

MODELO "CUANTI-CUALITATIVO" DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DEL AGUA EN SUELOS AGRÍCOLAS DE LA REGIÓN PAMPEANA ARGENTINA

JOSÉ MIGUEL ANDRIANI^{1*}; LUCIANA MAGNANO¹ & NICOLÁS SANMARTI¹

Recibido: 22-02-16

Recibido con revisiones: 12-08-16

Aceptado: 12-08-16

RESUMEN

Desde hace mucho tiempo se está estudiando la modelación de la relación lluvia-escorrimento y han sido desarrollados una gran cantidad de métodos y modelos para simular la generación de escurrimiento de una lluvia. Uno de los métodos ampliamente usados es el "Número de Curva" (NC) del Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos, que tiene la dificultad de necesitar datos empíricos. Tanto éste, como todos los modelos de regresión producen resultados muy variables ante un mismo evento de lluvia. Por tal motivo, se planteó desarrollar un modelo cuanti-cualitativo, que ayude a disminuir esa variabilidad, sobre la base de un modelo de regresión cuantitativo ajustado para la Región Pampeana Argentina. Con el conjunto de datos cuantitativos se efectuó un análisis de regresión, y posteriormente se los asoció con datos cualitativos. El objetivo del análisis fue poder determinar valores medios de escurrimiento a partir de la cantidad de lluvia caída, la intensidad de la misma y la humedad superficial del suelo. Para estimar el escurrimiento en función de variables cuantitativas y cualitativas, se utilizó un modelo de regresión lineal múltiple con variables indicadoras. A partir del mismo se utilizó el proceso de selección de variables Backward, para seleccionar cuáles son las variables que deben quedar en el modelo. Para suelos Molisoles de aptitud agrícola en siembra directa de la Región Pampeana, la ecuación lineal obtenida de los datos observados, presenta un buen ajuste estadístico. Sin embargo, la variabilidad encontrada en valores de precipitación diaria entre los 40 y 80 mm, no es admisible para la estimación de balances hídricos de cultivos. Para los suelos mencionados, el modelo de regresión obtenido con variable cuantitativa y variables indicadoras cualitativas produce una mejora sustancial para la estimación del escurrimiento superficial.

Palabras clave. Relación precipitación-escorrimento, Métodos de cálculo, Intensidad de lluvia, Ecuaciones.

QUANTITATIVE - QUALITATIVE SURFACE RUNOFF MODEL IN AGRICULTURAL SOILS OF THE ARGENTINE PAMPEANA REGION

ABSTRACT

Rainfall-runoff relationship modeling have been studied for a long time, developing along these period several methods and models to simulate rainfall-runoff event. One of the widely used methods is the "Curve Number" (CN) of the United States Soil Conservation Service which requires empiric data. This method as well as all regression models provides highly variable results for the same rainfall event. Therefore, in order to find a quantitative and qualitative model that helps reduce these variability, a quantitative adjusted regression model for Argentine Pampa Region is proposed. It was performed a regression analysis with a set of quantitative data, subsequently became associated with qualitative data. The objective of the analysis was to determine runoff average values from both the quantity and intensity of rainfall, and the surface soil moisture. A multiple linear regression model with variable indicators was used to estimate runoff based on quantitative and qualitative variables. A Backward Selection process was used to select variables that should be in the model. The linear equation obtained from the observed data, for non-tillage Mollisols with agricultural aptitude of the Pampa Region with slopes less than 1%, had good statistical adjustment. However, the variability found in daily precipitation values between 40 and 80 mm, is not suitable for estimating crop water balances. In summary, the soil described showed that the regression model with quantitative and qualitative indicator variables produces a substantial improvement for surface runoff estimation.

Key words. Rainfall-runoff relationship, Calculation methods, Rainfall intensity, Equation.

¹ INTA-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EEA Oliveros Grupo, Área de Agronomía

* Autor de contacto: andriani.jose@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

Hace tiempo que se viene estudiando la modelación de la relación lluvia-escurrimiento. La historia de esta relación se conoce desde hace más de 300 años, con el reporte de las mediciones cuantitativas en hidráulica, publicado por P. Perreault en 1674 (Linsley, 1982), el que estableció la relación funcional $Q_a = P_a/6$. Donde Q_a es el caudal o escorrentía de la cuenca y P_a es la precipitación del área en estudio o cuenca.

La forma básica de todos los modelos hidrológicos disponibles (Mishra y Singh, 2003) puede, en general, expresarse como:

$$Q = P - L$$

donde: Q es la escorrentía, P es la precipitación y L es la abstracción hidráulica de la cuenca, entendida como el conjunto de infiltración, almacenaje, retención superficial, interceptación, evaporación y evapotranspiración.

A partir de esta ecuación, han sido desarrollados una cantidad de métodos y modelos para simular la generación de escurrimiento de una lluvia. Uno de los métodos ampliamente usados es el "Número de Curva" (NC) del Servicio de Conservación de Suelo de Estados Unidos (SCS, 1972). Este es un modelo conceptual apoyado por información empírica. La mayoría de los elementos de un proceso de lluvia-escurrimiento están incorporados en el método de NC tales como: Característica de la cuenca, precipitación, abstracción hidráulica y escurrimiento. El NC es utilizado fundamentalmente en cuencas hidrológicas, aunque también se lo ha incorporado a modelos de producción de cultivos como los DSSAT (Jones *et al.*, 2003). Sin embargo, Pellat (2009) sostuvo que, pese a ser ampliamente usado en todo el mundo, modificando la relación de abstracción, esta ecuación da una falsa apariencia de funcionalidad.

Cuando nos enfocamos en un lote de producción agrícola, los principales parámetros a tener en cuenta para obtener el valor L, del modelo lluvia-escurrimiento, son la intensidad de la precipitación, el contenido de agua en el suelo, la pendiente y la cobertura superficial (Mishra y Singh, 2003). Generalmente, para querer representar estas áreas de producción, el valor L es obtenido por la diferencia $P - Q$, utilizando parcelas de escurrimiento. La FAO (Hudson, 1997) estableció tres tipos de parcelas de escurrimiento de acuerdo al objetivo buscado, i) micro-parcelas de 1 o 2 m² para una simple comparación de dos tratamientos, ii) parcelas pequeñas de alrededor de 100 m², para prácticas

de cultivo y cobertura, iii) parcelas grandes de aproximadamente una hectárea, para evaluación de tipo de terrazas o efecto de pastoreo. Investigaciones realizadas en INTA EEA Paraná (Sasal *et al.*, 2010), EEA Pergamino y EEA Marcos Juárez, utilizaron parcelas pequeñas FAO, con pendiente 2% y 3,5%. También otras de alrededor de 1500 m² con 1% de pendiente, para determinar la pérdida de agua y esencialmente la pérdida de suelo y nutrientes. De esta manera, se puede ajustar el valor L, para un determinado tipo de suelo y uso de la tierra. Sin embargo, no se puede generalizar el resultado de estas parcelas para la evaluación del escurrimiento superficial diario, en los lotes de producción de cultivos de una gran región, debido a que las mismas fueron construidas para evaluar la erosión hídrica del suelo y la cantidad total de agua perdida en determinadas condiciones de pendiente y uso de la tierra.

Casi todos los suelos agrícolas de la Región Pampeana argentina pertenecen al Orden de los Molisoles, y dentro de estos, predominan los Grandes Grupo de los Argiudoles, Hapludoles y Haplustoles (Panigatti, 2010; Godagnone *et al.*, 2002). Desde el punto de vista de la producción agrícola y en especial cuando queremos elaborar un balance hídrico de cultivo, el escurrimiento de agua superficial fuera del área del cultivo es un factor cuantitativamente importante en regiones de secano. De ahí, la necesidad de contar con un modelo confiable que estime con buena precisión las situaciones reales de la relación precipitación-escurrimiento. En realidad, para el cultivo lo más importante es la precipitación efectiva (PE) que gobierna la disponibilidad de agua en el suelo, y la evapotranspiración. Entonces, estos serían los componentes de L a tener en cuenta, mientras que la retención superficial y la interceptación- evaporación, estarían incluidas en el escurrimiento, entendiéndolo como la cantidad de agua que sale del sistema.

Dardanelli *et al.* (2010) obtuvieron una ecuación cuantitativa de escurrimiento superficial (ES) en función de las precipitaciones diarias, midiendo los valores reales de agua infiltrada en el suelo (PE) con lecturas de sonda de neutrones antes y después de un evento de lluvia, en las regiones centro-este de Córdoba y sur de Santa Fe. Si bien, la ecuación cuantitativa obtenida presentaba un alto valor de R², también presentaba amplios rangos de dispersión en valores medios y altos de precipitación diaria. En consecuencia, la utilización de la misma en zonas de intensas precipitaciones, con altos valores diarios, produce importantes errores en el cálculo del balance hídrico. Seguir buscando disminuir la variabilidad de los valores ES con modelos

cuantitativos va a ser una tarea difícil. Por lo tanto, es necesario considerar la alternativa práctica y universal de variables cualitativas.

Definidos el tipo de suelo y la pendiente, otros dos factores que afectan el ES diario son la intensidad de la precipitación (IP) y el estado de humedad superficial del suelo (HSS), los cuales podrían ser utilizados como variables cualitativas.

Por consiguiente se planteó la hipótesis, que la variabilidad del escurrimiento superficial diario encontrada en los modelos cuantitativos se disminuye con modelos cuanti-cualitativos que incorporan variables indicadoras de IP y HSS. Para confirmar esta hipótesis se establecieron los objetivos de: i) Ampliar el número de observaciones de la ecuación de escurrimiento superficial obtenida por Dardanelli *et al.* (2010) como modelo cuantitativo para pendientes menores a 1%. ii) Obtener un modelo cuantitativo para pendientes entre 1% y 2%. iii) Encontrar modelos cuanti-cualitativos de escurrimiento superficial que contengan las variables indicadoras de intensidad de lluvia y humedad superficial del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se llevó a cabo en la INTA-EEA Oliveros (32°33'S - 60°51'W), sobre suelos serie Maciel y Oliveros (Andriani, 2006), y en Berreta (32°57'S - 61°24'W) sobre un suelo serie Correa; todos pertenecientes al Gran Grupo de los Argüdoles y cultivados en el sistema de siembra directa. En el caso de la EEA Oliveros se evaluaron cuatro lotes de producción agrícola desde los años 2010 al 2014, con pendientes menores al 1% y en Berreta sobre un solo lote desde 2006 al 2009, con pendientes entre el 1 y 2%. En cada lote se colocaron tres tubos de aluminio de dos metros de profundidad en los sectores más representativos del relieve. Estos tubos fueron utilizados para medir la humedad del suelo en el punto medio de cada horizonte con una sonda de neutrones, marca Troxler, modelo 4302. En Oliveros las lecturas de humedad del suelo se realizaron el día anterior y posterior de cada evento de lluvia. Mientras que en Berreta, las lecturas se realizaron en períodos entre 15 y 21 días, seleccionándose los períodos que tuvieron eventos de lluvias únicos, ajustándose los valores registrados con la evapotranspiración del cultivo (ETC) o evaporación del barbecho (E). Para obtener el dato de escurrimiento puntual, se utilizó la ecuación general de escurrimiento ($Q=P-L$) para cada evento de lluvia superior a 5 mm, reemplazando el valor L por PE. La PE se calculó como la diferencia entre dos mediciones sucesivas de humedad de suelo (antes y después de la lluvia), menos la ETC o E, en ese período. La ETC se calculó multiplicando el coeficiente de cultivo (Kc) (Andriani, 1999 y datos

no publicados) por la evapotranspiración de referencia (ETo), utilizando la fórmula de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006), para el cálculo de esta última. Los registros de lluvia diaria se tomaron de pluviómetros ubicados cerca de los lugares de muestreo y los demás parámetros meteorológicos (para el cálculo de ETo) fueron obtenidos de la estación meteorológica de la EEA Oliveros.

Los datos ES diarios obtenidos de esta experiencia se agregaron a los datos presentados por Dardanelli *et al.* (2010). Para explicar cuantitativamente el comportamiento del escurrimiento superficial diario se ajustó un modelo de regresión lineal simple, utilizando como variable explicativa la precipitación diaria. La recta de regresión en su intersección con el eje de las abscisas, determinó el valor de lluvia diaria a partir del cual, el escurrimiento superficial es positivo.

De esa estación meteorológica, también se utilizaron las fajas del pluviógrafo, realizándose lecturas horarias. En base a estas lecturas se establecieron tres niveles cualitativos de intensidad de lluvia diaria: Suave, moderada e intensa, a partir de eventos que tuvieran precipitaciones menores a 6 mm/h, entre 6 y 15 mm/h y superiores a 16 mm/h, respectivamente. Otro aspecto cualitativo que se tuvo en cuenta, fue el estado de humedad superficial del suelo. Este aspecto es subjetivo, pero estuvo basado en la apreciación que normalmente realiza el productor agrícola en su observación habitual del estado de humedad de la superficie del suelo. Se lo clasificó teniendo en cuenta su estado en el momento previo a la lluvia: húmedo (no apropiado para utilizar maquinaria agrícola), oreado (está óptimo para la siembra) y seco (la superficie se la ve completamente seca).

Con el conjunto de datos cuantitativos clasificados como se señaló anteriormente, se realizó un análisis estadístico. El objetivo del análisis fue poder determinar valores medios de escurrimiento a partir de la cantidad de lluvia caída, la intensidad de la misma y la humedad superficial del suelo. Para estimar el escurrimiento en función de variables cuantitativas y cualitativas, se utilizó un modelo de regresión lineal múltiple con variables indicadoras (Neter *et al.*, 1996), donde dichas variables toman el valor uno cuando el atributo al que se hace referencia está presente y valor cero en caso contrario (Tabla 1).

El modelo planteado tiene la siguiente forma:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 D_1 + \beta_3 D_2 + \beta_4 D_3 + \beta_5 D_4 + \beta_6 D_1 + \beta_7 + \beta_2 x + \beta_8 D_3 + \beta_9 D_4 + \varepsilon_i \quad (1)$$

A partir de (1), se especificó un modelo distinto para cada combinación de los niveles de intensidad de las precipitaciones y niveles de humedad del suelo (Tabla 2).

Tabla 1. Valores de variables indicadoras para intensidad de lluvia y humedad superficial del suelo.

Table 1. Indicator variables values for rainfall intensity and surface soil moisture.

Lluvia	Suave	Moderada	Intensa
D1	1	0	0
D2	0	0	1

Suelo	Seco	Oreado	Húmedo
D3	1	0	0
D4	0	0	1

Por ejemplo, para el caso en que la intensidad de las precipitaciones sea intensa y el suelo seco, la ecuación (1) tomará la siguiente expresión:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_3 D_2 + \beta_4 D_3 + \beta_7 D_2 x + \beta_8 D_3 x + \epsilon_i$$

O, lo que es equivalente:

$$y_i = (\beta_0 + \beta_3 + \beta_4) + (\beta_1 + \beta_7 + \beta_8)x + \epsilon_i$$

A partir del planteo del modelo (1) se utilizó el proceso de selección de variables Backward (Neter *et al.*, 1996) para seleccionar cuáles son las variables que deben quedar en el

Tabla 2. Niveles de intensidad de las precipitaciones y humedad superficial del suelo.

Table 2. Levels of rainfall intensity and surface soil moisture.

Intensidad de las precipitaciones	Humedad superficial del suelo
Suave	Seco
Suave	Oreado
Suave	Húmedo
Moderada	Seco
Moderada	Oreado
Moderada	Húmedo
Intensa	Seco
Intensa	Oreado
Intensa	Húmedo

modelo. Dicho procedimiento comienza con un modelo que tiene todas las variables regresoras y va eliminando las variables menos influyentes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron de este trabajo 40 datos de ES, en suelos con pendientes menores al 1%, que sumados a los publicados por Dardanelli *et al.* (2010), completaron un total de 120 datos. Estos son graficados en la Figura 1, en re-

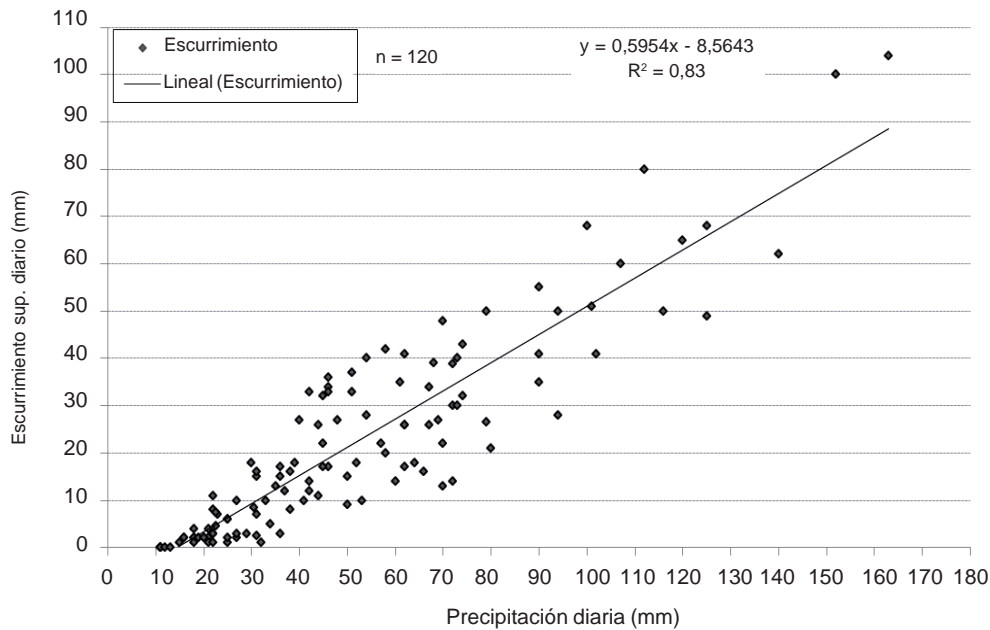


Figura 1. Relación entre la precipitación diaria y el escurrimiento superficial diario, para suelos Molisoles bajo siembra directa. Suelos con pendientes menores al 1%.

Figure 1. Relationship between daily rainfall and daily surface runoff, under non-tillage in Mollisols soils. Soils slopes less than 1%.

lación con la precipitación diaria correspondiente, y ajustados a una ecuación lineal de regresión, cuyo R^2 fue de 0,83.

El modelo estimado que representa la relación entre la precipitación diaria y el escurrimiento superficial para pendientes del suelo inferiores al 1% (Fig. 1) es el siguiente:

$$Q = 0,5954 P - 8,5643 \quad (2)$$

donde, P es la precipitación diaria y Q el escurrimiento superficial.

Si bien, el valor de R^2 de esta ecuación lo podemos considerar como un buen indicador de la bondad del modelo para explicar la variabilidad del escurrimiento (dispersión de los datos), se puede observar que la mayor dispersión se encuentra entre los valores de 40 y 80 mm de precipitación diaria (Fig. 1). Cuando por separado se analizan los 51 datos que se encuentran dentro de este rango, el R^2 que se obtiene es de 0,11. En regiones donde la probabilidad de ocurrencia de este rango de precipitaciones es alta, los errores que se pueden cometer en la estimación del ES diario, suelen ser muy grandes.

Por otra parte, se puede observar en la Figura 1, que la línea de regresión de esos puntos toca el eje de las abscisas en el valor de precipitación diaria de 14 mm. Por lo tanto, que valores inferiores a esa cantidad de precipitación no producen escurrimiento superficial.

Como se mencionó en la introducción la relación lluvia diaria-escurrimiento superficial se está estudiando desde hace muchos años, en la mayoría de los casos para estudios hidráulicos y no para lotes de producción agrícola. En la producción agrícola, el número de curva es la ecuación más difundida en todo el mundo, principalmente en los modelos de simulación de producción de cultivos (Jones *et al.*, 2003) y en el balance de agua en el suelo. Sin embargo, por más que se obtengan los datos empíricos del lugar (ajustando a algún número de curva), adolece principalmente de su baja sensibilidad a la variabilidad de la intensidad de lluvia. Pellat (2009) menciona que después de varios años de uso del método del NC de forma indiscriminada (validada muy pocas veces; y cuando esto es así, sólo se comporta bien cuando P es muy grande), es imperativa una formulación hidrológicamente sólida entre P y Q, en un esquema simple similar al formato del NC. Coincidiendo con lo que decía Mishra *et*

al. (2005), que el seguir buscando darle solidez al método a través de relaciones empíricas o adecuaciones "ad hoc", es parte de hacer viable un absurdo sin bases teóricas. Tanto Pellat, como Dardanelli *et al.* (2010) proponen otros tipos de modelos simples exponenciales, uno con sustento hidrológico y otro basado en registros locales, respectivamente.

El modelo cuantitativo de ES (2), como todos aquellos que se utilizan en la determinación de balances hídricos, no presenta una estimación aceptable de los datos reales de ES, en valores altos de precipitación diaria (más de 40 mm). Por lo tanto, para mejorar esta estimación se propuso utilizar variables indicadoras cualitativas.

A partir del modelo presentado en (1) se hizo una selección de variables utilizando el procedimiento Backward. El modelo resultante de dicha selección es el que se presenta a continuación:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_4 D3 + \beta_6 D1x + \beta_7 D2x + \beta_9 D4x + \epsilon_i \quad (3)$$

Los valores obtenidos para los estimadores paramétricos fueron:

$$\hat{\beta}_0 = -3,11601 \quad \hat{\beta}_1 = 0,46666 \quad \hat{\beta}_4 = -4,51997 \quad \hat{\beta}_6 = -3,13774 \quad \hat{\beta}_7 = 0,11855 \quad \hat{\beta}_9 = 0,1013$$

Una vez determinado el modelo (3) se especificaron los modelos para cada uno de los escenarios de intensidad de la precipitación y humedad superficial del suelo. Por ejemplo, en el caso en que la precipitación es moderada y el suelo oreado, el modelo que se utiliza es:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon_i$$

Cuando la precipitación es suave y el suelo húmedo, la ecuación resultante es:

$$y_i = \beta_0 + (\beta_1 + \beta_6 D1 + \beta_9 D4)x + \epsilon_i$$

Así, para cada uno de los escenarios presentados se calculó el valor del escurrimiento medio estimado. Una

forma más simple de estimar el escurrimiento, tomando como ejemplo este caso, es utilizando la ecuación:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x$$

donde, x es la precipitación diaria y los coeficientes b_0 y b_1 (Tabla 3) resumen los B y D que se deben incorporar en cada escenario (combinación de IP y HSS).

Es decir, según el ejemplo anterior,

$$\beta_0 = b_0 \text{ y } \beta_1 + \beta_6 D1 + \beta_9 D4 = b_1.$$

Tabla 3. Coeficientes para estimar el escurrimiento medio en los distintos escenarios de intensidad de precipitación y estado de humedad superficial del suelo.

Table 3. Coefficients to estimate average runoff in different rainfall intensity scenarios and surface soil moisture status.

Combinación intensidad-humedad	b_0	b_1
Suave – Seco	-7,636	0,329
Suave – Oreado	-3,116	0,329
Suave – Húmedo	-3,116	0,430
Moderada – Seco	-7,636	0,467
Moderada – Oreado	-3,116	0,467
Moderada – Húmedo	-3,116	0,568
Intensa – Seco	-7,636	0,586
Intensa – Oreado	-3,116	0,586
Intensa – Húmedo	-3,116	0,687

A cada uno de los 120 valores observados de escurrimiento superficial, asociados a determinados valores de precipitación diaria (Fig. 1), se le adjuntaron los valores ajustados obtenidos por los modelos de regresión múltiple con variables indicadoras, correspondientes a cada categoría (Fig. 2).

Mientras que el modelo de regresión lineal simple presentado en la Figura 1 explica el 83% de la variabilidad de la variable escurrimiento, el modelo de regresión con variables indicadoras explica el 96% de dicha variabilidad. Es decir, que los valores ajustados explican más la variabilidad de los datos observados que la curva de regresión de la Figura 1. También, se calculó la raíz del error cuadrático medio y los valores resultaron ser: 8,8 para el modelo de regresión simple y 3,9 para el modelo con variables indicadoras. Es decir, estos resultados ponen de manifiesto la importancia que tiene considerar en el modelo los dos factores evaluados.

Otra manera de presentar los datos es observar cuanto se aproximan los valores ajustados a los observados (Fig. 3). Si el modelo ajusta correctamente a los datos observados, la mayoría de los puntos deben estar en o cercanos a la línea sólida correspondiente a la función identidad.

Los resultados que se obtengan de las ecuaciones del modelo cuanti-cualitativo pueden presentar valores nega-

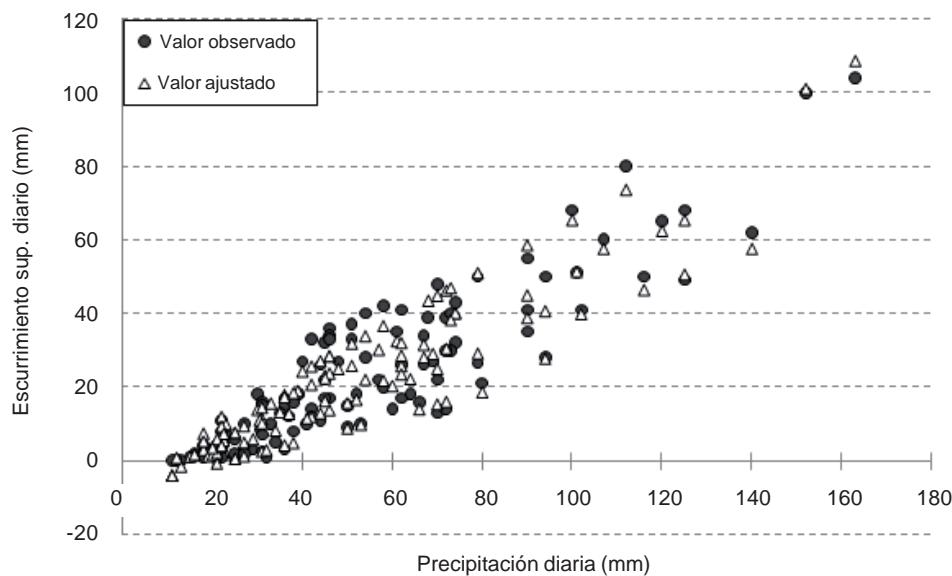


Figura 2. Comparación de los valores de escurrimiento superficial observados a campo y los valores estimados por los modelos para cada uno de los escenarios encontrados. Suelos con pendientes menores al 1%.

Figure 2. Comparison of surface runoff observed field values and models estimated values for each scenario. Soils slopes less than 1%.

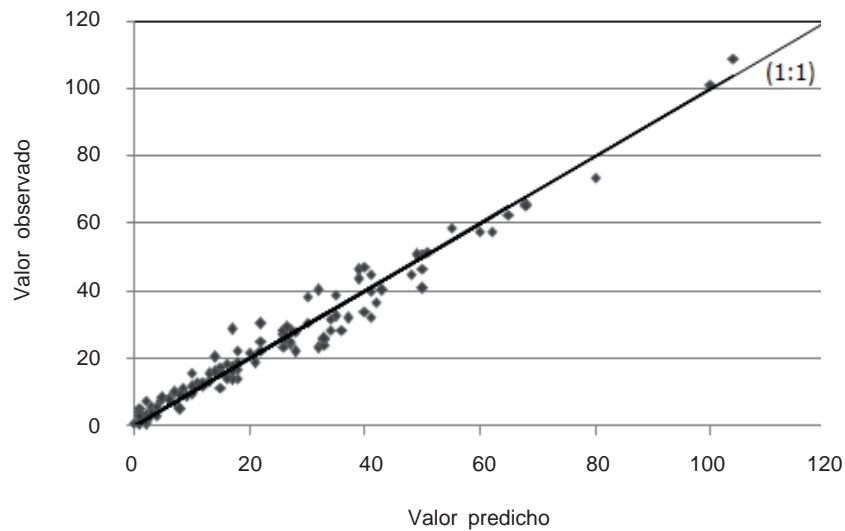


Figura 3. Relación entre valores observados y valores predichos.
 Figure 3. Relationship between observed values and predicted values.

tivos para un determinado rango de valores de precipitaciones. Si bien se estableció un valor límite de precipitación de 14 mm por encima del cual comienza a haber ES, este es un valor promedio de las distintas condiciones de IP y HSS. Por consiguiente, en todos los casos que se utilice este modelo y se obtengan valores de ES iguales o menores a

zero, significa que no hay escurrimiento superficial y toda agua precipitada ingresa al suelo.

En la localidad de Berreta, sobre un lote de producción agrícola con una pendiente entre 1 y 2%, se obtuvieron 27 datos de escurrimiento superficial. En la Figura 4 se grafican esos datos en función a su respectiva precipita-

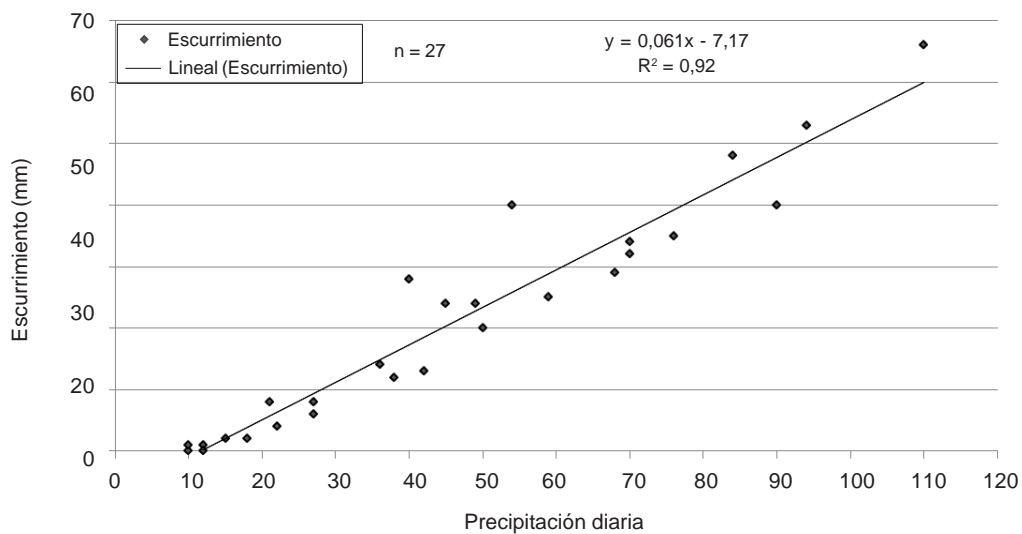


Figura 4. Relación entre la precipitación diaria y el escurrimiento superficial diario, para suelos Argiudoles bajo siembra directa. Suelos con pendientes entre el 1 y 2%.

Figure 4. Relationship between daily rainfall and daily surface runoff, under non-tillage in Argiudolls soils. Soils slopes between 1 and 2%.

ción diaria y ajustados a una línea de regresión, cuyo R^2 fue de 0,92. En el gráfico de esta figura, se puede observar que la línea de regresión de esos puntos toca el eje de las abscisas en el valor de precipitación diaria de 12 mm. Por lo tanto, valores inferiores a esa cantidad de precipitación no producen escurrimiento superficial.

El modelo cuantitativo que representa la relación entre la precipitación diaria y el escurrimiento superficial, para esa condición, es el siguiente:

$$Q = 0,61 P - 7,17 \quad (4)$$

donde, P es la precipitación diaria y Q el escurrimiento superficial.

Para un mismo valor de precipitación susceptible de escurrimiento, los valores de ES estimados con esta ecuación son superiores a los que se obtienen con la ecuación (1) en pendientes menores. Esto era de esperar, ya que Weir (2002) había comprobado que pendientes superiores al 1% provocaban una pérdida de agua por ES de alrededor de 2,5 veces mayor que pendientes inferiores al 1%.

Se observó que el análisis del modelo de regresión lineal múltiple con interacciones (1) para los 27 datos obtenidos iba a ser muy inconsistente. Debido a que, dentro de las distintas combinaciones cualitativas (Tabla 1), una de ellas no contaba con valores y varias tenían muy pocos datos. Por consiguiente, se decidió presentar solamente el modelo cuantitativo (4).

CONCLUSIONES

Para suelos Molisoles de aptitud agrícola en siembra directa de la Región Pampeana Argentina, con pendientes inferiores al 1%, la ecuación lineal obtenida de los datos observados, presenta un buen ajuste estadístico. Sin embargo, no presenta una estimación aceptable de los datos reales de ES, para precipitaciones diarias entre los 40 y 80 mm, frecuentes en esta región.

El modelo cuanti-cualitativo, utilizando variables indicadoras de intensidad de las precipitaciones y estado de humedad superficial del suelo, produce una mejora sustancial respecto al modelo cuantitativo para la estimación del escurrimiento superficial y su uso en modelos de balance hídrico de cultivos. En el caso que este modelo

produzca valores de ES iguales o menores que cero, se debe considerar que no hubo escurrimiento y que toda el agua precipitada ingresó al suelo.

Este último modelo tiene validez para suelos agrícolas en siembra directa de la Región Pampeana con pendientes menores al 1%, ya que fue desarrollado sobre el modelo cuantitativo mencionado anteriormente, y dado que esta región posee característica de intensidad de eventos de precipitaciones diarias muy similares.

Considerando lo anteriormente dicho, la aplicación y utilización del modelo cuanti-cualitativo podría ser extensible a todo el país, teniendo en cuenta que sean suelos Molisoles en siembra directa, con pendiente inferior al 1%.

Para suelos Molisoles de aptitud agrícola en siembra directa del sur de Santa Fe, con pendientes entre el 1 y 2%, el modelo cuantitativo obtenido mostró un muy buen ajuste pese a los pocos datos registrados de ES, pudiendo ser una buena referencia para estos suelos. Esos pocos datos fueron muy escasos para conseguir un modelo cuanti-cualitativo.

AGRADECIMIENTOS

Al señor Carlos Correro por su extraordinaria predisposición y dedicación en el registro de datos tomados a campo. Este trabajo se pudo realizar por financiación y logística aportada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, RG; LS Pereira; D Raes & M Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Cuadernos de riego y drenaje N° 56. FAO, Roma, 298 pp.
- Andriani, JM. 1999. Coeficientes de cultivo para soja de distinta época de siembra. Mercosoja 99, Resumen de trabajos y conferencias presentadas, Rosario, Argentina. Ecofisiología y Climatología, pp. 1.
- Andriani, JM. 2006. Contenido de agua útil de los principales suelos Argiudoles y Hapludoles del sur de Santa Fe. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, I reunión de suelos de la región andina, resúmenes, Salta-Jujuy, Argentina, pp. 94.
- Dardanelli, J; I Severina & JM Andriani. 2010. Funcionalidad de raíces y agua del subsuelo: Su rol en la optimización del riego suplementario. *Err*: 1er. Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas. Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. pp. 19-28.
- Godagnone, RE; H Bertola & M Ancarola. 2002. Ed. INTA-IGM. Ilustraciones y cuadros.
- Hudson, NW. 1997. Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. Capítulo 3, Boletín de suelos N°68, FAO-Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, Roma.

- Jones, JW; G. Hoogenboom; CH Porter; KJ Boote; WD Batchelor; LA Hunt; PW Wilkens; U Singh; AJ Gijsman & JT Ritchie, 2010. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* pp. 235-265.
- Linsley, R. 1982. *Hydrology for Engineers*. Book McGraw-Hill, 508 pp.
- SCS. 1972. *National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology*, U.S. Department of agriculture, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Mishra, SK & VP Singh. 2003. Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology. Vol. 42, *Water Science and Technology Library*, ISBN 1-4020-1132-6, 513 pp.
- Neter, J; M Kutner; CJ Nachtsheim & W Wasserman. 1996. *Applied Linear Statistical Models*. 4ta Edición, Editorial WCB/McGraw-Hill, Estados Unidos.
- Panigatti, JL. 2010. *Argentina 200 años, 200 suelos*. Ed. INTA, Buenos Aires, 345 pp.
- Pellat, FP. 2009. Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS. *Agrociencia* Vol. 43, N°5, México. Pp.521-528.
- Sasal, MC; MG Castiglioni & MG Wilson. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on rainfall erosion plots under no tillage. *Soil & Tillage Research* 108: 24-29.
- Weir Edgardo. 2002. Pérdida de suelo y agua en parcelas de escurrimiento. *En: A. Andriulo (ed), Por una agricultura sin contaminantes. Proyecto de contaminación Agrícola del INTA, Pergamino, Argentina.*

