

PREDICCIÓN DE LA ESCORRENTÍA Y ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD ANTECEDENTE EN UNA CUENCA AFORADA

MARÍA GUADALUPE ARES^{1,2*}; CELIO CHAGAS³ & MARCELO VARNI²

Recibido: 08-06-12

Recibido con revisiones: 06-09-12

Aceptado: 14-09-12

RESUMEN

La humedad del suelo constituye uno de los principales condicionantes de la respuesta al escurrimiento. Este trabajo plantea como objetivos discutir la incidencia de la humedad antecedente en la estimación del escurrimiento superficial realizada a través del método de la Curva Número (CN) en una cuenca agropecuaria aforada de las Sierras de Tandilia, provincia de Buenos Aires, y estimar la humedad previa empleando un método alternativo a través del ajuste de un balance hídrico calibrado para el área de estudio. El ajuste del balance permitió fijar un límite de diferenciación basado en la reserva de agua en el suelo del día previo a la precipitación entre las condiciones de humedad antecedentes I y II de 87,5 mm. La relación entre los escurrimientos observados y los calculados a través del método del CN con ajuste de la humedad antecedente de acuerdo con la lluvia de los 5 días previos presentó un coeficiente de determinación que explicó solo el 28% de la variabilidad, con sobreestimación de los valores predichos. Cuando el ajuste de la humedad se realizó según el criterio alternativo, la relación observados versus calculados presentó un R^2 de 0,48, lográndose una menor sobreestimación de las escorrentías comparado con el caso anterior. El balance hídrico propuesto resultaría de utilidad para la evaluación de la humedad antecedente de la región cercana a la subcuenca bajo estudio, al mejorar la predicción del escurrimiento respecto del método original del Servicio de Conservación de Suelos. Se pone de relieve la conveniencia de intensificar los estudios de predicción de la humedad edáfica inicial, por ser esta una variable muy sensible para la estimación de escurrimientos en concordancia con lo hallado en este trabajo como así también en otros reportes locales e internacionales.

Palabras clave. Precipitación de 5 días previos - Reserva de agua en el suelo - Número de curva.

RUNOFF PREDICTION AND ANTECEDENT MOISTURE ESTIMATION IN A GAUGED BASIN

ABSTRACT

Soil moisture is one of the major factors affecting rainfall-runoff response. The objectives of this paper are to discuss the effect of antecedent moisture condition on surface runoff calculated by Curve Number (CN) method on a gauged basin of Tandilia hills, Buenos Aires province, and to estimate this moisture condition by an alternative method employing a soil water balance calibrated for the study area. The limit set between antecedent moisture conditions I and II was 87,5 mm of soil water reserve at the rainfall previous day. This variable was estimated by water balance adjustment. The relationship between observed and estimated runoff by CN method and 5-day antecedent rainfall had a coefficient of determination that only explained 28% of the variability and overestimated predicted values. The same relationship but adjusting antecedent moisture using soil water reserve at the rainfall previous day showed an R^2 of 0.48, with less overestimation of runoff depths than the first method. It follows that new runoff estimations were improved compared to those obtained by the original Soil Conservation Service CN method. This shows that the water balance procedure can be useful to evaluate antecedent moisture conditions for the study region. According to the present results and others from local and international sources, initial moisture condition proved to be a highly sensitive variable for runoff estimation. This highlights the need to carry on further studies to improve the prediction of this soil water variable.

Key words. 5-day antecedent rainfall- Soil water reserve- Curve Number.

1*Becaria CONICET. gares@faa.unicen.edu.ar

2 Instituto de Hidrología de Llanuras «Dr Eduardo J Usunoff». República de Italia 780 (7300) Azul, Pcia de Buenos Aires, Argentina. varni@aa.unicen.edu.ar;

3 Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av San Martín 4453 (1417) Buenos Aires, Argentina. chagas@agro.uba.ar

* Autor de correspondencia, gares@faa.unicen.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La variabilidad en la respuesta a la escorrentía en una cuenca está dada por la interacción de distintos factores. Entre los mismos se pueden mencionar las diferencias en la distribución espacial de las tormentas y la intensidad de las precipitaciones. Otros factores son el tiempo transcurrido desde la última precipitación y la evapotranspiración durante ese período que, junto a las propiedades edáficas, condicionan la humedad del suelo (Pilgrim & Cordery, 1993; Ponce & Hawkins, 1996). Esta última variable constituye uno de los principales condicionantes de la respuesta al escurrimiento (Western *et al.*, 2004; Wei *et al.*, 2007; Penna *et al.*, 2011) y ha dado origen al concepto de condición de humedad antecedente (AMC) que emplea el método del Número de Curva (CN) (Ponce & Hawkins, 1996).

El método mencionado ha sido propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (USDA SCS, 1985), y se utiliza para predecir el volumen potencial de escorrentía directa de un evento de lluvia en pequeñas cuencas agrícolas, forestales y urbanas. El mismo define 3 condiciones de humedad antecedente (AMC): seca (AMC I), promedio (AMC II) y húmeda (AMC III), pudiendo expresarse los valores de CN en cualquiera de las tres condiciones mediante ajustes (Mishra & Singh, 2003). El criterio para definir la AMC II más difundido se basa en considerar la magnitud de las lluvias acumuladas de los 5 días previos. Este criterio establece valores diferenciales según se trate del otoño-invierno o de la primavera-verano, pero no contempla contrastes regionales o efectos de escala (Ponce & Hawkins, 1996). A menudo las predicciones de la escorrentía aplicando este criterio no han resultado adecuadas (Silveira *et al.*, 2000; Soulis *et al.*, 2009; Tramblay *et al.*, 2010). Por esta razón se ha señalado la necesidad de encontrar otras variables para tal fin. Algunos autores han considerado a la humedad del suelo medida *in situ* como una alternativa para valorar el efecto de la condición antecedente en la predicción de la escorrentía (Huang *et al.*, 2007; Tramblay *et al.*, 2010).

El área del Sistema de Tandilia, provincia de Buenos Aires, constituye una región con gran incidencia de la actividad agropecuaria en la cual existen importantes concentraciones urbanas como es el caso de la ciudad de Azul. Los escurrimientos superficiales han provocado perjuicios económicos y sociales en ambos ámbitos durante décadas recientes. Por esta razón, mejorar las predicciones del proceso lluvia escorrentía a través de un ajuste adecuado de la humedad previa es fundamental para obtener esti-

maciones más precisas, lo que puede contribuir a atenuar las consecuencias de las crecidas, mejorando a su vez la predicción del agua disponible para los vegetales.

En función de lo expuesto se plantean como objetivos de este trabajo evaluar la incidencia de la humedad antecedente en la estimación del escurrimiento superficial realizada a través del método de la Curva Número en una cuenca agropecuaria aforada del área de las Sierras de Tandilia, y estimar la humedad antecedente empleando un método alternativo a través del ajuste de un balance hídrico calibrado para el área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de trabajo corresponde a la subcuenca del arroyo Videla, que pertenece a la cuenca superior del arroyo del Azul, ubicada en la región central de la provincia de Buenos Aires (Figs. 1a y 1b). La subcuenca cuenta con una superficie de 116,3 km², su pendiente media es de 2,8%, mientras que su altitud máxima es de 340 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) y la mínima de 188 m s.n.m. Los tipos de suelos predominantes son los Argiudoles típicos (54,9%) y los Hapludoles líticos (28,1%), mientras que en menor proporción se encuentran Natracualfes típicos (9,3%), Paleudoles petrocálcicos (5,8%), Argiudoles líticos (0,5%), Argiudoles ácuicos (0,1%) y 1,4% del área posee afloramientos rocosos (INTA, 1992). Las tierras se destinan a usos agrícolas, ganaderos y mixtos.

Por otra parte, la precipitación media anual registrada durante el período 1901-2006 es de 917 mm, datos que corresponden a la estación Azul Aero del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que es la que posee representatividad regional en el área de estudio y que cuenta con datos meteorológicos completos desde 1901 (Fig. 1b).

Para este trabajo se analizaron registros de precipitación-escorrentía correspondientes a la subcuenca y valores de CN calculados para el área de estudio. Por otra parte, se estimaron valores locales de reserva de agua en el suelo a través del empleo de un balance hídrico diario. Dicho balance fue elaborado a partir de información de lluvias y de evapotranspiración de la estación Azul Aero del SMN y fue calibrado mediante valores de nivel freático obtenidos en el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA). Estas estaciones están separadas por 8 km, sus valores de precipitación resultan similares entre sí (Ares *et al.*, 2010) y a su vez son de magnitudes comparables a los registrados en la subcuenca estudiada. Asimismo, se considera que la evapotranspiración resulta, en términos generales, relativamente homogénea en las áreas consideradas, y aún en estaciones más distanciadas tal como señalan Rivas & Caselles (2004, 2005).

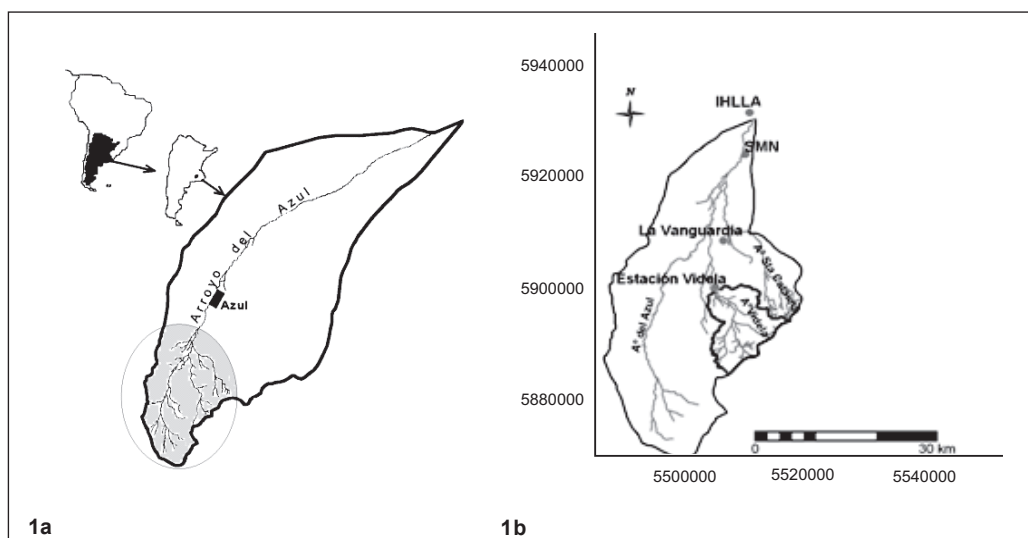


Figura 1a. Ubicación de la cuenca del arroyo del Azul. 1b. Detalle de la cuenca superior con subcuenca del arroyo Videla y ubicación de las estaciones Videla, La Vanguardia, SMN e IHLLA.

Figure 1a. Azul stream basin location. 1b. Upper basin and Videla stream subbasin and Videla, La Vanguardia, SMN and IHLLA stations location.

1- Selección y procesamiento de datos lluvia-escorrentía de la subcuenca del arroyo Videla

Se consideraron las crecidas registradas en la subcuenca durante el período 2001-2007, y se seleccionaron aquellas asociadas a precipitaciones mayores que 18 mm, ya que resultaban en un escurrimiento de relevancia en relación a la extensión de la subcuenca. Los datos de lluvia corresponden a la estación La Vanguardia, ubicada a 9 km de la salida de la subcuenca. Fue posible contar con 60 pares de datos de lluvia-escorrentía registrados en el área de estudio. Para cada crecida analizada se consideró la precipitación de los 5 días previos y se clasificaron los eventos en las categorías AMC I, II o III, según el criterio establecido por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) (Chow *et al.*, 1994).

La escorrentía superficial fue obtenida a través del procesamiento de las alturas registradas por un limnógrafo ubicado en el punto de cierre de la subcuenca. Dichas alturas se transformaron en caudales por medio de la curva altura-caudal de la sección, obtenida a través de aforos realizados con molinete hidrométrico. Los volúmenes de escurrimiento superficial se estimaron separando el flujo de base que es aportado por el medio subterráneo (Chow *et al.*, 1994).

2- Cálculo de los CN y estimación de escorrentía en la cuenca bajo estudio

El método del CN expresa el volumen de agua disponible para escurrir superficialmente como una función de la lluvia

y el almacenamiento (Silveira *et al.*, 2000), según la Ecuación (1).

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{para } P > 0,2S \quad (1)$$

mientras que $Q = 0$ para $P \leq 0,2S$, donde: Q= escorrentía (mm); P= precipitación (mm); S= retención potencial (mm).

Para el presente trabajo, se emplearon valores de CN mensuales correspondientes al área de estudio estimados por Ares (2010) mediante sistemas de información geográfica (SIG). Se relacionaron mapas temáticos correspondientes a grupos hidrológicos de suelos, uso del suelo y condición hidrológica, (referida a la cobertura porcentual y a la efectividad de cada cobertura para favorecer la infiltración del agua pluvial). Los mapas fueron elaborados a partir de información proveniente del área de estudio: la carta de suelos a escala 1:50.000 (INTA, 1992) utilizada para clasificar los suelos en los grupos hidrológicos, e imágenes de satélite que fueron procesadas para obtener la información correspondiente a uso del suelo y condición hidrológica. En este caso se contempló la variabilidad estacional en el uso del suelo y en el grado de cobertura mediante imágenes de los meses de abril, mayo, julio, septiembre, octubre y diciembre de 2005, y de enero, febrero y marzo de 2006, un ciclo anual representativo de las condiciones presentes en el área de estudio.

Los mapas elaborados fueron superpuestos en el SIG y resultaron en distintas combinaciones de tipos de suelos, usos y condición hidrológica. A cada combinación le fue asignado el valor de CN adecuado expresado en las tablas del SCS. Para obtener el CN mensual se calculó su valor ponderado considerando cada CN y su área correspondiente. Dado que los valores resultantes estaban expresados en AMC II, se calcularon los CN ajustados a AMC I y AMC III a través de las Ecuaciones (2) y (3):

$$CN(I) = \frac{4,2CN(II)}{10 - 0,058CN(II)} \quad (2)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0,13CN(II)} \quad (3)$$

A partir de estos datos se estimaron los valores de S asociados, mediante la Ecuación (4) expresados en condiciones de humedad antecedente I, II y III.

$$CN = \frac{25400}{(254 + S)} \quad (4)$$

Luego, se obtuvieron los escurrimientos estimados correspondientes a los eventos seleccionados de lluvia-escorrentía registrados en la subcuenca, ajustados por la humedad antecedente según la lluvia de los 5 días previos de cada crecida, a través de la Ecuación (1).

3- Calibración de un balance hidrológico diario para estimar la dinámica de la reserva de agua en el suelo

La reserva de agua en el suelo fue obtenida a partir de un balance de agua edáfica de paso de tiempo diario realizado por Varni (2005), calculado para el período 2001-2007. Brevemente, se comentan los aspectos principales relacionados con estos cálculos.

El balance fue planteado según las ecuaciones:

$$\Delta S = I - ETR \quad (5)$$

donde ΔS = variación de agua almacenada en el suelo (mm); I = infiltración (mm); ETR = evapotranspiración real (mm). Se considera que $I = P - ES$, donde ES = escurrimiento superficial.

Esta ecuación resulta válida mientras el almacenamiento de agua en el suelo no se haya completado. Una vez que el almacenamiento está en su nivel máximo, el suelo no puede retener el agua que ingresa y se produce la recarga al acuífero. Vale en este caso:

$$R = I - ETR \quad (6)$$

donde R = recarga (mm)

La evapotranspiración potencial (ETP) se calculó mediante el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) a partir de los datos registrados por la estación Azul Aero del SMN. Se consideró que la ETR varía linealmente desde ETR=0 para el suelo con almacenamiento de agua útil nulo, hasta ETR=ETP, dada para el suelo con su capacidad de almacenamiento completa. Así, a través de la verificación del almacenamiento se obtuvo la correspondiente ETR.

La recarga obtenida por la Ecuación (6) se dividió por el almacenamiento específico del acuífero en la zona de fluctuación del nivel freático, para obtener el ascenso de nivel freático. Además de los días en que se produce dicho ascenso debido a la recarga, el acuífero descarga agua por medio de flujo en el medio saturado hacia puntos cercanos (arroyos, lagunas, depresiones) o regionales (en este caso hacia el río Salado o el mar). Fueron utilizados dos niveles de descarga para representar un nivel de alcance local y otro de características regionales, cada uno con su coeficiente de descarga o goteo.

Se fijó una capacidad máxima de reserva de agua en el suelo de 100 mm (Burgos & Forte Lay, 1978), la que está de acuerdo con las propiedades de los suelos presentes en el área de estudio (clase textural, contenido de materia orgánica, capacidad de almacenamiento en función de la profundidad efectiva de los distintos tipos de suelos presentes en la subcuenca) y con la profundidad media del nivel freático del área donde se realiza el balance. Asimismo, dicha capacidad máxima de reserva de agua establecida está asociada con la profundidad que ocupan las raíces, que es la zona en la cual se evalúan los flujos de entrada y salida del agua en el cálculo del balance de agua en el suelo (Allen *et al.*, 1998).

Finalmente, los parámetros a ajustar fueron la capacidad de almacenamiento del suelo, la porosidad específica del acuífero en la zona de fluctuación de niveles, los coeficientes de goteo y niveles de descarga de las ecuaciones de las curvas de agotamiento local y regional. Los dos primeros parámetros influyeron en la magnitud de los ascensos, mientras que los restantes afectaron los descensos del nivel freático en el tiempo.

La calibración del balance con niveles observados en el acuífero arrojó un ajuste lineal entre niveles freáticos observados y simulados con un coeficiente de determinación $R^2=0,89$ para el mismo período de registro de crecidas analizadas en este trabajo.

Se computó la variación diaria del almacenamiento en el suelo a lo largo del tiempo, expresada como reserva de agua en el suelo (mm), y esta variable se empleó para establecer el criterio de valoración de la humedad previa propuesto en este trabajo.

4- Selección del valor de reserva de agua en el suelo límite entre las AMC y cálculo de escorrentía empleando este nuevo criterio de condición antecedente de humedad

En primer lugar, se estimaron los escurrimientos correspondientes a los eventos de lluvia-escorrentía registrados en la subcuenca para las condiciones I, II y III, a través de los valores de S y de la Ecuación (1), siguiendo el procedimiento explicado en el punto 2. En segundo lugar se establecieron los límites entre las condiciones de humedad previa a través del criterio de la reserva de agua en el suelo del día anterior a la lluvia. Para ello se identificó en qué condiciones de humedad antecedente se obtenían los mejores ajustes para los escurrimientos calculados. Se analizaron las diferencias mínimas relativas entre los escurrimientos observados y los escurrimientos calculados correspondientes a las 3 condiciones de AMC (Silveira *et al.*, 2000), de acuerdo con la Ecuación (7):

$$\frac{(Q_{\text{observado}} - Q_{\text{calculado}})}{Q_{\text{observado}}} \quad (7)$$

Se buscó el valor de reserva de agua en el suelo límite entre las condiciones de humedad previa identificadas. Finalmente, se clasificaron las crecidas consideradas de acuerdo con la AMC correspondiente y se recalcularon los escurrimientos.

5- Evaluación de los criterios de ajuste de la humedad antecedente

Dicha evaluación se realizó a través de comparaciones entre los escurrimientos observados y los calculados ajustados a la AMC correspondiente, de acuerdo con la lluvia de los 5 días previos por una parte, y a la AMC asociada según la reserva de agua en el suelo del día anterior a la precipitación por otra parte. Para ello se realizó un ajuste de modelos de regresión lineal simple con los primeros 40 datos lluvia-escorrentía, mientras que los últimos 20 pares de datos de la serie fueron destinados para la validación de los modelos (Beven, 1996). Se compararon los parámetros de las relaciones resultantes como también el valor de la raíz cuadrada del error cuadrático medio (root mean squared error, RMSE) (De Groot, 1980).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (8)$$

Donde n : número total de eventos considerados; y_j (mm): escurrimiento observado para cada evento; \hat{y}_j (mm): escurrimiento estimado correspondiente a cada evento.

RESULTADOS

En las Figura 2a y 2b se muestran dos ejemplos de la distribución areal de los CN resultantes de los procedimientos realizados por Ares (2010) y expresados en condición media de humedad antecedente, para los meses de abril y diciembre de 2005. Se aprecia que la distribución de las unidades cartográficas refleja la complejidad del paisaje analizado, que resulta de la combinación de diversos grupos hidrológicos de suelos, usos de la tierra y condiciones hidrológicas de la superficie presentes, los cuales aportan la heterogeneidad de acuerdo con la escala gráfica utilizada. En la Tabla 1 se presentan los CN en AMC II de cada mes considerado dentro del ciclo anual estudiado, obtenidos mediante la ponderación de cada CN individual por su área correspondiente. Asimismo, la tabla muestra los CN calculados para las AMC I y III como también los valores de S correspondientes.

Luego, se obtuvieron los escurrimientos estimados correspondientes a los eventos seleccionados de lluvia-escorrentía registrados en la subcuenca, ajustados por la humedad antecedente según la lluvia de los 5 días previos de cada crecida, a través de la Ecuación (1). Como ejemplo de estos cálculos se puede mencionar el correspondiente a la lluvia del 18 de diciembre de 2002, que presentó un registro de 65,4 mm y provocó un escurrimiento de 2,1 mm. El CN estimado para ese mes a través del uso de SIG expresado en AMC II fue de 84. Aplicando el método original (USDA SCS, 1985) la humedad antecedente para ese día se consideró en condición I, por lo tanto el valor de S corregido fue de 115 mm y la escorrentía calculada para esa lluvia fue de 11,4 mm, es decir 82% superior al valor medido.

Los escurrimientos calculados ajustados por humedad antecedente de acuerdo con el criterio de la lluvia de los cinco días previos y los valores de S asociados fueron comparados con los escurrimientos registrados *in situ* (Fig. 3). El ajuste de la relación entre las variables muestra un coeficiente de determinación que explica tan solo el 28% de la variabilidad observada. A su vez se aprecia una sobreestimación de la escorrentía, dado que la mayoría de los puntos se ubican por encima de la línea de relación 1:1.

En cuanto al criterio alternativo de evaluación de la humedad previa a través de la reserva de agua en el suelo, el análisis de las diferencias mínimas relativas entre los escurrimientos observados y los escurrimientos calculados correspondientes a las 3 AMC demostró que el 85% de los valores calculados ajustaban mejor a la condición I, mien-

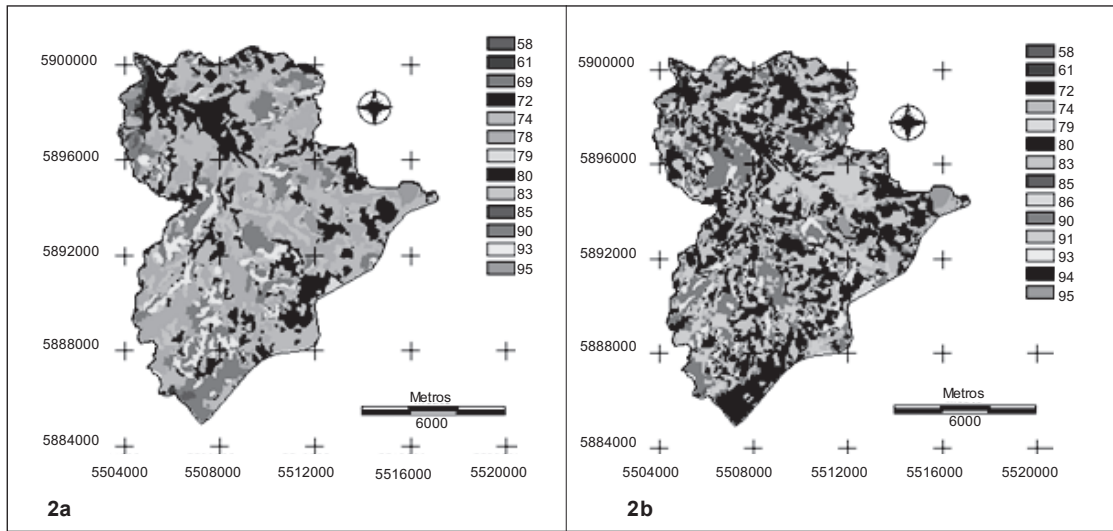


Figura 2. Distribución areal de los CN obtenidos en la subcuenca del arroyo Videla. 2a. mes de abril de 2005. 2b. mes de diciembre de 2005.
 Figure 2. CN areal distribution obtained for Videla stream subbasin. 2a. April 2005. 2b. December 2005.

Tabla 1. Valores de CN mensuales y valores de S (mm) correspondientes expresados en las 3 condiciones de humedad antecedente.
 Table 1. Monthly CN values and corresponding S values (mm) shown under the 3 antecedent moisture conditions.

Mes	CN II	S II	CN I	S I	CN III	S III
Abril	80	64	63	151	90	28
Mayo	84	48	69	115	92	21
Julio	87	38	74	90	94	17
Septiembre	83	52	67	124	92	23
Octubre	83	52	67	124	92	23
Diciembre	84	48	69	115	92	21
Enero	84	48	69	115	92	21
Febrero	82	56	66	133	91	24
Marzo	82	56	66	133	91	24

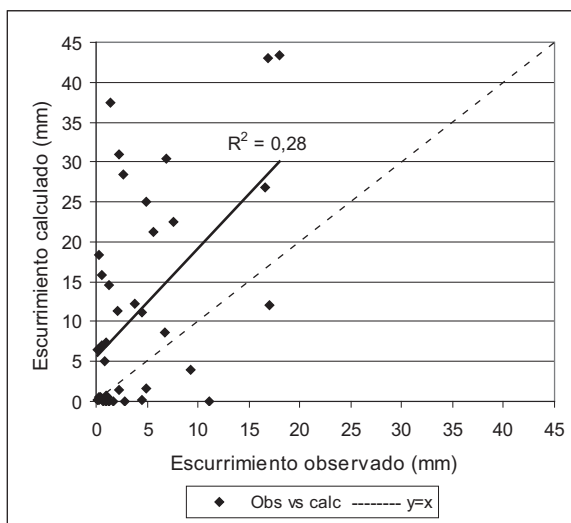


Figura 3. Escurrimientos calculados en relación a los escurrimientos observados en la subcuenca del arroyo Videla ajustados por humedad previa según el criterio de las lluvias de los 5 días previos.
 Figure 3. Measured versus estimated runoff depths of Videla subbasin adjusting antecedent moisture using 5-day antecedent rainfall criterion.

tras que el 15% restante a la condición II. Luego, la comparación conjunta de los escurrimientos calculados ajustados a la AMC I y II mostró que, en su mayoría, a los eventos expresados en condición I les correspondía un valor de reserva de agua en el suelo del día previo a la precipitación menor que 87,5 mm, mientras que aquellos ajustados a la condición II eran principalmente coincidentes con reservas de agua mayores que 87,5 mm. De acuerdo con esto, se estableció el nuevo límite de diferenciación basado en el criterio propuesto: $AMC I < 87,5 \text{ mm}$; $AMC II \geq 87,5 \text{ mm}$.

Con los eventos clasificados bajo este nuevo criterio los escurrimientos calculados se relacionaron con los escurrimientos observados (Fig. 4). En este caso, se encontró también una sobreestimación de la escorrentía, aunque la relación presentaba un mejor coeficiente de determinación ($R^2=0,48$) que en el caso del ajuste según la lluvia de los 5 días previos. Además, los modelos obtenidos para ambos métodos de ajuste de la humedad antecedente se

compararon a través de sus parámetros (Tabla 2). Si bien la relación entre las variables fue significativa en ambos casos y las pendientes de las ecuaciones de regresión obtenidas fueron iguales, al analizar las ordenadas al origen se observó que la correspondiente a la aplicación del criterio de reserva de agua en el suelo fue menor, lo que indica que para este caso hay una mayor cercanía a la línea de ajuste completo. A su vez, las estimaciones empleando este criterio alternativo presentaron menor RMSE.

La validación de los modelos de regresión planteados permitió corroborar los resultados obtenidos ya que la predicción del escurrimiento empleando el balance hídrico propuesto presentó nuevamente menor RMSE que el procedimiento original (5,3 vs 11,53) (Figs. 5a y 5b).

Figura 4. Escurrimientos calculados en relación a los escurrimientos observados en la subcuenca del arroyo Videla ajustados por humedad previa según el criterio de la reserva de agua en el suelo del día previo a la precipitación.

Figure 4. Observed versus estimated runoff depths of Videla subbasin adjusting antecedent moisture using soil water reserve at the rainfall previous day criterion.

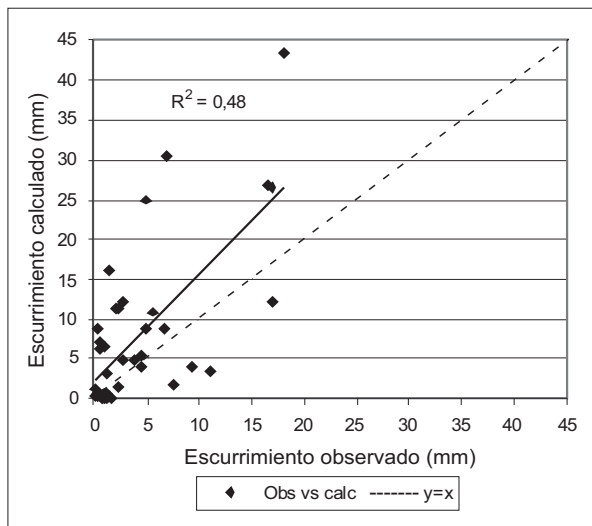


Tabla 2. Parámetros de las relaciones de regresión lineal simple entre los escurrimientos observados y los escurrimientos calculados ajustados bajo dos criterios de cuantificación de los límites entre las condiciones de humedad antecedente y valores la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

Table 2. Parameters of the simple linear regression relationships between observed and estimated runoff adjusted by two criteria to set the limits between antecedent moisture conditions and root mean squared error (RMSE) values.

Método de ajuste de humedad previa	Ordenada al origen	Pendiente	R ²	Valor p	RMSE
Precipitación de los 5 días previos	5,64	1,36	0,28	<0,05	10,9
Reserva agua en el suelo día previo a la precipitación	2,14	1,36	0,48	<0,05	7,1

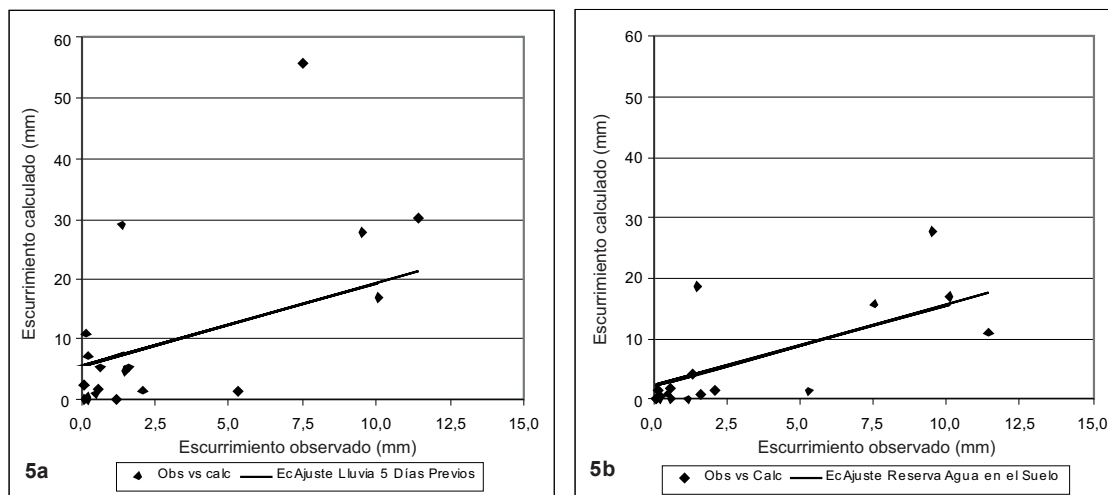


Figura 5. Validación de los modelos de regresión ajustados con los criterios de evaluación de la humedad previa: esguerrimientos calculados en relación a los esguerrimientos observados en la subcuenca del arroyo Videla y recta correspondiente a ecuaciones de ajuste según: 5a criterio de la lluvia de los 5 días previos, 5b criterio de reserva de agua en el suelo del día previo a la precipitación.

Figure 5. Validation of the regression models adjusted by the criteria to assess antecedent moisture: measured versus estimated runoff depths of Videla subbasin creek and straight lines corresponding to fitting equations by: 5a 5-day antecedent rainfall criterion, 5b soil water reserve at the rainfall previous day criterion.

DISCUSIÓN

Los resultados hallados concuerdan con lo señalado por Huang *et al.* (2007), en cuanto a la conveniencia de valorar la humedad del suelo *in situ* para mejorar la predicción del esguerrimiento. Sin embargo, surgen tres aspectos a considerar: por un lado la sobreestimación de los resultados obtenidos (Figs. 2 y 3), por otro lado el elevado porcentaje de variabilidad no explicada por el modelo propuesto y en tercer término, la ausencia de situaciones con AMC III en los análisis realizados. Respecto del primero se debe tener en cuenta que este análisis se realizó a partir de valores de CN mensuales calculados para una cuenca de 116,3 km². Si bien el método del CN no establece una superficie máxima, el mismo valora el esguerrimiento potencial que puede darse en pequeñas cuencas agrícolas. En este sentido, Esteves & Lapetite (2003), Cerdan *et al.* (2004) y Feng & Li (2008) señalan que en cuencas de mayor tamaño se reduce el esguerrimiento en relación a aquellas de menor tamaño, lo que es atribuible al mayor tiempo medio entre el inicio de la esguerrencia y la salida de la cuenca. Esto se suma a la incidencia de factores que podrían retardar y/o reducir el flujo superficial en cuencas grandes, tales como las condiciones superficiales de los suelos en cuanto a su rugosidad por la cobertura vegetal viva, muerta o la provocada por las labranzas, la variabilidad entre pendientes

locales y pendientes generales, la presencia de depresiones topográficas, alambrados, caminos, canales, etc. Ello explicaría la sobreestimación de esguerrimientos que se menciona en los resultados como así también la falta de condiciones de excesiva humedad antecedente (AMC III) observada. Por lo tanto, no todo el volumen de agua estimado por el método del CN para una determinada precipitación alcanzaría el punto de cierre de la cuenca de la forma prevista.

Lo señalado ayudaría a interpretar también la escasa capacidad de predicción que mostraron tanto el método original como la modificación propuesta, evidenciada por un R² menor al 50%. A los aspectos mencionados cabe agregar la existencia de suelos con capacidades de infiltración contrastantes asociados a la variación en su profundidad efectiva o a su estado de degradación (Sfeir *et al.*, 2005). Esto, sumado a la variabilidad espacial y temporal de las tormentas, puede determinar la presencia de áreas con diversas condiciones de humedad antecedente. Ello provocaría que no todos los sectores de la cuenca se activen al mismo tiempo en cuanto a la generación de la esguerrencia (Ali & Roy, 2010). Para el presente análisis, esta variabilidad no fue contemplada, ya que de acuerdo con la escala de trabajo, la selección de los valores límite entre

las condiciones de humedad antecedente se basó en cálculos realizados con un único valor de CN mensual agregado para toda la cuenca, al que se asoció valores de reserva de agua en el suelo obtenidos para un suelo que se consideró representativo del área de estudio. En concordancia con Ali & Roy (2010) se puede reafirmar que la escala de observación sería uno de los factores que hacen variar la efectividad que tienen mediciones sustitutas de la precipitación de los 5 días previos para valorar el efecto de la humedad antecedente en la escorrentía en cuencas comparables a las del presente estudio.

Todo lo expuesto permite considerar que el balance hídrico propuesto resultaría de utilidad para la evaluación de la humedad antecedente en la región cercana a la subcuenca de estudio, al mejorar la predicción del escurrimiento respecto del método original del SCS. Al mismo tiempo, se pone de relieve la conveniencia de intensificar los estudios de predicción de la humedad inicial, por ser esta una variable muy sensible para la estimación de escurrimientos de acuerdo con lo hallado por otros autores locales e internacionales (Chagas *et al.*, 1998; Silveira *et al.*, 2000; Tramblay *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011).

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, RG; LS Pereira; D Raes & M Smith. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper N° 56. FAO. Rome, Italy, 300 pp.
- Ali, A & AG Roy. 2010. A case study on the use of appropriate surrogates for antecedent moisture conditions (AMCs). *Hydrol Earth Syst Sci* 14: 1843-1861.
- Ares, MG. 2010. Escurrimiento superficial en una cuenca del Sistema de Tandilia: análisis de su dinámica y de los principales factores que la condicionan. Tesis de Magíster. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Ares, MG; M Varni & I Entraigas. 2010. Determinación de la erosividad de las precipitaciones para la localidad de Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina. En: M Varni *et al.* (eds.). Hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Zonas de Llanura. Tomo I. Pp 95-99. Ed Martin, Mar del Plata, Argentina. 794 pp.
- Beven, KJ. 1996. A discussion of distributed hydrological modelling, Chapter 13 A. In: MB Abbott & JC Refsgaard (eds.). Distributed hydrological modelling. Pp 255-278. Kluwer. Dordrecht, The Netherlands.
- Burgos, JJ & JA Forte Lay. 1978. Capacidad de almacenaje de agua en los suelos de la región pampeana. En: JJ Burgos (ed.). Taller argentino-estadounidense sobre sequías (CONICET). Pp 152-170. Mar del Plata, Argentina.
- 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 catchments in agricultural areas in Normandy. *J Hydrol* 299: 4-14.
- Chagas CI; OJ Santanatoglia; MJ Massobrio; MG Castiglioni & A Buján. 1998. Influencia de las lluvias previas sobre el comportamiento hidrológico de una microcuenca. En: Balbuena RH; SH Benez & D Jorajuria (eds.). Avances en el Manejo del Suelo y el Agua en la Ingeniería Rural. Pp 314-322. Ed de la Universidad Nacional de La Plata. Argentina.
- Chow, VT; D Maidment & L Mays. 1994. Hidrología aplicada. Mc Graw Hill. Santafé de Bogotá, Colombia. 584 pp.
- De Groot, MH. 1980. Probability and Statistics. 2nd ed. Addison-Wesley.
- Esteves, M & JM Lapetite. 2003. A multiscale approach of runoff generation in a Shaelian gully catchment: a case study in Niger. *Catena* 50: 255-271.
- Feng, P & JZ Li. 2008. Scale effects on runoff generation in meso-scale and large-scale sub-basins in the Luanhe River Basin. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 5: 1511-1531.
- 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. *Hydrol Process* 21(11): 1471-1481.
- INTA. 1992. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3760-22, Chillar, provincia de Buenos Aires. INTA. Argentina.
- Mishra, SK & V Singh. 2003. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) methodology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 513 pp.
- Penna, D; HJ Tromp-van Meerveld; A Gobbi; M Borga & G Dalla Fontana. 2011. The influence of soil moisture on threshold runoff generation processes in an alpine headwater catchment. *Hydrol Earth Syst Sci* 15: 689-702.
- Pilgrim, DH & I Cordery. 1993. Flood runoff. In: DR Maidment (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.
- Rivas, R & V Caselles. 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evapotranspiration from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Rem Sens Env* 93: 68-76.
- Rivas, R & V Caselles. 2005. Reference evapotranspiration in a pasture of Argentina. In: Pandalai SG (ed.). Recent Research Developments in Thermal Remote Sensing. Pp. 119-134. Kerala, India.
- 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 XX Congreso Nacional del Agua, Mendoza, en CD.
- Silveira, L; F Charbonnier & JL Genta. 2000. The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure. *Hydrol Sci J* 45(1): 3-12.
- Soulis, KX; JD Valiantzas; N Dercas & PA Londra. 2009. Analysis of the runoff generation mechanism for the investigation of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Hydrol Earth Syst Sci* 6: 373-400.
- 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.
- USDA-SCS. 1985. National Engineering Handbook, Section 4. U.S. Government. Printing Office, Washington DC.

- Varni, M. 2005. Evaluación de la recarga al acuífero del Azul: valores medios y variaciones temporal y espacial. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.
- Wei, L; B Zhang & M Wang. 2007. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems. *Agr Water Manage* 94: 54-62.
- Western, AW; SL Zhou; RB Grayson; TA McMahon; G Blöschl & DJ Wilson. 2004. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *J Hydrol* 286: 113-134.
- Zhang, Y; H Wei & MA Nearing. 2011. Effects of antecedent soil moisture on runoff modeling in small semiarid watersheds of southeastern Arizona. *Hydrol Earth Syst Sci* 15: 3171-3179.