

MODELO EXPO-LINEAL DE LA PRECIPITACIÓN-ESCURRIMIENTO EN LOTES EXPERIMENTALES DE LARGO PLAZO EN CULTIVOS DE MAÍZ

• Fernando Paz-Pellat* • Ma. Isabel Marín-Sosa •
• Mario Martínez-Menez •
Colegio de Postgraduados, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Modelar la relación precipitación-escurrimiento (P - Q) en parcelas o cuencas hidrográficas cobra especial importancia cuando se tienen fines de planeación y manejo de los recursos hídricos. En la actualidad existen diferentes modelos de tipo hidrológico que permiten aproximar esta relación; sin embargo, se dificulta su aplicación, dado que requieren datos de una gran cantidad de parámetros. Un esquema más simple y atractivo para este tipo de modelación es el método del número de curva (CN), que depende de un solo parámetro; sin embargo, se requiere conocer la dinámica de la cobertura de la vegetación, y la respuesta del suelo y su cobertura (residuos agrícolas, entre otros) para poder aplicarlo, ya que estos factores influyen en la respuesta hidráulica del sistema. Un esquema similar (en simplicidad) al del CN es el modelo introducido por Paz (2009), este último considera que el patrón que aproxima la relación P - Q está compuesto por dos fases: una exponencial y una lineal. En el presente trabajo se revisó el modelo expo-lineal a partir de datos de precipitación y escurrimiento tomados durante un periodo de seis años (1996-2001) sobre lotes de escurrimiento con cultivo de maíz (diferentes sistemas de manejo del suelo). El modelo del CN se empleó, en este caso, como esquema de ordenación de los patrones hidrológicos presentados con los diferentes tratamientos. A partir de los patrones observados, se decidió utilizar sólo la fase lineal del modelo expo-lineal para aproximar la relación P - Q . Los resultados mostraron que los valores de Q estimados presentan alta correlación con los valores de Q medidos ($R^2 = 0.99$ en todos los sistemas de manejo), por lo que se concluye que el modelo puede utilizarse de manera confiable como un esquema simplificado de modelación de la relación P - Q . Los resultados empíricos obtenidos definen un camino de modelación simple, a partir de aproximar la estimación de los parámetros del modelo expo-lineal.

Palabras clave: número de curva, pares ordenados (P , Q), parcelas de escurrimiento, fase lineal, modelo expo-lineal.

Introducción

Modelar de forma operacional la relación precipitación-escurrimiento en cuencas o lotes experimentales resulta difícil debido a la incidencia de múltiples factores en la respuesta hidrológica del sistema. Algunos modelos hidrológicos como el EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) desarrollado en el USDA (Sharpley

y Williams, 1990), y el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Neitsch *et al.*, 2002) permiten aproximar esta relación; no obstante, requieren datos de numerosos parámetros del suelo, la vegetación y el clima. En otro extremo se encuentran los modelos simplificados, como el de la curva numérica o CN (SCS, 1972), el cual resulta atractivo debido a que requiere de un solo parámetro para su implementación.

Una técnica empleada en campo para medir la respuesta hidrológica del sistema suelo-vegetación es el uso de lotes experimentales de escurrimiento. Los lotes son porciones delimitadas del terreno, en las cuales se mantienen fijas las condiciones del suelo y cobertura de la vegetación, a fin de obtener una respuesta homogénea del sistema ante eventos de precipitación natural. Los lotes son por lo común de dimensiones reducidas, pero representativas de la escala de observación usada. En este tipo de experimentos, la interacción de factores, y la respuesta hidráulica del suelo y de la vegetación inciden en los patrones de la relación precipitación-escurrimiento del sistema como un todo.

En el caso particular de lotes experimentales con cultivos, la respuesta hidrológica cambia en función de la dinámica de la cobertura de la vegetación, y de la respuesta del suelo y su cobertura (residuos agrícolas y su descomposición en el ciclo de crecimiento del cultivo). Esto hace complejo utilizar un modelo simplificado, como el de la CN, para modelar la relación precipitación-escurrimiento en estos sistemas. No obstante, este tipo de dinámicas de cambio son las que típicamente se intenta modelar en cuencas hidrográficas, por lo que es importante entender sus patrones de comportamiento y modelarlos en forma simple y operacional.

En este trabajo se presenta un esquema simplificado de modelación de la relación precipitación-escurrimiento, a partir del modelo expo-lineal introducido por Paz (2009), usando la inversión del método del CN para ordenar las respuestas del suelo-vegetación en lotes de escurrimiento experimentales.

Materiales y métodos

Para revisar el modelo expo-lineal (Paz, 2009) se utilizaron datos generados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en dos sitios experimentales: 1) el Centro Nacional de Producción Sostenible (Cenapros) y 2) el

Centro de Investigación Regional Golfo Centro (Cirgoc). En ambos sitios se establecieron lotes de largo plazo con cultivo de maíz para realizar estudios de escurrimiento, pérdida del suelo y pérdida de nutrimentos, entre otros. Para fines del presente trabajo, se utilizaron los datos de precipitación (P) y escurrimiento (Q) que se obtuvieron en el periodo 1996-2001. A continuación se describen las características de cada sitio, así como las condiciones de manejo del suelo en los lotes establecidos.

El sitio 1 (Cenapros-INIFAP) se localiza a 18 km de Pátzcuaro, en la carretera Pátzcuaro-Uruapan, en el estado de Michoacán, México (Tapia *et al.*, 2000). Geográficamente, se ubica en las coordenadas $19^{\circ} 29' 06''$ de latitud norte y $101^{\circ} 44' 22''$ de longitud oeste. La precipitación media anual en la zona es de 1 100 mm. Los suelos son derivados de cenizas volcánicas y pertenecen al grupo de los andosoles, los cuales presentan baja densidad aparente, no tienen estructura, son fácilmente erosionables y ligeramente ácidos (Gómez, 1994). Las propiedades del suelo, que fueron reportadas de manera previa por Canaca (2008), se indican en el cuadro 1. En este sitio se establecieron siete lotes de escurrimiento de 25 m de longitud por 4 m de anchura y 9% de pendiente (Tapia *et al.*, 2000), con los siguientes sistemas de manejo del suelo:

- Suelo desnudo (SD). Se estableció un lote con este sistema; se removió la capa superficial del suelo con azadón para mantenerlo sin vegetación, también se niveló con el paso de rastrillo. Las actividades se realizaron en época de lluvia para evitar la compactación y encostramiento de la superficie del suelo.
- Labranza cero (L0): se establecieron cuatro lotes con este sistema; no se removió la capa superficial del suelo y la siembra se hizo de forma directa. También se dejaron residuos o rastrojos de la cosecha anterior, utilizando diferentes porcentajes de cobertura (0, 33, 66 y 100%). Estos lotes se etiquetaron como L0 0%, L0 33%, L0 66% y L0 100%.

- Labranza mínima (LM): se estableció un lote con este sistema, aquí el suelo se preparó con paso de rastra. No se levantaron surcos ni se dejaron residuos de cosecha.
- Labranza convencional (LC): se estableció un lote con este sistema, aquí se realizaron labores de barbecho, rastreado, surcado y escarda, siguiendo el método convencional del productor.

El sitio 2 (Circoc-INIFAP) se ubica en el municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz, en las coordenadas 18° 20' 45" de latitud norte y 95° 18' 40" de longitud oeste (Canaca, 2008). La precipitación media anual en la zona es de 1 683 mm y el suelo predominante se clasifica como *typic tropofluvents* (Uribe et al., 2000). Las propiedades del suelo se muestran en el cuadro 2. En este sitio se establecieron lotes de escurrimiento sobre terrazas de muro vivo, en el sentido de la pendiente dominante. Las dimensiones de estos lotes fueron 2 m de anchura por 25 m de longitud (Uribe et al., 2002). Los sistemas que se estudiaron fueron los siguientes:

- Labranza convencional (LC). Consistió en la quema de residuos de cosecha de maíz al final del año agrícola y roturación del

suelo, en sentido de la pendiente, con arado de tracción mecánica.

- Labranza de conservación (L0 100%). No se removió el suelo y se dejó la totalidad del rastrojo producido en el ciclo anterior (4.10 t ha⁻¹ año⁻¹).

Propiedades del suelo

Según se muestra en los cuadros 1 y 2, los suelos de los sitios estudiados tienen propiedades hidráulicas diferentes, por lo que se analizaron por separado. Estos suelos se agruparon según las condiciones hidrológicas A, B, C o D, que se consideran en el método del CN (NRCS, 2004), donde los suelos pertenecientes al grupo A presentan un bajo potencial de escurrimiento y suelos del grupo D presentan un alto potencial de escurrimiento. Los suelos del sitio 1 pertenecen al tipo B, mientras que las características del suelo para el sitio 2 corresponden a suelos del tipo D.

Cobertura aérea de los cultivos

Los datos de cobertura del sitio 1 se generaron en 1985, durante el ciclo de desarrollo del cultivo (Santos, 1995). En el sitio 2 se obtuvo la cobertura del follaje con un cobertómetro

Cuadro 1. Propiedades del suelo en los lotes de escurrimiento (diferentes sistemas de manejo) del sitio 1, Canaca (2008).

Característica	Sistema de manejo					
	SD	L0 100%	L0 33%	L0 66%	LM	LC
Da (g cm ⁻³)	0.61	0.58	0.62	0.64	0.72	0.67
Arena (%)	50.0	53.00	44.00	47.00	49.00	43.00
Limo (%)	25.0	27.00	32.00	29.00	29.00	27.00
Arcilla (%)	25.0	20.00	24.00	24.00	22.00	30.00
MO (%)	1.28	1.88	2.16	2.63	2.55	2.27
K (cm h ⁻¹)	13.30	8.50	5.20	8.50	9.10	6.90
CC (%)	81.00	70.70	73.10	69.30	59.40	61.10
PMP (%)	57.60	49.20	48.50	46.70	43.60	40.90
PS (%)	106.7	103.70	99.30	103.80	85.80	81.90

SD = suelo desnudo; L0 100% = labranza cero con 100% de residuos de la cosecha anterior; L0 33% = labranza cero con 30% de residuos de la cosecha anterior; L0 66% = labranza cero con 66% de residuos de la cosecha anterior; LM = labranza mínima; LC = labranza convencional; Da = densidad aparente; MO = materia orgánica; K = conductividad hidráulica; CC = contenido de humedad en el suelo (%) a capacidad de campo; PMP = contenido de humedad en el suelo (%) en el punto de marchitez permanente; PS = punto de saturación.

Cuadro 2. Propiedades del suelo en los lotes (diferentes sistemas de manejo) del sitio 2, Francisco (2005).

Característica	Sistema de manejo	
	LC	L0 100%
Da (g cm ⁻³)	1.8	1.7
Arena (%)	0.9	1.9
Limo (%)	30.0	21.5
Arcilla (%)	29.0	41.0
MO (%)	41.0	37.5
CC (%)	34.1	37.3
PMP (%)	23.1	23.4
PS (%)	68.1	74.6

Nota: el contenido de humedad del suelo se midió en forma volumétrica a capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y punto de saturación (PS).

de mirillas; las mediciones se realizaron cada semana (a partir del 21 de junio de 2002) hasta acumular 40 lecturas (Francisco, 2005). Los datos de ambos sitios se emplearon para ajustar el siguiente modelo logístico:

$$COB = \frac{a}{1 + b \exp(-cDDC)} \quad (1)$$

donde *COB* es la cobertura del follaje del cultivo (%); *DDC*, los días de desarrollo del cultivo (en semanas para el sitio 2); y *a*, *b* y *c* son constantes empíricas. En la figura 1 se muestran los resultados de los modelos de la cobertura en ambos sitios. De esta evidencia experimental se puede suponer que las respuestas del crecimiento del cultivo de maíz son diferentes en ambos sitios.

Un punto importante de considerar, al usar cualquier modelo hidrológico, es que no es posible analizar la respuesta temporal de la relación *P-Q* con un solo parámetro que no sea variado en función del cambio de las condiciones del cultivo y suelo.

Modelo hidrológico del CN

Aunque Paz (2009) ha cuestionado fuertemente la validez del método del CN, es conveniente analizarlo para su uso en el ordenamiento de la información hidrológica de los sitios experimentales.

El método del CN establece una relación empírica entre el escurrimiento directo *Q* (mm) y la precipitación *P* (mm), a escala diaria, como:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia + S)}, \quad P \geq Ia$$

$$Q = 0, \text{ de otra forma} \quad (2)$$

donde *Ia* (mm) es la abstracción inicial antes del escurrimiento (almacenamientos superficiales, intercepción por la vegetación, evapotranspiración, infiltración antes de la saturación del suelo y otros factores) y *S* (mm) es un parámetro de retención, el cual varía espacialmente por cambios en el tipo y uso del suelo, manejo y pendiente, así como por cambios temporales en la humedad del suelo.

El parámetro *Ia* es expresado de manera general en función de *S*:

$$Ia = kS \quad (3)$$

donde *k* es supuesto, por lo general, como igual a 0.2 en la mayoría de las aplicaciones (SCS, 1972). El parámetro *S* se estima como:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

donde *CN* o curva numérica (0 a 100, adimensional) es función de la humedad ante-

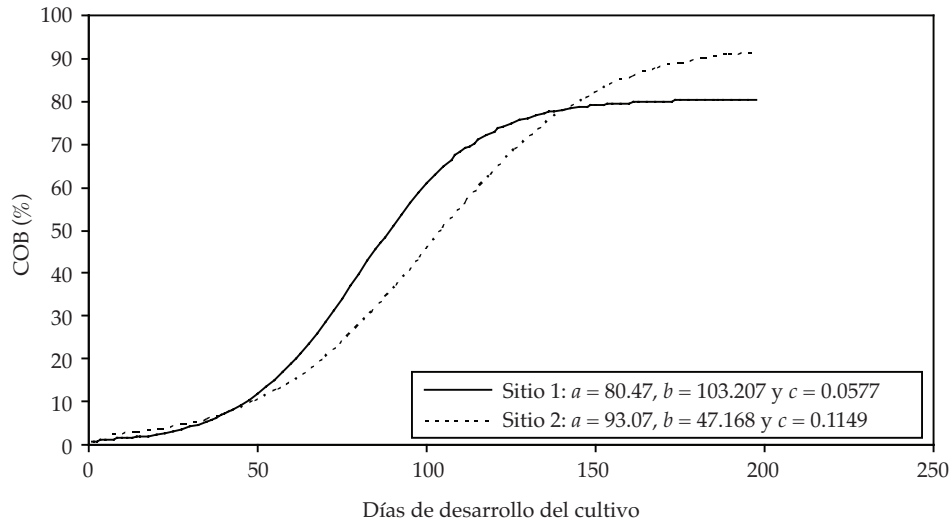


Figura 1. Patrones temporales del crecimiento del cultivo de maíz en los sitios 1 y 2.

cedente del suelo, la pendiente del terreno, el uso del suelo y sus prácticas de manejo, principalmente.

Para el caso de mediciones de pares (P, Q) en lotes experimentales, el valor de S es obtenido invirtiendo las ecuaciones (2) a (4), para obtener:

$$S = \frac{P}{k} + \frac{Q(1-k)}{2k^2} - \frac{[Q^2(1-k)^2 + 4kPQ]^{1/2}}{2k^2} \quad (5)$$

La obtención de la ecuación (2), caso de $I_a = 0$, es sólo producto de la siguiente relación (Paz, 2009):

$$\frac{Q}{P} = \frac{P-Q}{S} = 1 \quad (6)$$

En el aspecto de las aplicaciones empíricas del método de la CN, es interesante señalar que su autor principal, Mockus, en una entrevista con Ponce (1996), señaló que la relación implicada en el método de la CN, $(P-Q)/S = Q/P$, fue utilizada después de probar muchas relaciones empíricas y los resultados obtenidos en el ajuste a los datos experimentales fueron satisfactorios. Para que la relación (6) sea válida se tiene que cumplir:

$$S = \left(\frac{P}{Q}\right)(P-Q) = \frac{P^2}{Q} - P \quad (7)$$

Así, la hipótesis implícita de la CN es que S es función no lineal de P y Q , por lo que el desarrollo de la relación (2) usa argumentos diferentes a los de la relación (3), generando una contradicción.

Modelo hidrológico expo-lineal

Paz (2009) introdujo el modelo expo-lineal como una forma equivalente, en su simplicidad, al método del CN, el cual está definido por:

$$Q(t) = \frac{C}{r} \ln \{1 + \exp[r(P - P_b)]\} \quad (8)$$

donde r es una tasa relativa de cambio, C es la tasa máxima de cambio y P_b ($= S$ en la figura 2) es el tiempo cuando $Q = 0$ (proyectado) en la fase lineal de la relación $P-Q$.

El modelo expo-lineal tiene las siguientes características:

$$Q(P = P_T) = \frac{C}{r} = Q_T$$

$$P_T = P_b + \frac{0.541}{r} \quad (9)$$

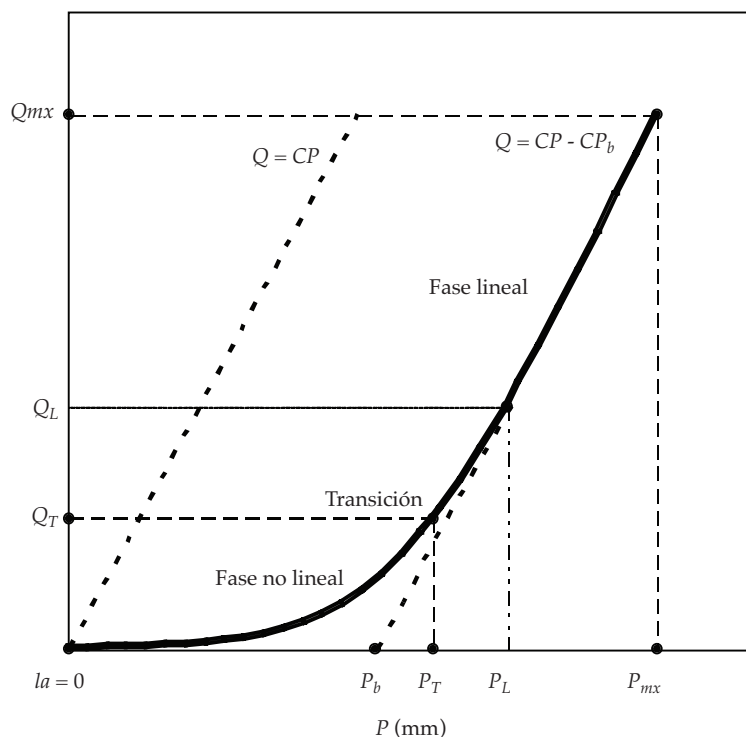


Figura 2. Esquemática del modelo expo-lineal y sus parámetros.

En la figura 2 se muestran en forma esquemática el modelo expo-lineal y sus parámetros, donde la línea punteada tiene un patrón lineal, caso extremo del modelo expo-lineal con $P_b = 0$.

La fase lineal del modelo expo-lineal está dada por:

$$Q = -CP_b + CP \quad (10)$$

Análisis de resultados y discusión

Para visualizar los patrones de comportamiento entre P y Q (todo el ciclo de crecimiento del cultivo), se seleccionaron dos casos extremos de los tratamientos establecidos en el sitio 1 (SD y L0 100%) (figura 3). Para estos dos casos, se observa que hay zonas de traslape entre los pares (P, Q) , además de que no hay una relación única (una sola CN) en la respuesta hidrológica. Las respuestas hidrológicas, dejando fija la pendiente del terreno, son

función de la saturación del suelo, de la intensidad de la precipitación y de la cobertura del follaje, principalmente. En nuestro caso, sin conocimiento adicional, es prácticamente imposible determinar cuál factor o combinación de ellos incide en cada punto de la figura 3. En realidad, dejando fuera el caso de la intensidad de la precipitación, hay un número infinito de combinaciones de la respuesta hidrológica del suelo y la vegetación que producen un mismo valor de (P, Q) , tal como ha sido planteado por Paz et al. (2009).

Al tratar de invertir la formulación de la CN usando la relación (5), con $k = 0.05$ (Schneider y McCuen, 2005), obtenemos CN múltiples y no bien caracterizados en sus patrones en relación con P (figura 4). Así, sin considerar los cambios en la cobertura del follaje (no medidos en todos los experimentos), resulta muy difícil definir un patrón CN- P en forma asintótica, tal como lo propone Hawkins (1993). Aun cuando se pudiera definir una curva única y bien definida

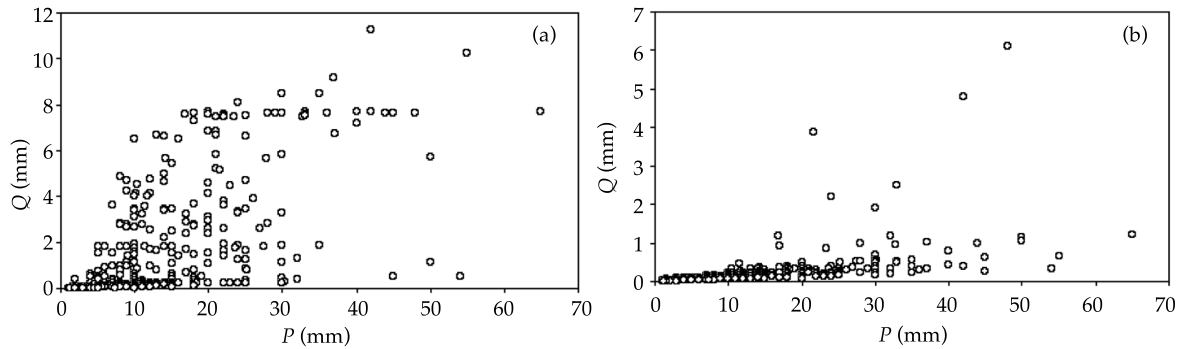


Figura 3. Patrones entre P y Q para el sitio 1: (a) SD y (b) L0 100 %.

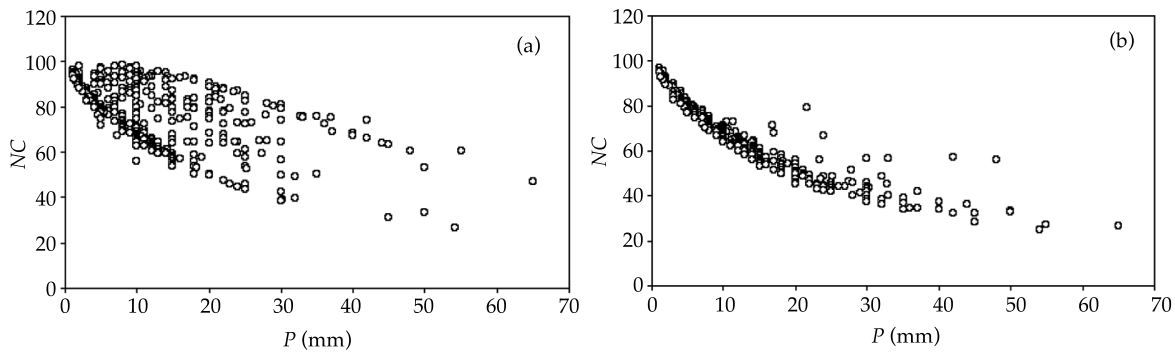


Figura 4. Patrones entre P y CN del sitio 1 para los sistemas: (a) SD y (b) L0 100%.

de CN - P , el método del CN no es estable, ya que produce múltiples CN para un patrón (P, Q) pertenecen (parámetros del modelo expo-lineal). A falta de información relacionada con los parámetros del modelo expo-lineal, se puede usar el procedimiento de inversión del CN como una aproximación a esta tarea. Para poder establecer un criterio de ordenación de los valores (P, Q) , se pueden analizar las tipologías asociadas con los patrones de la precipitación-escorrentía.

Para ordenar los datos de la figura 4, por ejemplo, es necesario definir a qué patrón (P, Q) pertenecen (parámetros del modelo expo-lineal). A falta de información relacionada con los parámetros del modelo expo-lineal, se puede usar el procedimiento de inversión del CN como una aproximación a esta tarea. Para poder establecer un criterio de ordenación de los valores (P, Q) , se pueden analizar las tipologías asociadas con los patrones de la precipitación-escorrentía.

Hawkins (1993) aplicó el método de la CN a cuencas de los Estados Unidos y definió re-

laciones entre el CN y la precipitación: para cada par (P, Q) se estimó el valor de S de la ecuación (5) con $k = 0.2$ y el valor obtenido de S fue sustituido en la relación (4) para estimar CN . Los patrones P - CN fueron ajustados por regresión de diferentes modelos matemáticos. Hawkins (1993) definió tres patrones generales de comportamiento: complaciente, estándar y violento. En la figura 5 se muestra el ajuste del modelo expo-lineal a estos tres tipos de comportamiento, al invertir el procedimiento usado para estimar los pares (P, Q) . Esta figura muestra que el modelo expo-lineal puede ser ajustado a los casos generales observados de la relación P - Q , pero sin tener el problema de valores múltiples de los parámetros.

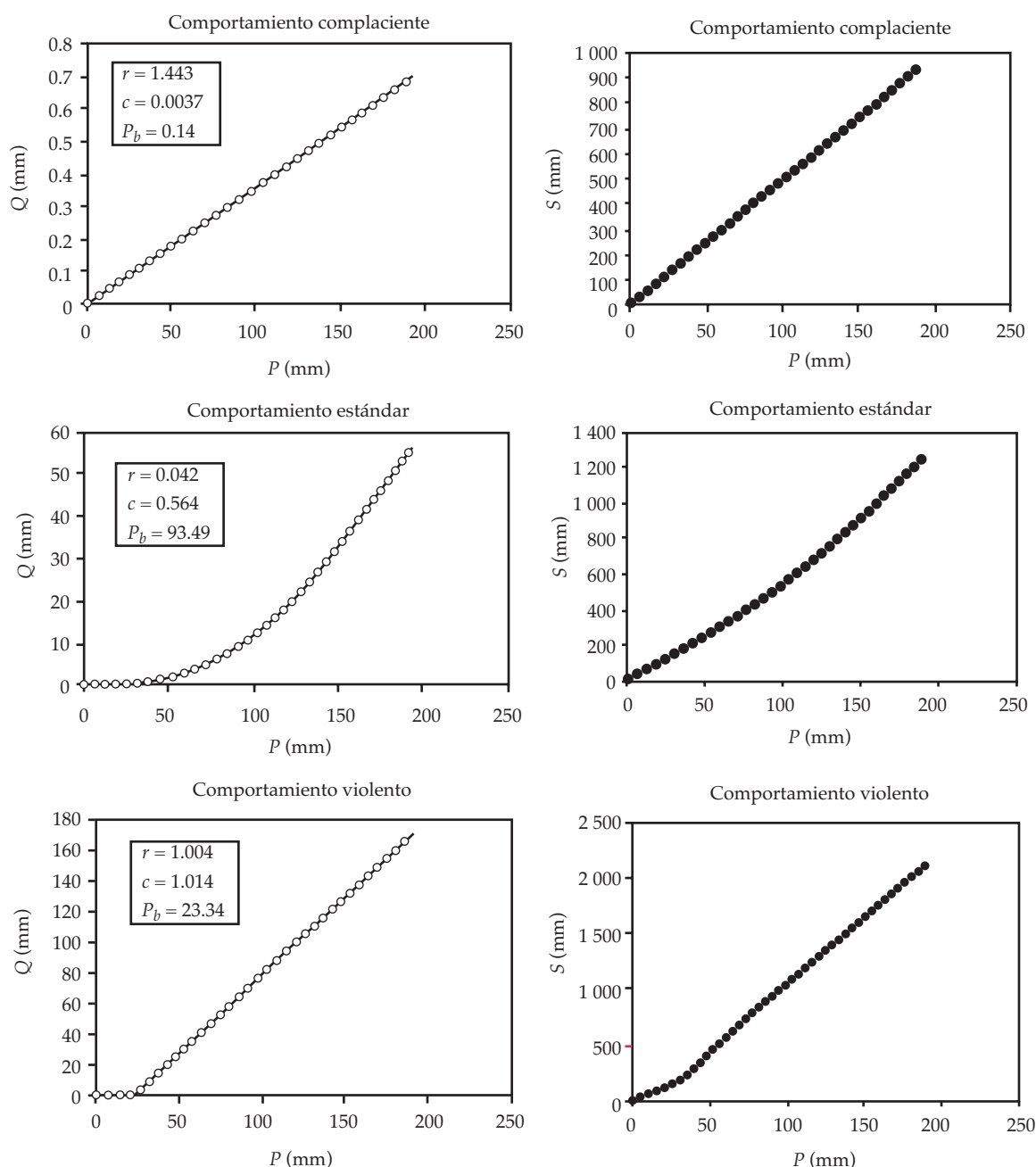


Figura 5. Patrones P - Q y P - S asociados con los comportamientos complaciente, estándar y violento, definidos por Hawkins (1993).

Puesto que la fase lineal del modelo expo-lineal está representada por la ecuación (10), entonces el valor máximo que puede tomar C es 1.0. En el comportamiento violento, mostrado en la figura 5, el valor de C es ligeramente superior a 1.0, como producto

del ajuste no lineal de r , C y P_b en forma simultánea, minimizando el error cuadrático de estimación. Es importante señalar que la inversión del método del CN produciendo valores múltiples del CN es consecuencia del no ajuste de las hipótesis intrínsecas de éste a

la realidad (pendiente unitaria de la relación P - Q).

En la figura 5 se grafican los patrones entre P y S , donde S se estimó de la ecuación (5), aplicada a los pares de datos (P , Q) de la misma figura. En lo general, el espacio P - S reproduce los mismos patrones que el espacio P - Q , por lo que podemos usar esta propiedad para determinar los valores P_b y C , al aplicar la relación (10) a los valores de (P , Q) ordenados por valores similares de la pendiente P/S (mismos parámetros del modelo expo-lineal) (figura 5). Así, en un procedimiento global, se puede analizar la fase lineal entre P y Q , de los pares que cumplan la relación P/S similar. Estos pares con P/S similar pueden ser obtenidos para valores de P grandes (fase lineal), para evitar el problema asociado con el desconocimiento del parámetro r . Esta aproximación parte de suponer que el efecto de la fase exponencial es pequeño y despreciable, siendo un caso particular del modelo expo-lineal.

La figura 6 muestra el esquema general para la selección de pares (P , Q) asociados con los pares ordenados (P , S). Cada recta, ecuación (10), tiene valores de P_b y C diferentes. Determinados los valores P_b y C de cada pendiente P/S similar, se puede establecer una relación (lineal, dada una r similar) entre estos

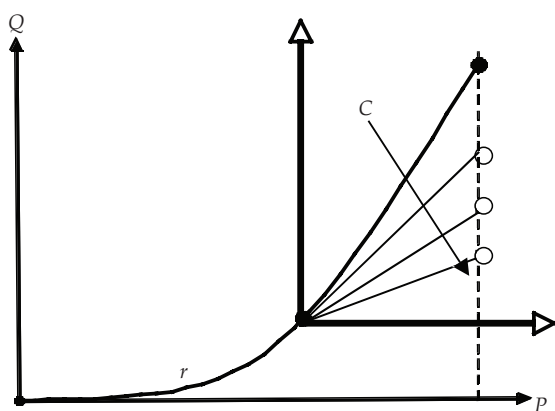


Figura 6. Esquema de selección de pares (P , Q), asociados con la fase lineal del modelo expo-lineal, suponiendo una r similar para todos los patrones lineales.

valores para simplificar los cálculos a sólo la estimación de uno de ellos. La relación P_b - C es función primaria del grado de cobertura de la vegetación, y del residuo, sobre el suelo. El parámetro restante, r , supuesto como dependiente del tipo de suelo, puede estimarse por regresión estadística, minimizando el error de estimación.

Regresando a los datos experimentales, en la figura 7 se muestran los patrones entre P y S , donde los valores de S fueron usados para estimar la CN de la figura 4. De los patrones observados, podemos usar una aproximación para discriminar la relación P - Q usando la fase lineal del modelo expo-lineal, suponiendo $P_b = 0$ en la relación (10), que implica una línea recta entre S y P , para un valor dado de C . Para fines prácticos, se usaron rangos de S/P de 0.5 para el sitio 1 y de 0.1 a 0.25 para el sitio 2, después de una revisión de los patrones asociados con estos rangos. El usar $P_b = 0$ se hizo bajo la consideración de que el efecto de este parámetro es pequeño para valores bajos de P , tal como se muestra en los datos experimentales.

El modelo de la CN , con valores múltiples de CN , se utilizó en nuestro caso como un esquema de ordenación de patrones hidrológicos, ya que este método sólo depende de un parámetro, a diferencia del modelo expo-lineal que utiliza tres parámetros y no se puede invertir en forma directa sin asumir alguna relación simplificada entre estos parámetros. El método del CN no puede, por diseño, aproximar la relación (10), por lo que no es útil en un esquema de modelación como el desarrollado.

En la figura 8 se muestra la relación entre la pendiente S/P y el parámetro C , para todos los eventos de precipitación del sitio 1 y 2. La agrupación de los rangos de S/P utilizados generó relaciones lineales entre P y Q , con valores de $R^2 > 0.98$ en todos los casos.

Sin pérdida de generalidad, y dado que no se conocen la cobertura del cultivo ni los patrones temporales de descomposición de los residuos, a los patrones mostrados en la figura 8 se les ajustó una relación empírica (mejor ajuste estadístico en la regresión) definida por:

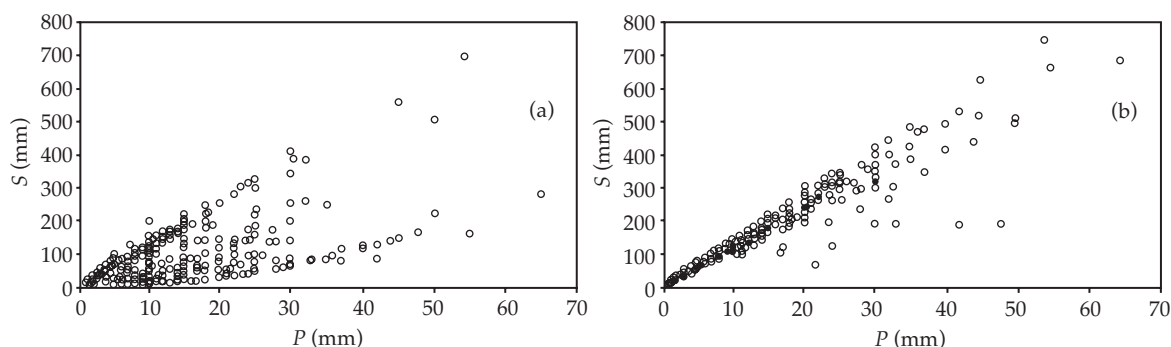


Figura 7. Patrones entre S y P del sitio 1 para los sistemas: (a) SD y (b) L0 100%.

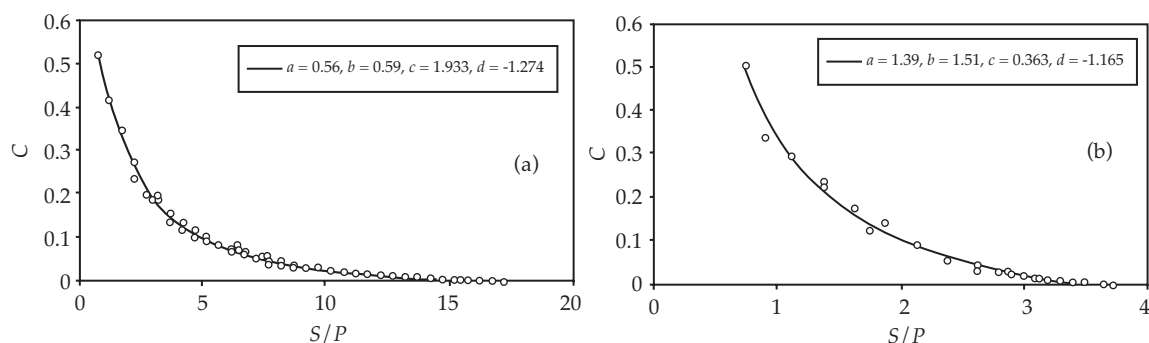


Figura 8. Patrones entre S/P y C: (a) sitio 1 y (b) sitio 2.

$$C = a - b \exp \left[-c \left(\frac{S}{P} \right)^d \right] \quad (11)$$

Si $C < 0$, entonces $C = 0$

donde a , b , c y d son constantes empíricas. La relación (11) muestra que el parámetro C es función de S/P , el cual varía en el tiempo en función del desarrollo del cultivo y condición del suelo, principalmente.

En la figura 8 se muestran los ajustes de regresión de la relación (11), donde en ambos sitios se obtuvo un $R^2 > 0.99$.

Con los valores estimados de C , para un valor dado de S/P , donde S se estimó de la inversión del método de la CN usando sólo el par (P, Q) , se estimó Q de la relación (10) usando $P_b = 0$. La figura 9 muestra los resultados

obtenidos con esta estrategia de modelación, donde resulta claro que las estimaciones resultan buenas y con muy poco sesgo.

Es importante señalar que el caso lineal del modelo expo-lineal, independiente de r y usando $P_b = 0$, fue utilizado como un esquema simplificado para los sitios analizados, dada la evidencia experimental observada (figura 7). En el caso general de patrones expo-lineales, la relación entre C y P_b puede ser analizada usando los valores más grandes de P y Q , fase lineal, y un valor de r que se ajuste a los datos.

Así, la estrategia del uso de la inversión del método del CN como esquema de agrupación de patrones entre P y Q resuelve el problema de indeterminación de estimar los tres parámetros del modelo expo-lineal.

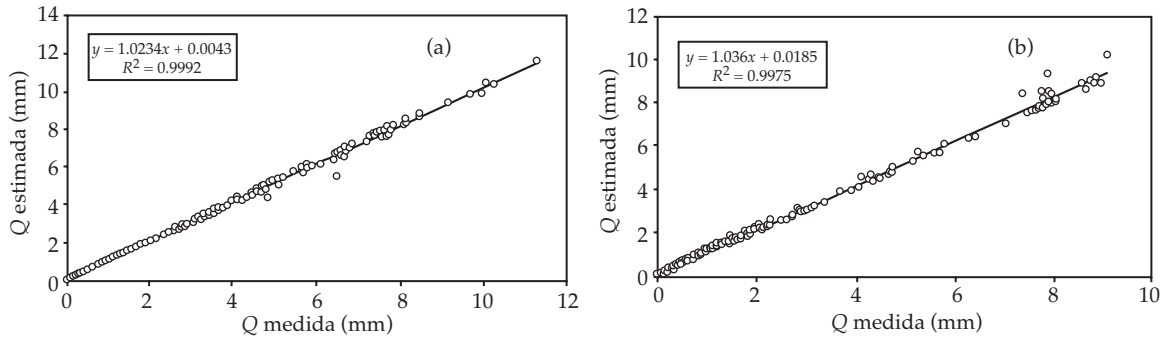


Figura 9. Estimaciones de Q : (a) sitio 1 (1 940 eventos diarios de precipitación) y (b) sitio 2 (777 eventos diarios de precipitación).

Conclusiones

Considerando las limitaciones asociadas con el método de CN, el desarrollo del modelo expo-lineal de Paz (2009) plantea un esquema más flexible del ajuste experimental de los datos (P , Q). El método de CN tiene sólo un parámetro libre, de allí su simplicidad; el expo-lineal tiene tres parámetros libres.

Usando el esquema de inversión del método del CN para estimar S y dado que el espacio S - P tiene patrones similares al espacio P - Q , se desarrolló una metodología que permite ordenar los pares (P , Q) para asociarlos con un punto P_b y C del modelo expo-lineal, reduciendo así el problema de estimación remanente a sólo dos parámetros, dado que se puede establecer una relación entre P_b y C , que es función de la cobertura del cultivo y de la descomposición del residuo sobre el suelo. En los experimentos analizados se utilizó $P_b = 0$, como esquema de simplificación. El parámetro r puede asociarse con el tipo hidrológico del suelo. Así, de información de cobertura de la vegetación, de la descomposición del residuo y del tipo del suelo, podemos parametrizar al modelo expo-lineal con sólo un parámetro, haciéndolo equivalente en simplicidad al método del CN.

La metodología desarrollada para parametrizar al modelo expo-lineal fue revisada usando datos de dos sitios con lotes de

escorrentía con un cultivo de maíz y diferentes grados de cobertura del residuo. Los resultados obtenidos, en una primera aproximación, muestran que la propuesta operacional resulta en ajustes estadísticos buenos a la relación precipitación-escorrentía.

El siguiente paso es el desarrollo de un esquema tabular de ordenamiento de los parámetros del modelo expo-lineal, en forma similar que el caso del método de la CN. Esto será realizado en trabajos posteriores del grupo de investigación.

Recibido: 30/03/2010

Aceptado: 11/02/2013

Referencias

- CANACA, R.L. *Relación precipitación-escorrentía para diferentes sistemas de manejo del suelo*. Tesis de maestría. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados, 2008, 122 pp.
- FRANCISCO, N. *Productividad y erosión hídrica en tres sistemas de manejo del cultivo doble de maíz en una ladera del trópico subhúmedo de México*. Tesis de doctorado. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados, 2005, 122 pp.
- GÓMEZ, A. *Tres niveles de erosión en la cuenca del lago de Pátzcuaro, Michoacán*. Folleto técnico 26. México, D.F.: INIFAP-SARH, 1994, pp. 1-22.
- HAWKINS, R.H. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering of the ASCE*. Vol. 119, 1993, pp. 334-445.

- NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., KINIRY, J.R., WILLIAMS, J.R., and KING, K.W. *Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2000*, TWRI Report TR-191. Texas: Texas Water Resources Institute, College Station. 2002. 498 pp.
- NRCS. Part 630 Hydrology. *National Engineering Handbook. Chapter 10 Estimation of direct runoff from storm rainfall*. Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture (210-VI-NEH, July, 2004).
- PAZ, F. Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS. *Agrociencia*. Vol. 43, 2009, pp. 521-528.
- PAZ, F., MARIN, M.A., LÓPEZ, E., ZARCO, A., BOLAÑOS, M.A., OROPEZA, J.L., MARTÍNEZ, M., PALACIOS, E. y RUBIÑOS, E. Elements for developing an operational hidrology using remote sensing: soil-vegetation mixture. *Hydraulic Engineering in Mexico*. Vol. XXIV, No. 2, April-June, 2009, pp. 69-80.
- PONCE, V.M. *Notes of my conversation with Vic Mockus* [en línea]. San Diego, California. July 15, 1996. [citado en octubre de 2007]. Disponible para World Wide Web: http://www.wsi.najo rcs.usda.gov/products/W2Q/H&G/tech_info/mockus.html.
- SANTOS, L.E. Cuantificación de la erosión hídrica bajo diferentes coberturas vegetales en un andosol en Patzcuaro, Michoacán. Tesis profesional. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo, 1995, 60 pp.
- SCS. Section 4: *Hydrology*. *National Engineering Handbook*. Washington, D.C.: Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture, 1972.
- SCHNEIDER, L.E. and McCUEN, R.H. Statistical guidelines for Curve Number generation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 131, No. 3, 2005, pp. 282-290.
- SHARPLEY, A.N. and WILLIAMS, J.R. (editors). EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. 1. Model documentation. *USDA Technical Bulletin*. No. 1768, 1990.
- TAPIA, M., TISCAREÑO, M., OROPEZA, J.L., STONE, J.J., and VELÁZQUEZ, M. Runoff and sediment Yields simulation under five soil management practices. *Agrociencia*. Vol. 34, 2000, pp. 663-675.
- URIBE, S., GUTIÉRREZ, C., TAVAREZ, C. y TURRENT, A. Caracterización y clasificación de suelos de ladera manejados con Terrazas de Muro Vivo en los Tuxtlas, Veracruz. *Agrociencia*. Vol. 34, 2000, pp. 403-412.
- URIBE, S., FRANCISCO, N. y TURRENT, A. Pérdida de suelo y nutrimentos en un entisol con prácticas de conservación en los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia*. Vol. 36, 2002, pp. 161-168.

Abstract

PAZ-PELLAT, F., MARÍN-SOSA, M.I. & MARTÍNEZ-MENEZ, M. Rainfall-runoff expo-linear model for long-term experimental plots with corn crops. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. IV, No. 5, November-December, 2013, pp. 85-97.

Modeling of the rainfall-runoff relationship (P-Q) plays an important role in the planning and management of water resources in plots and basins. Although many different hydrological models currently exist to estimate this relationship, they are difficult to apply because they require a large amount of data. A simpler and more attractive method for this type of modeling is called the curve number (CN), which depends on a single parameter. Nevertheless, its application requires knowing the dynamics of vegetation cover, the hydraulic response of soil and the soil cover (e.g. agricultural residues), since these factors influence the hydraulic response of the system. A method similar to the CN in terms of simplicity is the model introduced by Paz (2009), which considers two phases in the pattern that describes the P-Q relationship— an exponential and a linear phase. This paper reviews the expo-linear model using precipitation and runoff data for a period of 6 years (1996-2001) on runoff plots with corn crops (different land management systems). In this case, the CN model was used as a method to organize the hydrological patterns resulting from different treatments. Based on the patterns observed, only the linear phase of the expo-linear model was used to estimate the P-Q relationship. The results showed a high correlation between estimated and measured Q values ($R^2 = 0.99$ for all management systems). It was therefore concluded that the model can be reliably used as a simplified method to model the P-Q relationship. The empirical results define a simple modeling technique based on estimating the parameters of the expo-linear model.

Keywords: curve number, expo-linear model, linear phase, ordered pairs (P, Q), runoff plots.

Dirección institucional de los autores

Dr. Fernando Paz Pellat
Dra. Ma. Isabel Marín Sosa
Dr. Mario Martínez Menez

Colegio de Postgraduados
Carretera México-Texcoco, km 36.5
56230 Montecillo, Texcoco, México
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1151
pellat@colpos.mx
marin@colpos.mx
mmario@colpos.mx