

Evaluación del escurrimiento superficial de los modelos de Curva Numérica y Green-Ampt en la cuenca río Chapingo, México

Evaluation of surface runoff from the Numerical Curve and Green-Ampt models in the Chapingo River Basin, Mexico

Ricardo Montiel Gonzaga¹, Jorge Víctor Prado Hernández^{2,‡},
Mario Alberto Vázquez Peña³, Laura Alicia Ibáñez Castillo³ y Fermín Pascual Ramírez⁴

¹ Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), ² Departamento de Suelos, ³ Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México- Texcoco km 38.5, Chapingo. 56230 Texcoco, Edo. de México, México.

[‡] Autor para correspondencia (vpradohdez@gmail.com)

⁴ Universidad Autónoma de México, Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta. 58190 Morelia, Michoacán, México.

RESUMEN

Los modelos hidrológicos son una opción rápida y de bajo costo para estimar el escurrimiento superficial en un evento de lluvia-escorrentía en cuencas sin aforos, previo a su uso los modelos deben ser evaluados; la certidumbre de sus resultados es de utilidad en la definición de políticas acertadas para un manejo racional del recurso agua. El objetivo de esta investigación fue evaluar el grado de ajuste del modelo de escurrimiento de curva numérica del extinto Servicio de Conservación de Suelos de EE. UU. (SCS-CN) y del modelo de infiltración de Green-Ampt (GA) para reproducir hidrogramas de escurrimiento directo en cuencas no aforadas, los cuales se integraron en un modelo hidrológico estructurado en el software HEC-HMS. Se eligieron siete eventos de lluvia bien definidos y uno prolongado con precipitaciones intermitentes ocurridos en la cuenca río Chapingo, México. En el análisis del conjunto de los ocho eventos, el modelo SCS-CN estimó mejor el volumen total escurrido (RMSE de 5430 m³), mientras que el de GA estimó mejor el gasto pico (RMSE de 0.72 m³ s⁻¹). El modelo de GA estimó mejor los hidrogramas de tres eventos de lluvia bien definidos cuyos volúmenes escurridos fueron mayores que 8.31 × 10³ m³ y, Q_p ≥ 1.93 m³ s⁻¹, con una RMSE de 0.14 a 0.43 m³ s⁻¹, MRE de 0.20 a 0.28 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.92 a 0.95. En los otros cuatro eventos bien definidos,

con volúmenes escurridos inferiores a 6.35 × 10³ m³ y Q_p ≤ 1.44 m³ s⁻¹ ambos modelos estimaron de forma idéntica y sin eficacia los hidrogramas, con un índice de Nash-Sutcliffe de -1.38 a -7.34. La estimación del hidrograma del evento prolongado, resultó idéntica en ambos modelos, con una RMSE de 0.07 m³ s⁻¹, un MRE de 0.35 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.71.

Palabras clave: escurrimiento directo, Green-Ampt, hidrograma observado, humedad inicial del suelo, SCS-CN.

SUMMARY

Hydrological models are a fast and low-cost option to estimate surface runoff in a rainfall event in ungauged basins. Prior to their use, the models must be evaluated; their results, if reliable, are useful in defining sound policies for rational management of the water resource. The purpose of this research was to evaluate the degree of fit of the numerical curve runoff Model of the extinct U.S. Soil Conservation Service (SCS-CN) and the Green-Ampt (GA) infiltration model to reproduce direct runoff hydrograms in ungauged basins. These models were integrated into a hydrological model structured in HEC-HMS software. Seven well-defined rainfall events and one prolonged event with intermittent precipitation occurring in the Chapingo River Basin, Mexico, were chosen. In the

Cita recomendada:

Montiel Gonzaga, R., J. V. Prado Hernández, M. A. Vázquez Peña, L. A. Ibáñez Castillo y F. Pascual Ramírez. 2019. Evaluación del escurrimiento superficial de los modelos de Curva Numérica y Green-Ampt en la cuenca río Chapingo, México. *Terra Latinoamericana* 37: 291-301.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.484>

Recibido: 18 de enero de 2019.

Aceptado: 23 de abril de 2019.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 37: 291-301.

analysis of the set of eight events, the SCS-CN model estimated the total runoff volume better (RMSE of 5430 m³), while the GA model estimated the peak flow better (RMSE of 0.72 m³ s⁻¹). The GA model best estimated the hydrograms of three well-defined rainfall events whose runoff volumes were greater than 8.31 × 10³ m³ and $Q_p \geq 1.93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ with RMSE of 0.14 to 0.43 m³ s⁻¹, MRE of 0.20 to 0.28 and Nash-Sutcliffe efficiency of 0.92 to 0.95. For the other four well-defined events with runoff volumes lower than 6.35 × 10³ m³ and $Q_p \leq 1.44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, both models estimated the hydrograms identically and without effectiveness with a Nash-Sutcliffe index of -1.38 to -7.34. Estimation of the hydrogram of the prolonged event was identical in both models with an RMSE of 0.07 m³ s⁻¹, an MRE of 0.35 and a Nash-Sutcliffe efficiency of 0.71. The hydrogram of the prolonged event was identical in both models, with an RMSE of 0.07 m³ s⁻¹, an MRE of 0.35 and a Nash-Sutcliffe efficiency of 0.71.

Index words: *direct runoff, Green-Ampt, initial soil moisture, observed hydrogram, SCS-CN.*

INTRODUCCIÓN

La ausencia de estaciones de aforo hidrológico y el alto costo de las instalaciones de estas, obligan a los hidrólogos a usar métodos indirectos para estimar la escorrentía superficial de las cuencas hidrográficas (Ajmal *et al.*, 2016). Para ello, los modelos hidrológicos son una alternativa. La fiabilidad de las estimaciones de los modelos depende en gran medida del tipo de modelo hidrológico a utilizar, no obstante, previo a su aplicación deben ser calibrados y evaluados. Los modelos hidrológicos más usados en México son el método racional, Curva Numérica del extinto Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS-CN) (Alonso-Sánchez *et al.*, 2014). El modelo SCS-CN es uno de los más comunes y es utilizado para predecir escurrimiento ya que no considera la intensidad y duración de la lluvia, solo la precipitación total en 24 h; es un modelo aplicable a pequeñas cuencas agrícolas que permite estimar el escurrimiento con precisión aceptable (Sánchez *et al.*, 2003), aunque también ha sido aplicado a cuencas urbanas (USDA-NRCS, 1986).

Por otro lado, el modelo de infiltración de Green-Ampt (GA) puede integrarse en un modelo hidrológico para estimar escurrimiento superficial. Es

una ecuación matemática basada en un principio físico que puede simular el efecto de la intensidad de la lluvia y duración del proceso de infiltración. Green-Ampt representa de forma aceptable el movimiento del agua en suelos estratificados (Ma *et al.*, 2011) y puede ser útil para estimar escurrimientos superficiales en cuencas con diferentes usos del suelo y condiciones topográficas (Van Mullem, 1991). Se ha observado que el modelo de GA predice con mayor precisión en grandes tormentas que el modelo de SCS-CN, mientras que este último predice mejor en eventos de pequeñas tormentas. La efectividad de SCS-CN se debe a que supone una abstracción inicial antes de la escorrentía superficial y el modelo de GA asume el escurrimiento superficial sólo cuando las tasas de precipitación son mayores que la tasa de infiltración (Ficklin y Zhang, 2013). En cuencas 50% urbanas ambos modelos han mostrado que no hay diferencias significativas de error en el gasto pico y volumen escurrido (Kabiri *et al.*, 2013). En México el modelo de GA se ha aplicado en trabajos de irrigación a nivel parcela para modelar infiltración (Saucedo *et al.*, 2016); en cuencas ha sido poco aplicado y debido a la escasa información disponible no es posible realizar una comparación de su efectividad respecto al modelo de SCS-CN, ya que las investigaciones realizadas con GA han tenido objetivos diferentes al enfoque de estimación de la escorrentía superficial, por lo que en este trabajo se planteó evaluar ambos modelos en una cuenca de México.

El trabajo se realizó en la cuenca río Chapingo, México, la cual sufrió un proceso de erosión hídrica acelerado en la parte media ocasionado por las actividades agropecuarias y el uso irracional de los bosques (Cruickshank, 2007). El modelo SCS-CN y el método racional se han aplicado en la cuenca para estimar el escurrimiento superficial con fines académicos. El objetivo de este estudio fue evaluar y modelar el escurrimiento superficial en siete eventos aislados de lluvia bien definidos y uno prolongado de baja intensidad con lluvias intermitentes. Los modelos usados fueron SCS-CN y GA los cuales fueron integrados en un modelo hidrológico para estimar el escurrimiento superficial. Los modelos no se calibraron, con el propósito de identificar el potencial de ambos modelos como herramienta de apoyo para estimar el escurrimiento superficial en cuencas no aforadas con características ambientales similares a la cuenca río Chapingo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la Cuenca y Uso de Suelo

Este trabajo se realizó en la cuenca río Chapingo, catalogada como pequeña puesto que tiene un área de 15.46 km² y está integrada por ocho subcuencas (Figura 1). Forma parte de la cuenca del Valle de México y se ubica en el extremo oriente del municipio de Texcoco, Estado de México, entre las coordenadas geográficas extremas 19° 29' 22.83" N, 98° 53' 09.17" O y 19° 25' 15.28" N, 98° 45' 40.31" O, con una altitud de 2250 a 3580 m y una pendiente media de 33.16%.

En la cuenca predominan los siguientes usos de suelo: zona urbana en la parte baja, agricultura de temporal con bosque reforestado en la zona media; en la parte alta bosque reforestado y bosque de coníferas (bosque de pino y bosque de abies) (Figura 1).

Características Físicas de los Suelos

Se realizó un muestreo de suelos en toda la cuenca a una profundidad de 0 a 30 cm en 18 sitios, diferenciados por el tipo y uso de suelo y vegetación (Figura 1). A las muestras se les determinó la textura por el método de Bouyoucos modificado por Day (1965), la materia orgánica por el método de Walkley and Black para

suelos con porcentajes menores a 8% y el método de calcinación para porcentajes mayores a este valor. Los suelos Feozem háplico (suelos con agricultura de temporal) de la cuenca tienen textura areno-francosa y franco arenosa con 1 a 3.5% de materia orgánica (MO), los suelos litosoles (suelos con reforestación) tienen textura franca y franco arenosa con 0.9 a 4% de MO y los suelos cambisoles (suelos forestales) son de textura franca y franco arenosa con 3.2 a 9.5% de MO.

Construcción del Modelo Hidrológico

El diseño del modelo hidrológico y la modelación del escurrimiento se hizo en el software hidrológico HEC-HMS, desarrollado por el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos para simular el proceso de lluvia-escurrimiento dentro de cuencas hidrográficas (Scharffenberg, 2013). El modelo hidrológico quedó compuesto por ocho subcuencas y tres tramos de canal (Figura 2).

Selección de Hidrogramas de Esgurrimiento Directo y Datos de Precipitación

En la cuenca se establecieron cuatro estaciones hidrométricas, dos ubicadas en la parte media, una a la mitad del cauce principal y otra a la salida de la misma.



Figura 1. Subcuencas, tipos de suelos y puntos de muestreo en la cuenca río Chapingo.

Figure 1. Sub-basins, soil types and sampling points in the Chapingo River Basin.

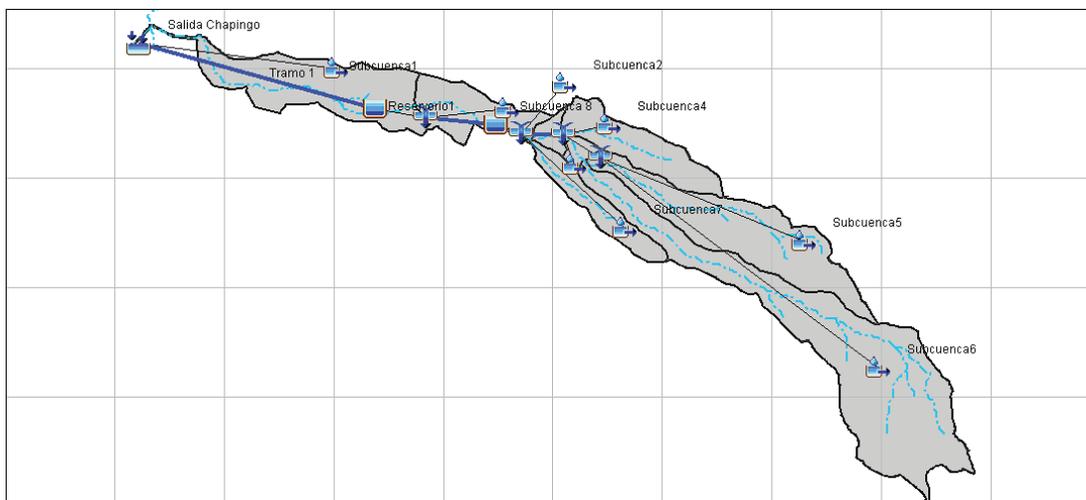


Figura 2. Estructura de los modelos hidrológicos.
Figure 2. Structure of hydrological models.

Los hidrogramas usados correspondieron a los años 2014, 2016 y 2017, los cuales produjeron volúmenes escurridos de 2.660×10^3 a $28.650 \times 10^3 \text{ m}^3$ y caudales pico de 0.57 a $4.46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a la salida de la cuenca. La información climática se recabó de tres estaciones meteorológicas automatizadas ubicadas en la parte baja, media y alta de la cuenca (Cuadro 1).

Variables de Entrada y Salida en los Modelos Hidrológicos

Los modelos SCS-CN y Green-Ampt fueron los implementados en el modelo hidrológico para estimar

el escurrimiento superficial en la cuenca. En ambos modelos la variable de entrada fue la precipitación. Las variables de salida para el modelo SCS-CN fue la evapotranspiración y el escurrimiento directo, y para el modelo de GA fue la infiltración y evapotranspiración; en los dos modelos la evapotranspiración fue calculada por el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y no se incluyeron la retención de agua por el follaje y el agua en depresiones. El cálculo de la infiltración se hizo con el modelo de GA y el escurrimiento directo por el modelo SCS-CN, los cuales se especifican a continuación.

Cuadro 1. Valores observados de los eventos de lluvia-escurrimientos modelados en HEC-HMS.
Table 1. Observed values of rainfall-runoff events modeled in HEC-HMS.

Evento	Tipo de evento	Fecha	hp [†]	d [‡]	i [§]	Qp	Q
			mm	h	mm hr ⁻¹	m ³ s ⁻¹	m ³
1	Aislado	8/7/2014	16.00	1.60	15.20	0.64	2660
2	Aislado	8/11/2014	20.60	1.80	14.50	2.86	13250
3	Aislado	5/28/2016	25.00	4.10	17.80	1.44	6350
4	Aislado	6/11/2017	15.90	4.60	4.70	0.96	4960
5	Aislado	7/4/2017	15.50	2.10	2.50	0.54	3600
6	Aislado	7/12/2017	15.50	1.30	15.40	1.93	8310
7	Prolongado	8/10/2017	22.30	20.80	3.20	0.57	10 690
8	Aislado	8/30/2017	36.90	2.80	30.00	4.46	28 650

[†] Altura de la precipitación registrada. [‡] Duración de la lluvia. [§] Intensidad de la lluvia.
[†] Height of recorded rainfall. [‡] Duration of rain. [§] Intensity of rain.

Modelo de Infiltración de Green-Ampt

El modelo de Green y Ampt (1911), es una representación conceptual física del proceso de infiltración del agua en el suelo con algunas hipótesis simplificadoras del fenómeno, que resulta de combinar la ley de continuidad y la ley de Darcy y se expresa en la Ecuación (1) (Fuentes *et al.*, 1992; McCuen, 1998).

$$I(t) = K_s t + \gamma \ln\left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \text{ con } \gamma = (h + \psi_f)(\theta_s - \theta_i) \quad (1)$$

donde: $I(t)$ es la infiltración acumulada (cm) en el tiempo t (h); Ψ_f es la presión capilar en el frente de humedecimiento (cm); h es el tirante de agua sobre la superficie (cm); θ_s es el contenido de humedad a saturación del suelo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_i es el contenido de humedad inicial del suelo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); y K_s es la conductividad hidráulica a saturación (cm h^{-1}).

A los 18 suelos muestreados se les determinó el valor de K_s por el método del permeámetro a carga constante. El valor de Ψ_f se obtuvo con la metodología propuesta por Brooks y Corey (1964). La humedad volumétrica a saturación (θ_s) se obtuvo a una tensión del suelo de 0 bar; la humedad inicial (θ_i) se determinó previo a la ocurrencia de los eventos de lluvia-escorrentía. Los parámetros hidráulicos de GA obtenidos en los 18 sitios se ponderaron para obtener un solo valor por subcuenca.

Modelo de Escurrimiento de la Curva Numérica

El segundo modelo aplicado fue el propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y el Servicio de Conservación de Suelos (USDA-NRCS, 2004), cuya expresión matemática es:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \text{ si } P \geq I_a, \quad Q = 0 \text{ en caso contrario} \quad (2)$$

donde: Q es el escurrimiento en (mm); P es la precipitación (mm); S es el potencial máximo de retención (mm); I_a es la abstracción inicial (mm), definida como una proporción del valor de S :

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

donde: λ es el coeficiente de abstracción inicial (adimensional), para cuencas pequeñas su valor estándar es 0.2 (Chow *et al.*, 1994). El parámetro

S depende del tipo de suelo, uso de suelo, condición hidrológica y condición de humedad antecedente (AMC), y se determinó con la Ecuación (4):

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

donde: CN es el valor de la curva numérica y se asignó con las tablas del Manual Nacional de Ingeniería del USDA-NRCS (2009) en función del tipo, uso y condición hidrológica del suelo, de la cobertura vegetal y de las prácticas de manejo (Figura 1). Los valores de la CN se modificaron en función de la condición de humedad antecedente, representada por la precipitación acumulada de los cinco días previos al evento de lluvia.

Hidrograma Unitario Adimensional Sintético del SCS

Las láminas de escurrimiento estimadas con los modelos SCS-CN y GA fueron convertidas en hidrogramas de escurrimiento directo mediante el método del hidrograma unitario sintético "adimensional" del SCS, válido para pequeñas cuencas agrícolas (Scharffenberg, 2013).

Evaluación Estadística de los Modelos SCS-CN y Green-Ampt

La evaluación de la precisión de los hidrogramas del escurrimiento directo, estimados con los modelos SCS-CN y GA, se hicieron con las medidas estadísticas raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), el error relativo medio (MRE, por sus siglas en inglés) (Ramesh *et al.*, 2005; Ma *et al.*, 2011) y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF) (Nash y Sutcliffe, 1970). La evaluación de la precisión de la estimación de los caudales pico de los eventos (Q_p) se hizo con el error relativo (RE) (Ma *et al.*, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros del Modelo de Green-Ampt

Los valores ponderados de Ψ_f calculados con el modelo de Brooks-Corey (1964) en las ocho subcuencas se ubicaron dentro de los valores reportados por Rawls *et al.* (1983) (179.24 a 233.24 mm) a excepción de la tres (1295.60 mm); dichos valores resultaron satisfactorios en las modelaciones con GA. Los valores de humedad

a saturación más altos pertenecieron a las subcuencas seis y siete (0.57 a $0.60 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) que están cubiertas con vegetación forestal; en las demás unidades de escurrimiento cuyas ocupaciones son agricultura, pastizales y reforestación, se estimaron valores más bajos de humedad a saturación (0.48 a $0.51 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), son suelos de bajo contenido de materia orgánica y baja porosidad con respecto a los suelos forestales. Los valores de K_s encontrados en las subcuencas tuvieron valores cercanos entre ellos (2.30 a 5.98 mm h^{-1}) a excepción de la dos y ocho (9.40 y 10.10 mm h^{-1}) cuyos suelos son de textura arenosa y están ocupados por agricultura de temporal.

Los valores de humedad inicial promedio del suelo (θ) encontrada en la cuenca previo a los eventos de lluvia dos, seis, siete y ocho, estuvieron en el rango de 0.36 a $0.40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, debido a que les antecedieron precipitaciones intensas y continuas en los cinco días previos. En los eventos uno, tres, cuatro y cinco la humedad del suelo fue menor (0.17 a $0.27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), debido a la pérdida de humedad por evapotranspiración y las escasas precipitaciones de los cinco a ocho días previos, lluvias que fueron de bajas intensidades e intermitentes. Los valores de evapotranspiración calculados por Penman-Monteith fueron muy bajos de tal manera que tuvieron poco o nulo efecto en los resultados de las modelaciones con ambos modelos.

Valores de Curva Numérica

Los valores de CN para el modelo SCS-CN correspondieron a las condiciones de humedad seca (CN(I)) e intermedia (CN(II)), debido a que la precipitación acumulada de los cinco días previos a los eventos de lluvia resultó en un rango de 10.1 a 38.1 mm . En las subcuencas uno y cinco con agricultura de temporal y zona urbana, respectivamente, se observaron los valores más altos de CN (74.67 y 76.02); en las subcuencas dos, cuatro y ocho con uso de suelo de agricultura de temporal se obtuvieron valores intermedios de CN (44.64 a 64.28) y en las subcuencas tres, seis y siete, con uso de suelo forestal, se obtuvieron los valores más bajos de CN (15.78 a 37.58). Los valores de abstracción inicial para estas tres últimas subcuencas fueron de los más altos. En las otras subcuencas (subcuenca uno, dos, cuatro, cinco y ocho) se observaron los valores más bajos de abstracción inicial, debido a que los usos de suelo son de agricultura de temporal y pastizal inducido.

Análisis del Conjunto de Eventos

El análisis de la información del conjunto de eventos estudiados, mostró que el modelo SCS-CN fue ligeramente mejor (promedio de 14150 m^3 , RMSE de 5430 m^3) que el modelo de GA para estimar el volumen escurrido Q , pero el modelo de GA resultó mejor para estimar el gasto pico Q_p (Cuadro 2). Este tipo de análisis es útil cuando el interés es conocer el volumen escurrido en un período de tiempo para dimensionar obras de almacenamiento, pero para el análisis del tránsito de avenidas en cauces con fines de prevención de inundaciones y diseño de obras de excedencias se requiere analizar el comportamiento de los hidrogramas de escurrimiento directo estimados en cada evento de lluvia escurrimiento (Mello *et al.*, 2016; Ruan *et al.*, 2016; Stenta *et al.*, 2016). En consecuencia, se hizo un análisis estadístico por hidrograma de escurrimiento.

Análisis por Hidrograma de Escurrimiento Directo

El modelo de GA estimó con buena eficiencia los hidrogramas de escurrimiento directo en los eventos aislados de mayor escurrimiento (dos, seis y ocho) (Cuadro 3). Su estimación fue excelente (0.92 a 0.95) según el criterio de Nash y Sutcliffe (1970) y con los valores de la RMSE, del MRE y el RE más bajos, en rangos de: 0.14 a $0.43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 0.20 a 0.28 y 2.0 a 23% , respectivamente. En el evento prolongado ambos modelos reprodujeron con el mismo error el hidrograma de escurrimiento y el gasto pico (RMSE de $0.07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, MRE de 0.35 y RE de cero), también con la misma eficiencia (0.71), calificada como muy buena según Nash y Sutcliffe (1970). En los eventos uno, tres, cuatro y cinco, de bajo escurrimiento, ambos modelos no reprodujeron los hidrogramas con efectividad y tuvieron los valores más altos de la RMSE y MRE, así como valores negativos en los índices de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

La modelación de los eventos de bajo escurrimiento resultó muy sensible a la superficie impermeable. Resultó difícil su caracterización, ya que los tipos de superficie impermeable encontrados en la cuenca no se indican en las investigaciones que reportan los valores de CN y los parámetros hidrodinámicos del modelo de GA. Por tal razón, este factor afectó la modelación de los hidrogramas con una sobrestimación del volumen escurrido en las subcuencas uno, dos, tres y ocho.

Cuadro 2. Volúmenes escurridos (Q) y gastos pico (Qp) estimados y medidos por evento.
Table 2. Drained volumes (Q) and peak expenditures (Qp) estimated and measured by event.

Evento	Medido		SCS-CN		GA	
	Q	Qp	Q	Qp	Q	Qp
	m ³	m ³ s ⁻¹	m ³	m ³ s ⁻¹	m ³	m ³ s ⁻¹
1	2660	0.64	9040	1.80	9040	1.80
2	13 250	2.86	12 920	1.62	15 850	2.20
3	6350	1.44	13 300	2.30	13 320	2.30
4	4960	0.96	14 270	1.96	14 270	1.96
5	3600	0.54	8800	1.35	8800	1.35
6	8310	1.93	9790	1.82	9950	1.86
7	10 690	0.57	16 280	0.57	16710	0.57
8	28 650	4.46	28 770	3.89	27 980	4.57
Promedio	9810	1.68	14150	1.91	14490	2.07
RMSE			5430	0.84	5580	0.72

RMSE = raíz cuadrada del error cuadrático medio.

RMSE = square root of the mean square error.

Durante la ocurrencia de los eventos de lluvia-escorrentía, en las subcuencas seis y siete con suelos forestales, las modelaciones con GA y SCS-CN produjeron poco o nulo escurrimiento, coincidiendo con lo observado en campo. La modelación del escurrimiento superficial con GA en estas subcuencas mostró una infiltración vertical en forma de pistón (Tucci, 1993), este fenómeno fue verificado en campo mediante pruebas de infiltración (Figura 3).

El evento 7 (Figura 4) fue un caso especial ya que la precipitación tuvo una duración de 20.8 h, valores

bajos de intensidad de lluvia (3.2 mm h⁻¹) y caudal pico (0.57 m³ s⁻¹) respecto a los otros eventos analizados. En este evento, ambos modelos produjeron un gasto pico igual que el observado en el segundo ascenso del hidrograma y la misma sobrestimación del volumen escurrido. La baja intensidad de precipitación de este evento y la alta capacidad de saturación del suelo permitieron infiltrar 17.88 mm y generar 4.42 mm de escurrimiento superficial, conocido también como precipitación efectiva (Pe), de los 23 mm precipitados.

El modelo SCS-CN tiene como desventaja

Cuadro 3. Resultados de las pruebas estadísticas del error de los hidrogramas modelados.
Table 3. Results of the statistical tests of the error of the modeled hydrograms.

Evento	RMSE		MRE		EF		RE	
	SCS-CN	GA	SCS-CN	GA	SCS-CN	GA	SCS-CN	GA
1	0.59	0.59	0.70	0.70	-7.34	-7.34	-1.81	-1.81
2	0.44	0.25	0.31	0.25	0.77	0.92	0.43	0.23
3	0.67	0.67	0.45	0.45	-1.38	-1.39	-0.60	-0.60
4	0.59	0.59	0.58	0.58	-2.71	-2.71	-1.04	-1.04
5	0.35	0.35	0.46	0.46	-7.11	-7.11	-1.50	-1.50
6	0.14	0.14	0.37	0.28	0.93	0.95	0.06	0.04
7	0.07	0.07	0.35	0.35	0.71	0.71	0.00	0.00
8	0.47	0.43	0.26	0.20	0.91	0.93	0.13	-0.02

RMSE = raíz cuadrada del error cuadrático medio; MRE = error relativo medio; EF = índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe. RE = error relativo.

RMSE = square root of the mean square error; MRE = mean relative error; EF = Nash-Sutcliffe efficiency index. RE = relative error.

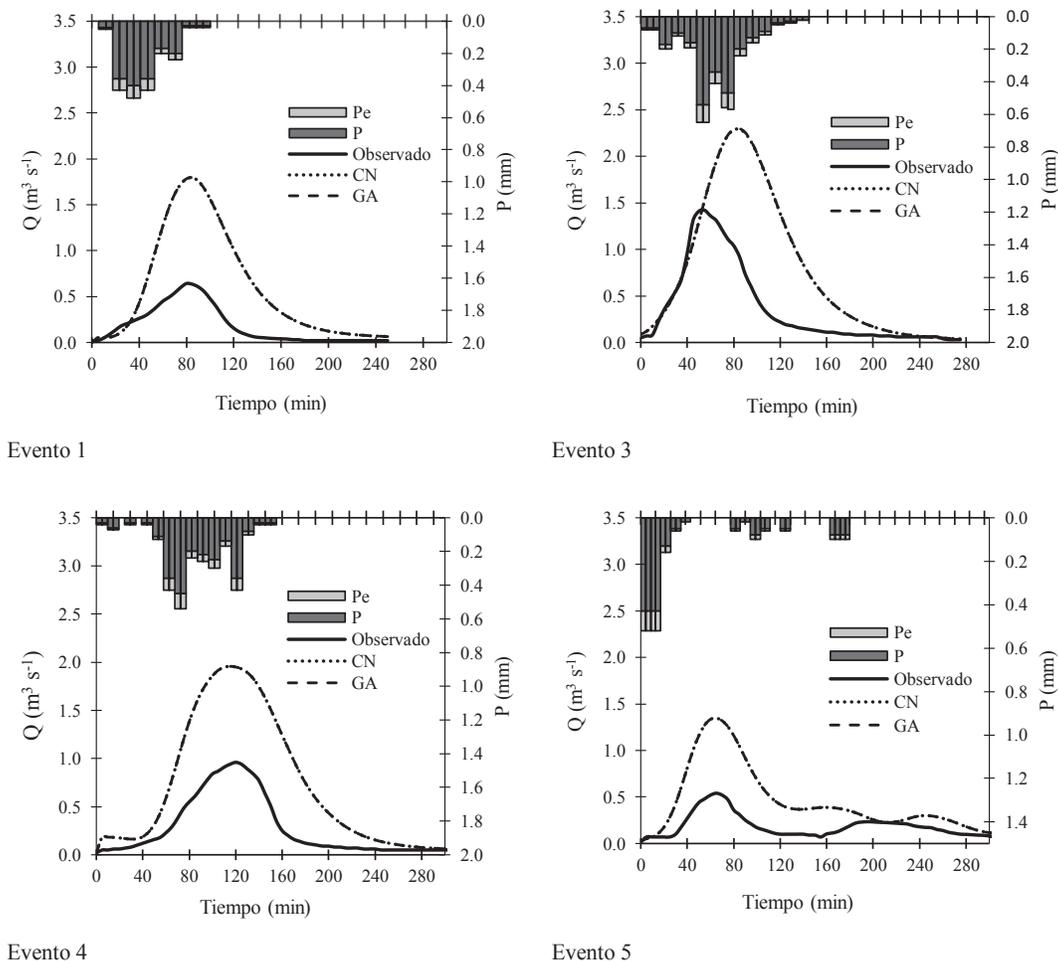


Figura 3. Representación de los hidrogramas medidos y estimados con los modelos SCS-CN y GA en eventos de volúmenes escurridos menores que $6.35 \times 10^3 \text{ m}^3$.

Figure 3. Representation of the hydrograms, measured and estimated with the SCS-CN and GA models in drained volume events smaller than $6.35 \times 10^3 \text{ m}^3$.

que la precipitación acumulada de los cinco días antecedentes a un evento de lluvia-escurrimiento no precisa el estado inicial de humedad del suelo. Por otro lado, las abstracciones iniciales no contemplan la tasa potencial de infiltración del suelo ni la intensidad de la precipitación (Ajmal *et al.*, 2016), aspectos que si son considerados por el modelo GA. Los parámetros del suelo del modelo GA tiene un significado físico, en cambio el valor del número de curva es difícil de interpretar porque depende varios factores. La elección del valor de CN se hizo con un análisis meticuloso de los factores que lo definen, dado que un incremento unitario del valor de CN genera un incremento considerable en el escurrimiento (Grimaldi *et al.*, 2013). Este modelo es más sensible al parámetro CN

que a la intensidad de precipitación (Hawkins, 1995); además, los valores de CN de las tablas del manual del USDA-NRCS (2009), por su procedencia y según investigaciones representan mejor los escurrimientos en cuencas agrícolas, con menos éxito en los pastizales semiáridos y suelos forestales (Kowalik y Walega, 2015; Walega y Rutkowska, 2015; Taylor y Shrimali, 2016).

El modelo de GA resultó muy sensible al contenido de humedad inicial (θ_i) por lo que, eventos con altos valores, generaron altos volúmenes de escurrimiento. La diferencia observada en las estimaciones de los modelos SCS-CN y GA fue semejante a los obtenidos por Kabiri *et al.* (2013).

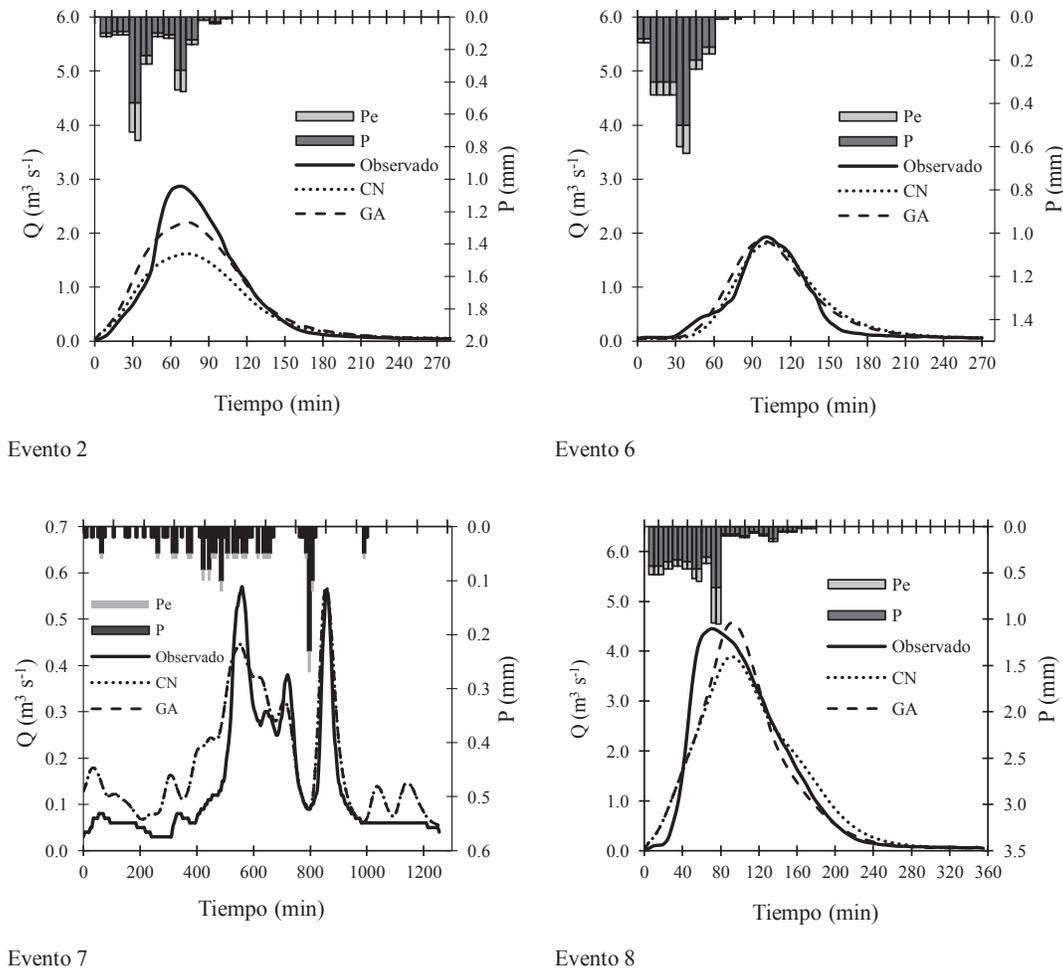


Figura 4. Representación de los hidrogramas medidos y estimados con los modelos SCS-CN y GA en eventos de volúmenes escurridos mayores que $8.31 \times 10^3 \text{ m}^3$.
Figure 4. Representation of hydrograms measured and estimated with the SCS-CN and GA models in drained volume events larger than $8.31 \times 10^3 \text{ m}^3$.

El modelo de GA presentó mejores resultados en la predicción de volúmenes y gastos pico que el modelo de SCS-CN (Van Mullem, 1989¹, 1991; Grimaldi *et al.*, 2013), particularmente en eventos de alto escurrimiento. En consecuencia, el modelo de GA no calibrado representa una herramienta potencial para estimar la escorrentía superficial; sin embargo, la dificultad se encuentra en estimar la presión del frente de succión Ψ_f del suelo (Li *et al.*, 2015) así como K_s y θ_s que son propiedades únicas de cada suelo, además demandan costos, tiempo y personal especializado. Por el contrario, el modelo SCS-CN es conceptualmente

más simple y, ante la escasez de información de los suelos, es considerado como un procedimiento adecuado a utilizar en las estimaciones de escorrentía (King *et al.*, 1999). Por tanto, el modelo de SCS-CN podría usarse cuando no se disponga de información confiable para alimentar el modelo de GA.

En estudios posteriores, es necesario abordar la calibración de los modelos para tener certeza sobre sus bondades. Esta tarea implicará una base de datos experimentales amplia, pero sus resultados ayudarán a definir políticas del manejo hídrico en las cuencas de México.

¹ Van Mullem, J. A. 1989. Applications of the Green-Ampt infiltration model to watersheds in Montana and Wyoming. M.S. Thesis. Montana State University at Bozeman. Bozeman, MT, USA.

CONCLUSIONES

El modelo de SCS-CN resultó más preciso que el modelo de GA en la estimación del volumen escurrido sumado de todos los eventos estudiados con una RMSE de 5430 m³, mientras que el modelo de GA fue mejor en la estimación del gasto pico con una RMSE de 0.72 m³ s⁻¹. El modelo de GA fue el mejor estimador de los hidrogramas de escurrimiento directo con el menor error (RMSE de 0.14 a 0.43 m³ s⁻¹, MRE de 0.20 a 0.28 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.92) en eventos de lluvia aislados con gastos pico altos (≥ 1.93 m³ s⁻¹). En eventos de lluvia aislados con gastos pico ≤ 1.44 m³ s⁻¹, los modelos SCS-CN y GA subestimaron los hidrogramas medidos con el error estadístico más alto (RMSE de 0.35 - 0.67 m³ s⁻¹, MRE 0.45 - 0.70) y con eficiencias insuficientes según Nash-Sutcliffe (-1.38 a -7.34). En el evento de escurrimiento de lluvia prolongada y baja intensidad, ambos modelos estimaron los hidrogramas con un error bajo (RMSE de 0.07 m³ s⁻¹ y un MRE de 0.35) y una eficiencia muy buena (0.71).

LITERATURA CITADA

- Ajmal, M., T. Ali Khan, and T. Woong Kim. 2016. A CN-Based ensemble hydrological model for enhanced watershed runoff. *Predic. Water* 8: 1-17. doi: <https://doi.org/10.3390/w8010020>.
- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
- Alonso-Sánchez, H., L. A. Ibañez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez y M. A. Vázquez-Peña. 2014. Identificación de curva de escurrimiento en tres microcuencas del río Coatán, Chiapas, México. *Tecnol. Cienc. Agua* 4: 153-164.
- Brooks, R. H. and T. A. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper No. 3. Colorado State University. Fort Collins, CO, USA.
- Chow, V. T., D. R. Maidment y L. W. Mays. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill. México, D. F.
- Cruikshank, G. 2007. Proyecto Lago de Texcoco: Rescate hidroecológico. CONAGUA-SEMARNAT. México, D. F.
- Day, P. R. 1965. Hydrometer method of particle size analysis. pp: 562-563. In: C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Ficklin, D. and M. Zhang. 2013. A comparison of the curve number and Green-Ampt models in an agricultural watershed. *Transac. ASABE* 56: 61-69. doi: [10.13031/2013.42590](https://doi.org/10.13031/2013.42590).
- Fuentes, C., R. Haverkamp, and J. Y. Parlange. 1992. Parameter constraints on closed-form soil-water relationships. *J. Hydrol.* 134: 117-142. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90032-Q](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90032-Q).
- Green, W. H. and G. A. Ampt. 1911. Studies on soil physics. Part 1: The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci* 4: 1-24. doi: <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>.
- Grimaldi, S., A. Petroselli, and N. Romano. 2013. Green-Ampt Curve-Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modelling in small and ungauged basins. *Hydrol. Process.* 27: 1253-1264. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.9303>.
- Hawkins, R. H. 1995. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *J. Irrig. Drain. Eng.* 119: 334-345. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:2\(334\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:2(334)).
- Kabiri, R., A. Chan, and R. Bai. 2013. Comparison of SCS and Green-Ampt Methods in Surface Runoff-Flooding Simulation for Klang Watershed in Malaysia. *Open J. Modern Hydrol.* 3: 102-114. doi: <http://dx.doi.org/10.4236/ojmh.2013.33014>.
- King, K. W., J. G. Arnold, and R. L. Bingner. 1999. Comparison of Green-Ampt and Curve Number Methods on Goodwin creek watershed using SWAT. *Trans. ASAE* 42: 919-925.
- Kowalik, T. and A. Walega. 2015. Estimation of CN parameter for small agricultural watersheds using asymptotic functions. *Water* 7: 939-955. doi: [10.3390/w7030939](https://doi.org/10.3390/w7030939).
- Li, J., Z. Wang, and C. Liu. 2015. A combined rainfall infiltration model based on Green-Ampt and SCS-Curve number. *Hydrol. Process.* 29: 2628-2634. doi: [10.1002/hyp.10379](https://doi.org/10.1002/hyp.10379).
- Ma, Y., S. Feng, D. Su, G. Gao, Z. Huo. 2010. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D. *Comput. Electron. Agr.* 71S: S40-S47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.07.006>.
- Ma, Y., S. Feng, H. B. Zhan, X. Liu, D. Su, S. Kang, and X. Song. 2011. Water infiltration in layered soils with air entrapment: modified Green-Ampt model and experimental validation. *J. Hydrol. Eng.* 16: 628-638. doi: [10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000360](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000360).
- McCuen, R. H. 1998. Hydrologic analysis and design. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Mello, R. C., L. Darrell Norton, L. Campos Pinto, S. Beskow, and N. Curi. 2016. Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. *Ciênc. Agrotecnol.* 40: 7-25. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542016000100001>.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Ramesh, S. V., V. Teegavarapu, and V. Chandramouli. 2005. Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *J. Hydrol.* 312: 191-206. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.015>.
- Rawls, W. J., D. L. Brakensiek, and N. Miller. 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *J. Hydraul. Eng.* 109: 62-70. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62)).
- Ruan, H., S. Zou, Z. Cong, Y. Wang, Z. Yin, Z. Lu, F. Li, and B. Xu. 2016. Runoff simulation by SWAT model using high-resolution gridded precipitation in the upper Heihe River Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* pp. 1-23. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-2016-594>.
- 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.

- Saucedo, H., M. Zavala y C. Fuentes. 2016. Estimación de parámetros de infiltración a partir de mediciones de avance de riego por melgas empleando las ecuaciones de Saint-Venant, y Green y Ampt. *Tecnol. Cienc. Agua* 17: 117-124.
- Scharffenberg, W. A. 2013. Hydrologic modeling system HEC-HMS. User's Manual. Versión 4.1, CPD-74A. U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Washington, DC, USA.
- Stenta, H. R., G. A. Riccardi y P. A. Basile. 2016. Modelación distribuida del escurrimiento superficial en la cuenca del río Tercero-Caracaña. *Aqua-LAC* 8: 44- 57.
- Taylor, D. and N. J. Shrimali. 2016. Surface runoff estimation by SCS curve number method using GIS for Rupen-Khan watershed, Mehsana district, Gujarat. *J. Indian Water Resour. Soc.* 36: 1-5.
- Tucci, C. E. M. 1993. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Editora da Universidade, UFRGS. Porto Alegre, Brasil. ISBN: 85-7025-298-6.
- USDA-NRCS (U.S. Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service). 1986. Chapter 2. Estimating runoff. pp. 2.1-2.16. *In: Urban hydrology for small watersheds*, TR-55. USDA-NRCS. Washington DC, USA.
- USDA-NRCS (United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service). 2004. Chapter 10. Estimation of direct runoff from storm rainfall. 10.1-10.22. *In: National Engineering Handbook Hydrology Chapters*. USDA-NRCS. Washington DC, USA.
- USDA-NRCS (United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service). 2009. Chapter 7. Hydrologic soil groups. pp: 7.1-7.5. *In: National Engineering Handbook Hydrology Chapters*. USDA-NRCS. Washington DC, USA.
- Van Mullem, J. A. 1991. Runoff and peak discharges using Green-Ampt infiltration model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 117: 354-370.
- Walega, A. and A. Rutkowska. 2015. Usefulness of the modified NRCS-CN method for the assessment of direct runoff in a mountain catchment. *Acta Geophys.* 63: 1423-1446. doi: <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0043>.