite cuantificar el desprendimiento de las partículas de suelo, su transporte y sedimentación, y está basado en los procesos de infiltración, escurrimiento superficial, crecimiento de las plantas, descomposición de los residuos, labranzas, manejo del ganado, consolidación del suelo y mecanismos de erosión (Flanagan *et al.*, 1995).

Una de las características distintivas del modelo WEPP es que está basado en procesos (físicos e hidrológicos), lo que debería proveerle cierta generalidad o capacidad para representar los mismos procesos bajo un amplio rango de condiciones (Nearing *et al.*, 1989; Nearing *et al.*,

1990a). Por otro lado, en la generación del modelo WEPP se han incluido una gama diversa de vegetación y características del suelo para desarrollar una ecuación general que describa el proceso de erosión en el espectro de diferentes tipos de pastizales (Simanton *et al.*, 1987; Simanton & Renard, 1992; Alberts *et al.*, 1995). La universalidad del modelo pretende ampliar su aplicación práctica en los ambientes de pastizales (Lafren *et al.*, 1991; Pierson *et al.*, 2002).

Aplicación del modelo WEPP en ambientes de pastizales

El avance en el modelado de los procesos de erosión del suelo en ambientes de pastizales naturales ha traído aparejado una mayor complejidad del modelo WEPP, sin embargo la precisión en la simulación muchas veces es perdida debido a la estimación de gran cantidad de parámetros incluidos en el modelo (Loague & Freeze, 1985; DeCousey, 1988; Blackburn & Pierson, 1994). Incluso, la adecuada estimación de los parámetros de los modelos muchas veces se ve limitada por la gran variación espacial y temporal de los procesos de erosión en los pastizales naturales (Blackburn *et al.*, 1990; Wilcox *et al.*, 1992; Pierson *et al.*, 2002). El mejoramiento en las técnicas de estimación de los parámetros del modelo y un mayor entendimiento de la variación inducida por la vegetación y el suelo son necesarios para incrementar la capacidad predictiva de la erosión en los pastizales naturales (Blackburn *et al.*, 1992).

La información publicada sobre la evaluación o aplicación del modelo WEPP en ambientes de pastizales de la Argentina es realmente escasa. Si bien se han realizado trabajos tendientes a explorar el comportamiento de algunos parámetros, hasta el momento no se ha utilizado el modelo WEPP para determinar el riesgo de erosión del suelo en un ambiente determinado. Echeverría *et al.* (2006) utilizaron lluvias simuladas para evaluar el parámetro de erodabilidad entre surcos (K_i) bajo condiciones de suelos cultivados del sur de la Región Pampeana. Estos autores encontraron que los valores de K_i estimados por WEPP fueron entre 2,5 y 7 veces mayores respecto de los valores medidos experimentalmente. Otros autores han encontrado resultados similares en un estudio realizado en el área cultivada pedemontana del suroeste de la provincia de Córdoba, donde se aplicó el modelo WEPP para verificar el efecto de diferentes valores del parámetro de conductividad hidráulica efectiva (K_e) sobre el escurrimiento y producción de sedimentos (Becker *et al.*, 2006). En este trabajo se reportó que el escurrimiento y la pérdida de suelo estimados estuvieron fuertemente correlacionados con los valores de K_e . Cuando se utilizaron valores de K_e estimados a partir de las ecuaciones o

calculados automáticamente por WEPP se observaron valores de escurrimiento y pérdidas de suelo mayores respecto de cuando se utilizaron valores de K_e medidos a campo.

El objetivo del presente trabajo fue examinar la eficiencia del modelo WEPP para predecir los procesos hidrológicos y de erosión del suelo en los ambientes de pastizales naturales semiáridos del noreste de Chubut. Además, se examinó la sensibilidad del escurrimiento y la producción de sedimentos estimados a la variabilidad inducida por la vegetación y las condiciones superficiales del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en Punta Ninfas, en el noreste de la provincia de Chubut (43° 00' S, 64° 30' W). El clima de esta región es árido y ventoso, con una precipitación media anual de 258 mm en el período 1995-2004 (Chartier & Rostagno, 2006). La temperatura media anual es de 12,6 °C y la velocidad media del viento es de 4,6 m s⁻¹ (Barros, 1983).

El suelo dominante en el área de estudio es un Calciargid xérico con un Haplocalcid xérico como subdominante (Soil Survey Staff, 1999). El Calciargid xérico es un suelo moderadamente profundo, con un horizonte A de espesor variable (10-25 cm) y textura arena franca a franca arenosa, un horizonte 2Bt (10-15 cm de espesor) arcillo arenoso y un horizonte 2Btk de 20 a 30 cm de espesor, con un drenaje moderado y una permeabilidad moderada a baja. En el horizonte argílico dominan las arcillas expandibles del grupo de las esmectitas (Bouza *et al.*, 2007). El Haplocalcid xérico es un suelo moderadamente profundo, con un horizonte A de 30 a 40 cm de espesor, de textura arena franca a franca arenosa y un horizonte 2Bk de 15 a 20 cm de espesor, bien drenado y con una permeabilidad moderada.

La principal fisonomía del área es un mosaico de parches de estepa herbácea con arbustos aislados que alternan con parches de estepa arbustiva baja, de 50 a 150 cm de altura. Las principales especies de arbustos son *Chuquiraga avellanadae* (quilembai), *Nassauvia fueguina* (colapiche) y *Mulinum spinosum* (neneo). Las especies herbáceas dominantes son *Nassella tenuis* (flechilla), *Jarava speciosa* y *Piptochaetium napostaense* (flechilla negra). La cobertura vegetal varía entre un 35 y 65% pero puede incrementarse substancialmente en el período lluvioso (otoño-invierno), cuando las plantas anuales contribuyen a la cobertura total (Beeskow *et al.*, 1995). La producción ovina es la principal actividad económica y es practicada bajo un esquema de pastoreo continuo con cargas moderadas (0,25 a 0,30 ovinos ha⁻¹), en cuadros de gran tamaño que comúnmente exceden las 2.500 hectáreas (Parizek *et al.*, 2002).

Simulación de lluvia y parámetros del modelo WEPP

Las simulaciones de lluvia se realizaron en el período 2003-2005 sobre un total de 120 parcelas de escurrimiento de 1 m² (0,60

x 1,67 m). Las parcelas se ubicaron al azar en las tres principales comunidades de plantas: 32 parcelas en una estepa herbácea con arbustos aislados (EH), 56 parcelas en una estepa herbácea-arbustiva (EHA) y 32 parcelas en una estepa arbustiva (EA). El mayor número de parcelas en la comunidad EHA responde a una mayor variabilidad observada en las condiciones superficiales del suelo. Estas comunidades de plantas se encontraron asociadas espacialmente a lo largo del gradiente de degradación del suelo, desde la condición más conservada representada por la comunidad EH hasta la condición más degradada representada por la EA. En el experimento se empleó un simulador de lluvia de cono lleno (Rostagno & Garayzar, 1995) y se aplicó una lluvia de 100 mm h⁻¹ de intensidad y 30 minutos de duración. En el área de estudio, un evento de lluvia de estas características tiene un período de recurrencia de 100 años (Vicenty *et al.*, 1984). Este simulador produce una energía cinética equivalente al 66% respecto de un evento de lluvia natural de la misma intensidad. Nosotros consideramos que una lluvia de estas características puede ser suficiente para discriminar los parches de suelo estables de aquellos inestables. El escurrimiento fue recogido a intervalos de 5 minutos en contenedores individuales para cada parcela y posteriormente se determinó el volumen. La producción de sedimentos fue obtenida por decantación (72 horas). Una vez eliminado el sobrenadante los sedimentos fueron secados por 48 horas a 60 °C y posteriormente pesados.

Previo a la aplicación de las lluvias simuladas se realizó una caracterización de las condiciones superficiales de cada parcela de escurrimiento y se tomó una muestra de suelo a una profundidad de 0-5 cm en la adyacencia de cada parcela. En la caracterización se determinó la cobertura del suelo y el espesor del horizonte A. En el laboratorio, se determinó la textura de suelo mediante el método del hidrómetro (Bouyoucos, 1965) y la densidad aparente mediante el empleo de un cilindro de 130 cm³ (Blake, 1965). El carbono orgánico se determinó por combustión húmeda (Nelson & Sommers, 1982) y se aplicó el factor de 1,724 para calcular posteriormente el contenido de materia orgánica del suelo. El contenido de humedad a capacidad de campo fue estimado por centrifugación (10 min; 2.440 rpm) de muestras de suelo saturadas (Parizek *et al.*, 2002). El espesor del horizonte A fue determinado por la profundidad al horizonte Bt en una calicata abierta en la adyacencia de cada parcela. Además, se determinó la biomasa de raíces y el contenido de gravas por tamizado (tamiz de 2 mm) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) mediante la saturación de las muestras con acetato de Na 1 N a pH 8,2. La significancia de las diferencias en las medias de las características superficiales y subsuperficiales del suelo entre las comunidades de las plantas (EH, EHA y EA) se corroboraron mediante un análisis de la varianza de una vía (Norusis, 1997). La comparación múltiple de las medias se realizó mediante la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher (LSD). El nivel de significancia fue fijado en 0,05.

A partir de la información proveniente de la caracterización de las parcelas de escurrimiento y de las características de la lluvia simulada se completaron los diferentes archivos requeridos en el modelo WEPP. En la simulación se utilizó la versión WEPP 2006.5 para planos de pendientes, en el modo de simulación de un único evento de lluvia (WEPP, 2006). La lluvia simulada se aplicó sobre un suelo con muy bajo contenido de humedad por lo que en el modelo se consideró una humedad inicial promedio del 5%.

Análisis estadístico de los datos

Las predicciones del modelo WEPP para el volumen escurrido y la producción de sedimentos fueron comparadas con los valores medidos a campo sobre las parcelas de escurrimiento. La calidad de la predicción se determinó mediante el cálculo de un coeficiente de eficiencia de ajuste del modelo (Nash & Sutcliffe, 1970):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)^2}$$

donde, E es la eficiencia del modelo, Q_{oi} representa el valor observado del evento i , Q_{ci} es el valor computado del evento i y Q_o es la media de los valores observados. Este coeficiente puede variar entre $-\infty$ a 1. Una eficiencia de 1 ($E = 1$) corresponde a un ajuste perfecto entre los valores observados y estimados. Una eficiencia de 0 ($E = 0$) indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, mientras que una eficiencia negativa indica que la media observada es mejor que la predicción obtenida a partir del modelo.

Posteriormente, los valores de escurrimiento y producción de sedimentos fueron agrupados según las distintas comunidades de plantas identificadas en el pastizal: EH, EHA y EA. La significancia de las diferencias en las medias del escurrimiento y la producción de sedimentos estimados para cada comunidad fueron evaluadas por medio de un análisis de la varianza de una vía (Norusis, 1997). La comparación múltiple de las medias se realizó mediante la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher (LSD). El nivel de significancia fue fijado en 0,05.

Análisis de sensibilidad del modelo WEPP

El análisis de sensibilidad evalúa la magnitud relativa de cambio en la respuesta del modelo en función del cambio en el valor de un determinado parámetro de entrada (Nearing *et al.*, 1990b). En el presente estudio se evaluó la sensibilidad según el rango de variación observado a campo para cada parámetro. En la medida en que se evaluó la sensibilidad de un determinado parámetro, las restantes variables de entrada del modelo (parámetros de lluvia, de pendiente, de cobertura y físico-químicos del suelo) fueron mantenidos en los valores medios observados. El coeficiente de sensibilidad S está dado por la ecuación:

$$S = \frac{(R_2 - R_1) / R_{12}}{(Pe_2 - Pe_1) / Pe_{12}}$$

donde, R_1 y R_2 son el valor más bajo y más alto en la respuesta del modelo (escurrimiento o producción de sedimentos) para los valores más bajo y más alto de los parámetros de entrada (Pe_1 y Pe_2), según el rango de variación observado para cada variable analizada. R_{12} es el promedio de los dos resultados del modelo y Pe_{12} es el promedio de Pe_1 y Pe_2 . El parámetro S representa un cambio relativo normalizado en las variables permitiendo de esta manera la comparación de las sensibilidades de los parámetros de entrada,

los cuales generalmente tienen distintos órdenes de magnitud (Nearing *et al.*, 1990b). Valores de S cercanos a cero indicarían que el modelo es poco sensible a cambios en el parámetro de entrada evaluado. Por el contrario, valores positivos de S indicarían incrementos en la respuesta del modelo en la medida que aumenta el valor del parámetro de entrada, y lo contrario ocurriría con valores negativos de S. El valor absoluto del parámetro de sensibilidad indicaría el grado del cambio o importancia de la sensibilidad.

RESULTADOS

Las principales comunidades de plantas identificadas dentro del pastizal presentaron valores contrastantes en cuanto a las características superficiales y subsuperficiales del suelo (Tabla 1). Las coberturas herbácea y de mantillo presentaron los valores más elevados en la comunidad EH y disminuyeron hacia la EA. De manera opuesta, en ésta última comunidad se registraron los máximos valores de cobertura de gravas. La comunidad EHA presentó valores intermedios de cobertura con respecto a las restantes comunidades. Respecto de las características físico-químicas del suelo, la proporción de arena y limo, así como el espesor del horizonte superficial, la biomasa de raíces, el contenido de carbono orgánico y la conductividad hidráulica efectiva presentaron los mayores valores en la comunidad EH y los menores en la comunidad EA. Por el contrario, la fracción de arcilla estuvo asociada con el contenido de humedad a capacidad de campo, la capacidad de intercambio catiónico, la densidad aparente y la erodabilidad del suelo; estas variables presentaron los menores valores en la comunidad EH comparado con las comunidades EHA y EA.

El contraste entre el volumen escurrido y la producción de sedimentos estimados por el modelo y los valores observados a campo se presentan en la Figura 1. El modelo WEPP predijo el escurrimiento con una mayor eficiencia ($E = 0,14$; Fig. 1A) comparado a la producción de sedimentos ($E = -0,93$; Fig. 1B). Sin embargo, el ajuste del modelo mejoró notablemente cuando los valores estimados por el modelo y aquellos observados a campo fueron promediados para cada comunidad de plantas, tanto para el escurrimiento (Fig. 2A) como para la producción de sedimentos (Fig. 2B). Los valores medios estimados mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las comunidades EH y EHA respecto de EA en el escurrimiento, y entre las tres comunidades de plantas evaluadas respecto de la producción de sedimentos ($p < 0,05$).

Análisis de sensibilidad del modelo WEPP

El análisis de sensibilidad mostró que el escurrimiento y la producción de sedimentos estimados por el modelo WEPP fueron fuertemente sensibles a la lámina aplicada,

Tabla 1. Valores medios (errores estándar) de diferentes características del suelo (0-5 cm) para cada comunidad del pastizal: estepa herbácea (EH), estepa herbáceo-arbustiva (EHA) y estepa arbustiva (EA).

Table 1. Mean values (standard errors) of different soil characteristics (0-5 cm) for each rangeland plant community: (EH) grass steppe, (EHA) grass-shrub steppe, and (EA) shrub steppe.

Características superficiales y subsuperficiales del suelo	Comunidades de plantas		
	EH	EHA	EA
Cobertura herbácea (%)	44,1 (2,4) a	16,9 (0,9) b	5,3 (1,1) c
Cobertura basal herbácea (%)	10,8 (0,6) a	4,2 (0,2) b	1,3 (0,3) b
Cobertura de mantillo (%)	35,2 (2,5) a	20,7 (1,6) b	4,8 (1,1) c
Cobertura de gravas (%)	0,5 (0,1) a	5,9 (0,9) b	46,5 (2,4) c
Arena (%)	72,2 (0,8) a	73,1 (0,5) a	64,8 (1,4) b
Limo (%)	22,1 (0,7) a	18,9 (0,3) b	17,7 (0,8) b
Arcilla (%)	5,7 (0,4) a	7,9 (0,4) b	15,8 (1,4) c
Contenido de gravas (%)	6,2 (0,8) a	12,7 (0,8) b	11,0 (0,9) b
Biomasa de raíces (0-10 cm) (kg m ⁻²)	0,4 (0,05)a	0,2 (0,05)b	0,1 (0,02)c
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1,2 (0,02)a	1,3 (0,01)b	1,3 (0,02)b
Humedad a capacidad de campo (%)	18,1 (0,6) a	18,4 (0,4) a	29,8 (1,4) b
Espesor del horizonte A (cm)	26,4 (1,1) a	16,9 (1,2) b	3,6 (0,4) c
Materia orgánica (%)	1,9 (0,11)a	1,2 (0,04)b	1,2 (0,06)b
Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 g)	10,7 (0,4) a	9,9 (0,3) a	13,2 (0,8) b
Erodabilidad entre surcos $K_i \times 10^5$ (kg s m ⁻⁴)	1,7 (0,08)a	1,8 (0,06)a	2,3 (0,13)b
Erodabilidad en surcos $K_r \times 10^{-3}$ (s m ⁻¹)	0,5 (0,02)a	0,5 (0,01)a	0,7 (0,04)b
Tensión crítica de corte hidráulico t_c (Pa)	0,8 (0,05)a	0,6 (0,03)a	1,0 (0,07)b
Conductividad hidráulica efectiva K_e (mm h ⁻¹)	14,3 (0,8) a	14,2 (0,4) a	4,7 (0,6) b

Valores medios con letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$; $n = 120$) entre las comunidades de plantas.

Mean values with different letters indicate significant differences ($p < 0,05$; $n = 120$) among plant communities.

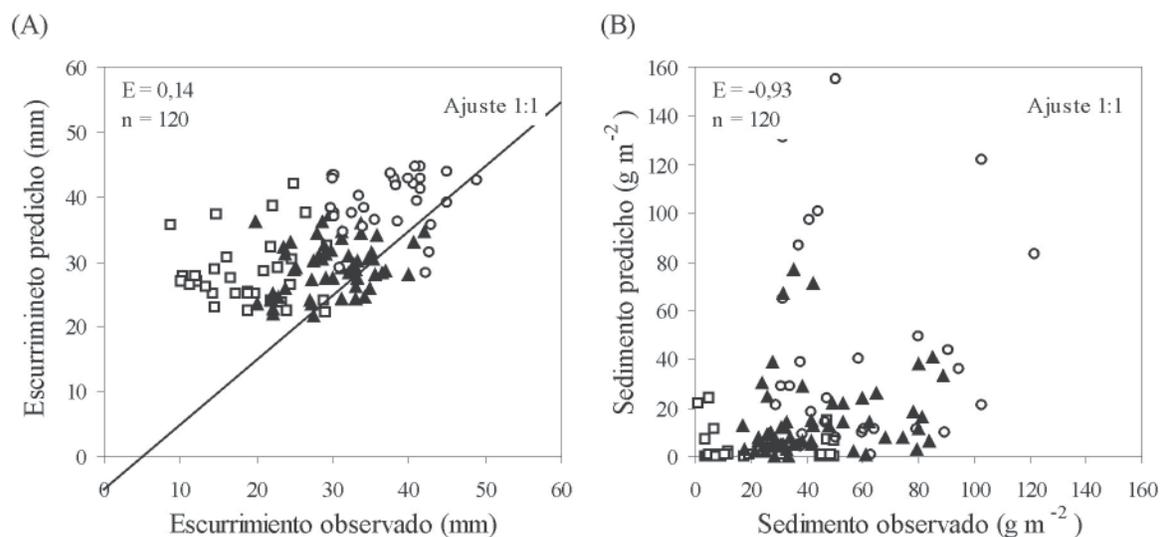


Figura 1. Comparación de los valores observados y estimados por WEPP de escurrimiento (A) y producción de sedimentos (B) para cada parcela ubicada en el pastizal. E es la eficiencia en el ajuste del modelo y n es el número de parcelas. Diferentes símbolos en la figura distinguen las distintas comunidades de plantas: (□) estepa herbácea, (▲) estepa herbáceo-arbustiva y (○) estepa arbustiva.

Figure 1. Comparison of observed and WEPP estimated runoff (A) and sediment production (B) for each individual plot located in the rangeland. E is the efficiency of the model and n is the number of samples. Different symbols in the figure distinguish different plant communities: (□) grass steppe, (▲) grass-shrub steppe, and (○) shrub steppe.

Figura 2. Comparación de los valores medios (errores estándar) observados y estimados por WEPP de escurrimiento (A) y producción de sedimentos (B) para cada comunidad de plantas del pastizal. Diferentes símbolos en la figura distinguen las distintas comunidades de plantas: (□) estepa herbácea, (▲) estepa herbáceo-arbustiva y (o) estepa arbustiva. Las medias de comunidades con letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) en el escurrimiento y la producción de sedimentos estimados por el modelo WEPP.

Figure 2. Comparison of mean (standard errors) observed and WEPP estimated runoff (A) and sediment production (B) for each rangeland plant community. Different symbols in the figure distinguish different plant communities: (□) grass steppe, (▲) grass-shrub steppe, and (o) shrub steppe. Plant community means with different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) in the WEPP estimated runoff and sediment production.

Tabla 2. Valores de sensibilidad a los parámetros de lluvia del modelo de erosión WEPP.

Table 2. Sensitivity values for rainfall parameters of the WEPP erosion model.

Parámetros	Valor*	Escurrimiento (mm)	Sedimento (kg m ⁻²)	Sensibilidad (S)	
				Escurrimiento	Sedimento
Precipitación	25	7,45	1		
	40	18,53	5	1,68	2,31
	55	32,62	14		
Intensidad de lluvia	50	16,83	2		
	100	27,71	10	0,50	1,43
	150	28,15	12		

* Unidades: Precipitación (mm) e intensidad de lluvia (mm h⁻¹).

* Units: Precipitation (mm) and intensity (mm h⁻¹).

y en menor grado a la intensidad de lluvia (Tabla 2). El escurrimiento estimado por el modelo WEPP se mostró insensible frente a cambios en la pendiente (Tabla 3) y en la cobertura del suelo (Tabla 4). Por el contrario, la producción de sedimentos mostró una elevada sensibilidad

a la pendiente, resultando en una mayor cantidad de sedimentos removidos ante incrementos en el largo e inclinación de la pendiente.

Por otra parte, la producción de sedimentos mostró una elevada y negativa sensibilidad ante cambios en los dife-

Tabla 3. Valores de sensibilidad a los parámetros de pendiente del modelo de erosión WEPP.

Table 3. Sensitivity values for slope parameters of the WEPP erosion model.

Parámetros	Valor*	Esguerrimiento (mm)	Sedimento (kg m ⁻²)	Sensibilidad (S)	
				Esguerrimiento	Sedimento
Inclinación	0,1	29,91	1		
	15	30,42	35	0,00	0,98
	30	30,42	67		
Largo de la pendiente	2	30,42	35		
	6	30,42	50	0,00	0,86
	10	30,42	128		

* Unidades: Inclinación (%) y largo (m) de la pendiente.

* Units: Slope gradient (%) and length (m).

Tabla 4. Valores de sensibilidad a los parámetros de cobertura del suelo del modelo de erosión WEPP.

Table 4. Sensitivity values for soil cover parameters of the WEPP erosion model.

Parámetros	Valor*	Esguerrimiento (mm)	Sedimento (kg m ⁻²)	Sensibilidad (S)	
				Esguerrimiento	Sedimento
Cobertura vegetal aérea	0,1	30,21	25		
	40	30,21	6	0,00	-0,67
	80	30,21	5		
Cobertura basal	0,1	30,21	47		
	10	30,21	5	0,00	-0,85
	20	30,21	2		
Cobertura de mantillo	0,1	30,21	37		
	40	30,21	3	0,00	-0,67
	80	30,21	3		
Cobertura de gravas	0,1	30,21	15		
	40	30,21	3	0,00	-0,93
	80	30,21	3		

* Unidades: Coberturas (%).

* Units: Cover (%).

rentes factores de cobertura de suelo mientras que la fracción de arena afectó positivamente tanto el esguerrimiento como a la producción de sedimentos (Tabla 5). Sin embargo, ambas variables de respuesta del modelo mostraron una escasa sensibilidad ante cambios en el contenido de gravas, el contenido de materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico. La producción de sedimentos, a diferencia del

esguerrimiento, presentó una elevada sensibilidad a los parámetros de erodabilidad del suelo entre surcos (K_i) y en surcos (K_r) y a la tensión crítica de corte hidráulico (tc). La conductividad hidráulica (K_e) afectó de manera significativa tanto al esguerrimiento como a la producción de sedimentos, disminuyendo el valor de estas variables de respuestas ante incrementos del parámetro K_e .

Tabla 5. Valores de sensibilidad a los parámetros físicos y químicos del suelo del modelo de erosión WEPP.
Table 5. Sensitivity values for soil physical and chemical parameters of the WEPP erosion model.

Parámetros	Valor*	Esguerrimiento (mm)	Sedimento (kg m ⁻²)	Sensibilidad (S)	
				Esguerrimiento	Sedimento
Fracción de arena	60	25,50	10		
	70	29,22	11	0,85	0,91
	80	32,57	13		
Fracción de arcilla	5	28,48	11		
	15	33,24	14	0,18	0,23
	25	36,15	15		
Materia orgánica	1	29,86	12		
	2	30,45	12	0,03	0,00
	3	30,85	12		
Capacidad de intercambio catiónico	5	29,87	12		
	15	30,10	12	0,01	0,00
	25	30,10	12		
Contenido de gravas	0,1	29,60	12		
	15	30,40	12	0,03	0,00
	30	31,38	12		
Erodabilidad laminar del suelo <i>K_i</i>	50.000	30,10	7		
	200.000	30,10	13	0,00	0,62
	350.000	30,10	19		
Erodabilidad del suelo en surcos <i>K_r</i>	0,0005	30,10	12		
	0,0010	30,10	16	0,00	0,55
	0,0015	30,10	21		
Tensión crítica de corte <i>t_c</i>	0,5	30,10	19		
	1	30,10	7	0,00	-0,92
	1,5	30,10	7		
Conductividad hidráulica efectiva <i>K_e</i>	2	44,50	20		
	12	31,10	12	-0,40	-0,58
	22	22,12	7		

* Unidades: Fracciones de arena y arcilla (%), contenidos de materia orgánica y gravas (%), capacidad de intercambio catiónico (meq 100 g⁻¹), erodabilidad laminar (kg s m⁻²), erodabilidad en surcos (s m⁻¹), tensión crítica de corte hidráulico (Pa) y conductividad hidráulica efectiva (mm h⁻¹).

* Units: Clay and sand fractions (%), organic matter and gravel content (%), cation exchange capacity (meq 100 g⁻¹), interrill erodability (kg s m⁻²), rill erodability (s m⁻¹), critical shear stress of the flow (Pa), and effective hydraulic conductivity (mm h⁻¹).

DISCUSIÓN

Predicción del esguerrimiento y producción de sedimentos

Los resultados de este estudio mostraron que, bajo las condiciones del pastizal evaluado y las características del evento de lluvia simulado, el modelo WEPP predijo con una baja eficiencia el esguerrimiento y la producción de sedimentos. En la producción de sedimentos, el valor

negativo de eficiencia indica que los valores medios observados proveen una mejor estimación que aquella obtenida con el modelo.

Según puede observarse en las Figuras 1B y 2B, el modelo WEPP subestimó la producción de sedimentos respecto de los valores observados. Ello ocurrió a pesar que la remoción de sedimentos obtenidos a campo en las parcelas de esguerrimiento podría haber sido inferior a aquella producida bajo una lluvia natural de las mismas

características, debido a la menor energía cinética proporcionada por la lluvia simulada (Rostagno & Garayzar, 1995). De todas maneras, los valores de pérdida de suelo hallados en el presente estudio, con un promedio de 40 g m⁻² (equivalente a 0,4 Mg ha⁻¹) y una variación que se encuentra entre 0 y 120 g m⁻², estuvieron dentro del rango de variación de los resultados reportados para otros ambientes del noreste de la Patagonia, obtenidos mediante lluvia simulada (Rostagno, 1989; Parizek *et al.*, 2002) o bajo condiciones naturales (Coronato & del Valle, 1993; Rostagno *et al.*, 1999).

Factores relacionados con la predicción del escurrimiento y la producción de sedimentos

Está ciertamente probado que en los experimentos de simulación de lluvia el largo de la parcela de escurrimiento afecta y determina en gran medida el proceso de erosión que toma lugar dentro de ella (Mutchler *et al.*, 1988). El tamaño de parcela utilizado en el presente estudio (0,6 x 1,67 m) permitiría una adecuada evaluación del proceso de la erosión entre surcos (Simanton *et al.*, 1987; Simanton & Renard, 1992; Alberts *et al.*, 1995). Más aun, autores del proyecto WEPP sugieren que «el estudio de la erosión hídrica en los pastizales naturales debería focalizarse sobre la erosión por salpicado y laminar ya que en la mayoría de estos ecosistemas el flujo del escurrimiento es predominantemente laminar» (Nearing com. pers.). Sin embargo, a partir de las 120 simulaciones realizadas con WEPP pudo observarse que cuando el proceso de erosión en surcos era suprimido en la comunidad EA, a diferencia de lo que ocurría en la comunidad EH, la cantidad de sedimentos estimados era despreciable y similar a la encontrada en la comunidad EHA (datos no mostrados). Esto estaría indicando que al menos bajo las condiciones superficiales más deterioradas (EA), la erosión en surco tomaría un rol más activo en la contribución del sedimento total estimado. En la comunidad EA, la escasa cobertura herbácea desuniformemente distribuida y la presencia de gravas en superficie podrían interrumpir el flujo laminar, concentrando el escurrimiento y favoreciendo la formación de surcos (Poesen *et al.*, 1994; Poesen *et al.*, 1999). Sumado a esto, en los suelos donde la cobertura de gravas es dominante, la mayor tasa de escurrimiento, la menor rugosidad superficial y la mayor continuidad de los parches de suelo desnudo podrían también favorecer la formación de vías de escurrimiento concentrado (Weltz *et al.*, 1998; Kuehl *et al.*, 2001; Nash *et al.*, 2003). Estas vías de escurrimiento concentrado en comparación con el escurrimiento laminar, son más eficientes en el desprendimiento y transporte de sedimentos del suelo (Morgan, 1980). En este contexto, la formación de surcos podría ser iniciada cuando se registran reducciones de la cobertura vegetal causadas por sequías prolongadas, sobrepastoreo, ocurrencia de

fuego o cuando los arbustos, con escasa vegetación herbácea en las áreas entre arbustos, representan las bioformas dominantes en los planos de pendiente (Pierson *et al.*, 2002).

Por otra parte, la condición básica o de referencia que asume el modelo WEPP en la estimación de los principales parámetros representa claramente una limitación en su aplicación bajo condiciones de pastizales naturales. Los parámetros del modelo para infiltración, escurrimiento y producción de sedimentos son inicialmente estimados a partir de una condición de suelo desnudo y posteriormente son ajustados en función de la cobertura vegetal y de las características superficiales del suelo. Mientras las condiciones de referencia pueden ser apropiadas para las condiciones relativamente homogéneas de los cultivos, donde los suelos son frecuentemente roturados con implementos mecánicos, parece no representar adecuadamente las condiciones de pastizales naturales.

Es importante destacar que el presente estudio se realizó con el modelo WEPP sin calibrar, por lo que ninguna de las ecuaciones para estimar los diferentes parámetros fue modificada. De esta manera, se asume que las relaciones entre todas las variables que intervienen en el modelo se mantienen bajo las condiciones del pastizal evaluado. Este supuesto se encuentra respaldado considerando que WEPP, por ser un modelo basado en procesos físicos, presenta cierta generalización o capacidad para representar adecuadamente los mismos procesos bajo un amplio rango de condiciones (Nearing *et al.*, 1989; Nearing *et al.*, 1990a). Por otra parte, en la generación del modelo WEPP se ha incluido una gama diversa de tipos y características de pastizales los cuales fueron agrupados o promediados para desarrollar un único algoritmo o ecuación general para describir un proceso en el espectro de diferentes tipos de pastizales (Alberts *et al.*, 1995). Esta universalidad del modelo WEPP permitiría su aplicación en los ambientes de pastizales (Simanton *et al.*, 1987; Laflen *et al.*, 1991; Pierson *et al.*, 2002). Sin embargo, es posible que para las condiciones particulares de los pastizales de Punta Ninfas las relaciones entre las variables pudieran no ser las mismas, difiriendo quizás en el valor o en la forma de la pendiente.

Análisis de sensibilidad del modelo WEPP

Los resultados del análisis de sensibilidad indican que, bajo las condiciones del pastizal estudiado y para las características del evento de lluvia simulado, la lámina y la intensidad de lluvia fueron los parámetros que más afectaron los volúmenes escurridos y la producción de sedimentos estimados por el modelo. Por otra parte, el largo e inclinación de la pendiente no tuvieron efecto sobre el volumen escurrido. Esto difiere de lo reportado por Nearing *et al.* (1990b), quienes estudiaron la sensibilidad

del modelo WEPP sobre planos de pendientes bajo varias condiciones de pastizales del oeste de EE.UU. y encontraron que las pendientes más largas producían mayor escurrimiento. A diferencia de lo observado en el escurrimiento, ambos factores de la pendiente tuvieron un fuerte efecto positivo sobre la producción de sedimentos. Asimismo, la relación entre los procesos de erosión en surcos y laminar parece estar relacionada con el largo de la pendiente (Nearing *et al.*, 1990b). Estos autores encontraron que la relación entre erosión en surcos y laminar aumenta de 0,20 a 3,2 cuando el largo de la pendiente se incrementaba de 5 a 300 m, revelando una mayor participación de los surcos en el resultado total de la erosión con pendientes más largas.

El escurrimiento estimado por WEPP no respondió ante cambios en los factores de cobertura del suelo. Coincidentemente con lo reportado por otros autores, quienes trabajaron con lluvias simuladas en un amplio rango de pastizales del oeste de los EE.UU. (Simanton *et al.*, 1991; Simanton & Renard, 1992), la cobertura vegetal tuvo un efecto reducido sobre el escurrimiento y la infiltración del suelo. Estos autores concluyeron que la contribución directa de cobertura herbácea sobre la protección del suelo contra el impacto de las gotas de lluvia no es suficiente para controlar el escurrimiento. Por el contrario, los efectos indirectos de la vegetación como los niveles deseables de estructura del suelo, materia orgánica y mantillo en superficie son importantes contribuyentes a la conservación del agua y del suelo (Wilcox *et al.*, 1988). Respecto de la erosión, la cobertura vegetal aérea y basal, el mantillo y las gravas en superficie, mostraron una elevada sensibilidad negativa, disminuyendo la producción de sedimentos estimados con incrementos en los valores de cobertura. Adicionalmente, el efecto que tiene la cobertura aérea sobre la erosión del suelo parece estar relacionada con la pendiente, de tal manera que las pendientes más cortas y de menor grado son las condiciones donde la cobertura vegetal presenta las mayores sensibilidades (Nearing *et al.*, 1990b). Bajo estas condiciones, la mayor sensibilidad ante cambios de la cobertura herbácea debería estar relacionada con el proceso de erosión laminar, en el cual el desprendimiento de las partículas del suelo ocurre principalmente por el impacto de las gotas de lluvia.

Los resultados de la simulación con WEPP mostraron una elevada sensibilidad a la fracción de arena y en menor medida a la fracción de arcilla del suelo, tanto para el escurrimiento como para la producción de sedimentos. La textura es una propiedad importante del suelo en el modelo WEPP, la cual afecta directa e indirectamente varios de los procesos internos involucrados (Nearing *et al.*, 1990b). En este sentido, gran parte de la sensibilidad a la textura se debería a que ésta interviene en el cálculo de varios parámetros del suelo tales como: la conductividad

hidráulica efectiva, la erodabilidad entre surcos, la erodabilidad de los surcos y la tensión crítica de corte hidráulico (Alberts *et al.*, 1995). La conductividad hidráulica efectiva (Ke) tuvo una moderada sensibilidad, disminuyendo tanto el escurrimiento como la producción de sedimentos estimado cuando aumentó el valor de Ke . La conductividad hidráulica efectiva es el parámetro hidrológico más importante del modelo WEPP en términos de infiltración (Rawls *et al.*, 1989; Wilcox *et al.*, 1992). Asimismo, Ke tuvo un efecto negativo sobre la producción de sedimentos, lo cual podría ser atribuido a que en la estructura del modelo WEPP, incrementos en este parámetro aumentan la infiltración limitando la remoción de partículas del suelo. La producción de sedimentos estimados mostró una elevada sensibilidad a la erodabilidad del suelo, aumentando la erosión con incrementos en los parámetros Ki y Kr . La tensión crítica de corte hidráulico (tc) resultó en la mayor sensibilidad de los parámetros de suelo, con una mayor producción de sedimentos estimados cuando disminuye el valor del parámetro. Este resultado podría deberse a que el parámetro tc es un factor dominante en el cálculo de la capacidad de desprendimiento y transporte de los sedimentos en los surcos.

Varios investigadores han realizado diferentes análisis de sensibilidad en el modelo WEPP, especialmente para los pastizales de los Estados Unidos (Nearing *et al.*, 1990b; Chaves & Nearing, 1991; Tiscareno-López *et al.*, 1993). Los resultados de estos análisis de sensibilidad acuerdan en gran medida con lo encontrado en el presente trabajo, donde los parámetros de la lluvia (profundidad de la lámina, duración, e intensidad) y los parámetros que afectan la infiltración (cobertura del suelo y conductividad hidráulica) tienen el mayor impacto sobre el escurrimiento; mientras que la cobertura del suelo y los parámetros de erodabilidad tienen la mayor influencia sobre la pérdida del suelo.

Análisis en diferentes comunidades de plantas

A partir del análisis de los valores medios puede observarse que el modelo WEPP fue capaz de detectar la variación en el escurrimiento y en la producción de sedimentos de las diferentes comunidades del pastizal. El incremento medio en el escurrimiento y la pérdida de suelo estimados estuvieron fuertemente asociados al gradiente de degradación del suelo desde la comunidad EH a la EA. Adicionalmente, la diferencia entre los valores medios estimados y observados varió en las distintas comunidades de plantas, tanto para el escurrimiento como para la erosión. Así, el escurrimiento medio fue sobreestimado en un 55,5% en la EH y la producción de sedimentos fue subestimada en un 69,6, 62,7 y 17,5% en la EH, EHA y EA respectivamente, respecto de los valores observados. La falta de un buen ajuste del modelo podría deberse a que el conjunto de variables que intervienen o las relaciones

entre ellas no representan adecuadamente los procesos de escurrimiento y erosión en los pastizales evaluados.

Los resultados de este estudio revelan la necesidad de calibrar el modelo WEPP para su aplicación bajo las condiciones locales. Asimismo, coincidiendo con lo reportado para otros ecosistemas de pastizales naturales (Blackburn & Pierson, 1994; Spaeth *et al.*, 1994, 1996; Weltz *et al.*, 2000; Mergen *et al.*, 2001; Pierson *et al.*, 2002), los resultados obtenidos sugieren la necesidad de incorporar en los modelos hidrológicos una estratificación de la vegetación de los pastizales naturales. En este sentido, si la vegetación de los pastizales exhibe un patrón espacial heterogéneo y las unidades funcionales están correlacionadas con el comportamiento hidrológico del suelo, esta información podría ser utilizada para desarrollar ecuaciones predictivas específicas para cada comunidad de plantas. La estratificación de los pastizales áridos y semiáridos podría mejorar notablemente la capacidad predictiva de los actuales modelos de erosión del suelo.

CONCLUSIONES

En este trabajo, bajo las condiciones del pastizal evaluado y las características del evento de lluvia simulado, se pudo observar una baja eficiencia del modelo WEPP para predecir el escurrimiento y la erosión del suelo. La predicción del escurrimiento y pérdida de suelo por parte del modelo mostraron las mayores sensibilidades frente a cambios en los parámetros de lluvia y pendiente del terreno, y en menor medida, a la cobertura, textura, erodabilidad del suelo y conductividad hidráulica efectiva.

El uso del modelo WEPP en los ecosistemas de pastizales naturales constituye una importante herramienta para estimar la erosión y seleccionar prácticas adecuadas de manejo para la conservación del agua y del suelo. Sin embargo, a partir de los resultados se concluye que es necesario calibrar previamente el modelo para las condiciones locales. Asimismo, se sugiere incorporar en los modelos hidrológicos una estratificación de los pastizales de acuerdo a las diferentes comunidades de plantas para lograr una mejor capacidad predictiva en estos ambientes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Lina Videla y Alicia Toyos por el apoyo brindado en el trabajo de campo. El financiamiento de este estudio fue provisto por el CONICET y el proyecto PICT 07-09792. Agradecemos también a dos anónimos revisores por sus comentarios y sugerencias, las cuales permitieron mejorar el manuscrito.

REFERENCIAS

- Alberts, EE; MA Nearing; MA Weltz; LM Risse; FB Pierson; XC Zhang; JM Laflen & JR Simanton. 1995. Soil component. *In: Flanagan, DC & MA Nearing (eds).* USDA - Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. USDA-ARS-NSERL Report No. 10. NSERL, West Lafayette, Indiana, USA, pp. 1-47.
- Ares, J; AM Beeskow; MB Bertiller; CM Rostagno; MP Irisarri; J Anchorena; GE Defossé & CA Merino. 1990. Structural and dynamic characteristics of overgrazed lands of northern Patagonia, Argentina. *In: A Breymeyer (ed).* Managed grasslands: Regional studies. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 149-175.
- Barros, V. 1983. Atlas del potencial eólico de la Patagonia. Contribución No. 69. Centro Nacional Patagónico, Puerto Madryn, Chubut, Argentina, 80 pp.
- Becker, A; 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. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 5 pp.
- Beeskow, AM; NO Elissalde & CM Rostagno. 1995. Ecosystem change associated with grazing intensity on the Punta Ninfas rangelands of Patagonia, Argentina. *J. Range Manage.* 48: 517-522.
- Bestelmeyer, BT; JR Brown; KM Havstad; R Alexander; G Chavez & JE Herrick. 2003. Development and use of state-and-transition models for rangelands. *J. Range Manage.* 56: 114-126.
- Bestelmeyer, BT. 2006. Threshold concepts and their use in rangeland management and restoration: The good, the bad, and the insidious. *Restoration Ecol.* 14: 325-329.
- Blackburn, WH; FB Pierson & MS Seyfried. 1990. Spatial and temporal influence of soil frost on infiltration and erosion of sagebrush rangelands. *Water Resour. Bull.* 26: 991-997.
- Blackburn, WH; FB Pierson; CL Hanson; TL Thurow & AL Hanson. 1992. The spatial and temporal influence of vegetation on surface soil factors in semiarid rangelands. *Transactions of the ASAE* 35: 479-486.
- Blackburn, WH & FB Jr Pierson. 1994. Sources of variation in interrill erosion on rangelands. *In: Blackburn, WH; FB Jr Pierson; GE Schuman & R Zartman (eds).* Variability in rangeland water erosion processes. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. Special Publication 38, pp. 35-50.
- Blake, GR. 1965. Core method. *In: Black, CA; DDEvans; JL White; LE Ensminger & FE Clark (eds).* Methods of soil analysis - Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Series agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 374-390.
- Bouyoucos, GJ. 1965. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron. J.* 54: 464-465.
- Bouza, PJ; M Simón; J Aguilar; H del Valle & CM Rostagno. 2007. Fibrous-clay mineral formation and soil evolution in Aridisols of northeastern Patagonia, Argentina. *Geoderma* 139: 38-50.
- Chartier, MP & CM Rostagno. 2006. Soil erosion thresholds and alternative states in northeastern Patagonian rangelands. *Rangeland Ecol. Manage.* 59: 616-624.

- Chaves, HML & MA Nearing 1991. Uncertainty analysis of the WEPP soil erosion model. *Transactions of the ASAE* 34: 2437-2444.
- Coronato, FR & HF del Valle. 1993. Methodological comparison in the estimate of fluvial erosion in an arid closed basin of northeastern Patagonia. *J. Arid Environ.* 24: 231-239.
- DeCousey, DG. 1988. A critical assessment of hydrologic modeling. *In: Modeling agricultural, forest, and rangeland hydrology. Proceedings of the 1988 International Symposium.* Chicago, IL. ASAE Publication 07-88, St. Joseph, MI, USA, pp. 478-493.
- Echeverría, NE; AG Vallejos & JC Silenzi. 2006. Erodabilidad de suelos del sur de la región semiárida argentina. *Ciencia del Suelo* 24: 49-57.
- Flanagan, DC; JC Ascough; AD Nicks; MA Nearing & JMLaflen. 1995. Overview of the WEPP erosion prediction model. *In: Flanagan, DC & MA Nearing (eds.)*. USDA - Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. USDA-ARS-NSERL Report No. 10. NSERL, West Lafayette, Indiana, USA, pp. 1-12.
- Flanagan, DC & MA Nearing. 1995. (eds.) USDA - Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. USDA-ARS-NSERL Report No. 10. NSERL, West Lafayette, Indiana, USA.
- Kuehl, RO; MP McClaran & J Van Zee. 2001. Detecting fragmentation of cover in desert grasslands using line intercept. *J. Range Manage.* 54: 61-66.
- Laflen, JM; LJ Lane & GR Foster. 1991. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. *J. Soil Water Conserv.* 46: 34-38.
- Lane, LJ & MA Nearing. 1989. (eds.) USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile model documentation. USDA-ARS-NSERL Report No. 2. NSERL, West Lafayette, Indiana, USA, 300 pp.
- Loague, KM & RA Freeze. 1985. A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments. *Water Resour. Res.* 21: 229-248.
- Mergen, DE; MJ Trlica; JL Smith & WH Blackburn. 2001. Stratification of variability in runoff and sediment yield based on vegetation characteristics. *J. Am. Water Resour. As.* 37: 617-628.
- Morgan, RPC. 1980. Field studies of sediment transport by overland flow. *Earth Surf. Processes* 5: 307-316.
- Mutchler, CK; CE Murphree & KC McGregor. 1988. Laboratory and field plots for soil erosion studies. *In: Lal R (ed.)*. Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA, pp. 187-200.
- Nash, JE & JV Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Nash, MS; E Jackson & WG Whitford. 2003. Soil microtopography on grazing gradients in Chihuahuan desert grasslands. *J. Arid Environ.* 55: 181-192.
- Nearing, MA; GR Foster; LJ Lane & SC Finkner. 1989. A process-based soil erosion model for USDA - Water erosion prediction project technology. *Transactions of the ASAE* 32: 1587-93.
- Nearing, MA; LJ Lane; EE Alberts & JMLaflen. 1990a. Prediction technology for soil erosion by water: Status and research needs. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1702-1711.
- Nearing, MA; L Deer-Ascough & JM Laflen. 1990b. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Transactions of the ASAE* 33: 839-849.
- Nelson, DW & LE Sommers 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. *In: Page, AL; RH Miller & DR Keeney (eds.)*. Methods of soil analysis - Chemical and microbiological properties., Series agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, pp. 539-579.
- Norusis, MJ. 1997. SPSS Advanced statistics 7.5. SPSS, Chicago, USA, 579 pp.
- Parizek, B; CM Rostagno & R Sottini. 2002. Soil erosion as affected by shrub encroachment in northeastern Patagonia. *J. Range Manage.* 55: 43-48.
- Pierson, FB; KE Spaeth; MA Weltz & DH Carlson. 2002. Hydrologic response of diverse western rangelands. *J. Range Manage.* 55: 558-570.
- Poesen, J; D Torri & K Bunte. 1994. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: A review. *Catena* 23: 141-166.
- Poesen, J; E De Luna; A Franca; J Nachtergaele & G Govers. 1999. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. *Catena* 36: 5-29.
- Rawls, WJ; JJ Stone & DL Brakensiek. 1989. Infiltration. *In: Lane, LJ & MA Nearing (eds.)*. USDA - Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile version., USDA-ARS-NSERL Report No. 2. NSERL, West Lafayette, Indiana, USA, pp. 1-11.
- Rostagno, CM. 1989. Infiltration and sediment production as affected by soil surface conditions in a shrubland of Patagonia, Argentina. *J. Range Manage.* 42: 382-385.
- Rostagno, CM & D Garayzar. 1995. Diseño de un simulador de lluvia para estudios de infiltración y erosión de suelos. *Ciencia del Suelo* 13: 41-43.
- Rostagno, CM; F Coronato; D Puebla & HF del Valle. 1999. Runoff and erosion in five land units of a closed basin of northeastern Patagonia. *Arid Soil Res. Rehabil.* 13: 281-292.
- Schlesinger, WH; JF Reynolds; GL Cunningham; LF Huennke; WM Jarrell; RA Virginia & WG Whitford. 1990. Biological feedbacks in global desertification. *Science* 247: 1043-1048.
- Simanton, JR; LT West; MA Weltz & GD Wingate. 1987. Rangeland experiments for Water Erosion Prediction Project. *Am. Soc. Agric. Eng.* Paper 87-2545.
- Simanton, JR; MA Weltz & HD Larsen. 1991. Rangeland experiments to parameterize the water erosion prediction project model: Vegetation canopy cover effects. *J. Range Manage.* 44: 276-282.
- Simanton, JR & KG Renard. 1992. Upland erosion research on rangeland. *In: Parsons, AJ and AD Abrahams (eds.)*. Overland flow: Hydraulics and erosion mechanics. UCL Press (University College), London. 438 pp.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agricultural Handbook 436, USDA Soil Conservation Service. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA.
- Spaeth, KE; MA Weltz; HD Fox & FB Jr Pierson. 1994. Spatial pattern analysis of sagebrush vegetation and potential influences on hydrology and erosion. *In: Blackburn, WH; FB Jr Pierson; GE Schuman & R Zartman (eds.)*. Variability in rangeland water erosion processes. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA. Special Publication 38, pp. 35-50.

- Spaeth, KE; FB Pierson; MA Weltz & JB Awang. 1996. Gradient analysis of infiltration and environmental variables as related to rangeland vegetation. *Trans. ASAE* 39: 67-77.
- SRM Task Group (Society for Range Management Task Group on Unity in Concepts and Terminology Committee). 1995. New concepts for assessment of rangeland condition. *J. Range Manage.* 48: 271-282.
- Tiscareno-Lopez, M; VL Lopes; JJ Stone & LJ Lane. 1993. Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications. Hillslope processes. *Trans. ASAE* 36: 1659-1672.
- Vicenty, OA; JJ Serra & AD Gabetta. 1984. Estudio de las precipitaciones en la ciudad de Trelew, Chubut. MESOP, Rawson, Chubut, Argentina, pp. 44.
- Villagra, PE; GE Defossé; HF del Valle; S Tabeni; CM Rostagno; E Cesca & E Abraham. 2009. Land use and disturbance effects on the dynamics of natural ecosystems of the Monte Desert: Implications for their management. *J. Arid Environ.* 73: 202-211.
- Weltz, MA; M Kidwell & DH Fox. 1998. Influence of abiotic and biotic factors in measuring and modeling soil erosion on rangelands: State of knowledge. *J. Range Manage.* 51: 482-495.
- Weltz, L; G Frasier & M Weltz. 2000. Hydrologic response of shortgrass prairie ecosystems. *J. Range Manage.* 53: 403-409.
- WEPP. 2006. Water Erosion Prediction Project versión 2006.5. Publicado en Internet, disponible en: <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/>. Activo: Octubre 2006.
- Wilcox, BP; MK Wood & JH Tromble. 1988. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes. *J. Range Manage.* 41: 197-206.
- Wilcox, BP; M Sbaa; WH Blackburn & JH Milligan. 1992. Runoff prediction from sagebrush rangelands using water erosion prediction project (WEPP) technology. *J. Range Manage.* 45: 470-474.