

EROSIÓN HÍDRICA EN UNA MICROCUENCA AGRÍCOLA BAJO SIEMBRA DIRECTA DEL CENTRO DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

MARÍA GUADALUPE ARES^{1*}; MARCELO VARNI¹ & CELIO CHAGAS²

Recibido: 14-02-14

Recibido con revisiones: 15-08-14

Aceptado: 05-10-14

RESUMEN

En el área de las sierras de Tandilia, en la región de la Pampa Húmeda Argentina, la introducción poco sustentable de la siembra directa ha provocado la reducción de la cobertura vegetal y su efecto protector. Esta realidad, sumada al incremento de las precipitaciones en décadas recientes, ha contribuido al aumento del escurrimiento y a la susceptibilidad del suelo a la erosión hídrica en esa área. El objetivo de este trabajo fue analizar la dinámica de la concentración de sedimentos generados por erosión hídrica y establecer relaciones con las precipitaciones, los escurrimientos y las condiciones de lluvia antecedente, en una microcuenca bajo agricultura en siembra directa. Los resultados indican que el escurrimiento (Esc) presentó alta variabilidad temporal. La concentración de sólidos suspendidos (CSS) demostró las mayores correlaciones con las variables asociadas al escurrimiento, mientras que éste último se correlacionó significativamente con el índice de erosividad de las precipitaciones (EI_{30}). Contrariamente a lo esperado, la lluvia de los 5 días previos no se correlacionó con el Esc o la CSS. El análisis de la interacción lluvia-escurrimiento-concentración de sedimentos permitió identificar diferentes respuestas erosivas, las que se podrían asociar, alternativamente a erosión laminar o a erosión en surcos como procesos dominantes en la microcuenca, según la magnitud del evento considerado. El primer tipo se daría de manera más frecuente, y el segundo tipo, en una proporción de eventos menor. De acuerdo con los resultados obtenidos se requeriría mantener la elevada capacidad de infiltración natural de dichos suelos a la vez de implementar prácticas de control de los escurrimientos erosivos.

Palabras clave. Concentración de sedimentos suspendidos - Caudal - Erosión laminar - Erosión en surcos.

WATER EROSION IN A SMALL AGRICULTURAL WATERSHED UNDER NO-TILLAGE IN CENTRAL BUENOS AIRES PROVINCE

ABSTRACT

In the hilly area of Tandilia, in the Argentine Humid Pampas region, the unsustainable adoption of no-tillage practices has resulted in the reduction in vegetation cover and its protective effects. In addition, the rainfall increase recorded in recent decades has contributed to increase runoff and soil susceptibility to water erosion in the area. The aim of this study was to analyze the dynamics of sediment concentrations generated by water erosion and to study relationships with rainfall, runoff, and previous precipitation events in a watershed under no-tillage. Results indicate that runoff showed a high temporal variability. The suspended sediment concentration showed the highest correlations with runoff variables, while runoff was significantly correlated with the erosivity index. Contrary to expectations, precipitation of the previous 5 days was not correlated with runoff or sediment production. The analysis of the rainfall-runoff-sediment production interaction allowed identifying different erosive responses that could be associated alternatively with sheet erosion or with rill erosion as major processes in the watershed, according to the magnitude of the considered event. The most frequent type of erosion may be inter-rill erosion. Meanwhile, rill erosion may be less frequent. According to these results, the natural high infiltration capacity of these soils should be preserved, and, at the same time, erosive runoff should be controlled.

Key words. Suspended sediment concentration - Discharge - Sheet erosion - Rill erosion.

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. E. Usunoff.; ² Facultad de Agronomía UBA.

*Autor de contacto: gares@faa.unicen.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica es uno de los procesos de degradación de las tierras agrícolas de mayor importancia a nivel mundial (Valentin *et al.*, 2005). La lluvia y el escurrimiento asociado son los principales factores desencadenantes de tal proceso (Blanco & Lal, 2008). Varios autores han analizado relaciones entre la lluvia, el escurrimiento y la producción de sedimentos a nivel de cuenca. Así, se han interpretado los factores que controlan las respuestas en diferentes ambientes y su variabilidad asociada a condiciones de humedad antecedente, uso de suelo y sistemas de labranza implementados (Rodríguez-Blanco *et al.*, 2010; Nu-Fang *et al.*, 2011; Onderka *et al.*, 2012; Gellis, 2013). Los estudios a tal escala resultan adecuados para el análisis de los procesos de escurrimiento y erosión, dado que la cuenca es la unidad hidrológica en la que ocurren dichos procesos y además es aquella área sobre la cual pueden ser implementadas medidas para su control y manejo (Cerdan *et al.*, 2004).

La siembra directa es un sistema que tiende a conservar el suelo y el agua. La mejora que puede implicar en las funciones del suelo dependen del tipo de suelo, la topografía y las características del clima (Blanco & Lal, 2008). En este sentido, este sistema aún presenta desafíos que incluyen el riesgo de compactación de los suelos, la estratificación de la materia orgánica y de nutrientes como nitrógeno y fósforo, o la alta dependencia del uso de herbicidas y fertilizantes (Moreno *et al.*, 2006; López-Fando & Pardo, 2011). No obstante, en la actualidad, este sistema se encuentra entre los más difundidos para el control de la erosión (Blanco & Lal, 2008). Su efecto benéfico se logra a partir de la cobertura que ejercen los residuos de cosecha en superficie y por el incremento de materia orgánica edáfica que está asociado. Por lo tanto, a partir de la acción sinérgica de estos dos factores se han apreciado mejoras en propiedades del suelo como la estabilidad de los agregados, la macroporosidad, la retención de agua, la infiltración y la conductividad hidráulica (Jin *et al.*, 2011; Van Wie *et al.*, 2013). Así, constituye una alternativa para reducir el escurrimiento y la erosión en las tierras cultivables (Armand *et al.*, 2009). La reducción del flujo de agua concentrado y de su velocidad contribuye al control de la erosión en surcos (West *et al.*, 1992; Knapen *et al.*, 2007). De tal modo, en sistemas bajo siembra directa la erosión entre surcos sería el tipo de erosión más frecuente (Nearing *et al.*, 1994).

En la Argentina, la incorporación de este sistema de manejo produjo un cambio tecnológico que ha modificado la actividad agrícola (Blanco & Lal, 2008). En el área de

las sierras de Tandilia, ubicada en la Pampa Húmeda, la práctica de siembra directa se introdujo con escaso o nulo criterio conservacionista. Las evidencias de esta aseveración son: la escasa planificación de la secuencia de cultivos con alta participación de la soja, el pastoreo de los rastrojos y las labores de roturación que, en definitiva, llevan al suelo a que quede sin el efecto protector de la cobertura superficial (Sfeir *et al.*, 2006). Al mismo tiempo, el aumento de las precipitaciones registrado en las últimas décadas, ha contribuido a incrementar el escurrimiento y el riesgo de erosión hídrica de los suelos del área. Las manifestaciones más notorias son los desbordes de los arroyos de la región, registrados durante los años 1980-85-92; 2001-02-12, y las evidencias de erosión observadas a campo, las que obligan a colocar a la degradación como un problema prioritario en el área de las sierras de Tandilia (Iruiria *et al.*, 1996). Las consecuencias de estos manejos inadecuados afectan incluso a las áreas urbanas ubicadas en las márgenes de dichos arroyos. Es por esto que se ha trabajado en la modelación del proceso precipitación-escurrimiento (Dalponte *et al.*, 2007) y se ha estudiado la respuesta hidrológica en esa región (Ares *et al.*, 2012). Sin embargo, aún no existen estudios que consideren las relaciones entre las precipitaciones, el escurrimiento y la producción de sedimentos a escala de microcuenca. A tal escala la heterogeneidad espacial es limitada, lo que constituye una ventaja para el análisis de los factores que intervienen en el proceso erosivo y de sus interacciones (Molina *et al.*, 2008).

El objetivo de este trabajo fue analizar la dinámica de la concentración de sedimentos generados por erosión hídrica y establecer relaciones con las precipitaciones, los escurrimientos y las condiciones de lluvia antecedente en una microcuenca bajo agricultura en siembra directa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde a una microcuenca de 560 ha localizada en la naciente de la cuenca del arroyo Videla, cuyo punto de cierre se ubica en las coordenadas Gauss-Krüger X=5506836 m; Y=5889385 m. A su vez éste desagua en el arroyo del Azul, ubicado en el centro de la provincia de Buenos Aires (Fig. 1a). El clima es templado húmedo, con temperatura media anual de 14,4 °C. La precipitación media anual es de 914 mm y el 71% se produce entre octubre y abril. Geomorfológicamente, la microcuenca pertenece al sistema de sierras de Tandilia, que está constituido por una cadena de cerros aislados de rocas graníticas, y áreas de pedemonte con relieve ondulado. La altitud máxima de la microcuenca oscila entre

260 y 280 m snm, mientras que la pendiente media es del 3%, con un rango entre 1 y 10%. En su paisaje los afloramientos rocosos serranos ocupan áreas reducidas respecto al pedemonte ondulado. En esta última subunidad geomorfológica los depósitos de loess presentan espesores de 1 a 2 metros, apoyados sobre una costra calcárea de gran dureza ("tosca") que se muestra en las lomas (INTA, 1990). Los suelos dominantes son los Argiudoles típicos (67,9%) con buen drenaje, horizonte superficial de textura franco arcillosa, con contenidos de carbono orgánico entre 3 y 4%. En los sectores de cerros y lomas, con roca o tosca cercana a la superficie, se encuentran Argiudoles líticos y Hapludoles líticos (27,6%) (INTA, 1992). Estos suelos presentan características disímiles según su historia de uso. Los que están bajo pasturas naturales presentan un horizonte superficial con abundantes raíces, contenido de carbono orgánico del 6,1% y estructura granular. Los que se han destinado a agricultura, por tener originalmente mayor espesor del horizonte A, presentan 3% de carbono orgánico y estructura en bloques. Como suelos "menores", ocupando posiciones cercanas al cauce del arroyo, se encuentran Argiudoles típicos de fases moderadamente bien drenada y algo pobremente drenada. En general los suelos de la microcuenca son destinados a la agricultura, empleando secuencias de cultivos que incluyen soja, maíz, girasol, cebada y trigo. Como prácticas para reducir

el escurrimiento se utiliza la siembra directa cortando la pendiente.

Medición de los datos

El escurrimiento se registró durante el período 2011-2012, con un limnógrafo con sensor de presión ubicado a la salida de la microcuenca (Fig. 1b). El nivel de agua se midió cada 15 minutos y se transformó en caudal a través de la curva altura-caudal de la sección obtenida a través de aforos realizados con molinete hidrométrico. La separación del escurrimiento superficial del subterráneo se realizó mediante la aplicación de un filtro digital (Rodríguez *et al.*, 2000), basado en uno de los métodos que revisa Chapman (1999). El principio sobre el cual se sustenta el filtro digital consiste en remover la componente de alta frecuencia del hidrograma de caudales, esto es la escorrentía directa, y así determinar la escorrentía de baja frecuencia, es decir, el flujo base.

Los muestreos de agua de escorrentía durante las crecidas se realizaron a través de un muestreador automático provisto de 2 bombas de succión, instalado en el punto de cierre del área de estudio (Fig. 1b). El dispositivo posee dos sensores que activan el inicio de la recolección cuando toman contacto con

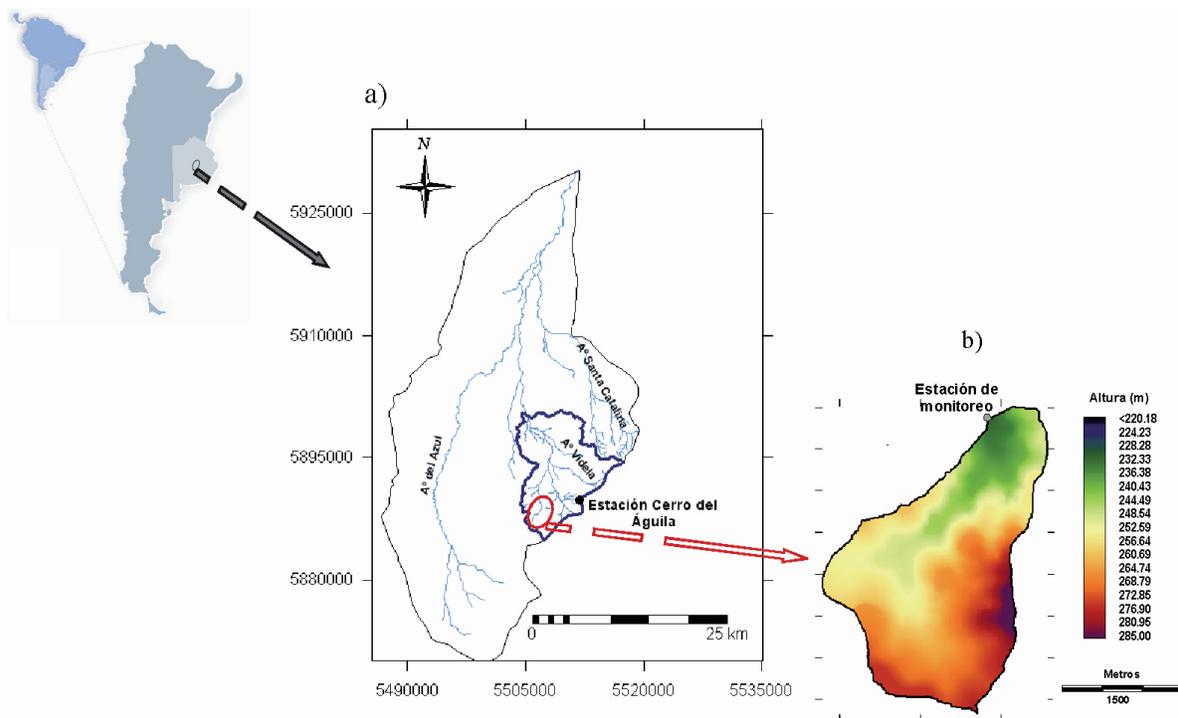


Figura 1. a) Ubicación de la microcuenca en estudio en la cuenca superior del arroyo del Azul y estación de registro pluviométrico (Cerro del Águila). b) Detalle de la microcuenca y ubicación de estación de monitoreo de caudales y muestreo de agua de crecidas.

Figure 1. a) Location of the watershed under study in the upper basin of the Azul stream and pluviometric record station (Cerro del Águila). b) Detail of the watershed with location of the flow-monitoring and runoff water sampling station.

el agua de la crecida transportada por el arroyo. Dichos sensores se ubicaron para que el muestreo se produjera cuando el nivel del curso de agua alcanzaba 0,3 m desde el fondo del cauce, por lo que ingresaron en el análisis las crecidas que igualaron o superaron ese nivel. El nivel se adoptó con el criterio de obtener muestras de agua de una cantidad razonable de eventos de magnitud significativa para esta microcuenca. Una de sus bombas fue programada para muestrear los sedimentos de manera puntual en la crecida. Tal muestreo se iniciaba en el momento en que el curso de agua alcanzaba la altura de 0,3 m mencionada, y se extendía durante 7 minutos para completar el recipiente contenedor. Dicho recipiente se ubica dentro del equipo y tiene una capacidad de 3,8 litros. La otra bomba fue programada para realizar la recolección de una muestra compuesta por submuestras tomadas cada 5 minutos. De esta manera, la recolección se prolongaba durante un período mayor a lo largo del evento, que comprendía 1,5 h desde el nivel de agua inicial. Una vez en laboratorio, cada muestra se agitó, se tomó una alícuota de 250 cm³ y se secó en estufa a temperatura de 60 °C hasta peso constante, según ASTM D3977-97 (2007). La determinación se realizó por duplicado. El modo de muestreo puntual correspondía a los momentos iniciales de la crecida, para aquellas de mayor magnitud, o a los cercanos al escurrimiento pico, para aquellas de menor envergadura. Cabe mencionar que el tiempo de concentración de la microcuenca es de 2,6 horas, según la ecuación derivada por Kirpich citada por Chow *et al.* (1994). Sin embargo, la moda del tiempo al caudal máximo fue de 8 horas. Análisis previos no reportados en este artículo indicaron que durante la etapa inicial del escurrimiento se obtenían las mayores concentraciones de sedimentos. Por ello, el muestreo puntual inicial podía aportar más información de la producción de sedimentos en comparación con el muestreo compuesto. Asimismo, ensayos de simulación de lluvia realizados en microparcels establecidas a campo en el área de estudio (Ares *et al.*, 2014), aportaron resultados en igual sentido, e indicaron que la mayor salida de sedimentos correspondía a los momentos iniciales y cercanos al máximo escurrimiento. De tal modo, para el presente estudio se seleccionó el muestreo puntual.

La lluvia se midió a través de una estación meteorológica automática perteneciente a un sistema de alerta contra inundaciones de la ciudad de Azul, Argentina. Dicha estación, denominada "Cerro del Águila", se encuentra situada a 5 km del punto de cierre de la microcuenca en estudio (Fig. 1a) y es la más cercana a la microcuenca que cuenta con datos detallados para el período considerado. La misma posee un pluviómetro construido y dispuesto según las normas de la Organización Meteorológica Mundial, que registra la lluvia cada 10 minutos con una precisión de 0,20 mm a través de un sistema de cangilones.

Procesamiento de los datos

Se obtuvieron muestras de agua de escurrimiento en un total de 17 eventos durante los dos años de registro, para las que se calculó la concentración de sólidos suspendidos (CSS, g L⁻¹). Cada evento se caracterizó con las variables asociadas a la precipitación, el escurrimiento y la lluvia antecedente, evaluada a través de la precipitación de los 5 días previos (Pa5d).

En cuanto a la precipitación, se calculó su valor total (P, mm), la duración de la precipitación (Dur, h), la energía cinética total de la precipitación (E, MJ ha⁻¹), la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30'}, mm h⁻¹), y el producto EI_{30'} (MJ mm (ha h)⁻¹). La E de la precipitación se obtuvo a partir de la sumatoria de las energías individuales de intervalos de 10 minutos según la relación matemática establecida por Wischmeier & Smith (1978):

$$e = 0,119 + 0,0873 \log_{10} (i) \quad [1]$$

donde "e" = energía cinética del intervalo (MJ (ha mm)⁻¹); "i" = intensidad de la lluvia (mm h⁻¹).

Por su parte, la intensidad máxima en 30 minutos se estimó considerando la máxima precipitación caída en intervalos variables de 30 minutos.

El cálculo de E se realizó para los eventos en los cuales se obtuvieron muestras de agua de escurrimiento. La precipitación total de dichos eventos superó los 12,7 mm, valor a partir del cual las lluvias contribuyen de manera significativa al proceso erosivo (Wischmeier & Smith, 1978). Por otra parte, no se registraron lluvias que superaran la intensidad límite de 76 mm h⁻¹, desde la cual la velocidad terminal de las gotas no se incrementa, y por lo tanto, tampoco la E de la precipitación (Wischmeier & Smith, 1978). Así, no fue necesario adoptar un valor máximo constante de E para los casos bajo estudio.

El escurrimiento se analizó por medio de la lámina de escurrimiento superficial (Esc, mm), caudal pico (Qp, m³s⁻¹), caudal superficial medio (Qsm, m³s⁻¹) y coeficiente de escurrimiento, calculados a través de la relación entre el escurrimiento superficial y la precipitación total del evento (CE, %)

Se puso a prueba la normalidad de los datos correspondientes a cada variable mediante el test de Shapiro-Wilks. Debido a que este test indicó el rechazo del supuesto de normalidad para las variables estudiadas, se analizaron las correlaciones de Spearman para identificar los factores que explican la respuesta hidrológica y la concentración de los sólidos suspendidos. Luego se realizó un agrupamiento de los eventos a través del método de estadística multivariada de análisis de cluster. Este método permite identificar la asociación natural de las observaciones, sin realizar presunciones previas de ellos e identificar patrones, en este caso, en cuanto a la respuesta lluvia-escurrimiento-concentración de sedimen-

tos. Para este análisis se realizó la transformación de las variables. Se empleó el método de escalamiento lineal (Pyle, 1999), por el cual todas las variables quedan expresadas en el rango de valores comprendido entre 0 y 1, según:

$$v_e = \frac{v_i - \text{mín}(v_1 \dots v_n)}{\text{máx}(v_1 \dots v_n) - \text{mín}(v_1 \dots v_n)} \quad [2]$$

donde: "ve"= variable escalada; "vi"= variable en cuestión; "mín"= valor mínimo de la variable en cuestión; "máx"= valor máximo de la variable en cuestión.

En relación al cluster, se utilizó el método de agrupamiento jerárquico de Ward, que ha resultado ser adecuado para el estudio de este tipo de datos (Giménez *et al.*, 2012). Se seleccionó la distancia Euclídea al cuadrado, como medida de la similitud entre los eventos a agrupar. Se identificaron los conglomerados principales en el dendrograma, a través de distintos valores de las distancias reales reescaladas entre 0 y 25. Para reconocer diferencias entre los grupos de casos asociados, se consideraron las medianas de las variables transformadas de los eventos agrupados. Además, se aplicó la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney de comparación de muestras independientes, cuando el número de casos reunidos en cada uno de los grupos era superior a 5.

RESULTADOS

Descripción de los eventos de lluvia, escurrimiento, concentración de sedimentos y las variables relacionadas

La precipitación total anual correspondiente al año 2011 fue de 807 mm (11,7% menor que el promedio anual) y la del año 2012 de 1351 mm (32% superior al promedio anual), por lo cual el estudio tuvo lugar durante dos años contrastantes en cuanto a la pluviometría. En relación a ello, se obtuvieron registros en 17 eventos, de los cuales 4 pertenecieron al año 2011 y 13 al año 2012. En la Tabla 1 se presentan los valores de las variables de cada crecida estudiada. En la Figura 2 se muestra el gráfico de cajas con información sobre la mediana, el primer y el tercer cuartil, y los valores máximos y mínimos de las variables. El análisis del diagrama indica la alta variabilidad de Pa5d, ya que esta presentó el rango intercuartil más amplio. También se destaca aquella que registraron el Esc, Qp, Qsm y CE. La concentración de material suspendido de las crecidas resultó entre 8,5 y 0,5 g L⁻¹. Cabe destacar que de los 17 casos en estudio, el 75% registró un valor inferior a 1,9 g L⁻¹, y en sólo 4 de ellos las CSS fueron superiores, lo que corresponde a eventos producidos durante el año 2012.

Tabla 1. Características generales de los eventos registrados en la microcuenca del arroyo Videla
Table 1. General characteristics of the events registered in the small watershed of the Videla stream.

Nº evento	Fecha	P (mm)	Dur (h)	E ₃₀ (MJ mm (ha h) ⁻¹)	E (MJ ha ⁻¹)	I ₃₀ (mm h ⁻¹)	Pa5d (mm)	Esc (mm)	Qp (m ³ seg ⁻¹)	Qsm (m ³ seg ⁻¹)	CE (%)	CSS (g L ⁻¹)
1	15/01/2011	106,6	14,0	1144,5	22,7	50,4	6,2	26,0	3,23	0,89	24,4	1,94
2	30/04/2011	65,4	21,5	328,1	13,0	25,2	9	1,7	0,33	0,05	2,6	1,86
3	19/07/2011	39,8	14,0	49,0	6,8	7,2	0,4	0,4	0,19	0,02	1,0	0,52
4	08/11/2011	63,6	24,0	84,1	11,1	7,6	35,2	0,6	0,17	0,03	0,9	0,76
5	10/01/2012	60,6	16,0	536,8	12,8	42,0	0	1,1	0,20	0,03	1,9	1
6	05/03/2012	65,2	9,0	371,7	13,5	27,6	0	1,4	0,21	0,05	2,2	1,02
7	11/03/2012	33	10,0	204,7	6,4	32,0	17,6	1,2	0,16	0,03	3,7	0,56
8	18/04/2012	17,8	6,0	62,7	3,9	16,0	6,4	0,4	0,14	0,02	2,2	0,74
9	17/05/2012	136,4	42,0	1030,3	28,3	36,4	0,2	42,6	3,84	1,05	31,2	8,54
10	23/08/2012	75,8	35,5	250,0	14,9	16,8	77,8	19,7	2,25	0,52	26,0	0,62
11	03/09/2012	29,4	24,5	41,6	5,0	8,4	0,4	4,2	0,80	0,12	14,5	0,5
12	05/10/2012	30	8,0	51,4	5,4	9,6	16,4	2,8	0,58	0,09	9,2	0,64
13	15/10/2012	53,8	24,0	114,2	9,2	12,4	0	6,6	0,86	0,13	12,2	0,58
14	22/11/2012	28,4	9,0	55,4	5,4	10,3	6,4	2,8	0,61	0,11	9,8	0,6
15	05/12/2012	26,8	7,0	98,9	5,5	18,0	40,2	11,1	2,52	0,72	41,3	3,74
16	19/12/2012	38,6	5,0	557,1	9,7	57,2	23,2	22,0	4,60	1,17	56,9	6,76
17	28/12/2012	23,6	3,0	213,0	5,8	36,8	77	5,1	1,67	0,50	21,4	5,28
Mediana		39,8	14,0	204,7	9,2	18,0	6,4	2,8	0,61	0,11	9,8	0,76

P (precipitación); Dur (duración de la precipitación); E (energía cinética de la precipitación); I₃₀ (intensidad máxima de la precipitación en 30 minutos); Pa5d (precipitación de los 5 días previos); Esc (escurrimiento); Qp (caudal pico); Qsm (caudal superficial medio); CE (coeficiente de escurrimiento); CSS (concentración de sedimentos suspendidos).

P (precipitation); Dur (precipitation duration); E (precipitation kinetic energy); I₃₀ (maximum precipitation intensity in 30 minutes); Pa5d (precipitation accumulated during the previous 5 days); Esc (runoff); Qp (peak discharge); Qsm (mean surface discharge); CE (runoff coefficient); CSS (concentration of suspended sediments).

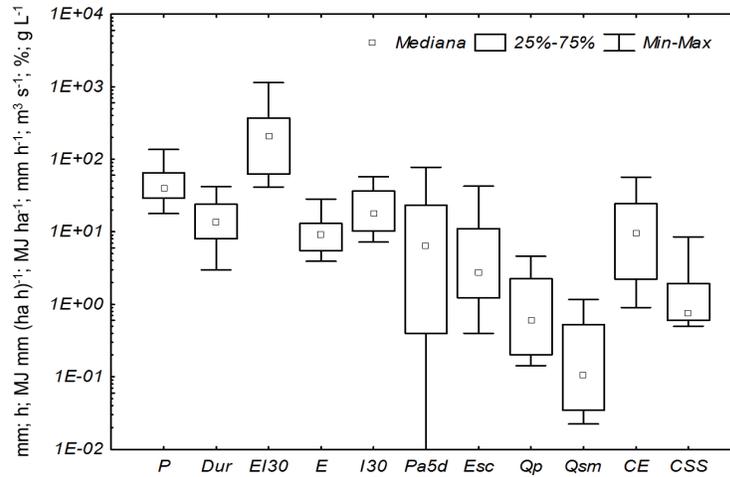


Figura 2. Diagramas de caja de las variables consideradas en los 17 eventos estudiados. La mediana, el primer y tercer cuartil, y los valores máximos y mínimos de las variables se expresan en escala logarítmica. El valor mínimo de Pa5d corresponde a cero. P (precipitación); Dur (duración de la precipitación); E (energía cinética de la precipitación); I_{30} (intensidad máxima de la precipitación en 30 minutos); Pa5d (precipitación de los 5 días previos); Esc (escurrimiento); Qp (caudal pico); Qsm (caudal superficial medio); CE (coeficiente de escurrimiento); CSS (concentración de sedimentos suspendidos).

Figure 2. Boxplot of the variables considered in the 17 studied events. The median, first and third quartile are expressed in logarithmic scale. The minimum value of Pa5d is zero. P (precipitation); Dur (precipitation duration); E (precipitation kinetic energy); I_{30} (maximum precipitation intensity in 30 minutes); Pa5d (precipitation accumulated during the previous 5 days); Esc (runoff); Qp (peak discharge); Qsm (mean surface discharge); CE (runoff coefficient); CSS (concentration of suspended sediments).

Tabla 2. Coeficientes de Correlación de Spearman entre las variables analizadas. La correlación es significativa al nivel 0,01 para los números en negrita y al nivel 0,05 para los números en negrita cursiva.

Table 2. Spearman correlation coefficients between the analyzed variables. The correlation is significant at level 0.01 for the numbers in bold and at level 0.05 for the numbers in bold italics.

	P	Dur	EI ₃₀	E	I ₃₀	Pa5d	Esc	Qp	Qsm	CE	CSS
P	1										
Dur	0,69	1									
EI ₃₀	0,64	0,08	1								
E	0,94	0,50	0,81	1							
I ₃₀	0,25	-0,25	0,89	0,48	1						
Pa5d	-0,28	-0,32	-0,10	-0,18	0,02	1					
Esc	0,29	0,14	0,50	0,37	0,47	0,16	1				
Qp	0,21	0,06	0,43	0,30	0,43	0,25	0,97	1			
Qsm	0,21	0,03	0,49	0,32	0,48	0,22	0,98	0,98	1		
CE	0,01	-0,07	0,35	0,12	0,45	0,33	0,93	0,94	0,95	1	
CSS	0,23	-0,28	0,73	0,45	0,71	0,19	0,49	0,51	0,55	0,44	1

P (precipitación); Dur (duración de la precipitación); E (energía cinética de la precipitación); I_{30} (intensidad máxima de la precipitación en 30 minutos); Pa5d (precipitación de los 5 días previos); Esc (escurrimiento); Qp (caudal pico); Qsm (caudal superficial medio); CE (coeficiente de escurrimiento); CSS (concentración de sedimentos suspendidos).

P (precipitation); Dur (precipitation duration); E (precipitation kinetic energy); I_{30} (maximum precipitation intensity in 30 minutes); Pa5d (precipitation accumulated during the previous 5 days); Esc (runoff); Qp (peak discharge); Qsm (mean surface discharge); CE (runoff coefficient); CSS (concentration of suspended sediments).

Relaciones entre lluvia, escurrimiento, lluvia antecedente y concentración de sedimentos

Para identificar los factores que explican la respuesta hidrológica y aquella en cuanto a la concentración de sedimentos, se realizó una matriz de correlación de Spearman

(Tabla 2). Su análisis indicó que tanto el Esc como el Qsm presentaron relaciones significativas con el índice EI₃₀. Con relación a la CSS, las correlaciones fueron significativas ($p < 0,05$), con el Esc, Qp y Qsm. Las correlaciones entre CSS y las variables asociadas a la precipitación fueron significati-

vas al nivel de $p < 0,01$ para los casos de $E_{I_{30}}$ e I_{30} , mientras que P, E y Dur no mostraron relación significativa con la CSS.

Por otra parte, la lluvia antecedente expresada a través de la precipitación en los 5 días previos, no se relacionó significativamente con Esc, Qp, Qsm, CE ni con CSS. En tanto, las variables P, Dur y E estuvieron correlacionadas entre sí de manera significativa ($p < 0,01$), aunque sin presentar asociación estrecha con I_{30} .

Agrupamiento de los eventos de acuerdo con la interacción lluvia-escorrentía-concentración de sedimentos mediante análisis de cluster

El análisis de cluster se realizó empleando todas las variables climáticas e hidrológicas analizadas que mostraron correlaciones significativas entre sí de acuerdo con la matriz de correlaciones de Spearman (Tabla 2). Por tal motivo se excluyó de dicho análisis a la humedad antecedente.

En la Figura 3 se muestra el resultado obtenido. Un primer análisis muestra que, al considerar la distancia Euclídea de 11, se diferencian 2 grupos principales. El estudio de las me-

dianas de las variables transformadas correspondientes a los casos que resultaron incluidos dentro de cada grupo (Tabla 3) permitió identificar diferencias entre ellos.

Los casos reunidos dentro del grupo A registraron las menores medianas en todas las variables, excepto en la relacionada a Dur. Por su parte, en el grupo B coincidieron los eventos que, en general, mostraron las mayores medianas para todas las variables. En relación con lo anterior, el resultado de la prueba no paramétrica de U de Mann-Whitney indicó diferencias significativas entre A y B en cuanto a $E_{I_{30}}$ ($p=0,03$), I_{30} ($p=0,02$), Esc ($p=0,0003$), Qp ($p=0,0002$), Qsm ($p=0,0002$), CE ($p=0,0002$) y CSS ($p=0,005$). Por otra parte, para identificar posibles diferencias dentro de los grupos que se conformaron, se consideraron otras asociaciones internas en A y en B. Así, en A, a una distancia reescalada de 3, se reconocieron 2 grupos: A1 y A2. Las medianas de las variables transformadas vinculadas a la precipitación fueron, en general, menores en A1 y mayores en A2 (Tabla 3). En cuanto a las variables del escurrimiento, la situación fue inversa, y las medianas fueron menores para los casos de A2.

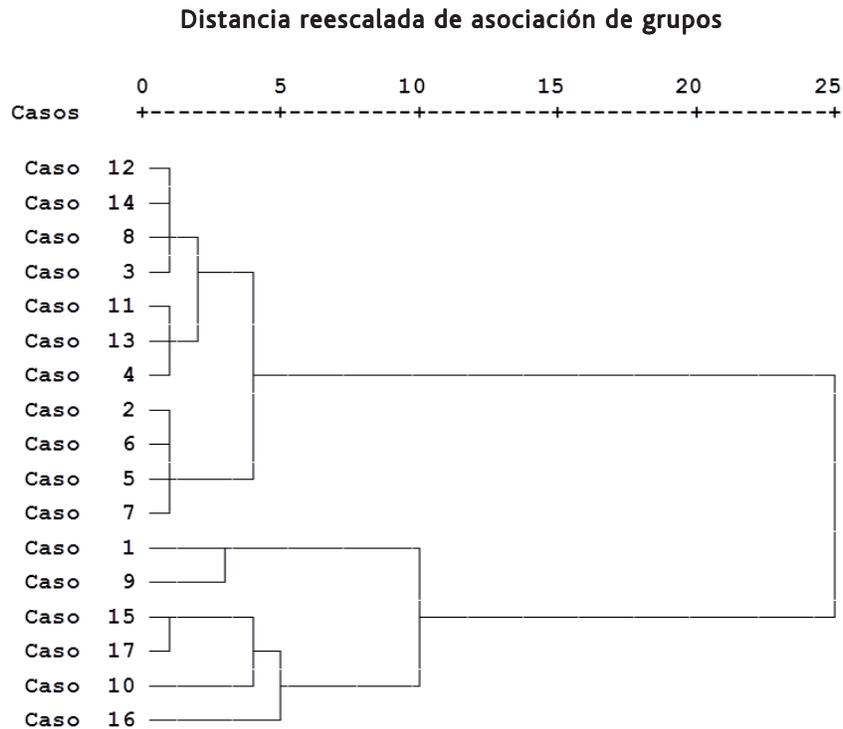


Figura 3. Dendrograma del análisis de cluster sobre los casos analizados, considerando datos transformados de precipitación, escurrimiento y variables asociadas a estos y concentración de sólidos suspendidos.

Figure 3. Dendrogram of cluster analysis on the analyzed cases, considering transformed data of precipitation, runoff, and variables associated with these and concentration of suspended sediments.

Tabla 3. Medianas de las variables transformadas correspondientes a los casos incluidos dentro de cada grupo obtenido a través del análisis de cluster.
Table 3. Medians of the transformed variables corresponding to the cases included within each group obtained by cluster analysis.

Grupo	Casos/Eventos	P	Dur	El ₃₀	E	I ₃₀	Esc	Qp	Qsm	CE	CSS
A	12-14-8-3-11-13-4-2-6-5-7	0,19	0,28	0,04	0,12	0,1	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
B	1-9-15-17-10-16	0,33	0,19	0,33	0,34	0,59	0,48	0,61	0,68	0,49	0,5
A1	12-14-8-3-11-13-4	0,1	0,28	0,01	0,06	0,05	0,06	0,1	0,06	0,16	0,01
A2	2-6-5-7	0,38	0,26	0,28	0,37	0,46	0,02	0,02	0,02	0,05	0,06
B1	1-9	0,88	0,64	0,95	0,89	0,72	0,81	0,76	0,83	0,49	0,59
B2	15-17-10-16	0,13	0,08	0,18	0,16	0,41	0,36	0,5	0,53	0,6	0,5

P (precipitación); Dur (duración de la precipitación); E (energía cinética de la precipitación); I₃₀ (intensidad máxima de la precipitación en 30 minutos); Esc (escurrimiento); Qp (caudal pico); Qsm (caudal superficial medio); CE (coeficiente de escurrimiento); CSS (concentración de sedimentos suspendidos).

P (precipitation); Dur (precipitation duration); E (precipitation kinetic energy); I₃₀ (maximum precipitation intensity in 30 minutes); Esc (runoff); Qp (peak discharge); Qsm (mean surface discharge); CE (runoff coefficient); CSS (concentration of suspended sediments).

En relación a B, a una distancia reescalada de 6 fue posible identificar otros 2 agrupamientos denominados B1 y B2. En términos generales, las medianas de las variables asociadas al escurrimiento y a la precipitación fueron mayores para los casos de B1 y menores para los de B2 (Tabla 3).

Si se comparan A1, A2, B1 y B2, es posible establecer que tanto B1 como B2 presentaron las mayores medianas de CSS y de variables asociadas al escurrimiento. En tanto, en términos generales, las medianas de las variables asociadas a la precipitación fueron menores en A1, seguidas en orden de importancia por las correspondientes a B2, A2 y B1.

DISCUSIÓN

Relaciones entre lluvia, escurrimiento y concentración de sedimentos suspendidos

El escurrimiento mostró alta variabilidad a escala de los eventos analizados. Esto se puede asociar a las diversas interacciones entre los factores que condicionan la respuesta lluvia-escurrimiento para cada evento, entre los que se encuentran la época de ocurrencia de las precipitaciones, que puede condicionar su magnitud e intensidad, el tiempo transcurrido desde la última precipitación y la evapotranspiración durante ese período que, junto a las propiedades edáficas, determinan la humedad del suelo (Pilgrim & Cordery, 1993; Ponce & Hawkins, 1996). A su vez, las características de la superficie en cuanto a su estado físico o a la cobertura de vegetación presente, influyen en la capacidad de infiltración del suelo, a través del efecto en la porosidad y el micro relieve. Estos factores poseen variabilidad espacial y temporal, y por lo tanto, conducen también a las diferencias en las respuestas al escurrimiento

(Malet *et al.*, 2003) y en las CSS (Nu-Fang *et al.*, 2011). Por su parte, las diferencias en la CSS entre los eventos pueden vincularse a desigualdades en el desprendimiento, transporte y sedimentación de partículas a lo largo de los eventos registrados. Tales partículas desprendidas pueden depositarse de manera permanente o temporaria en las vertientes. Las partículas depositadas temporariamente, podrán ser removilizadas antes de alcanzar la salida de la cuenca, lo que contribuirá a la variabilidad entre eventos (Walling, 1994). En relación a esta heterogeneidad, González-Hidalgo *et al.* (2007) y Nu-Fang *et al.* (2011), señalan que la mayor cantidad de material suspendido se transporta en una cantidad reducida de eventos. Esto coincide con los resultados obtenidos en el presente trabajo, donde dichos eventos fueron registrados durante el año más lluvioso.

El Esc se correlacionó con el índice El₃₀. En tanto, la CSS mostró correlaciones significativas tanto con las variables de la P (El₃₀ e I₃₀) como con las del escurrimiento (Esc, Qp y Qsm). Tales resultados pueden ser importantes a la hora de predecir la salida de contaminantes vinculada a los procesos erosivos. Estos pueden estar disueltos o particulados, e incluyen al carbono orgánico y a nutrientes (Collins & Owens, 2006; Navas *et al.*, 2012). Así, sería posible emplear a El₃₀ como predictora de la salida total de contaminantes. El monitoreo del escurrimiento sería de importancia para el pronóstico de la salida de contaminantes particulados.

Por su parte, la significancia resultante entre la CSS e I₃₀ podría indicar que el flujo superficial tuvo importancia en el desprendimiento de material durante el período es-

tudiado, ya que esta variable considera el incremento en la eficiencia en el desprendimiento asociada al escurrimiento por lluvias que superan la capacidad de infiltración de los suelos (van Dijk *et al.*, 2002).

En cuanto a la Pa5d, esta variable parecería no representar adecuadamente las condiciones antecedentes a los eventos. Si bien este es un criterio ampliamente difundido para definir la humedad previa, Trambly *et al.* (2010) señalan que las predicciones de la escorrentía aplicando tal criterio no han resultado adecuadas, en tanto que Giménez *et al.* (2012) encontraron similar respuesta en relación a la CSS.

Agrupamiento de los eventos de acuerdo con la interacción lluvia-escurrimiento-concentración de sedimentos

A partir del análisis de cluster se identificaron dos agrupamientos principales de los eventos: A y B. Estos se diferenciaron de manera significativa en las variables E_{30} , I_{30} , en las correspondientes al escurrimiento y en la CSS. A su vez, dentro de cada grupo se reconocieron distintas asociaciones internas. El análisis comparativo de las medianas indicó que el grupo A1 se relacionaría con la ocurrencia de precipitaciones de baja magnitud e intensidad y por lo tanto de baja erosividad, las cuales habrían provocado un escaso desprendimiento de material edáfico. Mientras tanto, la situación del grupo A2 presentó una tendencia hacia mayor CSS con respecto a A1. Esto podría estar vinculado a la erosividad registrada, cuya mediana resultó más elevada que la del grupo A1. Se podría postular entonces, asociado al menor escurrimiento producido, que el suelo podría haberse desprendido pero no habría encontrado suficiente volumen de agua para ser transportado. De esta forma, se limitaría la pérdida de suelo (Morgan, 2005). Así, el escaso escurrimiento se podría relacionar con condiciones de escasa humedad previa, como fue el caso de los eventos 5 y 6 (Tabla 1). A su vez, la cobertura podría haber afectado simultáneamente tanto el desprendimiento como el transporte en los eventos 5, 6 y 7 de este grupo. Dichos eventos se produjeron en los meses de enero y marzo con presencia de cultivos de verano en crecimiento activo, y por consiguiente, con alta cobertura.

De acuerdo con lo expuesto, podría plantearse que los casos comentados para los grupos A1 y A2 en los que el escurrimiento y la CSS fueron bajos, se dieron condiciones favorables para la ocurrencia de erosión de tipo laminar. Estas situaciones fueron las que se registraron con mayor

frecuencia durante el período estudiado, ya que 11 casos se asociaron a este tipo de erosión.

Según lo propuesto por Duvert *et al.* (2010), se analizó la correlación de Spearman entre la CSS y la E de la precipitación. Esta energía se refiere a la que poseen las gotas de lluvia para desprender el suelo, lo que genera erosión entre surcos. La baja velocidad del flujo puede limitar la capacidad de transporte de sedimentos, resultando en una baja CSS (van Dijk *et al.*, 2002). Las variables se correlacionaron de manera significativa ($p < 0,05$), lo que indicaría que la energía se vincularía al proceso erosivo en estos casos considerados.

Por otra parte, la respuesta representada en el grupo B estaba asociada a alta concentración de sedimentos suspendidos. En estos casos sería preponderante el rol del escurrimiento y la proporción de agua que escurre en relación a la lluvia caída, que para estos casos superó el 20% (Tabla 1). Entre los dos grupos identificados dentro de B resultaron contrastantes las precipitaciones y las variables asociadas. Sin embargo, el escurrimiento habría sido el agente en común que habría provocado el desprendimiento y transporte de suelo. A este factor se habría sumado el efecto de las lluvias en los eventos ubicados en el grupo B1, de manera importante. De este modo, sería posible relacionar a estos eventos con erosión en surcos, en los cuales la fuerza de corte del flujo habría sido la fuente de energía que provocó el desprendimiento (Cerdan *et al.*, 2002). Estos casos se dieron en una proporción menor en el ciclo estudiado, lo cual está de acuerdo con lo que mencionan Shipitalo & Edwards (1998) y Estrany *et al.* (2009). Dichos autores señalan que la mayor parte de la erosión anual se produce en eventos de frecuencia menor.

Vinculado a lo anterior, se examinó la correlación de Spearman entre la CSS y el Qsm. Si bien la relación no fue estadísticamente significativa, la tendencia fue positiva ($r_s = 0,54$), lo que indicaría el rol del escurrimiento en estos eventos. Dos imágenes correspondientes a las condiciones posteriores a la tormenta del evento 9 (17/05/2012) evidencian los surcos formados (Fig. 4) como ejemplo de lo discutido. En ellas se muestran dos lotes pertenecientes a la microcuenca cubiertos con rastrojo de soja en ese caso, pero también en ese momento podían encontrarse los demás lotes del área de estudio ocupados por residuos de maíz, cebada o trigo. Observaciones posteriores a este evento evidenciaron que la masa de agua que escurrió fue tal, que ocasionó el arrastre del rastrojo en áreas de pendiente. Así, con la pérdida de la cobertura la superficie del



Figura 4. Fotografías que muestran surcos formados en el área de estudio durante la tormenta del día 17/05/2012.

Figure 4. Photographs showing rills formed in the study area during the storm of 17/05/2012.

suelo quedó expuesta a la acción conjunta de la lluvia y del flujo, lo que produjo la formación de surcos y el desprendimiento adicional de material. Los suelos del área de este trabajo están bien provistos de CO, presentan texturas francas a franco-arcillosas y poseen una muy buena estructura porosa, con valores altos de estabilidad entre 3,3 y 1,79 mm de diámetro medio ponderado (Ares *et al.*, 2014). No obstante, el rol de la cobertura sería fundamental en estos agroecosistemas para atenuar la escorrentía y la pérdida de suelo. En tal sentido, ensayos con simulador de lluvias realizados en sectores representativos de la microcuenca permitieron comparar la respuesta ante la lluvia en cuanto al escurrimiento y la pérdida de suelo en microparcels cubiertas con rastrojo y en otras descubiertas bajo condiciones de humedad previa semejantes (Ares *et al.*, 2014). Así, con lluvias de 120 mm h^{-1} en suelo cubierto el coeficiente de escurrimiento promedio fue de 3,7%, y la pérdida de suelo de 3,1 mg de sedimento por mm de precipitación aplicado. Mientras tanto, las parcelas sin cobertura bajo igual intensidad alcanzaron un coeficiente de escurrimiento de 28,8%, con una pérdida de suelo de 64,2 mg de sedimento por mm de precipitación aplicado. Cabe aclarar que, de acuerdo con el tamaño de la parcela utilizado, los sedimentos se habrían desprendido principalmente por el impacto de las gotas de lluvia, y en menor medida, por el efecto del escurrimiento. En cuanto a la condición superficial de los suelos, los valores de erodabilidad calculados mediante nomograma (Wischmeier & Smith, 1978) fueron cercanos a 0,3 para la microcuenca en general (Ares, 2014). Estos valores están en concordancia con la estabilidad de la estructura antes mencionada. Los resultados indicarían que, aún con baja susceptibilidad de los suelos

ala erosión, la cobertura vegetal resultaría fundamental para reducir el escurrimiento y la pérdida de suelo bajo las condiciones de estudio. De este modo, lo anterior contribuiría a explicar en parte lo que fue observado en los eventos registrados en la microcuenca.

Se podría establecer que en estas áreas de pendientes moderadas el sistema de siembra directa debería implementarse asociado, en primer lugar, a prácticas agronómicas que garanticen el mantenimiento de la cubierta de rastrojos. Entre estas se puede mencionar al pastoreo controlado de los rastrojos. La adopción de rotaciones con cultivos de gramíneas también permite la formación de una cubierta de residuos abundante, que bajo las condiciones de clima templado tiene baja tasa de descomposición, lo que prolonga su efecto protector. A su vez, estas prácticas deberían integrarse de manera adecuada con prácticas específicas para el control de la erosión, que incrementen la rugosidad para favorecer la infiltración y disminuir el escurrimiento. Estas deberían incluir, en orden de complejidad, los cultivos cortando la pendiente, en las áreas de pendientes uniformes y de bajo gradiente. En tanto, en las áreas de relieves más complejos, serían adecuadas las técnicas de cultivos en curvas de nivel. La adopción de terrazas sería la de mayor complejidad a implementar donde sea necesario acortar las pendientes, como puede suceder en áreas de laderas. Mientras que las prácticas agronómicas actúan sobre el desprendimiento y transporte ocasionado por el impacto de las gotas de lluvia, la implementación de prácticas específicas contribuiría a atenuar el efecto de los escurrimientos concentrados durante eventos de mayor magnitud.

Como síntesis de los resultados obtenidos, se puede señalar que el escurrimiento medido en la microcuenca se correlacionó significativamente con la erosividad de las precipitaciones, en tanto que la concentración de sólidos suspendidos presentó correlaciones con variables asociadas a la precipitación y al escurrimiento. Los eventos registrados mostraron diferencias en la respuesta erosiva, vinculadas a erosión de tipo laminar y en surcos. El primer caso se daría de manera más frecuente. El segundo, sería el proceso dominante en las vertientes de la microcuenca en una proporción de eventos menor, pero responsable de la generación de mayor concentración de sólidos suspendidos. De acuerdo con estos resultados, se destaca la conveniencia de mantener la elevada capacidad natural de infiltración de los suelos bajo estudio mediante un manejo agronómico racional. Esa capacidad se encuentra en el rango de 60-120 mm h⁻¹, según lo que indican ensayos de simulación de lluvia implementados en la región estudiada (Sfeir *et al.*, 2005; Ares *et al.*, 2014). Asimismo, se requeriría la implementación de prácticas específicas de conservación de suelos que contribuyan al control de los escurrimientos erosivos una vez que los mismos se hubieran producido. Ello contribuirá además a la reducción de la vulnerabilidad a la contaminación por aporte de sedimentos a los cuerpos de agua de la región.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por los proyectos UBACyT 709 y 937 (período 2011-2014). Se agradece a Ing. D. Arias, Lic. F. Altolaquirre y Téc. N. de Líbano por su colaboración en el procesamiento de las muestras de agua de escurrimiento. Se agradece al Lic. J. González Castelain por su colaboración en el procesamiento estadístico de los datos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ares, MG. 2014. Lluvia, escurrimiento y producción de sedimentos en una microcuenca agrícola del Sistema de Tandilia. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Ares, MG; C Chagas & M Varni. 2014. Respuesta hidrológica de cuencas de diferentes tamaños ubicadas en la Pampa Serrana y en la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 32(1): 117-127.
- Ares, MG; M Varni; C Chagas & I Entraigas. 2012. Calibración del número N de la curva de escurrimiento en una cuenca agropecuaria de 116 km² de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Agrociencia* (México) 46: 535-541.
- Armand, R; C Bockstaller; A-V Auzet & P Van Dijk. 2009. Runoff generation related to intra-field soil surface characteristics variability. Application to conservation tillage context. *Soil Till Res* 102: 27-37.
- ASTM Standard D3977 – 97. 2007. Test Methods for Determining Sediment Concentration in Water Samples. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Blanco, N & R Lal. 2008. Principles of Soil Conservation and Management. Springer. 617 pp.
- Cerdan, O; Y Le Bissonnais; A Couturier; H Bourennane & V Souchère. 2002. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil Till Res* 67: 99-108.
- Cerdan, O; Y Le Bissonnais; G Govers; V Lecomte; K van Oost; A Couturier; C King & N Dubreuil. 2004. Scale effect on runoff from experimental plots to catchment in agricultural areas in Normandy. *J Hydrol* 299: 4-14.
- Chapman, T. 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrol Process* 13(5): 701-714.
- Chow VT; D Maidment & L Mays. 1994. Hidrología aplicada. Mc Graw Hill. Santafé de Bogotá, Colombia. 584 pp.
- Collins AJ & PN Owens. 2006. Introduction to soil erosion and sediment redistribution in river catchments: Measurement, modeling and management in the 21st century. In: Owens PN & AJ Collins (eds). Soil erosion and sediment redistribution in catchments measurement, modeling and management. Pp:3-9. CAB International, London, UK. 328 pp.
- Dalpono, D; P Rinaldi; G Cazenave; E Usunoff; M Varni; L Vives; MJ Vénere & A Clausse. 2007. A validated fast algorithm for simulation of flooding events in plains. *Hydrol Process* 21: 1115-1124.
- Duvert, C; N Gratiot; O Evrard; O Navratil; J Némery; C Prat & M Esteves. 2010. Drivers of erosion and suspended sediment transport in three headwater catchments of the Mexican Central Highlands. *Geomorphology* 123: 246-256.
- Estrany, J; C García & RJ Batalla. 2009. Suspended sediment transport in a small Mediterranean agricultural catchment. *Earth Surf Proc Land* 34: 929-940.
- Gellis, AC. 2013. Factors influencing storm-generated suspended-sediment concentrations and loads in four basins of contrasting land use, humid-tropical Puerto Rico. *Catena* 104: 39-57.
- Giménez, R; J Casali; I Grande; J Díez; MA Campo; J Álvarez-Mozos & M Goñi. 2012. Factors controlling sediment export in a small agricultural watershed in Navarre (Spain). *Agr Water Manage* 110: 1-8.
- González-Hidalgo, JC; JL Peña-Monné; M de Luis. 2007. A review of daily soil erosion in Western Mediterranean areas. *Catena* 71: 193-199.
- INTA-CIRN. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. Proyecto PNUD 85/019. Buenos Aires, Argentina. Tomo I, 731 p.
- INTA. 1992. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3760-22, Chillar.
- Irurtia, CB; R Berón; O Costamagna & A Glave. 1996. Erosión, Provincia de Buenos Aires. En: Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura (ed). El deterioro del ambiente en la Argentina. Pp 55-64. Orientación Gráfica Editora.

- Jin, H; L Hongwen; RG Rasaily; W Qingji; C Guohua; S Yanbo; Q Xiaodong & L Lijin. 2011. Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat-maize cropping system in North China Plain. *Soil Till Res* 113: 48-54.
- Knapen, A; J Poesen; G Govers; G Gyssels & J Nachtergaele. 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Sci Rev* 80: 75-109.
- López-Fando, C & MT Pardo. 2011. Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region. *Soil Till Res* 111: 224-230.
- Malet, J-P; A-V Auzet; O Maquaire; B Ambroise; L Descroix; M Esteves; J-P Vandervaere & E Truchet. 2003. Soil surface characteristics influence on infiltration in black marls: application to the Super-Sauze earthflow (southern Alps, France). *Earth Surf Proc Land* 28: 547-564.
- Moreno, F; JM Murillo; F Pelegrín & IF Girón. 2006. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO₃. *Soil Till Res* 85: 86-93.
- Morgan, RP. 2005. Soil Erosion and Conservation, 3rd Edition. Blackwell Publishing. 304 pp.
- Molina, A; G Govers; J Poesen; H Van Hemelryck; B De Bièvre; V Vanacker. 2008. Environmental factors controlling spatial variation in sediment yield in a central Andean mountain area. *Geomorphology* 98: 176-186.
- Navas, A; L Gaspar; L Quijano; M López-Vicente & J Machín. 2012. Patterns of soil organic carbon and nitrogen in relation to soil movement under different land uses in mountain fields (South Central Pyrenees). *Catena* 94: 43-52.
- Nearing, MA; LJ Lane & VL Lopes. 1994. Modeling soil erosion. In: Lal, R (ed). Soil Erosion Research Methods. 2nd Edition. Pp 127-156. SWCS, Ankeny, Iowa, USA.
- Nu-Fang, F; S Zhi-Hua; L Lu & J Cheng. 2011. Rainfall, runoff, and suspended sediment delivery relationships in a small agricultural watershed of the Three Gorges area, China. *Geomorphology* 135: 158-166.
- Onderka, M; A Krein; S Wrede; N Martínez-Carreras & L Hoffmann. 2012. Dynamics of storm-driven suspended sediments in a headwater catchment described by multivariable modeling. *J Soils Sediments* 12: 620-635.
- Pilgrim, DH & I Cordery. 1993. Flood runoff. In: Maidment, DR (ed). Handbook of Hydrology. Pp: 9.1-9.42. McGraw-Hill Inc. New York, U.S.A.
- Ponce, VM & R Hawkins. 1996. Runoff Curve Number: has it reached maturity? *J Hydrol Eng ASCE* 1(1): 11-19.
- Pyle, D. 1999. Data preparation for data mining. Morgan Kaufmann, San Francisco.
- Rodríguez, L; C Vionnet; G Parkin & P Younger. 2000. Aplicación de un método automático para la separación de las componentes del hidrograma. Actas XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba, Argentina. Tomo II pp. 279-286.
- Rodríguez-Blanco, ML; MM Taboada-Castro & MT Taboada-Castro. 2010. Factors controlling hydro-sedimentary response during runoff events in a rural catchment in the humid Spanish zone. *Catena* 82: 206-217.
- Sfeir, A; M Varni; M Piscitelli; RJ Crespo; G Ares & G Studdert. 2005. Cuantificación de los procesos de infiltración, escurrimiento y pérdida de suelo por medio de simuladores de lluvia. Actas de XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, en CD.
- Sfeir, A; M Varni; M Piscitelli; G Ares; RJ Crespo & E Usunoff. 2006. Efecto de la siembra directa permanente sobre la reducción del escurrimiento superficial. III Congreso Iberoamericano sobre el control de la erosión y los sedimentos, en CD.
- Shipitalo, MJ & WM Edwards. 1998. Runoff and erosion control with conservation tillage and reduced-input practices on cropped watersheds. *Soil Till Res* 46 1-12.
- Tramblay, Y; C Bouvier; C Martin; JF Didon-Lescot; D Todorovik & JM Domergue. 2010. Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modeling. *J Hydrol* 387:176-187.
- Valentin, C; J Poesen & Y Li. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* 63: 132-153.
- van Dijk, AI; LA Bruijnzeel & CJ Rosewell. 2002. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *J Hydrol* 261: 1-23.
- Van Wie, B; JC Adam & JL Ullman. 2013. Conservation tillage in dryland agriculture impacts watershed hydrology. *J Hydrol* 483: 26-38.
- Walling, DE. 1994. Measuring sediment yield from river basins. In: Lal, R (ed). Soil Erosion Research Methods. 2nd Edition. Pp 127-156. SWCS, Ankeny, Iowa, USA.
- Wischmeier, WH & DD Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning. Handbook 537, USDA-ARS.
- West, LT; WP Miller; RR Bruce; GW Langdale; JM Laflen & AW Thomas. 1992. Cropping system and consolidation effects on rill erosion in the Georgia Piedmont. *Soil Sci Soc Am J* 56: 1238-1243.