

ESCURRIMIENTO EN SISTEMA DE SIEMBRA DIRECTA: EFECTO DE ALGUNOS FACTORES METEOROLÓGICOS

MARIO GUILLERMO CASTIGLIONI^{1*} & ERIK ZIMMERMANN²

Recibido: 20-09-14

Recibido con revisiones: 05-03-15

Aceptado: 21-03-15

RESUMEN

El escurrimiento superficial es un proceso que debe ser considerado por su efecto sobre el ambiente como también por sus consecuencias productivas. Dada su importancia a escala de lote de producción, el objetivo del trabajo fue estudiar la incidencia de las precipitaciones, la temperatura y otros efectos estacionales, sobre las características de los escurrimientos de un Argiudol vértico cultivado en un sistema de siembra directa. El trabajo se desarrolló en un lote con maíz en siembra directa, ubicado en Zavalla, Santa Fe, Argentina (33°02'14,84"S, 60°54'04,40"O). Con la información proveniente de las lluvias (lámina, intensidad, duración y precipitaciones previas), de las temperaturas (máximas y medias diarias), de los escurrimientos (lámina, duración y caudal pico) y de algunos parámetros estimados (curva número, condición antecedente de humedad, tiempo de retraso y coeficientes de abstracción inicial y de escurrimiento), se estudió el grado de vinculación entre las diferentes variables climáticas y de escurrimiento. Se pudo comprobar una fuerte relación entre las precipitaciones caídas los cinco días previos a cada evento de escurrimiento con el valor de la curva número, la lámina escurrida y el coeficiente de escurrimiento. La lluvia de los diez días anteriores influyó sobre el coeficiente de abstracción inicial, aumentando su valor a partir de precipitaciones previas mayores a los 40 mm. Las lluvias y las temperaturas máximas o medias de los diez a quince días previos, incidieron sobre la extensión del tiempo de retraso. Al estimar la lluvia en exceso considerando la abstracción inicial registrada a campo, la dinámica del escurrimiento y el caudal pico predichos presentaron resultados más satisfactorios, respecto a emplear la metodología tradicional pautada por el modelo de la curva número. No se observaron efectos estacionales o de las diferentes etapas del cultivo de maíz (barbecho o período de crecimiento), sobre el comportamiento hidrológico de la parcela.

Palabras clave. Lluvia antecedente, abstracción inicial, tiempo de retraso.

RUNOFF UNDER NO TILLAGE SYSTEM: EFFECT OF SOME METEOROLOGICAL FACTORS

ABSTRACT

Surface runoff should be taken into account not only for its impact on the environment but also for its effect on crop production. Surface runoff should be evaluated at the field scale; the objective of this study was to evaluate rainfall, temperature and other seasonal effects on runoff characteristics of a vertic Argiudol under no-tillage. The study was conducted in a corn field under no-tillage in Zavalla, Santa Fe, Argentina (33°02'14.84"S, 60°54'04.40"O). With the rainfall information (amount, duration, intensity and previous rainfall), temperatures (maximum and average daily), runoff (amount, duration and peak flow) and some estimated parameters (curve number, previous moisture condition, lag time and initial abstraction and runoff coefficients) the association among the different climatic and runoff variables was studied. A strong relationship was observed between rainfall the previous five days and the curve number value, runoff depth and runoff coefficient. Ten day= previous rainfall influenced the initial abstraction coefficient, increasing its value with previous rainfall greater than 40 mm. Rainfall and maximum or average temperatures of ten to fifteen days previous rainfall impacted on the delay time extent (Lag). When rainfall excess was estimated taking into account the field initial abstraction, runoff dynamics and peak flow were more satisfactory predicted compared to the results obtained with the traditional methodology used by the curve number model. Seasonal effects and corn growth stages (fallow or growing period) did not affect the hydrological plot response.

Key words. Antecedent rainfall, initial abstraction, lag time.

¹ Facultad de Agronomía (UBA); Buenos Aires. Argentina.

² Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura (UNR), Rosario. Argentina.

*Autor de contacto: castigli@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

El escurrimiento superficial es crítico en la pérdida de suelo por erosión hídrica. Las consecuencias de este proceso de degradación no solo son perjudiciales para la productividad de las tierras, sino que también genera externalidades como la destrucción de obras de infraestructura, la contaminación por transporte de sedimentos y sustancias químicas y la colmatación de los cuerpos de agua por sedimentación (Blanco & Lal, 2010).

Una de las tareas básicas de quienes modelan los procesos hidrológicos a escala de cuenca o de parcela, ha sido la búsqueda de una relación simple entre precipitación y escurrimiento (Paz Pellat, 2009). El desarrollo de este tipo de modelos predictivos es importante para la estimación de la respuesta hidrológica de vertientes y cuencas, para el análisis de los cambios en el comportamiento de los excesos hídricos ante la implementación de distintas prácticas de conservación de suelos, como también para efectuar un cálculo más ajustado del balance hídrico (Soulis & Valiantzas, 2011).

La modalidad que asume el escurrimiento responde al efecto e interacción de diversas variables, entre las que se pueden detallar la intensidad de las lluvias, su duración, las propiedades de los suelos presentes, el contenido de humedad edáfica, el uso de la tierra, la cobertura y el largo y gradiente de las pendientes (Elhakemm & Papanicolaou, 2009).

Dada la complejidad e incertidumbre que gobiernan dicho proceso, existen modelos de predicción agregados y conceptuales, que constituyen herramientas simples y útiles para ser utilizadas en el análisis de la relación lluvia-escurrimiento (Elhakemm & Papanicolaou, 2009). No obstante la simplicidad en su uso, estos modelos deben ser calibrados y validados, a partir de mediciones realizadas a campo (Elhakemm & Papanicolaou, 2009).

El método de la curva número fue desarrollado en 1954 por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos, encontrándose documentado en el USDA-NRCS (2010). Esta metodología fue elaborada para predecir el escurrimiento a partir de datos de lluvia, ha sido ampliamente utilizada en el mundo y también fue incluida en distintos modelos hidrológicos, de erosión y de calidad de agua (Huang *et al.*, 2006). Este modelo fue adoptado en varias regiones para distintas condiciones de uso de la tierra y bajo diferentes climas (Soulis & Valiantzas, 2011). Su base de datos inicial se originó a partir del aporte de información correspondiente a 200 cuencas, con superficies que oscilaron entre 0,0971 y 18.600 ha.

Este es un modelo de dos parámetros: a) abstracción inicial (I_a), que representa la lámina de agua de lluvia que inicialmente queda atrapada en el sistema hidrológico por intercepción, almacenamiento en depresiones y debido a la infiltración ocurrida en los primeros momentos de la tormenta; b) retención potencial máxima (S), que consiste en la máxima lámina de agua (exceptuada la I_a), que potencialmente puede ser absorbida por el sistema estudiado (Young & Carleton, 2006; Elhakemm & Papanicolaou, 2009). El valor de la curva número es considerado una función del tipo de suelo, del uso de la tierra, la cobertura y la condición antecedente a la escorrentía (Elhakemm & Papanicolaou, 2009).

La condición antecedente de humedad (AMC) fue inicialmente asumida como la principal causa de la variación en la respuesta hidrológica entre tormentas de similar magnitud. Sin embargo, otros estudios han determinado un rol secundario de la AMC, al ser comparado dicho parámetro con otras características superficiales del suelo, como por ejemplo la formación de costras (Zhang *et al.*, 2011). En este sentido, Steenhuis *et al.* (1995) y Soulis *et al.* (2009), mencionaron que las variaciones observadas en el valor de la curva número no siempre han sido justificadas a partir de los cambios ocurridos en el antecedente de humedad. Por su parte, Young & Carleton (2006) sugirieron que la humedad del suelo es uno de los factores condicionantes, pero no el que predomina sobre los restantes que controlan el desarrollo inicial de la escorrentía. Es por ello que dichos autores sugirieron el uso del término condición antecedente del escurrimiento. Sin embargo en los NEH-4 (National Engineering Handbook, Section 4) más actuales (USDA-NRCS, 2010), no se ofrece una guía para cuantificar o determinar dicho parámetro (Young & Carleton, 2006).

Debido a las dificultades que se presentan en el monitoreo de la humedad edáfica, la problemática de la humedad antecedente se ha abordado generando diversos índices, entre los cuales se encuentran aquellos que se relacionan con las precipitaciones ocurridas en forma previa al desencadenamiento del proceso de escurrimiento (Brocca *et al.*, 2008). Si bien el término antecedente puede abarcar lo ocurrido entre los 5 y 30 días previos (Mishra *et al.*, 2005), el método de la curva número toma en cuenta solamente lo sucedido los 5 días anteriores a cada tormenta, categorizando el estado de humedad en tres niveles: AMC I (seco), AMC II (normal) y AMC III (húmedo) (Mishra *et al.*, 2006). Sin embargo, muchos estudios que han utilizado este criterio de estimar la humedad previa del suelo, han mostrado resultados poco satisfactorios (Brocca *et al.*, 2008; Soulis *et al.*, 2009; Trambly *et al.*, 2010; Ares *et al.*, 2012). Por lo mencionado, algunos investigadores han

considerado otros estimadores del antecedente de humedad. Dentro de estos se pueden mencionar a los distintos índices construidos en función del caudal base de los arroyos o de la precipitación antecedente, la estimación de la humedad del suelo a partir de balances hídricos calibrados o mediante información generada por satélites, como también la medición directa del contenido hídrico edáfico (Huang *et al.*, 2007; Brocca *et al.*, 2009; Trambly *et al.*, 2010; Ares *et al.*, 2012).

Además de estas dificultades, el coeficiente de abstracción inicial (λ), que resulta del cociente entre la y el valor de S, es el supuesto más ambiguo del método y requiere de mayores estudios (Mishra *et al.*, 2006). Este parámetro, que el método de la curva número lo ha fijado en 0,2, depende fuertemente de las condiciones climáticas y tiene un efecto importante en los cálculos de la lámina de escurrimiento, del caudal pico del hidrograma y en la distribución temporal del caudal (Baltas *et al.*, 2007). Ponce & Hawkins (1996) sugirieron que fijar el valor de λ en 0,2 puede no ser lo más apropiado, dado que el mismo debe ser interpretado como un parámetro regional. En este sentido, algunos investigadores han propuesto otros coeficientes para el logro de mejores resultados, encontrándose trabajos en los que los valores óptimos de λ oscilaron entre 0 y 0,38 (Ponce & Hawkins, 1996; Woodward *et al.*, 2002; Mishra & Singh, 2004).

Otro parámetro a considerar en la estimación de la relación lluvia-escurrimiento, es aquel que se refiere al tiempo transcurrido entre que comienza a escurrir el agua y el pico de la crecida, generalmente expresado en términos del tiempo de retraso (Lag) (Bodhinayake, 2004). Esta última variable está íntimamente asociada a la predicción del proceso lluvia-escurrimiento, y debido a ello muchos modelos la utilizan en forma directa o toman en cuenta otros parámetros relacionados. Según Bodhinayake (2004), el tiempo de retraso puede ser representado de diversas maneras: tiempo de concentración, tiempo al pico, tiempo de duración del escurrimiento o como el tiempo transcurrido entre el centroide del hietograma de lluvia en exceso respecto al centroide del hidrograma.

Dada la importancia que representa el proceso de escurrimiento a escala de lote de producción, resulta necesario poder establecer los parámetros que regulan el mismo, como así también la forma de poder estimarlos. El objetivo del trabajo fue estudiar la incidencia de las precipitaciones, la temperatura y otros efectos estacionales sobre las características de los escurrimientos de un Argiudol vértico cultivado en un sistema de siembra directa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en un lote perteneciente a la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Rosario, ubicado en Zavalla (Pcia. de Sta. Fe) (33°02'14,84"S, 60°54'04,40"O). La serie de suelos presente es Roldán (Argiudol vértico), la pendiente es de aproximadamente el 0,45%, el uso de la tierra es la agricultura continua en siembra directa, con una rotación trigo/soja-maíz, orientando las hileras de siembra en forma perpendicular a la pendiente.

La temperatura media anual correspondiente a la región es de 17 °C, mientras que la precipitación media anual es de 976 mm, ocurriendo el 68% de las lluvias en el período primavera-estival. De acuerdo al balance hídrico mensual regional según Thornthwaite, los meses con déficit de agua son diciembre, enero y febrero, mientras que el período con exceso de agua se extiende de junio a noviembre.

En el lote se delimitó una parcela de escurrimiento de 2106 m² (97 x 21,71 m). La granulometría del suelo en el espesor de 0 a 10 cm fue: arena 5%, arcilla 29%, limo 66%, presentando estos resultados baja variabilidad espacial (coeficiente de variación= 4%, n= 4).

El caudal se estimó a partir del registro de altura de la columna de agua, realizado cada 15 minutos por un limnógrafo. El mismo se instaló a la salida de la parcela, dentro de una cámara de inspección con un vertedero de chapa rectangular y salida "no ahogada" a canal cuneta. Para transformar los valores de altura de agua en caudal, se utilizó la ecuación de vertedero rectangular de pared delgada:

$$Q_e \text{ (empírico)} = C_d \times \frac{2}{3} b \times (2g)^{1/2} \times h^{3/2} \quad (1)$$

siendo Q_e : caudal (m³ s⁻¹); C_d : coeficiente de descarga; b : ancho del vertedero (m); g : aceleración de la gravedad (m s⁻²); h : altura por sobre la cresta (m).

El período de registro de los escurrimientos fue desde el 1 de octubre de 2011 hasta el 15 de octubre de 2012, estando la parcela durante ese lapso de tiempo con rastrojo de cebada, cultivo de maíz (siembra: 7/11/2011; cosecha: 1/04/2012) y rastrojo de maíz. Tanto la información correspondiente a las precipitaciones, tomada con una frecuencia de 15 minutos, como las temperaturas máximas y medias diarias, fueron obtenidas a partir de la estación agrometeorológica perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias (UNR).

Con la información proveniente de las características de las lluvias y de los escurrimientos originados en la parcela, se estimaron para cada evento los siguientes parámetros: lámina de lluvia caída (P); intensidad media de la lluvia (I); duración de la lluvia (DLL); lámina de agua escurrida (Q); duración del escurrimiento (DE); coeficiente de escurrimiento (CE); curva número (CN); lámina de lluvia previa al inicio del escurrimiento

(Ia); precipitaciones caídas los siguientes días previos a cada tormenta: 5, 10, 15, 20 y 30; antecedente de humedad correspondiente a cada evento de lluvia (AMC); caudal pico de escurrimiento (QP); sumatoria y promedio de las temperaturas máximas y medias diarias correspondientes a los mismos días previos mencionados para lluvia; minutos de duración de la rama ascendente (DAP) y descendente del hidrograma generado (DDP).

El valor de CN se calculó a partir de la información de lámina de lluvia y de escurrimiento, aplicando la siguiente ecuación para determinar S (retención potencial máxima al comienzo de la tormenta) (Yoo *et al.*, 1993):

$$S = 5P + 10Q - 10(Q^2 + 1,25PQ)^{1/2} \quad (2)$$

Posteriormente, los valores de S fueron transformados a CN mediante la siguiente fórmula (Hawkins, 1993):

$$CN = 25.400 \times (254 + S)^{-1} \quad (3)$$

Con la información de las precipitaciones caídas los 5 días previos a cada evento, se determinó según la época del año (etapa de reposo o de activo crecimiento), la condición antecedente de humedad (AMC) correspondiente a cada tormenta (USDA NRCS, 2010). A su vez, y para el caso de las tormentas bajo condición antecedente de humedad distinta a II, los resultados de CN fueron transformados a dicha condición (CN II), mediante el uso de tablas (USDA-NRCS, 2010).

El coeficiente de escurrimiento (CE) se determinó de la siguiente manera:

$$CE = \frac{\text{lámina de escurrimiento (mm)}}{\text{lámina de lluvia (mm)}} \quad (4)$$

El tiempo de retraso (Lag) se estimó gráficamente y a partir de ajustar dicho parámetro mediante la utilización del modelo hidrológico HEC-HMS 3.5 (2010). Este último procedimiento se realizó con el objetivo de determinar el valor de Lag correspondiente al hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Chow *et al.*, 1994), que lograba el mejor ajuste entre el hidrograma observado a campo de cada tormenta con el generado por dicho modelo. Para ello se utilizó como valor de entrada la precipitación en exceso correspondiente a cada tormenta, la que surgió de aplicar la siguiente ecuación (Brocca *et al.*, 2009) sobre los milímetros de lluvia caídos en cada intervalo de tiempo en que se subdividieron las precipitaciones (15 minutos):

$$E = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia + S)} \quad P > Ia \quad (5)$$

donde E= lámina de lluvia en exceso (mm); Ia = abstracción inicial (mm); P= lámina de lluvia (mm); S= máxima retención potencial (mm).

Para escoger el Lag que aportara el mejor ajuste entre los caudales generados por el modelo HEC-HMS 3.5 (2010) y aquellos obtenidos a campo, se utilizó el criterio de seleccionar aquel parámetro que aportara el menor valor de la raíz cuadrada del error cuadrado medio (RMSE), siendo su forma de cálculo la siguiente:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_o)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

siendo y_i el valor actual, y_o el valor estimado y N el número de observaciones.

Si bien para la determinación gráfica del Lag se considera el lapso de tiempo transcurrido entre el centroide del hietograma de la lluvia en exceso y el pico del hidrograma (USDA-NRCS, 2010), dado que algunas de las tormentas analizadas presentaron más de un pico de crecida, se optó por considerar el tiempo transcurrido hasta el centroide del hidrograma.

Para el estudio de la vinculación entre las distintas variables estudiadas, se realizaron análisis de correlación y regresión simple, utilizando para ello el programa InfoStat, versión 2008 (Di Rienzo *et al.*, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el presente estudio llovieron en total 1122 mm, siendo la lámina total de agua escurrida 84,8 mm, representando el 7,6% del total. Un valor superior a este (22%), fue reportado por Sasal *et al.* (2010) al analizar los escurrimientos ocurridos en un monocultivo de maíz en siembra directa, determinados sobre una parcela ubicada en la EEA INTA Paraná (Pcia. de Entre Ríos), dispuesta sobre un Argiudol ácuico. Este mayor volumen de agua perdida correspondiente a este último trabajo, fue como consecuencia de encontrarse la parcela sobre una pendiente más pronunciada (3,5%), debido al efecto de un período con mayor volumen de precipitaciones (1574 mm) y por el menor tamaño de la parcela de escurrimiento utilizada (100 m²). Por otra parte, el porcentaje de escurrimiento registrado en el presente trabajo, fue superior al obtenido por Weir (2002) en parcelas con monocultivo de maíz, ubicadas en Marcos Juárez (Pcia. de Córdoba). En dicho estudio, los porcentajes de escurrimiento fueron 5% y 2%, para las parcelas con el 2% de gradiente y 88 m² de superficie, y con 1% de gradiente y 1500 m² de superficie, respectivamente, siendo la lámina de lluvia caída durante dicho estudio de 778 mm.

Entre el 1 de octubre de 2011 y el 30 de setiembre de 2012 llovieron 989 mm, lo que coincidió con la media anual regional pero no con su distribución (período: 1973-2013) (Fig. 1). Estas diferencias ocurrieron fundamentalmente en febrero, agosto, setiembre y octubre, obteniéndose en dichos meses 271 mm más respecto a la media histórica, mientras que durante enero, abril, junio, julio y diciembre llovieron 251 mm menos respecto al promedio.

Durante el lapso de tiempo analizado, los eventos de lluvia fueron 63, de los cuales 10 ocasionaron escurrimiento

(Tabla 1). A su vez, el 84% de las precipitaciones fueron inferiores a 36 mm, y entre estas solo una lluvia de 31,5 mm con alta intensidad ($31,5 \text{ mm h}^{-1}$), fue generadora de escurrimiento. Todos los eventos con láminas mayores a 36 mm provocaron escurrimiento, con la excepción de una tormenta de 43 mm de baja intensidad ($1,79 \text{ mm h}^{-1}$), que no generó pérdida de agua de la parcela.

Se pudo comprobar también, que de acuerdo a la estación del año, el volumen de las tormentas máximas que no provocaron escurrimiento fue distinto, observándose

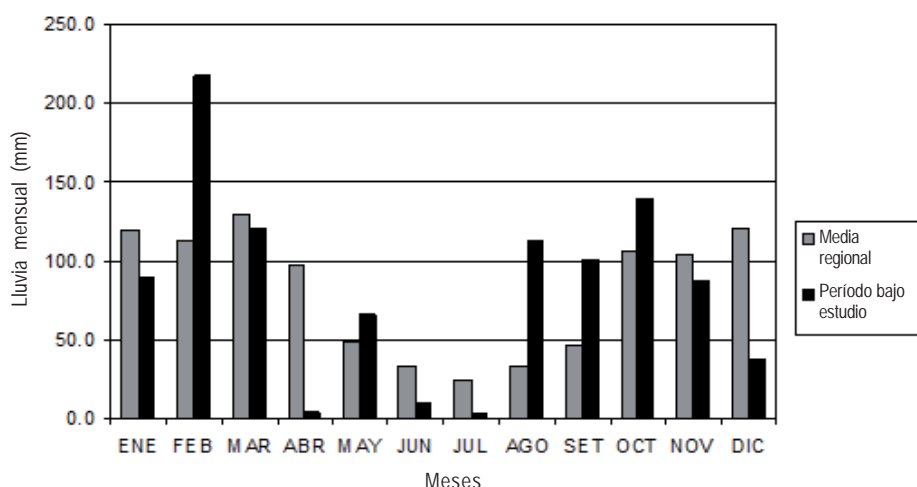


Figura 1. Precipitación media mensual de la región y precipitación del período estudiado.

Figure 1. Average monthly rainfall in the region and rainfall during the study.

Tabla 1. Algunas características de las tormentas y de los escurrimientos ocurridos en el período estudiado.

Table 1. Several storm and runoff characteristics occurred under the studied period.

Fecha	P (mm)	I (mm h ⁻¹)	Q (mm)	CE	CN	CN II	P5 (mm)	P10 (mm)	P15 (mm)	AMC	la (mm)
07/10/11	57,75	10,50	18,74	0,32	80	80	38,25	38,25	41,25	II	16,88
05/11/11	31,50	31,50	1,08	0,03	71	86	0,00	13,25	13,25	I	23,00
05/02/12	59,00	33,71	9,21	0,16	70	85	0,00	0,00	43,5	I	26,50
08/02/12	58,00	19,33	28,53	0,49	87	73	61,50	61,50	72,75	III	19,25
28/02/12	52,00	11,56	0,54	0,01	55	74	0,00	22,25	22,25	I	45,25
20/03/12	38,50	6,16	3,46	0,09	73	87	0,00	33,50	65,50	I	15,25
17/08/12	50,75	3,18	9,49	0,19	75	56	29,75	55,25	45,00	III	36,25
06/09/12	36,75	8,65	0,30	0,01	63	80	4,50	4,50	21,00	I	33,00
06/10/12	48,00	8,35	7,04	0,15	73	87	8,75	8,75	8,75	I	22,75
15/10/12	45,25	9,05	6,41	0,14	74	87	0,00	77,50	86,25	I	35,50

P: lámina de lluvia; I: intensidad de la lluvia; Q: lámina de escurrimiento; CE: coeficiente de escurrimiento; CN: curva número; CNII: curva número transformada a AMCII; P5, P10 y P15: lámina de lluvia caída los 5, 10 y 15 días previos a cada tormenta; AMC: antecedente de humedad; la: abstracción inicial.

P: rainfall; I: rainfall intensity; Q: runoff; CE: runoff coefficient; CN: runoff curve number; CNII: runoff curve number adjusted to AMCII; P5, P10 and P15: antecedent rainfall from the 5, 10 or 15 days; AMC: antecedent moisture condition; la: initial abstraction.

el siguiente ordenamiento: verano (43 mm), otoño-invierno (35,5 mm) y primavera (22 mm). Para un número de registros de mayor extensión respecto a la del presente trabajo, Chagas *et al.* (2008) determinaron para una microcuenca de 300 ha de la Pampa Ondulada, un ordenamiento de las estaciones del año similar al señalado, pero con valores máximos de lluvia sin generación de escurrimiento superiores.

Los escurrimientos estuvieron concentrados en el período primavera-estival (8), mientras que solamente dos de ellos ocurrieron durante el invierno (Tabla 1). El valor promedio de CN fue 72 (mediana= 73), con mínimos y máximos de 55 y 87, respectivamente. Estos dos valores extremos de CN se dieron dentro de un período relativamente corto (8/02 al 28/02) y ante tormentas de similar magnitud, siendo los milímetros de lluvia caídos los cinco días previos, la principal causa del distinto escurrimiento obtenido y por lo tanto del valor de CN estimado (Tabla 1). Corroborando estos resultados, se encontró entre la CN y los milímetros caídos los cinco días previos a cada tormenta, un coeficiente de correlación de 0,75 ($P < 0,05$). También se pudo comprobar, al ser convertidos los valores de CN de esas dos fechas a los que corresponden para una condición antecedente de humedad II, disminuyendo de esta manera el efecto de la humedad previa sobre dicho parámetro, la falta de diferencias sustanciales entre ambos valores (Tabla 1). Al mismo tiempo y dentro del mismo período, una tormenta de similar magnitud (05/02), presentó un valor de CN intermedio a los dos mencionados previamente, pero una CN II mayor (85) pese a no presentar lluvias los diez días previos. Este distinto comportamiento se debió a que dicha tormenta tuvo una intensidad sensiblemente mayor a las restantes del mes de febrero (Tabla 1).

De acuerdo a los resultados del presente trabajo, los valores de CN II promedio para los períodos de crecimiento del maíz y barbecho fueron 81 y 78, respectivamente, mientras que a través del uso de tablas (USDA-NRCS, 2010) surgen los valores de CN II 81 y 88, para similares condiciones edáficas y de manejo que las del presente estudio. No obstante la coincidencia entre el valor medio estimado para el período de crecimiento del cultivo y aquel que surge de la bibliografía, hubo variaciones en este parámetro durante dicho lapso de hasta el 10%, que respondieron a las características de las precipitaciones (Tabla 1). De acuerdo a lo mencionado y a las diferencias encontradas entre los valores de CN II estimados y surgidos de tabla para el período

de barbecho (USDA NRCS, 2010), surge la necesidad de profundizar el estudio de la relación lluvia-escurrimiento, para obtener parámetros de predicción de dicho proceso más realistas.

A partir del análisis de los resultados de la Tabla 1, también se puede comprobar que la mayoría de las tormentas que generaron escurrimiento ocurrieron en AMC I (70%), mientras que aquellas con AMC II (10%) y AMC III (20%) fueron menos habituales. Otros investigadores de la Argentina, también encontraron una preponderancia de la AMC I, ante la ocurrencia de escurrimientos en cuencas de distinto tamaño del norte y centro de la Pcia. de Bs. As. (Chagas *et al.*, 2008; Ares *et al.*, 2012). A su vez, teniendo en cuenta todas las lluvias ocurridas durante el período estudiado (con y sin generación de escurrimiento), la proporción no varió considerablemente respecto a lo visto para las situaciones previamente detalladas, ya que el 62% de las precipitaciones lo hicieron en AMC I, el 13% con AMC II y el restante 25% en AMC III.

La lámina de lluvia caída los cinco días anteriores a cada evento de escurrimiento, resultó ser un parámetro sensible que afectó el volumen de agua salida por fuera de la parcela, siendo el coeficiente de correlación de la lámina de agua escurrida y del coeficiente de escurrimiento, respecto al volumen de las precipitaciones caídas los cinco días previos de 0,92 ($P < 0,01$). Este alto grado de vinculación entre estos parámetros no se registró al considerar un período previo de hasta treinta días, ni mejoró al ser tenido en cuenta el efecto de las temperaturas máximas y medias previas, como tampoco cuando se usaron distintas relaciones lluvia-temperatura.

Castiglioni *et al.* (2006) trabajando en una microcuenca agrícola de 300 ha ubicada en Pampa Ondulada, descartaron la posibilidad de que las lluvias previas influyeran en el comportamiento hidrológico de dicha unidad funcional, independientemente del sistema de labranza empleado. Por su parte, Castiglioni *et al.* (2014) estudiando el comportamiento hidrológico de una parcela con monocultivo de maíz ubicada en la EEA INTA Paraná, tampoco encontraron que el escurrimiento estuviera influenciado por las lluvias ocurridas entre los cinco y veinte días previos. Ares *et al.* (2012), al estimar los escurrimientos de una cuenca de Azul, considerando las lluvias de los cinco días anteriores, solo encontraron un coeficiente de determinación del 28% al contrastar dichos resultados con lo observado a campo. Tramblay *et al.* (2010), citan otros trabajos con similares resultados (Huang *et al.*, 2007; Brocca *et al.*, 2009;

Soulis *et al.*, 2009). En este sentido, Brocca *et al.* (2008) consideraron que dado el origen empírico de esta forma de determinación del AMC, su uso es discutible en ambientes con características distintas respecto a aquellos donde dicho parámetro fue diseñado.

En el presente trabajo y a pesar del alto grado de vinculación encontrado, la lluvia caída los cinco días previos no fue un parámetro que predijo de manera eficiente aquellos escurrimientos que no presentaron precipitaciones los cinco días anteriores a cada tormenta. De acuerdo a estos resultados, se investigó en que medida se podía mejorar la predicción para dichos casos, pudiéndose establecer un índice combinado que incluyó no solamente la lámina de lluvia de los cinco días previos, sino también los milímetros caídos los diez días anteriores (ponderados por un coeficiente igual a 0,05), además del volumen de lluvia correspondiente a la tormenta que generó cada escurrimiento (afectado por un coeficiente igual a 0,78) (Fig. 2).

De esta manera, el índice de lluvia (ILL) generado que mejor predijo la lámina de escurrimiento registrada en la parcela fue el siguiente:

$$ILL \text{ (mm)} = (P5 \times 1) + (P10 \times 0,05) + (P \times 0,78) \quad (7)$$

Siendo P5 y P10 los milímetros de lluvia caídos los cinco y diez días previos a cada tormenta, respectivamente, P la lámina de lluvia caída que generó el escurrimiento.

De acuerdo a estos resultados y dado el bajo coeficiente de ponderación que afectó a las lluvias ocurridas los diez días previos, el escurrimiento en la parcela estuvo fundamentalmente afectado por la dinámica de la humedad edáfica de los cinco días anteriores y por la magnitud de lámina de agua que originó el escurrimiento.

También de acuerdo a lo observado en la Figura 2, sería necesario un valor de ILL de al menos 26 mm para que se genere escurrimiento, lo cual correspondería a una lluvia de 33 mm, si se considera que no hubo precipitaciones los diez días previos.

A su vez, analizando como se dispusieron las distintas fechas de los eventos de escurrimiento respecto a la línea de regresión, no pareciera haber un efecto de la época del año sobre la relación ILL-lámina de escurrimiento. En este sentido, hubo mayores diferencias entre fechas que correspondieron a un mismo período del cultivo (05/02 y 28/02), respecto a aquellas que se observan entre las etapas de barbecho y crecimiento del cultivo (05/02 y 06/10).

Distintos resultados a los del presente trabajo encontraron Castiglioni *et al.* (2014), analizando información correspondiente a una parcela de escurrimiento con monocultivo de maíz, ubicada en la EEA INTA Paraná. En dicho estudio se pudieron encontrar diferencias significativas en la respuesta hidrológica de la parcela, al comparar lo sucedido en las etapas de barbecho y de desarrollo del men-

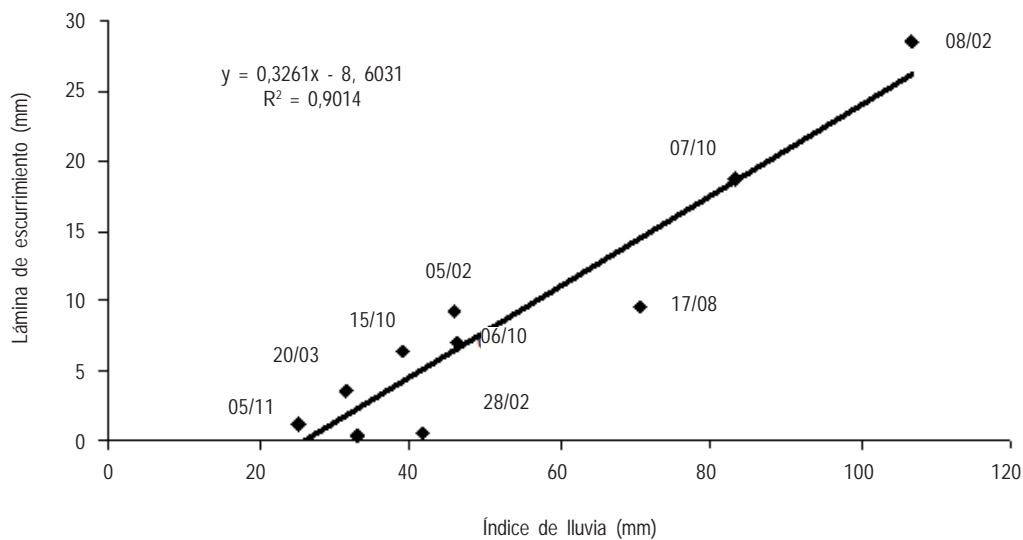


Figura 2. Relación entre el índice de lluvia (ILL) y la lámina de escurrimiento.

Figure 2. Relationship between rainfall index (ILL) and plot runoff.

cionado cultivo. Las precipitaciones caídas en Zavalla y Paraná fueron similares para ambos períodos. No obstante, la relación lluvia/evapotranspiración de las fases con y sin maíz de Paraná fue 0,68 y 0,87 respectivamente, mientras que en Zavalla estas presentaron valores de 0,75 y 0,83. Estos resultados muestran una mayor amplitud de este parámetro climático para la localidad de Paraná, lo cual pudo generar las diferencias de comportamiento entre parcelas.

Al analizar de qué manera los valores de abstracción inicial (I_a) (Tabla 1) se vincularon con la retención potencial máxima (S), se pudo comprobar que seis de los diez resultados ajustaron a una regresión lineal (Fig. 3). A su vez, tres tormentas conformaron otro grupo con una relación I_a/S distinta a la anteriormente mencionada, mientras que el evento correspondiente al 20/03 no formó parte de ninguno de estos dos grupos. Esto último se debió a que dicha tormenta correspondió a un evento de características particulares, ya que más del 50% de su lámina cayó durante los primeros treinta minutos. Por ese motivo, para este análisis se descartó a dicho evento de escurrimiento. Según se desprende de la observación de la Figura 3, ambos grupos de tormentas incluyeron fechas que correspondieron al invierno, primavera y verano, por lo que las diferencias en la relación I_a/S no se debieron a efectos climáticos estacionales o por tratarse de diferentes períodos del cultivo de maíz.

El valor medio de λ correspondiente al primer grupo de fechas mencionado fue 0,23, mientras que el del segundo fue 0,42. Este comportamiento diferencial entre ambas situaciones, se debió al efecto de las lluvias de los diez días previos. De esta manera, cuando λ fue en promedio igual

a 0,42, en dichas fechas (8/02, 17/08 y 15/10) las precipitaciones de los diez días previos presentaron una lámina superior a los 40 mm (Tabla 1), mientras cuando dicho parámetro fue en promedio 0,23, las lluvias de los diez días anteriores presentaron un valor inferior al mencionado.

De acuerdo a lo observado previamente, la lluvia de los últimos diez días tuvo una baja incidencia (5%) en la explicación de los escurrimientos ocurridos. No obstante ello, se pudo comprobar que dicho parámetro afectó la relación I_a/S . En aquellos eventos con precipitaciones en los últimos diez días superiores a los 40 mm, no hubo un efecto de dicha lámina sobre la I_a , obteniéndose en estos casos valores de abstracción inicial que se ubicaron dentro del rango obtenido por las restantes fechas (Tabla 1). Sin embargo, dada la mayor humedad edáfica presente debido a la superior lámina de agua caída los diez días previos, la retención potencial máxima (S) fue menor a lo esperado de acuerdo al volumen de agua infiltrada inicialmente (Fig. 3), obteniéndose por lo tanto un resultado de λ mayor. Por su parte, para las tormentas con una lámina de agua de los diez días previos menor a 40 mm, el comportamiento de la relación I_a/S estuvo más acorde con lo pautado por el modelo de la curva número.

En este sentido, Tedella *et al.* (2012) comentaron que en su origen el coeficiente λ se determinó con un subgrupo de datos medidos sobre cuencas menores a las 4 ha, registrándose valores para este parámetro que estuvieron comprendidos entre 0,013 y 2,20. A su vez, Shi *et al.* (2009) encontraron para una cuenca de China que λ variaba entre 0,010 y 0,154, no estando dicho valor relacionado con la

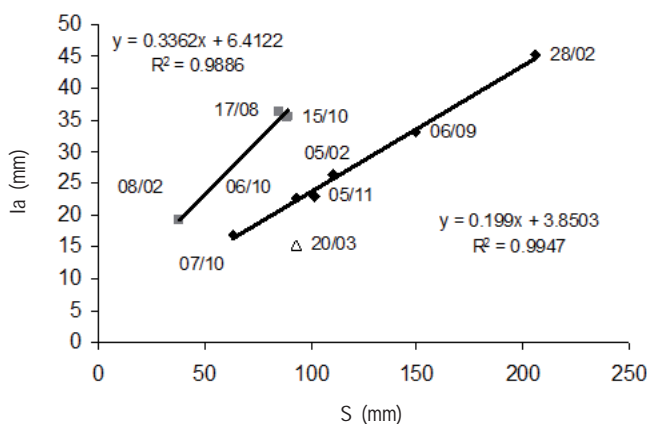


Figura 3. Relación entre la abstracción inicial (I_a) y la retención potencial máxima (S).

Figure 3. Relationship between initial abstraction (I_a) and the maximum potential retention (S).

lámina de lluvia caída. Otros estudios también han utilizado valores de dicho parámetro mayores o menores al original 0,2 (Baltas *et al.*, 2007; Elhakem & Papanicolaou, 2009), por lo que sería necesario realizar estudios locales y con diferentes situaciones de humedad de suelo para llegar a resultados más satisfactorios.

En el presente trabajo, al usar la ecuación cinco para calcular S, empleando los valores de la P y E determinados con los resultados de campo, se obtuvieron valores de retención potencial máxima sensiblemente inferiores a los generados por medio de la ecuación dos. Dadas estas diferencias, el tiempo de retraso (Lag) se estimó tanto gráficamente (Lg) como a partir del modelo Hec-Hms 3.5 (2010) (Lh), considerando dos procedimientos para el cálculo de la lluvia en exceso: 1) utilizando el valor de S obtenido mediante la ecuación dos y aplicando un coeficiente λ igual a 0,2 (Lg1 y Lh1); 2) teniendo en cuenta el registrado a campo y empleando el valor de S estimado a partir de la ecuación cinco (Lg2 y Lh2).

En la Tabla 2 se observa para cada tormenta los minutos de duración de la lluvia (DLL), de los escurrimientos (DE), de la rama ascendente (DAP) y descendente (DDP) de los hidrogramas y del Lag estimado según lo detallado previamente.

De acuerdo a los análisis de correlación efectuados, la duración de la fase ascendente del escurrimiento estuvo afectada por la duración de la lluvia (coeficiente de corre-

lación: 0,89; $p < 0,01$), mientras que la descendente estuvo más asociada a la duración total de este proceso (coeficiente de correlación: 0,92; $p < 0,01$), en la medida que dicha fase ocupó en promedio un 62% del tiempo total. A su vez, se observa en la Tabla 2 que independientemente de la forma de estimación del Lag, este parámetro sufrió variaciones durante el período estudiado.

A partir de lo detallado en la Tabla 3, se observa que las variaciones del Lag estuvieron asociadas a la relación de la lámina de lluvia caída entre los diez y quince días previos, respecto al promedio de las temperaturas medias o máximas correspondientes a igual intervalo de tiempo.

Un número considerable de estudios realizados en cuencas, ha indicado que la intensidad de la lluvia, su duración, la duración del exceso de lluvia, la porosidad del suelo y el caudal de descarga, son factores que influyen en el tiempo de retraso (Bodhinayake, 2004). En este sentido, Castiglioni *et al.* (2014) trabajando en una parcela de escurrimiento, pudieron evaluar que dicho parámetro se encontraba en algunos casos positivamente relacionado con la duración de las precipitaciones, mientras que en otros lo hacía en forma negativa con su intensidad media.

En el presente estudio, el comportamiento de los escurrimientos sugiere que si bien las precipitaciones de los cinco días más cercanos influyeron en la magnitud de su volumen, aquellas que ocurrieron entre los diez y quince días

Tabla 2. Duración de la lluvia y de distintos parámetros temporales que caracterizaron a los escurrimientos.
Table 2. Rainfall duration and different time parameters of runoff characteristic.

Fecha	DLL (min)	DE (min)	DAP (min)	DDP (min)	Lg1 (min)	Lg2 (min)	Lh1 (min)	Lh2 (min)
07/10/11	330	600	45	555	25	12	13	10
05/11/11	60	90	15	75	12	11	15	12
05/02/12	105	105	45	60	20	18	22	20
08/02/12	180	150	60	90	27	20	26	20
28/02/12	270	60	30	30	19	14	22	15
20/03/12	375	90	30	60	27	28	25	27
17/08/12	960	360	240	120	148	55	50	50
06/09/12	255	45	30	15	12	8	12	9
06/10/12	345	285	45	240	30	19	22	20
15/10/12	300	225	90	135	84	58	80	50

DLL: Duración lluvia; DE: duración escurrimiento; DAP: duración de la fase ascendente del hidrograma de escurrimiento; DDP: duración de la fase descendente del hidrograma de escurrimiento; Lg1 y Lg2: Lag obtenido por resolución gráfica; Lh1 y Lh2: Lag ajustado mediante uso del modelo Hec-Hms.

DLL: rain duration; DE: runoff duration; DAP: rising stage duration of the runoff hydrograph; DDP: descending stage duration of the runoff hydrograph; Lg1 and Lg2: Lag obtained by graphical resolution; Lh1 and Lh2: Lag adjusted by using Hec-Hms model.

Tabla 3. Coeficientes de correlación y significancia estadística entre el Lag estimado con diferentes métodos y distintas relaciones lluvia/temperatura.

Table 3. Correlation coefficients and statistical significance between Lag estimated with different methods and several rain-temperature relationships.

	Lg1	Lg2	Lh1	Lh2
P10/tm10	0,79**	0,85**	0,83**	0,81**
P10/tM10	0,75*	0,84**	0,84**	0,80**
P15/tm15	0,63*	0,81**	0,82**	0,77**
P15/tM15	ns	0,80**	0,81**	0,77**

P10 y P15: precipitaciones de los 10 y 15 días previos, respectivamente; tm10 y tm15: promedio de temperaturas medias de los 10 y 15 días previos; tM10 y tM15: promedio de temperaturas máximas de los 10 y 15 días previos. Lg1 y Lg2: Lag obtenido por resolución gráfica; Lh1 y Lh2: Lag ajustado mediante uso del modelo Hec-Hms. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; ns: no significativo.

P10 and P15: 10 and 15 days rainfall antecedent; tm10 and tm15: 10 and 15 days antecedent average mean temperatures; tM10 and tM15: 10 and 15 days antecedent average high temperatures; Lg1 and Lg2: Lag obtained by graphical resolution; Lh1 and Lh2: Lag adjusted by using Hec-Hms model. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; ns: not significant.

anteriores, en relación a las temperaturas medias o máximas acontecidas en igual período de tiempo, condicionaron la dinámica del caudal registrado a la salida de la parcela. De esta manera se pudo constatar, que la mayor humedad del suelo generada por las condiciones meteorológicas de los últimos quince días, favorecía un retraso en la ocurrencia del centro de la masa del escurrimiento.

En el proceso de ajuste del Lag por medio del modelo Hec-Hms 3.5 (2010), se comprobó que al estimar la lluvia en exceso considerando la abstracción inicial registrada a campo, los resultados de RMSE y del caudal pico estimado para cada tormenta fueron mas satisfactorios, respecto a emplear la metodología tradicional pautaada por el modelo de la curva número. En este sentido, el valor promedio de RMSE fue 0,00038 para el primer procedimiento mencionado, mientras que para el segundo fue de 0,00051. Por su parte, el caudal pico promedio estimado estuvo entre un 89% y 77% respecto al registrado a campo, según el primer y segundo procedimiento, respectivamente. A su vez, se pudo constatar que independientemente de la forma de estimación del Lag, al aumentar el volumen de escurrimiento disminuía la eficiencia en la predicción de los hidrogramas. Por su parte, los casos con menor precisión en la estimación del caudal pico al seguir la metodología tradicional pautaada por el modelo de la curva número, estuvieron asociados a aquellas fechas con mayor valor de la abstracción inicial (28/02; 17/08 y 15/10), siendo en estos

casos el caudal pico estimado entre un 54 y 58% respecto al observado a campo.

No obstante, al tener en cuenta las dos formas de cálculo de la lluvia en exceso, no hubo diferencias significativas en la lámina de escurrimiento estimada por el modelo Hec-Hms 3.5 (2010), siendo esta entre un 97% y 96% de la real.

CONCLUSIONES

La lámina de lluvia de los cinco días previos a cada evento de escurrimiento y el volumen de las precipitaciones que originaron dicho proceso, fueron los principales factores que afectaron la lámina de agua que salió de la parcela y el coeficiente de escurrimiento.

La lámina de lluvia de los diez días previos actuó sobre el coeficiente de abstracción inicial, siendo este parámetro mayor en la medida que las precipitaciones caídas en dicho intervalo de tiempo superaran los 40 mm.

Las precipitaciones y temperaturas medias o máximas de los diez a quince días previos a cada evento de escurrimiento, influyeron sobre el tiempo de retraso, prolongando su duración ante aumentos en el valor de la relación de ambos parámetros meteorológicos.

No se observaron efectos meteorológicos estacionales o de los diferentes períodos del cultivo de maíz (barbecho o etapa de crecimiento) sobre el comportamiento de los resultados obtenidos.

De acuerdo a los resultados obtenidos, sería conveniente profundizar el estudio de la relación lluvia-escurrimiento, con el objetivo de desarrollar métodos de predicción de dicho proceso más realistas.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por proyecto UBACyT 20020110200 270. Se agradece a la Facultad de Agronomía de la UNR por facilitar el acceso al lote para la realización del presente estudio y a la Cátedra de Climatología de la UNR por el aporte de información meteorológica.

BIBLIOGRAFÍA

- Ares, MG; CI Chagas & M Varni. 2012. Predicción de la escorrentía y estimación de la humedad antecedente en una cuenca aforada. *Ciencia del Suelo* 30(2): 151-160.
- Baltas, EA; NA Dervos & MA Mimikou. 2007. Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11: 1825-1829.

- Blanco, H & R Lal. 2010. Soil and water conservation. In: Blanco, H & R Lal (ed). Principles of Soil Conservation and Management. 1er edn. Pp 1-19. Springer.
- Bodhinayake, ND. 2004. Influence of hydrological, geomorphological and climatological characteristics of natural catchments on lag parameters. PhD thesis, School of Civil, Mining and Environmental engineering, University of Wollongong, <http://ro.uow.edu.au/theses/385>.
- Brocca, L; F Melone & T Moramarco. 2008. On the estimation of antecedent wetness conditions in rainfall-runoff modelling. *Hydrolog. Process* 22: 629-642.
- Brocca, L; F Melone; T Moramarco & VP Singh. 2009. Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall-runoff modelling. *J. Hydrolog. Eng.* 14 (2), 153-165.
- Castiglioni M; C Sasal; M Wilson; J Oszust & E Gabioud. 2014. Análisis de los escurrimientos provenientes de una parcela con monocultivo de maíz en dos períodos del año diferentes. 2do. Congreso Internacional de Hidrología. 23 al 26 de setiembre 2014. Santa Fe. Argentina.
- Castiglioni, MG; CI Chagas; MJ Massobrio; OJ Santanatoglia & A Buján. 2006. Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de pampa ondulada bajo diferentes sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo* 24(2): 169-176.
- Chagas, CI; OJ Santanatoglia; MG Castiglioni; MJ Massobrio; A Buján & C Irurtia. 2008. Número de curva de escurrimiento para una microcuenca bajo labranza convencional y siembra directa. *Ciencia del Suelo* 26(1): 63-69.
- Chow, VT; DR Maidment; LW Mays. 1994. Hidrología aplicada. Cap 5: Agua Superficial. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Colombia. 130-171.
- Dí Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & CW Robledo. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Elhakeem, M & AN Papanicolaou. 2009. Estimation of the Runoff Curve Number via Direct Rainfall Simulator Measurements in the State of Iowa, USA. *Water Resour. Manage.* 23: 2455-2473.
- Hawkins, R. 1993. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *J. Irrig. Drainage Eng.* 19(2): 334-345.
- Hec-Hms 3.5. 2010. Hydrologic Modeling System. U.S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resource. Hydrologic Engineering Center. Davis CA.
- Huang, M; J Gallichand; C Dong; Z Wang & M Shao. 2007. Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China. *J. Hydrolog. Process.* 21(11): 1471-1481.
- Huang, M; J Gallichand; Z Wang & M Goulet. 2006. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Hydrolog. Process.* 20: 579-589.
- Mishra, SK & VP Singh. 2004. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. *J. Hydrolog. Processes* 18: 1291-1313.
- Mishra, SK; MK Jain; RP Pandey & VP Singh. 2005. Catchment area-based evaluation of the AMC-dependent SCS-CN-based rainfall-runoff models. *Hydrolog. Process* 19, 2701-2718.
- Mishra, SK; RK Sahu; TI Eldho & MK Jain. 2006. An Improved Ia-S Relation incorporating Antecedent Moisture in SCS-CN Methodology. *Water Resour. Manage.* 20: 643-660.
- Paz-Pellat, F. 2009. Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS. *Agrociencia* 43: 521-528.
- Ponce, VM & RH Hawkins. 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity? *J. Hydrolog. Eng.* (1): 11-19.
- Sasal, MC; MG Castiglioni & MG Wilson. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil & Tillage Research* 108: 24-29.
- Shi, ZH; LD Chen; NF Fang; DF Qin & CF Cai. 2009. Research on SCS-CN initial abstraction using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges area, China. *Catena* 77(1): 1-7.
- Soulis, KX & JD Valiantzas. 2011. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds. The two-CN system approach. *Hydrolog. Earth Syst. Sci. Discuss.* 8: 8963-9004.
- Soulis, KX; JD Valiantzas; N Dercas & PA Londra. 2009. Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Hydrolog. Earth Syst. Sci.* 13: 605-615.
- Steenhuis, TS; M Winchell; J Rossing; JA Zollweg & MF Walter. 1995. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. *J. Irrig. Drain.* 121: 234-238.
- Tedela, NH; SC McCutcheon; TC Rasmussen; RH Hawkins; WT Swank; JL Campbell; MB Adams; CR Jackson & EW Tollner. 2012. Runoff Curve Numbers for 10 Small Forested Watersheds in the Mountains of the Eastern United States. *J. Hydrolog. Eng.* 17: 1188-1198.
- Tramblay, Y; C Bouvier; C Martin; J F Didon-Lescot; D Todorovik & JM Domergue. 2010. Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modeling. *J. Hydrolog.* 387: 176-187.
- USDA-NRCS. 2010. National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology. National Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.
- Weir, E. 2002. Pérdida de suelo y agua en parcelas de escurrimiento. Actas del 2º taller de contaminación por agroquímicos. 23 de Agosto. AIANBA. Pergamino. Bs. As.
- Woodward, DE; RH Hawkins & QD Quan. 2002. Curve number method: Origins, applications and limitations. Proc., Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference: Hydrologic Modeling for the 21st Century, Subcommittee on Hydrology of the Advisory Committee on Water Information, Las Vegas, NV.
- Yoo, KH; KS Yoon & JM Soileau. 1993. Runoff curve numbers determined by three methods under conventional and conservation tillage. *Trans. ASAE* 36(1): 57-63.
- Young, DF & JN Carleton. 2006. Implementation of a probabilistic curve number method in the PRZM runoff model. *Environmental Modelling & Software* 21: 1172-1179.
- Zhang, Y; H Wei & MA Nearing. 2011. Effects of antecedent soil moisture on runoff modeling in small semiarid watersheds of southeastern Arizona. *Hydrolog. Earth Syst. Sci. Discuss.* 8: 6227-6256.

