

ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO EN UNA LADERA DE ALTA PENDIENTE REFORESTADA CON *Pinus tenuifolia*, USANDO EL MÉTODO DEL NÚMERO DE LA CURVA

Estimation of runoff for a high slope planted with Pinus tenuifolia using the curve number method

Edgar Hernández B.

Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Departamento de Conservación, Mérida-Venezuela. E-mail: ehernandezb@cantv.net

RESUMEN

Se evalúa la respuesta hidrológica a la ocurrencia de lluvias en una ladera de 60% de inclinación y 180 m de longitud, reforestada en 1965 con *Pinus tenuifolia*, por la Universidad de Los Andes. Se midieron las lluvias ocurridas entre abril y mayo del 2002, analizándose la hora de inicio, duración, variación de la intensidad y profundidad. Simultáneamente, se registraron en un limnógrafo las variaciones del nivel de escorrentía en un vertedero triangular calibrado e instalado en el canal trapezoidal al pie de la ladera. La relación mira –gasto permitió la elaboración de los hidrogramas a partir de los cuales se calcularon las láminas de escurrimiento directo y las relaciones precipitación– escurrimiento. Con los valores medidos se evaluó la bondad de predicción de la ecuación del “método del número de la curva modificada por Woodward”. El valor 55, para un CN en condición media de saturación, produjo la mejor predicción del escurrimiento para este tipo del complejo suelo-bosque. Se postula que en el sector medio de la ladera ocurre principalmente flujo superficial que funciona según el modelo planteado por Horton, y en el tercio superior de topografía redondeada, con suelos de permeabilidad moderada, el proceso principal es el flujo subsuperficial que alimenta la recesión alargada de los hidrogramas.

Palabras clave: escurrimiento en el bosque, el método del número de la curva.

ABSTRACT

The hydrological answer to rains in a 60% hillslope in an area reforested in 1965 with *Pinus tenuifolia* by the Universidad de Los Andes was evaluated. The April and May 2002 rains were measured analyzing starting time, duration, intensity and depth. Simultaneously, the runoff level was measured in a calibrated triangular weir installed in a trapezoidal channel located at foot of the hillslope. The stage-discharge relation was established for this site allowing the development of the hydrographs. From these hydrographs, direct runoff values were calculated and the rainfall runoff-rainfall relationships. With these values the degree of prediction of the “curve number method modified by Woodward” was evaluated. The 55 value for a CN in an average saturation condition (type II), produced the best prediction for this type of soil-forest complex. It is postulated that the middle sector of the hillslope has overland flow that works according to the Horton model. In the upper third area of the hillslope with a rounded topography and soils with moderate permeability presented subsurface flow which fed a long streamflow recession.

Key words: Runoff in the forest, method of the number of the number of the curve.

INTRODUCCIÓN

El método del “Numero de la Curva” fue desarrollado en 1950 para uso interno por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los EEUU con el propósito de estimar el escurrimiento directo producido por las lluvias. Luego, se hizo público, recibiendo amplia aceptación para estimar caudales máximos, formular modelos de simulación hidrológica, evaluar crecidas e impactos ambientales y realizar otras aplicaciones. (Woodward, *et al.*, 2001). Postula que el escurrimiento directo asociado con un evento de lluvia es función de tres variables: la profundi-

dad de la precipitación, las “abstracciones iniciales” y la “retención potencial máxima”.

La abstracción inicial es la cantidad de agua necesaria para saturar los almacenajes de la vegetación, retención y depresiones del suelo, antes que se inicie el escurrimiento. La retención potencial máxima es un índice del sitio, definido por la diferencia máxima entre la lluvia y el escurrimiento directo. Todas estas variables tienen dimensiones lineales y se expresan en mm en el sistema métrico decimal. Si la profundidad de la lluvia es menor que las “abstracciones iniciales” no ocurre escurrimiento. La formulación matemática del método es la siguiente:

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

Donde:

Q= Esguerrimiento directo

P= Profundidad del evento de precipitación

I_a =Abstracciones iniciales

S= Retención potencial máxima

El SCS propuso que la “abstracción inicial” (I_a) estaba relacionada con la “retención potencial máxima” por el coeficiente λ (lambda), según la expresión:

$$\lambda = \frac{I_a}{S}$$

y estableció para este coeficiente el valor de 0,2 indicativo que en general las abstracciones iniciales eran el 20% de la “retención potencial máxima” ($I_a = 0,2 \times S$). Insertando la expresión anterior en la ecuación inicial se obtiene que:

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

La “retención potencial máxima” ó índice (S) tiene valores en el rango 0 hasta infinito. Su determinación no es fácil, por lo que se recurre a un procedimiento alterno, estimándola en función del factor llamado “Numero de la Curva” (CN), mediante la expresión empírica siguiente:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

El “numero de la curva” (CN) es un valor empírico, adimensional, que puede variar entre 0 y 100. Es un índice de la condición del terreno que expresa la capacidad del terreno para producir esguerrimiento. Se define para sectores que posean condiciones similares de suelo, vegetación y uso de la tierra. El valor de CN se consigue en tablas elaboradas en base a investigaciones en cuencas experimentales en los EEUU (SCS, 1985).

Para la determinación del CN se valora el suelo desde el punto de vista hidrológico. Los suelos se clasifican en A, B, C y D según el potencial generador de esguerrimiento, que puede ser bajo, moderado, alto y muy alto, respectivamente. Para determinar el tipo de suelo se evalúa la tasa de infiltración y la capacidad de almacenamiento, tomando en cuenta la textura, la profundidad efectiva y la velocidad de percolación. Los factores antes mencionados controlan el valor de CN, y por ende también la capacidad de retención máxima de agua en el suelo.

El método del CN incorporó otra variable importante: el nivel de saturación de humedad en los suelos, que depende de la cantidad de lluvia previamente caída. De acuerdo a este criterio, los valores de CN se clasifican en tres tipos de saturación: seco, medio y saturado. Cuando la cantidad de lluvia acumulada en los cinco días previos al evento, ha sido entre 36 y 53 mm se considera como situación media (CN_{II}); cuando no ha llovido, o en todo caso, ha sido menos de 36 mm se valora como seca (CN_I) y, por último, la condición de suelos saturados (CN_{III}) cuando la lluvia acumulada ha sido mayor de 53 mm (Rojas, R 1979).

Los valores del CN_I y CN_{III} se calculan a partir del valor de CN_{II} , según Lewis *et al.*, (2000), a través de las ecuaciones siguientes:

$$CN_I = \frac{4,2 \times CN_{II}}{10 - 0,058 \times CN_{II}} \quad CN_{III} = \frac{23 \times CN_{II}}{10 + 0,13 \times CN_{II}}$$

El método del “número de la curva”, fue desarrollado inicialmente para terrenos agrícolas en los EEUU. A medida que se ha extendido su aplicación ha surgido la conveniencia de evaluar y cambiar algunos de sus coeficientes iniciales a situaciones específicas como lo propuso Tripathi citado por Pandey y Dabrai, 2000.

En este proceso de evaluación del método vale la pena destacar el trabajo reciente de Woodward y sus colaboradores (2001). Ellos indican que la justificación inicial para establecer el valor de lambda (λ), no está claro en la formulación inicial por lo que su valoración se debe revisar. En base al resultado de sus investigaciones, con datos de 307 cuencas y parcelas, proponen el valor de lambda

$\lambda = \frac{I_a}{S} = 0,05$ y la nueva ecuación para cálculo de esguerrimiento:

$$Q = \frac{(P - 0,05 \times S)^2}{(P + 0,95 \times S)} \quad \text{Para } P \geq 0,05 \times S$$

Las precipitaciones menores de $0,05 \times S$ no generan esguerrimiento. Es de observar que el cambio propuesto implica variaciones en los valores tradicionalmente utilizados en las tablas para S y CN.

Paralelo a la nueva formulación del método de la curva, también han ocurrido avances en la comprensión del proceso de esguerrimiento, especialmente en terrenos inclinados con bosque en el trópico. Elsenberg (2001), indica que el primer estudio cuantitativo en esta materia fue realizado por Bonell y Gilmour en 1978.

Según Elsenberg (2001), las rutas del movimiento del agua en una vertiente, después de un evento de lluvia, son controladas por las características del suelo y la precipitación. Los suelos del Orden Acrisol, por su alto contenido de arcilla tienden a generar escurrimiento superficial, mientras que los de tipo Ferrasol, por la alta conductividad hidráulica tienden a poseer más infiltración, percolación y muy poco o nulo escurrimiento superficial. Entre estos dos extremos existen situaciones intermedias.

Las rutas del escurrimiento varían en el tiempo y a lo largo de la ladera. Mientras que no llueva, el movimiento del agua dentro del suelo tiene principalmente dirección vertical y una pequeña componente lateral, esto debido a la diferencia de conductividad hidráulica en el perfil. Durante la lluvia, la situación cambia, siendo la dirección dominante de tipo lateral. La anisotropía del suelo juega un rol principal en la activación de las rutas y en la definición de la profundidad del flujo lateral.

En el tope de la ladera, domina el flujo subsuperficial asociado a la lluvia (subsuperficial stormflow) porque la concavidad de la pendiente, la micro topografía, las raíces del bosque y la alta conductividad hidráulica facilitan la infiltración y el flujo lateral interno a poca profundidad.

En la zona media de la ladera el agua infiltrada es obligada a salir a la superficie como “flujo de retorno” por disminución de la conductividad hidráulica, llegando a la zona inferior como “escurrimiento superficial” a través de pequeños hilos de agua, en

una zona de alta saturación de humedad en el suelo, tal como se indica en la figura 1. La aparición del flujo de retorno se asocia a cambios del grado de inclinación del terreno, profundidad en el suelo, porosidad y capas impermeables.

Otras investigaciones recientes como las de Dykes, 1998, realizada al norte de Borneo, sobre simulación hidrológica de vertientes tropicales, concluyen que la anisotropía de los suelos, la abundancia de macro poros, de pequeños canalículos llamados “pipes”, inducidos por las raíces del bosque y el alto contenido de rocas, son variables importantes que aumentan la percolación y el almacenaje profundo en este tipo de vertientes tropicales.

Se acepta que los bosques reducen el escurrimiento por el efecto de la parte aérea del bosque sobre la precipitación, y de las raíces, humus y mantillo sobre la infiltración, el almacenaje y la retención de agua en el suelo y subsuelo (Meunier, 1996). La expresión gráfica de estos efectos se muestra en la figura 2. La función subterránea es muy significativa, hasta cierto valor umbral, que depende del tipo y densidad del bosque y del nivel de saturación de los suelos.

Las copas de los árboles se interponen en el camino de las gotas de lluvia, parte de ella se queda interceptada en el follaje y luego sale por evaporación, o es retenida temporalmente por las hojas. Otra parte, cae por goteo desde el follaje al suelo forestal o se desliza por los troncos.

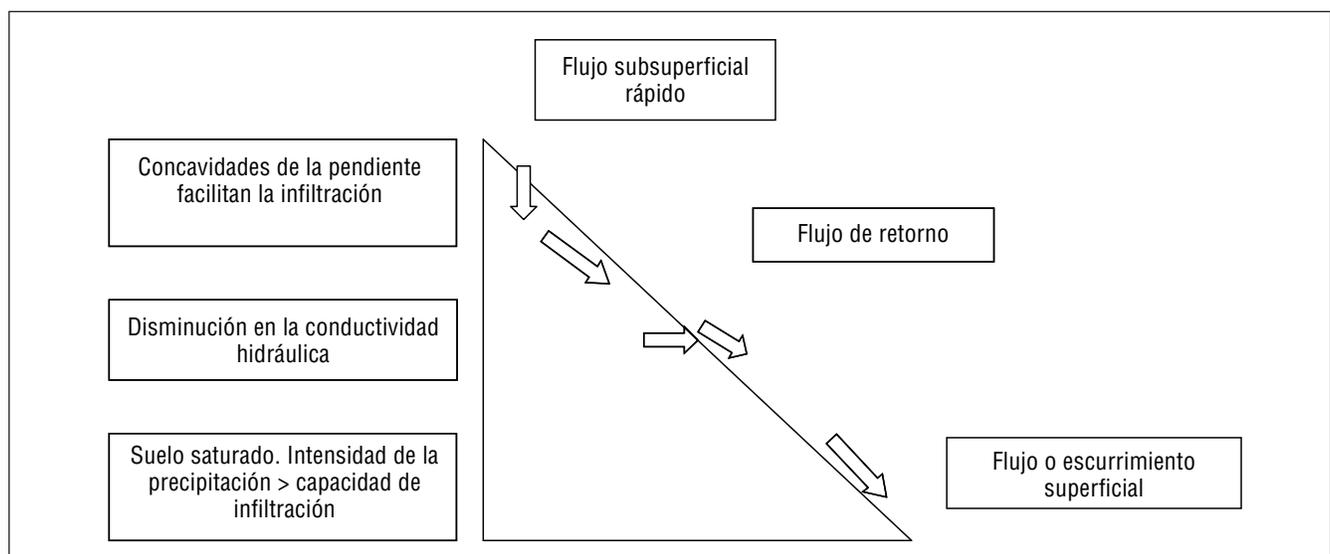


Figura 1. Un modelo conceptual del mecanismo de generación del escurrimiento en una vertiente. (Elsenberg H. 2001)

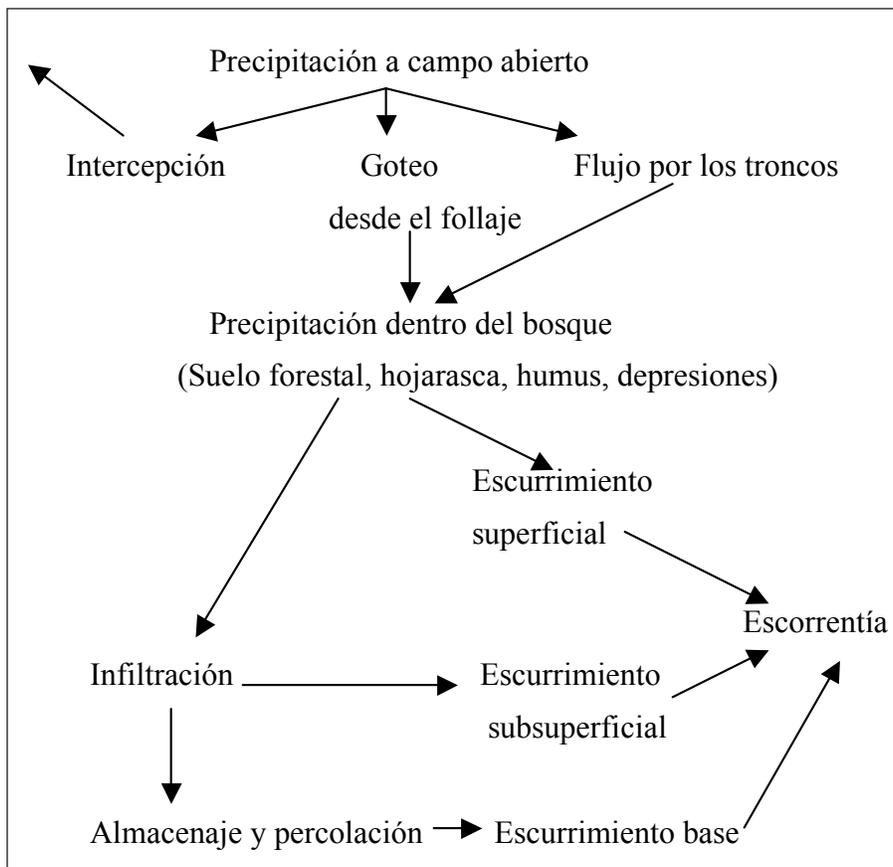


Figura 2. Influencia del bosque sobre las lluvias y el escurrimiento en una ladera (Meunier, M. 1996)

El suelo se humedece al principio de la lluvia, saturando la capacidad de detención superficial y luego llenando las micro depresiones del terreno. Las lluvias con intensidades inferiores a la tasa de infiltración del suelo son absorbidas totalmente sin producir escurrimiento. Las lluvias prolongadas, con intensidades altas, producen flujo superficial, después de satisfacer los almacenajes. La infiltración divide el agua de lluvia en rutas diferentes: la superficial y la subterránea. La primera se alimenta por la precipitación que tiene intensidades mayores a la capacidad de infiltración. La subterránea o el escurrimiento base recibe el agua que ingresa al suelo por infiltración y percolación (Horton citado por Elsenberg H, 2001). Entre ellos ocurre un flujo intermedio, llamado flujo subsuperficial. Todos los flujos se combinan y llegan a los cauces formando la escorrentía.

Posteriormente Hewleet y Hibbert (1967), a partir de las investigaciones en Coweeta, postularon el concepto de “área variable de generación de flujo

superficial” el cual plantea que el escurrimiento superficial no se produce por igual en toda la vertiente, sino que se expande vertiente arriba a medida que transcurre el tiempo con lluvia.

Recientemente las investigaciones de German (1994) y Gresillon (1994), citadas por Meunier, 1996, realizadas en las cuencas de Brusquet y Laval en Francia, concluyen que el bosque y las prácticas de conservación de suelos, promueven la infiltración de casi toda la precipitación, aún de eventos de lluvia muy intensos, debido al efecto asociado a las raíces, aumentando la velocidad de infiltración, las rutas de percolación y la capacidad de retención de agua en el suelo y subsuelo.

Gresillon aplicó artificialmente una lluvia de 196 mm/hora de intensidad y 2 horas de duración, en una parcela con bosque, obteniendo un escurrimiento de solo 16 mm. Es decir, que casi toda la lluvia (el 91,8%), había sido absorbida por el follaje y el suelo rico en raíces, a pesar que se trataba de una lluvia de muy alta intensidad. El escurrimiento

fue solo el 8,16 %. Repitió la simulación, después de remover toda la vegetación inclusive las raíces. En la nueva situación, la infiltración se redujo drásticamente. La lluvia simulada fue de 134 mm/h con una duración de 45 minutos. La infiltración solo fue 10 mm generándose un escurrimiento de 124 mm que correspondió al 92,5% de la precipitación.

Este experimento indica el gran efecto reductor en la cantidad de escurrimiento superficial por las raíces, la hojarasca y el humus, lo que es muy importante, especialmente cuando se trata de suelos poco profundos, como ocurre en la mayoría de las laderas y vertientes de las cuencas montañosas tropicales. El bosque al permitir una rápida infiltración del agua de lluvia en laderas empinadas desempeña una función decisiva (Meunier, 1996). El autor indica que una alta saturación del suelo, la cual no fue medida en el experimento, alteraría el movimiento del agua hacia estratos más profundos.

En una ladera sin bosque, el escurrimiento después de las lluvias será fundamentalmente superficial, con un tiempo de retardo mínimo. Cuando existe bosque, ocurrirá bastante infiltración y por lo tanto poco escurrimiento superficial. La escorrentía en los cauces dependerá del escurrimiento subsuperficial.

Ya Hursch en 1932, citado por Swift *et al.* (1989), planteaba que el concepto de Horton no era aplicable a las tierras forestales porque virtualmente toda la precipitación se infiltraba dentro del suelo. En el laboratorio hidrológico forestal de Coweeta en Carolina del Norte, destacaron la importancia de la capacidad de almacenamiento y las características de la transmisión del agua en el suelo en vertientes empinadas. Las cuencas forestales en alta pendiente y suelos superficiales produjeron solo el 20% de la precipitación como escurrimiento directo.

Se concluye que recientemente han existido avances importantes tanto en la mejor comprensión del proceso de escurrimiento, como en metodologías prácticas para su cuantificación. En Venezuela las relaciones precipitación-escurrimiento se han investigado, principalmente en terrenos agrícolas de baja pendiente mediante parcelas de escurrimiento (Pérez, 1989, Forti 1999) y otros investigadores

En la presente investigación se aspira caracterizar el escurrimiento en una ladera empinada cubierta con bosque y evaluar la bondad predictiva del método del “número de la curva” para estimar la generación del escurrimiento en esta localidad específica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Es un lote boscoso plantado hace 40 años con *Pinus tenuifolia* en el bosque universitario “Emilio Menotti Sposito”, perteneciente a la Universidad de los Andes. Se ubica frente al edificio de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, en el municipio Libertador, al noroeste de la ciudad de Mérida en Venezuela, en las coordenadas UTM 0264505.68 E y 953947.5898 N. El área tiene una forma trapezoidal con superficie de 2,35 ha (Figura 3) con un base inferior de 120 m y un ancho de 200 m. La inclinación dominante es 60%, aunque en la cima y en la base existe franjas de aproximadamente 50 m de ancho con pendiente suave (< 20%). Varía altitudinalmente entre 1750 y 1870 msnm.

Los suelos son Humic Dystrudepts, con un epipedon úmbrico que descansa sobre un horizonte cámbico de desarrollo incipiente, con lavado de bases por la alta precipitación; adición de materia orgánica por las temperaturas relativamente bajas y por el efecto de la reforestación. Son de bajo grado evolutivo, con un horizonte A delgado sobre un horizonte C. Los suelos provienen de la familia Sabaneta (Márquez y Valero, *et al.*, 1991) formada por una secuencia de areniscas cuarzosas, de color gris, gruesas, con intercalaciones de limonitas y areniscas de color rojo, meteorizándose a suelos de carácter ácido, con altos contenidos de aluminio intercambiable. Las areniscas y las limonitas aportan relativamente altos contenidos de arena. A lo largo de una transecta se realizó un muestreo de suelos obteniéndose los resultados que se indican en la Cuadro 1.



Figura 3. Panorámica de la ladera del estudio. Mérida.

Se concluye que en la ladera existen dos sectores de suelos desde el punto de vista hidrológico: la franja superior con pendiente menores de 20%, con permeabilidad moderada, textura FAa, suelos tipo B con moderadamente bajo potencial de escurrimiento y buena infiltración. La franja media e inferior por debajo de los 1810 msnm con textura FA, permeabilidad moderadamente lenta y potencial moderadamente alto de escurrimiento que le califican como un suelo tipo C.

La precipitación anual es alrededor de los 2060 mm/año según las mediciones de la estación Santa Rosa (ULA), con una distribución bimodal típica para esta región de los Andes, lluvias de fuerte intensidad en abril, mayo y octubre.

La ladera estaba sin protección vegetal adecuada hace 40 años. Fue reforestada sembrada al tresbolillo (Fernández, 1985). Hoy en día ha sido recuperada. Los árboles tienen altura dominantes entre 25 a 30 m y diámetros que varían entre 70 y 30 cm. El dosel es mediamente denso presentando tres pequeños sectores ralos, con matorral bajo, donde los árboles se han caído debido a sus raíces superficiales.

En el pie de la ladera se había construido un canal en hormigón de sección trapezoidal (Figura 4) de 1 m de base inferior, 2,28 m de base superior y 0,65 m de altura, para el drenaje de la humedad de la vertiente y de la vía. Precisamente en este canal se instaló el vertedero triangular de 60° de cresta afilada, calibrado in situ (Figura 5) para registrar los niveles de escorrentía. Las variaciones de los niveles se midieron mediante un limnigrafo (Figura 6), marca Stevens, modelo 71 Tipo A, que graficaba el nivel en un papel colocado sobre un tambor cuyo movimiento se activaba por corriente eléctrica.



Figura 4. Canal al pie de ladera.



Figura 5. Vertedero triangular.



Figura 6. Estación limnigrafica.

La medición de la precipitación se realizó mediante dos pluviografos, uno instalado en la Escuela de Geografía y otro en la Urbanización Santa Maria localizados a una distancias de 150 y 300 m del sitio

Cuadro 1. Características de los suelos

Código muestra	Altitud msnm	Textura	Materia orgánica (%)	Ph	Conductividad eléctrica (Mohs)	Permeabilidad	Estructura	Potencial de escurrimiento
3 (cima)	1870	FAa	2,93	4,76	8 baja	3 Moderada	3	Moderadamente bajo. Suelo tipo B
2 (media ladera)	1810	FA	4,33	4,66	9 baja	Moderadamente lenta	4	Moderadamente alto. Suelo tipo C
1 (base)	1780	FA	5,89	4,85	15 media	Moderadamente lenta	4	Moderadamente alto. Suelo tipo C

de medición del escurrimiento respectivamente.

Se usó el análisis de datos de lluvia y escurrimiento concurrentes. La cantidad de escurrimiento directo se determinó convirtiendo el limnigrama a hidrograma respectivo mediante una ecuación de calibración mira-gasto desarrollada a partir de los datos de campo:

Donde: $Q = 4.3411 \times H^{2.193}$

Q= caudal instantáneo (l/s) H= carga o nivel (m)

La integración del área debajo del hidrograma permitió calcular el volumen de escurrimiento, que dividido entre el área generadora se transformó en lámina escurrida (mm), la cual fue comparada con la profundidad de precipitación. Se analizaron eventos coetáneos de lluvia y escurrimiento. La determinación del efecto de la parte subterránea del bosque sobre el escurrimiento, es decir la retención, se calculó por diferencia entre la precipitación y el escurrimiento directo para cada evento de lluvia. Para determinar la bondad de predicción del método del "número de la curva" en la predicción del volumen escurrido se comparó el valor estimado según el método de SCS, modificado por Woodward y el valor medido en las condiciones de campo. A partir de esos resultados se identificó el valor de CN para el complejo suelo-bosque bajo estudio.

RESULTADOS

Entre abril y junio del 2002 se midieron 8 eventos de escorrentía y precipitación, de los cuales 4 se descartaron, ya que la profundidad de precipitación fue muy pequeña, menor de 6 mm. Las fechas de ocurrencia de los eventos seleccionados fue: 21 y 24 de abril y 1 y 30 de mayo del 2002.

La forma de los hidrogramas

En todos los hidrogramas se observa una rama ascendente de alta pendiente, (Figura 7) indicativo de la presencia del escurrimiento superficial que llega rápidamente al canal, lo que sugiere que esta vertiente a pesar de estar reforestada, si genera escurrimiento superficial en el sentido de la teoría de Horton. Posiblemente proviene del sector medio de la ladera, donde los suelos son franco arcillosos, permeabilidad moderadamente lenta, en pendiente de

60%, con suelo tipo C, indicativo de moderado alto potencial de generación de escurrimiento.

La rama descendente presenta comportamiento variado. Tiene picos secundarios asociados a la morfología de la intensidad de la lluvia. En unos hidrogramas, el tiempo de recesión es largo y el coeficiente de agotamiento es lento indicativo de la presencia de un aporte significativo de flujo subsuperficial, el cual proviene de la infiltración en el sector superior donde la textura de los suelos es FAa, con pendientes menores de 20%, permeabilidad moderada, que caracterizan al suelos como del tipo B, de acuerdo a la clasificación hidrológica, es decir con moderadamente bajo potencial de escurrimiento.

El flujo subsuperficial de velocidad rápida, que ha descendido dentro del perfil suelo desde la cima, se convierte en "flujo de retorno" y aparece como superficial en la parte mas inferior de la ladera, allí disminuye la pendiente a valores menores de 35 %, donde los suelos generalmente están saturados y la conductividad hidráulica es muy lenta.

En base a los resultados anteriores, se propone para la vertiente en estudio el modelo de funcionamiento hidrológico indicado en la figura 8, en el cual el flujo de retorno aparece cerca de la cota 1760 msnm, en el sector inferior de la ladera, con los dos escurrimientos, superficial y subsuperficial, operando en el sector medio e inferior.

Las abstracciones iniciales (Ia)

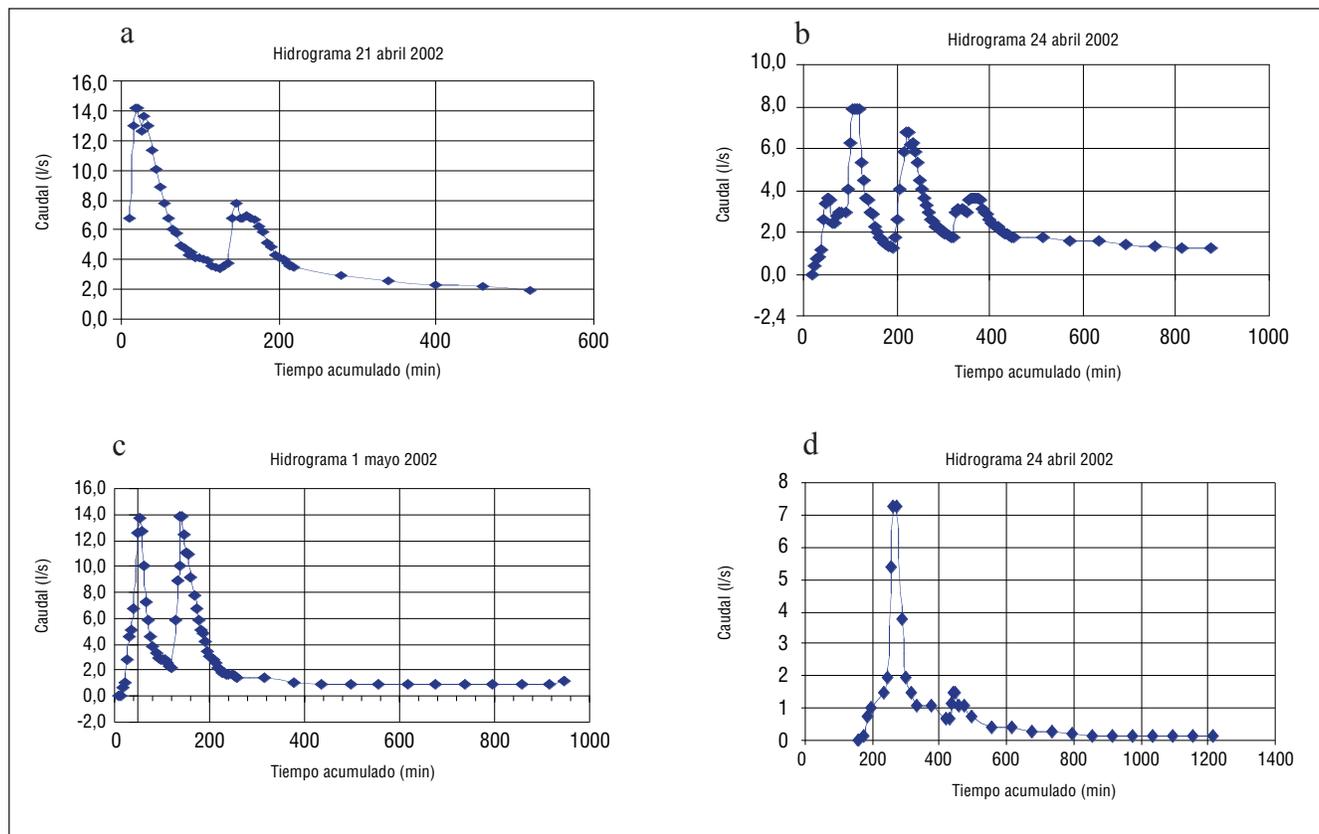
Las abstracciones iniciales se corresponden a la cantidad de lluvia caída hasta el momento en que aparece la escorrentía directa en el hidrograma. Su determinación se realiza por lectura en la curva acumulativa de precipitación (Figura 9). Los valores obtenidos se expresan en la Cuadro 2.

Las abstracciones iniciales para los cuatro eventos seleccionados oscilaron entre 3,0 y 7,8 mm, como se expresa en la Cuadro 2. El coeficiente lambda, que relaciona las pérdidas iniciales y la retención de almacenamiento varió entre 0,05 y 0,24.

La relación general entre la precipitación y la escorrentía directa

Cuando se relacionan todos los eventos de precipitación, inclusive los de menor profundidad, con la escorrentía directa medida en el canal se detectan una tendencia general expresada mediante la ecuación

$$Y = 0.0057 \times X^{1.8006} \quad R^2 = 0.88$$



Figuras 7. a, b, c y d: Hidrogramas medidos en la estación limnimétrica del canal trapezoidal

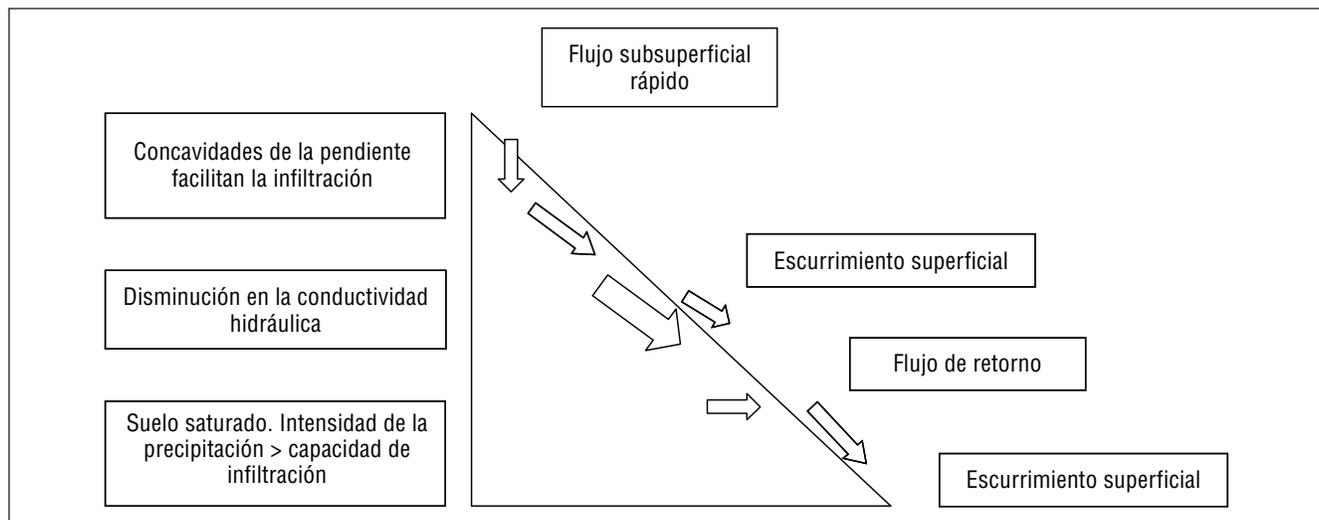


Figura 8. Un modelo conceptual para el funcionamiento hidrológico de la vertiente en estudio.

Donde $Y =$ Precipitación (mm) y $X = Q$ Escorrentía directa (mm)

A pesar de la dispersión de los pocos puntos analizados se observa una tendencia clara y unos valores relativamente bajos de escorrentía directa (Figura 10), que se explican por la utilidad de la reforestación en la promoción de la infiltración.

La bondad del método del CN para la predicción del volumen escurrido

La escorrentía directa que salió de la ladera y se midió en el canal varió entre 2,8 y 5,5 mm, incluyendo algunos eventos menores. El cuadro 2 también presenta un resumen de los valores medidos de es-

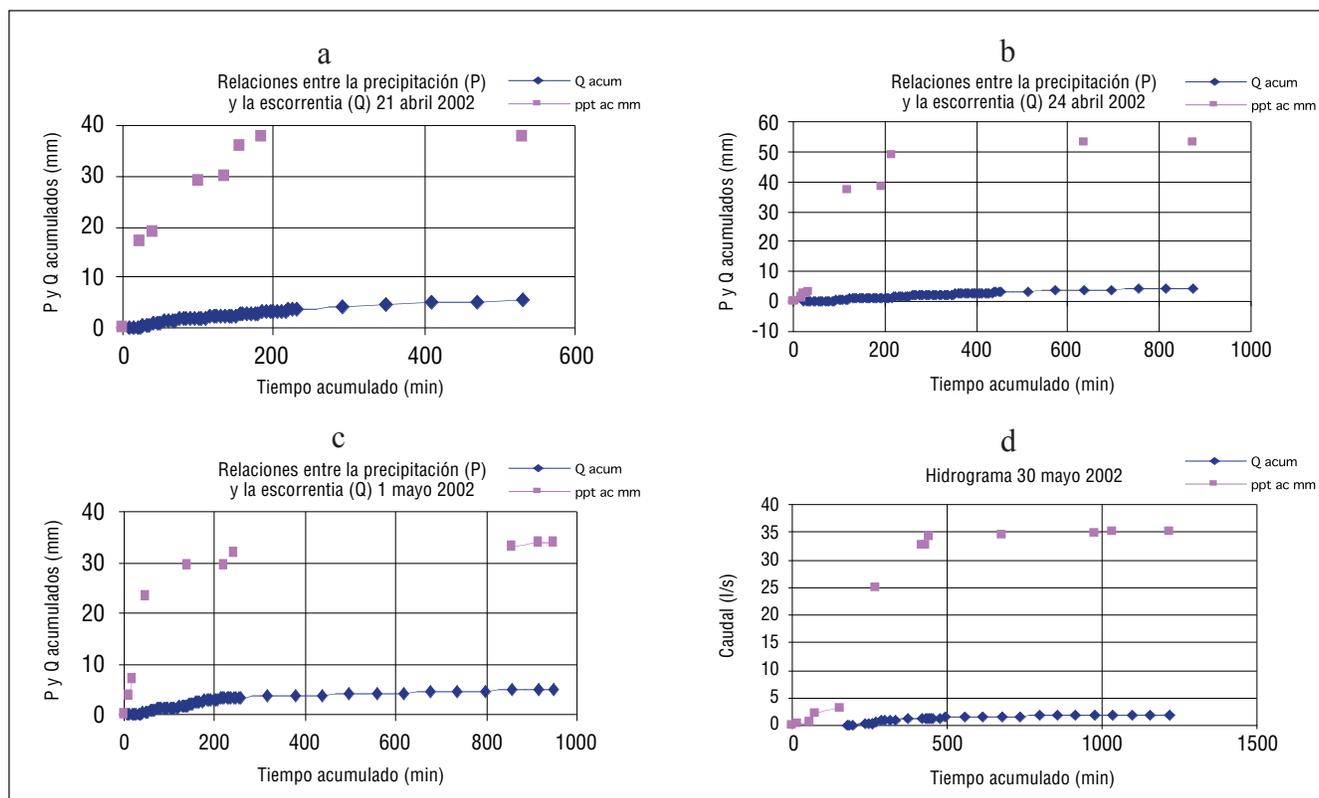


Figura 9. Curvas acumulativas de precipitación y escurrimiento.

Cuadro 2. Abstracciones iniciales en los cuatro eventos analizados

#	Fecha	Precipitación P (mm)	Escorrentía Q (mm)	Abstracciones iniciales medidas (Ia) mm.
1	21 abril 2002	37,7	5,5	7,8
2	24 abril 2002	53,0	5,1	3,0
3	1 mayo 2002	33,1	5,0	3,8
4	30 mayo 2002	28,0	2,8	3,1

correntía directa para las diferentes profundidades de precipitación de los eventos observados.

El valor estimado por el método del SCS, utilizando la ecuación original y los valores de CN tabulado de acuerdo a las características del suelo y vegetación (CN= 67) para una condición antecedente de humedad II osciló entre 0 y 10,3 mm. Se observa que el método subestima la generación de escorrentía en los valores bajos de precipitación y

los subestima entre 51 y 87 % los valores intermedios (Figura 10).

Sin embargo el método mejora la bondad de predicción cuando se aplica la ecuación modificada por Woodward y se aplica el valor de CN deducido de las mediciones para este complejo suelo-bosque, que resultó ser CN=55 para la condición de humedad antecedente II (Cuadro 3)

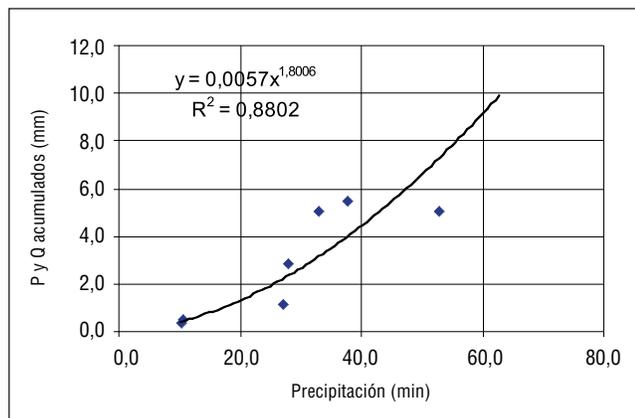


Figura 10. Expresión matemática ajustada por mínimos cuadrados para los valores medidos de precipitación y escorrentía.

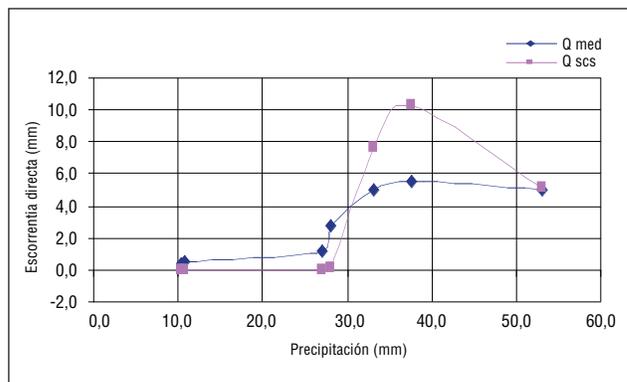


Figura 11. Valores medidos y estimados para la escorrentía directa por el método del SCS (CN valor tabulado)

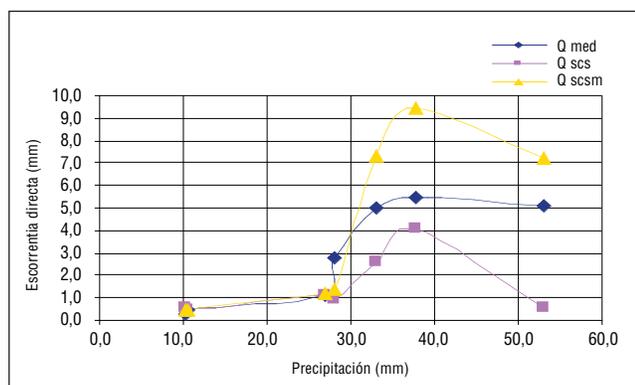


Figura 12. Valores de escorrentía estimada por la fórmula original (Qscs) y modificada (Qscsm) utilizando el valor de CN obtenido de los datos medidos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las mediciones conjuntas de escurrimiento y precipitación permitieron demostrar la bondad del método del SCS para la predicción del volumen de escurrimiento.

La ecuación propuesta por Woodward *et al.* (2001) mejora levemente la predicción de la escorrentía directa. Se concluye que el factor más importante es el cambio del valor de CN de 67 a 55 para este tipo de complejo suelo-vegetación. El pronóstico fue más cerca de la realidad cuando se utilizó el valor de CN=55 en vez del 67 asignado por la

Cuadro 3. Valores medidos y estimados de escorrentía directa (mm) para diferentes profundidades de precipitación (mm)

Fecha	Precipitación (mm)	Escorrentía directa Q (mm)	Retención (mm)	Condición de humedad antecedente	CN	Q estimada por el método original	Q estimada por el método modificado
10/5/02	10.4	0.3	10.1	III	75	.05	0.4
22/4/02	10.7	0.5	10.2	III	75	.05	0.5
15/6/02	27.0	1.1	25.9	II	55	1.1	1.2
30/5/02	28.0	2.8	25.2	II	55	0.9	1.4
1/5/02	33.1	5.0	28.0	III	75	2.6	7.3
21/4/02	37.7	5.5	32.2	III	75	4.1	9.5
24/4/02	53.0	5.1	47.9	II	55	0.6	7.2

tablas elaboradas para otras condiciones climáticas y edáficas.

Se recomienda continuar realizando este tipo de mediciones, tratando de eliminar algunos problemas prácticos presentados en relación a pequeñas filtraciones en fondo del canal, a sedimentación y obturación por hojarascas y en general al manteniendo de las instalaciones.

AGRADECIMIENTO

Se agradece la cooperación del CDCHT que financió este proyecto mediante el proyecto Código FO-380-96-01-B

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHORLEY, R. J. 1978. The hillslope hydrological cycle. En Hillslope hydrology. Editado por M. J. Kirkby. John Wiley. New Cork.
- DYKES A.P. 1998. Simulating the hydrology of tropical hillslopes using a finite element model. Department of Geography. King's College London. Strand, London WC2R 2LS. <http://www.kcl.ac.uk/kis/schools/humus/geog/46.pdf>
- ELSENBERG H. 2001. Hydrologic flowpaths in tropical rain forest soilscares-a review. 2001 Hydrological Processes **15**, 1751-1759 (2001) <http://www.uni-postdam.de/u/Geoekologie/publikationen/bodenKunde/23.pdf>
- FERNANDEZ N. 1985. La intercepción en dos tipos de bosques en el Bosque Pedro Menotti Sposito. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de los Andes. Merida
- FUJIEDA, M. 1995. Runoff characteristics in the Serra de Mar, San Paulo. Brazil. Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute. 369, 63-151. Ibaraki. Brasil
- FORTI A. 1999. Escorrentía y erosión bajo diferentes grados de cobertura y sistemas de siembra en suelos de ladera. Tesis de maestría. Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado. Universidad de los Andes. Mérida.
- HEWLETT, J. D. y A.R. HIBBERT. 1967 Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. En Sopper W.E. y H. W. Lull. International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon Press. Oxford.
- LEWIS, D., M. J. SINGERY K.W.TATE. 2000. Applicability of SCS Curve Number Method for a California Oak Woodlands Watershed. Journal of Soil and Water Conservation. Vol 55. Number 2. 2000. USA
- MARQUEZ J. A. Y S. VALERO. 1991. Evaluación y planificación de clareos en las plantaciones Buena Vista y Emilio Menotti Sposito. Tesis de grado. Escuela de Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes. Mérida.
- MEUNIER, M. 1996. La cubierta forestal y las crecidas en las pequeñas cuencas de montaña. Unasylnva N° 185. Vol 47 1996/2.
- PANDEY A. Y P.P. DABRAL. 2000. Estimation of runoff for agricultural watershed using SCS curve number and geographic information system. <http://www.Gisdevelopment.net/application/agricultura/soil/mi0348pf.htm>.
- PÉREZ URIEL, 1989. Evaluación del efecto de la cobertura de cultivo de la papa (*Pennisetum clandestinum*) sobre la erosión de los suelos bajo practicas agronómicas. Centro de Estudios Forestales de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Mérida.
- ROJAS M. R. 1979. Hidrología de tierras agrícolas. CIDIAT. Merida.
- SWIFT, L.W., G.B. CUNNINGHAM Y J.E. DOUGLAS. 1989. Climatology and Hydrology. Forest Hydrology and Ecology at Coweeta. Wayne T Swank y D.A. Crossley, Jr. Editors. Springer-Verlag. New York.
- STOREY, H., HOBBA R Y M. ROSA. 1964. Hydrology of forest lands and rangelands. En Handbook of Applied Hydrology. Editado por V.T. Chown. McGraw Hill. New York.
- STEVENS INSTRUMENTS. 1980. Type A Model 71 Recorder. Leupold & Stevens Inc. Publication 34225. Oregon. USA.
- USDA SCS. 1985. Hydrology. Section 4. National Engineering Handbook. NCRS. el metodo del SCS.
- WOODWARD D.E., R.HAWKINS, R. JIANG, A. HJELMFELT Jr, J. VAN MULLEM y Q. D. QUAN. 2001. Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio. <http://class.et.byu.edu/ce531/Papers/CNInitialAbstraction.pdf>