

# ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL CON EL MÉTODO SCS-CN EN EL TRÓPICO SUBHÚMEDO DE MÉXICO

## Runoff Assessment with the SCS-CN Method in the Subhumid Tropic of Mexico

Néstor Francisco-Nicolás<sup>1‡</sup>, Antonio Turrent-Fernández<sup>2</sup>, Hugo Ernesto Flores-López<sup>3</sup>,  
Mario Roberto Martínez-Menes<sup>4</sup> y Javier Francisco Enríquez-Quiroz<sup>5</sup>

### RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo validar el método de curvas numéricas del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN) de los Estados Unidos para predecir el escurrimiento superficial (ES). El experimento se ubicó en una ladera cóncava, con 14.6% de pendiente, suelo Typic Tropofluvents, con 1.4% de materia orgánica, pH de 6.1 y una precipitación anual de 1683 mm. El método SCS-CN se validó con información de escurrimientos medidos en lotes de 50 m<sup>2</sup>, bajo tres sistemas de manejo del suelo: 1) terrazas de muro vivo con tracción animal (TMV), 2) labranza de conservación (LC), y 3) labranza tradicional (LT). Los valores de curvas numéricas (CN) se determinaron para condiciones de humedad antecedente con la lluvia acumulada de los cinco días previos al evento como: seco, medio y húmedo. Las CN se calibraron en el año 1996 y la validación fue de 1997 a 2002. La eficiencia del método se determinó mediante el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) y el coeficiente de Nash y Sutcliffe. En promedio, el sistema LT generó la mayor lámina de escurrimiento anual; los demás sistemas redujeron en 50% con respecto a LT. Los coeficientes anuales de escurrimiento fueron de 15.3, 15.9, 30.2% en los sistemas TMV, LC y LT, respectivamente. La relación precipitación-escurrimiento se ajustó a un modelo potencial, con R<sup>2</sup> entre 0.61 y 0.74. El sistema TMV

mostró valores de CN similares a LC, desde 78 a 82; en cambio, el sistema LT se asoció con valores de CN mayores del orden de 86 a 91, aunque los valores de CN que aportaron máxima eficiencia en la predicción del escurrimiento fueron menores. En conclusión, se encontró evidencia que mediante datos de escurrimiento superficial obtenidos en lotes de escurrimiento pueden obtenerse valores de CN, para estimar esta variable hidrológica en parcelas.

**Palabras claves:** curvas numéricas, coeficiente de escurrimiento, manejo de suelos, terraza de muro vivo, labranza de conservación.

### SUMMARY

The objective of the study was to validate the numerical curves method of the Soil Conservation Service (SCS-CN) of the United States in order to predict runoff. The experiment was established on a hillside site in a Typic Tropofluvents, 14.6% slope, soil with an organic matter content of 1.4%, a 6.1 pH, and 1683 mm of rainfall as annual average. The SCS-CN method was validated using data from conventional runoff plots 2 m wide by 25 m long, on the following soil management systems: 1) living wall terraces using horse-drawn traction (LWT), 2) conservation tillage (CT), and 3) conventional tillage (COT). The numerical curve (NC) values were defined for the moisture conditions (AHC) from accumulated rainfall from the five days previous to the event as dry conditions, average conditions and wet conditions. CN calibrations were performed for the year 1996 and validation comprised the period 1997 to 2002. Efficiency of the evaluated method was assessed using the determination coefficient (R<sup>2</sup>) as well as the Nash-Sutcliffe coefficient. On average, the COT system generated the largest annual runoff, whereas in the other systems it was 50% less. The annual runoff coefficients were 15.2, 15.9, and 30.2% for LWT, CT, and COT systems, respectively. The runoff: rainfall relationship was fitted to a potential model through a R<sup>2</sup> whose value

<sup>1</sup> Campo Experimental Cotaxtla, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 94270 Medellín de Bravo, Veracruz, México.

<sup>‡</sup> Autor responsable (francisco.nestor@inifap.gob.mx).

<sup>2</sup> Campo Experimental Valle de México, INIFAP. 56230 Chapingo, estado de México, México.

<sup>3</sup> Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, INIFAP. 47600 Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

<sup>4</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México, México.

<sup>5</sup> Campo Experimental La Posta, INIFAP. 94277 Medellín de Bravo, Veracruz, México.

ranged between 0.61 and 0.74. The LWT system showed NC values very similar to those of CT, from 78 to 82, with the three AHC, whereas in the COT system, the NC value for the three AHC was higher in the order of 86 to 91, although NC values that contributed the most efficiency in predicting runoff were the lowest. Concluding, using surface runoff data, evidence was found to validate the use of NC information to estimate this hydrological variable in runoff plots.

**Index words:** *numerical curve, runoff coefficient, soil management, living wall terraces, conservation tillage.*

## INTRODUCCIÓN

El proceso de escurrimiento superficial (ES) sin control constituye un problema ambiental crítico, favorece la erosión hídrica del suelo, aumenta el caudal, la carga de sedimentos y de otros contaminantes en el agua. El ES puede cuantificarse mediante la medición directa del flujo en estaciones de aforo, pero implica un alto costo económico, porque requiere infraestructura y demanda recursos humanos. Una estrategia viable para disminuir costos y tiempo es predecir el ES mediante modelos de simulación, los cuales estiman con bajo sesgo, y permiten la planificación de obras para controlar los escurrimientos superficiales. Los modelos disminuyen la infraestructura para medir componentes hidrológicos, reducen la inversión económica y recursos humanos (Freebairn *et al.*, 1989).

El pronóstico del escurrimiento y la erosión hídrica evolucionó de la colecta de datos para comparar prácticas, a modelos empíricos simples o complejos, y recientemente a modelos basados en procesos (McCool y Renard, 1990). Los modelos demandan consideraciones conceptuales y necesitan información básica medida en campo para integrar procesos a nivel temporal y espacial. La aplicación de modelos requiere conocer sus componentes principales, los parámetros y procesos involucrados, sus fortalezas y debilidades e información para integrar la base de datos.

En los modelos basados físicamente, resaltan los procesos de ES, de remoción del suelo por salpicado y por ES, de erosión entre surcos y en surcos, el transporte, el depósito y la producción de sedimentos. Sin embargo, sus desventajas son la mayor cantidad de datos requeridos y su insensibilidad a algunos parámetros. En

países en desarrollo, una herramienta útil es la aplicación de modelos empíricos, como el método de curvas numéricas desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN) de los Estados Unidos (Soil Conservation Service, 1972). Este método aplicable a pequeñas cuencas agrícolas, previa estimación de la retención máxima potencial de agua del suelo y la precipitación, permite estimar el escurrimiento con precisión aceptable (Sánchez *et al.*, 2003). Rawls *et al.* (1993) mencionaron que la CN refleja las condiciones de infiltración del suelo, las prácticas de manejo de los terrenos agrícolas, la condición antecedente de la lluvia y la cobertura del suelo, que relacionan la infiltración y el ES. El valor de la CN varía de 0 a 100, CN es igual a 100 para superficies impermeables y superficies de agua, y en superficies naturales es menor de 100 (Chow *et al.*, 1994); por lo que, con valores cercanos a 100 se tendrá el máximo escurrimiento. El método SCS-CN constituye una herramienta simple para aplicarse con poco conocimiento de la hidrología de un suelo; razón por la cual, en este estudio se utilizó tal método para estimar el ES.

El objetivo de este estudio fue calibrar el método de curvas numéricas y validar su capacidad para predecir el escurrimiento superficial, en tres sistemas de manejo del suelo, en una ladera del trópico subhúmedo de México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del Experimento

La investigación inició en 1988, en el sitio experimental Vistahermosa, localizado en la región de Los Tuxtlas, en el estado de Veracruz, entre 18° 00' y 18° 45' N y 94° 55' y 95° 30' O. El experimento se ubicó en una ladera cóncava, con 14.6% de pendiente y una precipitación anual de 1683 mm. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano ( $Aw_2$ ) (García, 1981). El suelo es Typic Tropofluvents (Uribe *et al.*, 2000), de textura franco arcillo arenoso, bajo contenido de materia orgánica (1.4%) y pH moderadamente ácido (6.1).

El método SCS-CN se validó utilizando información de escurrimientos medidos en lotes de escurrimiento durante siete años hidrológicos, que comprende el período de 1996 a 2002. El mes de mayo se consideró como el inicio del año hidrológico, el cual finaliza en abril del siguiente año civil. La evaluación hidrológica se realizó

en los sistemas de manejo del suelo siguientes: 1) terrazas de muro vivo labradas con implementos ligeros de tracción animal y 1.0 m de intervalo vertical (TMV), 2) labranza de conservación (LC) y 3) labranza tradicional (LT). En TMV, las parcelas constaron de seis terrazas de 20.0 m de longitud por un ancho variable asociado a la distancia entre setos. En LC y LT, las parcelas fueron de 17.5 m de longitud transversal a la pendiente y de 40.0 m de ancho.

En el sistema TMV se establecieron setos en contorno con *Gliricidia sepium*, se instaló anualmente un filtro de escurrimientos con residuos de cosecha y el suelo se roturó unidireccionalmente con arado reversible (Turrent *et al.*, 1995). El sistema LC consistió en no roturar el suelo, controlar malezas con herbicidas y eliminar la quema del rastrojo de maíz (4.10 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de materia seca), el cual se dejó como mantillo en ambos ciclos de cultivo. El sistema LT consistió en quemar los residuos de cosecha de maíz de dos ciclos de cultivo (3.59 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de materia seca) y en roturar el suelo en el sentido de la pendiente con arado de tracción mecánica.

El experimento se condujo con el cultivo doble de maíz de primavera-verano (P-V) con sucesión de otoño-invierno (O-I), estableciéndose en la segunda quincena de junio y primera de noviembre, respectivamente. El ciclo P-V se sembró con la variedad VS-536 y el ciclo O-I con la variedad V-530, con densidades de 60 mil y 45 plantas ha<sup>-1</sup>, respectivamente. El maíz se fertilizó con la dosis 138-69-00 y 100-40-00 de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O respectivamente en los ciclos correspondientes.

La precipitación pluvial se midió con un pluviógrafo de registro diario. El ES se registró en lotes de escurrimiento de 2 m de ancho y 25 m de longitud, delimitados con lámina de asbesto, con descarga en tres depósitos. Cada 24 h se midió la altura del agua en los depósitos, para obtener la lámina escurrida. El ES se relacionó con la precipitación diaria, mediante regresión no lineal. Para ajustar el escurrimiento con la precipitación, se utilizó el modelo de regresión potencial, con el cual se ha encontrado buen ajuste (Singh y Woolhiser, 1976; Tapia *et al.*, 2000).

### Descripción del Método de Curvas Numéricas

El método SCS-CN estima el escurrimiento medio (Q) mediante cantidad de precipitación y retención máxima potencial (S), utilizando valores de curvas numéricas. Las fórmulas para obtener Q y S se indican a continuación:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (1)$$

donde:

Q = escurrimiento medio por evento (mm)

P = precipitación efectiva por evento (mm)

S = retención máxima potencial (mm)

La condición para aplicar la Ecuación 1 es que  $Q > 0$  cuando  $P \geq 0.2 S$ , de lo contrario  $Q = 0$ .

La retención máxima potencial se obtiene mediante curvas numéricas, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

donde: CN = curva numérica (adimensional).

### Variables y Parámetros Requeridos en el Método de Curvas Numéricas

Los valores de CN utilizados en la validación se obtuvieron con datos de lluvia y ES observados durante el período de estudio. En virtud, que el estudio se realizó en un clima Aw<sub>2</sub>, las CN se determinaron en las condiciones de humedad antecedente propuestas por Boughton (1989), quien estableció condiciones de humedad para la estación de crecimiento, con base en la precipitación de los cinco días previos al evento: seco (<35.6 mm), medio (35.6 a 53.3 mm) y húmedo (>53.3 mm). La retención máxima potencial de agua en el suelo se estimó utilizando la siguiente relación, obtenida de la Ecuación 1.

$$S = 5 \left[ P + 2Q - (5PQ + 4Q^2)^{1/2} \right] \quad (3)$$

donde:

Q = escurrimiento medio por evento (mm)

P = precipitación por evento (mm)

S = retención máxima potencial (mm).

La obtención del valor de curva numérica para cada condición de humedad antecedente, utilizó el valor de S en la siguiente ecuación:

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

En cada condición de humedad antecedente se optimizó el valor de CN para obtener la máxima eficiencia en la predicción del ES, para ello se tomaron valores de CN incluidos en el intervalo de variación.

### Calibración y Validación del Método de Curvas Numéricas

La calibración de las CN se realizó con el año hidrológico de 1996 y la validación comprendió el periodo de 1997 a 2002. La calibración consistió en utilizar los parámetros obtenidos para hacer los cálculos con el método y hacer las comparaciones del ES predicho con el observado en lotes de escurrimiento. La bondad de ajuste entre los valores medidos y predichos o eficiencia de predicción del método SCS-CN se determinó con valores diarios de ES, sobre todo el período de estudio. Los indicadores de eficiencia del método fueron el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970). El coeficiente de determinación minimiza la suma de cuadrados entre valores observados y simulados por el método y su fórmula es la siguiente:

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_o - V_s)^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_o - \bar{V}_s)^2} \quad (5)$$

donde:

$V_o$  = valor observado del evento  $i$

$V_s$  = valor simulado del evento  $i$

$\bar{V}_s$  = promedio de los valores simulados y

$n$  = número de eventos.

El coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970) se determina por el método siguiente:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_o - V_s)^2}{\sum_{i=1}^n (V_o - \bar{V}_o)^2} \quad (6)$$

donde:

$E$  = coeficiente de eficiencia del método

$V_o$  y  $V_s$  definidos previamente

$\bar{V}_o$  = promedio de los valores observados.

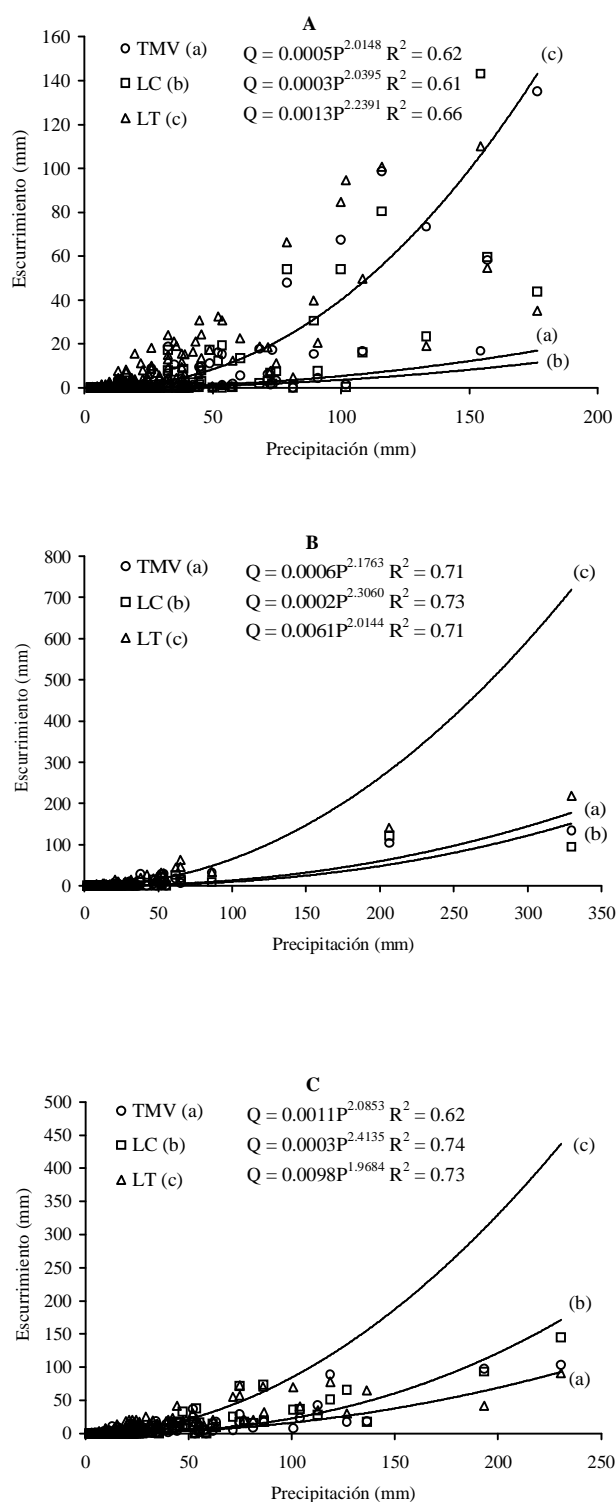
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En promedio, se encontró que el sistema LT se asoció con la mayor lámina de ES anual (551 mm); mientras que, en los sistemas TMV y LC fue de 280 y 291 mm, respectivamente. Los coeficientes anuales de escurrimiento promedio fueron de 15.3, 15.9 y 30.2% en los sistemas TMV, LC y LT, respectivamente. Los coeficientes de escurrimiento obtenidos en LC y LT son bajos comparados con los encontrados por Villar *et al.* (1998) en la Fraylesca, Chiapas, quienes encontraron valores de 36 y 54% en una ladera con 6% de pendiente, en los sistemas respectivos.

La relación entre precipitación diaria y ES observado por condición de humedad antecedente se asoció a un modelo potencial, de acuerdo con Singh y Woolhiser (1976) y Tapia *et al.* (2000), con una  $R^2$  entre 0.61 y 0.74 (Figura 1). Sobresale el mayor potencial de ES asociado a LT, aunque la pendiente de las ecuaciones no refleja este fenómeno. Por lo tanto, las diferencias observadas en ES se asocian a los valores de los interceptos, que engloban el efecto conjunto de los coeficientes de regresión (Myers, 1990; Tapia *et al.*, 2000).

Los valores promedio de CN fueron altos en los tres sistemas de manejo del suelo, en las tres condiciones de humedad antecedente (Cuadro 1). El sistema LC mostró valores de CN similares a la TMV, desde 78 a 82; en cambio, en el sistema LT los valores de CN fueron mayores, en el orden de 86 a 91. Los valores elevados de CN significan alto ES, que en TMV no muestran el efecto de la disminución de la pendiente y el filtro de escurrimientos. Tampoco se manifiesta el efecto de la rugosidad superficial proporcionada por los residuos de cosecha en LC (Cogo *et al.*, 1984). Sin embargo, el sistema LT se asoció con los valores mayores de CN (Cuadro 1), indica que tiene menor capacidad de retención de humedad del suelo. Así mismo, se observó que los valores de CN aumentan al pasar de la condición seca a la húmeda, lo que implica incremento en el ES al aumentar la humedad antecedente (Hawkins, 1993).

Los valores mínimos y máximos de CN presentados en el Cuadro 1 reflejan su variabilidad; por lo cual, los valores promedios presentan baja eficiencia en la predicción del ES, con tendencia a sobreestimar el valor de CN. El Cuadro 2, presenta los valores de CN



**Figura 1.** Esguerrimiento en función de precipitación en tres sistemas de manejo del suelo bajo tres condiciones de humedad antecedente (A) seco, (B) medio y (C) húmedo. TMV = terraza de muro vivo; LC = labranza de conservación; LT = labranza tradicional.

que aportaron la máxima eficiencia de predicción del ES, los cuales se tomaron del intervalo de variación para cada condición de humedad antecedente, en cada sistema de manejo del suelo.

En el Cuadro 2 se aprecia que los valores disminuyen en los tres sistemas, en relación a los valores promedio de CN que se presenta en el Cuadro 1. En TMV no se encontró diferencia entre CN (Cuadro 2), indicando que la humedad antecedente no tiene efecto sobre el ES en este sistema de manejo del suelo. Esta respuesta se explica por el efecto del seto y del filtro de esguerrimientos, que retienen el agua y causa su infiltración (Francisco *et al.*, 2006).

El menor valor de CN en LC para las condiciones de humedad seca y media, sugiere que en tales condiciones presenta un ES ligeramente menor que TMV; sin embargo, LC tiene mayor potencial de ES para la condición húmeda (Cuadro 2). En los años con alta precipitación, en LC se espera mayor ES que en TMV; por ejemplo, en 1999 la lluvia anual fue de 2691 mm y TMV se asoció con 582 mm de ES, pero en LC el ES fue de 787 mm (Francisco *et al.*, 2006). En el sistema LT el ES está más asociado a la condición de humedad antecedente, con mayor potencial de esguerrimiento al pasar de la condición seca a la húmeda (Hawkins, 1993).

De acuerdo con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970), se encontró que en promedio la eficiencia de predicción del ES fue de 0.66, 0.75 y 0.70 en los sistemas TMV, LC y LT, respectivamente (Cuadro 3). El sistema TMV presentó una eficiencia similar en las tres condiciones de humedad; en cambio, los sistemas LC y LT presentaron la menor eficiencia en la condición de humedad antecedente seca y la mayor eficiencia en la condición de humedad media. Este estudio aporta evidencia que pueden utilizarse datos de ES obtenidos en lotes de esguerrimiento para obtener CN y estimar el ES, a pesar que el método se generó para predecir ES en cuencas pequeñas.

En los tres sistemas de manejo del suelo se encontró un balance entre subestimación y sobreestimación del ES (Figura 2).

La respuesta encontrada está asociada al efecto de la cobertura vegetal y al efecto de la variabilidad de la precipitación entre años. La sobreestimación se vincula a los años que rebasan la precipitación media, debido a que existe una relación directa entre la CN, que representa el ES y la precipitación (Soil Conservation Service, 1972).

**Cuadro 1. Valores de curvas numéricas para tres condiciones de humedad antecedente en tres sistemas de manejo del suelo.**

Condición de humedad antecedente <sup>†</sup>	Precipitación de cinco días previos <sup>‡</sup>	Sistema de manejo del suelo		
		Terrazas de muro vivo	Labranza de conservación	Labranza tradicional
	mm	Valores promedio (mínimo y máximo) <sup>§</sup>		
Seca	< 35.6	79 (40 – 96)	78 (37 – 96)	86 (47 – 99)
Media	35.6 – 53.3	81 (47 – 97)	80 (39 – 97)	90 (63 – 99)
Húmeda	> 53.3	82 (48 – 98)	82 (47 – 98)	91 (46 – 99)

<sup>†</sup> El número de observaciones fue de 83, 242, 180 en las condiciones seca, media y húmeda, respectivamente. <sup>‡</sup> la precipitación que define la condición de humedad antecedente fue la establecida por Boughton (1989) para la estación de crecimiento. <sup>§</sup> entre paréntesis se muestran los valores mínimos y máximos de curvas numéricas, respectivamente. El coeficiente de variación de los valores de las curvas numéricas, en las tres condiciones de humedad y en los tres sistemas de manejo del suelo, fue de 13.8%.

**Cuadro 2. Valores de curvas numéricas que aportaron la máxima eficiencia para predecir el escurrimiento superficial en tres sistemas de manejo del suelo.**

Condición de humedad antecedente	Precipitación de cinco días previos <sup>†</sup>	Curva numérica	Sistema de manejo del suelo		
			Terrazas de muro vivo	Labranza de conservación	Labranza tradicional
	mm				
Seca	< 35.6	I	70	68	81
Media	35.6 – 53.3	II	70	68	86
Húmeda	> 53.3	III	72	76	88

<sup>†</sup> La precipitación que define la condición de humedad antecedente fue la establecida por Boughton (1989) para la estación de crecimiento.

**Cuadro 3. Escurrimiento superficial promedio de siete años por condición de humedad antecedente y eficiencia de predicción por evento en tres sistemas de manejo del suelo.**

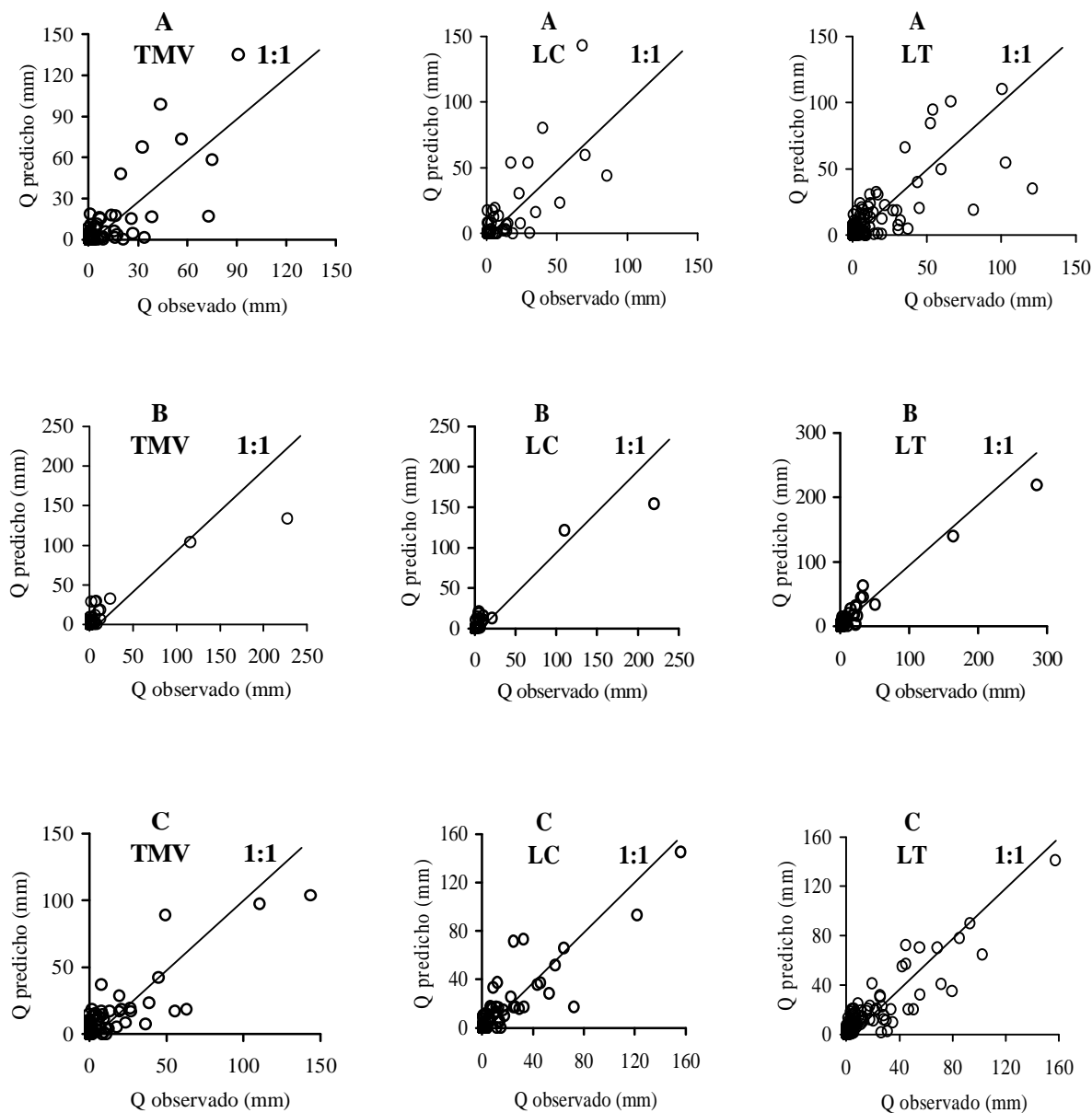
Condición de humedad antecedente <sup>†</sup>	Escurrimiento	Sistema de manejo del suelo					
		Terrazas de muro vivo		Labranza de conservación		Labranza tradicional	
	mm						
Seca	Observado	101	(0.66)	92	(0.61)	191	(0.59)
	Predicho	97		86		180	
Media	Observado	58	(0.64)	50	(0.87)	118	(0.89)
	Predicho	63		52		119	
Húmeda	Observado	120	(0.67)	150	(0.77)	243	(0.63)
	Predicho	122		149		247	

<sup>†</sup> La precipitación que define la condición de humedad antecedente fue la establecida por Boughton (1989) para la estación de crecimiento. Los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y del coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970), se determinaron sobre los eventos de un período de siete años y adquirieron los mismos valores, los cuales se presentan entre paréntesis.

## CONCLUSIONES

- En el sistema de terrazas de muro vivo los valores de curvas numéricas fueron muy similares a los encontrados en labranza de conservación (78 a 82), los cuales fueron

inferiores a los encontrados en labranza tradicional (86 a 91); aunque los valores de curvas numéricas que aportaron máxima eficiencia en la predicción del escurrimiento fueron menores. El método de curvas numéricas aplicado a condiciones de parcela, generó



**Figura 2.** Relación del escurrimiento superficial predicho con el observado por evento durante siete años en tres sistemas de manejo del suelo, por condición de humedad antecedente A = seca, B = media y C = húmeda. TMV = terrazas de muro vivo con tracción animal, LC = labranza de conservación y LT = labranza tradicional.

un balance entre subestimación y sobrestimación del escurrimiento superficial; sin embargo, en promedio permite tener una predicción aceptable.

- Se encontró evidencia que mediante datos de escurrimiento superficial obtenidos en lotes de escurrimiento pueden obtenerse valores de curvas numéricas para estimar esta variable hidrológica en parcelas agrícolas, sin o con prácticas de conservación

de suelos, a pesar que el método se generó para predecir escurrimiento superficial en cuencas pequeñas.

### LITERATURA CITADA

- Boughton, W. C. 1989. A review of the USDA SCS curve number method. *Aust. J. Soil Res.* 27: 511-523.
- Chow, V. T., D. R. Maidmet y L. W. Mays. 1994. *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana. Santa Fé de Bogotá, Colombia.

- Cogo, N. P., W. C. Moldenhauer, and G. R. Foster. 1984. Soil loss reductions from conservation tillage practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 368-373.
- Francisco N., N., A. Turrent F., J. L. Oropeza M., M. R. Martínez M. y J. I. Cortés F. 2006. Pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo. *Terra Latinoamericana* 24: 253-260.
- Freebairn, D. M., D. M. Silburn, and R. J. Loch. 1989. Evaluation of three soil erosion models for clay soils. *Aust. J. Soil Res.* 27: 199-211.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 3ª edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Hawkins, R. H. 1993. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 119: 334-345.
- McCool, D. K. and K. G. Renard. 1990. Water erosion and water quality. *Adv. Soil Sci.* 13: 175-185.
- Myers, R. H. 1990. Classical and modern regression with applications. Duxbury Press. Boston, MA, USA.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, a discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and B. Soni. 1993. Agricultural management effects on soil water processes. Part I: Soil water retention and Green and Ampt infiltration parameters. *Trans. ASAE* 26: 1747-1752.
- Sánchez C., I., M. Velázquez V., R. Jasso I. y J. L. González B. 2003. Caracterización de la retención máxima de humedad en el suelo del método SCS-CN. Aplicación a una cuenca de México. *Ing. Hidrául. Méx.* 18: 111-117.
- SCS (Soil Conservation Service). 1972. National engineering handbook. Section 4. Hydrology. U. S. Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Singh, V. P. and D. A. Woolhiser. 1976. Sensitivity of linear and nonlinear surface runoff models to input errors. *J. Hydrol.* 29: 243-249.
- Tapia V., M., J. L. Oropeza, B. Figueroa S., J. M. González, C. Ortiz S., M. Tiscareño L. y J. Stone. 2000. Protección de suelos de ladera y erosión hídrica en la cuenca del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Ing. Hidrául. Méx.* 15: 55-64.
- Turrent F., A., S. Uribe G., N. Francisco N. y R. Camacho C. 1995. La terraza de muro vivo para laderas del trópico subhúmedo de México. I. Análisis del desarrollo de la terraza durante 6 años. *Terra* 13: 276-298.
- Uribe-Gómez, S., M. del C. Gutiérrez-Castorena, C. Tavarez-Espinosa y A. Turrent-Fernández. 2000. Caracterización y clasificación de suelos de ladera manejados con terrazas de muro vivo en Los Tuxtlas, Veracruz. *Agrociencia* 34: 403-412.
- Villar-Sánchez, B., B. Figueroa-Sandoval, J. L. Oropeza-Mota, L. Landois-Palencia y V. Volke-Haller. 1998. Erosionabilidad de suelos y su impacto en la productividad del maíz en el trópico mexicano. *Agrociencia* 32: 199-207.