

Relación lluvia-escurrimiento en un sistema pequeño de cuencas de selva baja caducifolia¹

Luis Cervantes Servín y M. Maass

Instituto de Biología, UNAM

Ramón Domínguez Mora

Instituto de Ingeniería, UNAM

Cinco pequeñas cuencas hidrológicas localizadas en la región de Chamela, Jalisco, se estudian en la actualidad bajo un enfoque ecológico, a fin de experimentar el manejo de recursos y el uso del suelo. La respuesta hidrológica de cada una de ellas es uno de los parámetros básicos para la evaluación. Todas presentan escurrimientos efímeros por estar localizadas en una zona marcadamente estacional con respecto a las lluvias y en uno de los climas subhúmedos más secos del país. La lámina promedio de escurrimiento anual representa sólo el 1.57% de la lluvia media anual (702 mm), con índices de infiltración promedio de 13.7 mm/15 min. Estos valores se deben a las características arenosas predominantes del suelo y al papel interceptor que juegan la vegetación en pie y la hojarasca. Las respuestas hidrológicas muestran diferencias entre los hidrogramas unitarios. Los parámetros que caracterizan la transformación de la lluvia en escurrimiento servirán de base para cuantificar objetivamente los cambios que introducirá el manejo de dichas cuencas en su comportamiento hidrológico.

Las zonas de ladera, existentes en México en gran escala, significan un importante potencial para el desarrollo nacional, mediante un manejo adecuado. Para ello es preciso estudiarlas de manera integral con un enfoque de cuenca ecológica. Con este concepto se establece una unidad hidrológica delimitada por un área de captación claramente definida y drenada por un río o arroyo, que se puede demarcar con facilidad en el campo. Incluye componentes ligados al suelo, agua y recursos biológicos, lo cual hace que se comporte como una unidad ecológica natural. El agua es el factor que determina la función de la cuenca, aunque el valor total de su funcionamiento equivale a la suma de todos los valores de sus partes (Seminario Internacional, 1980).

Hoy en día, los países de América tropical (incluido México) se ven sujetos a grandes presiones para intensificar la producción agropecuaria y el uso forestal en zonas de laderas, debido al incre-

mento tanto poblacional y de urbanización como al del precio de los combustibles fósiles; estos factores ocasionan drásticas transformaciones ecológicas, hidrológicas, sociales y económicas en estas zonas (Lugo y Brown, 1985). En virtud de ello, el manejo integral de las cuencas resulta crítico para el mantenimiento de los recursos; uno de sus principales objetivos es lograr nuevos diseños, o mejorar las prácticas ya existentes sobre el uso del suelo, conservando o aumentando la infiltración de éste para evitar los procesos de erosión.

La relación lluvia-escurrimiento es un parámetro básico de estudio en la respuesta hidrológica de cualquier cuenca. En la dinámica de esta relación se ha determinado que los procesos de infiltración, almacenamiento y escurrimiento de agua en una zona dependen de las interacciones complejas entre topografía, clima, geología, tipo de suelo, vegetación y manipulación humana (Hew-

lett y Nutter, 1969). A su vez, del tipo de transformación que sufra la vegetación dependerá el impacto en el agua del suelo y subsuelo y, por lo tanto, la cantidad, calidad, temporalidad y distribución de los escurrimientos.

Como ejemplo de lo anterior, se menciona un bosque templado de EUA talado por explotación forestal comercial, donde el escurrimiento se incrementó alrededor del 28% por arriba del flujo esperado en condiciones no perturbadas (Swank y Cunningham, 1982). Swift y Swank (1981) plantean que el porcentaje de reducción del área basal arbórea dentro de una cuenca es un predictor efectivo del aumento en el escurrimiento.

La reducción del dosel implica un fuerte impacto hidrológico, ya que significa el decrecimiento en la intercepción de la lluvia y la disminución de la evapotranspiración, lo que a su vez, permite un ingreso mayor de agua al suelo e incrementa el escurrimiento (Swank y Miner, 1968). En una cuenca del sureste de las montañas Apalaches, en Carolina del Norte, el 60% de recuperación del dosel medido como índice de área foliar (LAI) dio como resultado el 70% de recuperación en el escurrimiento original (Swift y Swank, 1981). El cambio del bosque nativo por otro tipo de vegetación arbórea implica modificaciones en la arquitectura y densidad del dosel que alteran sustancialmente la dinámica de los escurrimientos. En el caso de las cuencas de Coweeta, Carolina del Norte, EUA, se detectó que la conversión de un bosque deciduo de angiospermas a uno de coníferas provocó una disminución en la evapotranspiración y un aumento de volumen en los escurrimientos (Swank y Douglas, 1974; Swank y Miner, 1968).

Por otra parte, la cantidad de agua producida por una cuenca sujeta a una actividad de agricultura nómada y de monocultivos permanentes, es mayor que la de una cuenca no perturbada (Hamilton y King, 1983). Los diferentes tipos de manejo agrícola propician un mayor o menor grado de escurrimiento. En un estudio sobre la conservación del agua de las cuencas en el estado de Hidalgo, se observó que de los cultivos experimentados, el del nopal fue el más eficiente en la retención de agua en el suelo, seguido por el del maíz, frijol, cebada y, por último, de pastizales (Castillo, 1985). En la conversión de una ladera a pastizal hay un incremento en el agua que escurre superficialmente, aun después de establecida la cobertura del pastizal en el área; la producción del escurrimiento puede variar en relación directa con la producción de biomasa del pastizal (Hib-

bert, 1969). Al igual que el dosel, la hojarasca muerta o *litter* localizado en la superficie del suelo se relaciona con los escurrimientos. Aquella mantiene la estructura y capacidad de filtración del suelo, en tanto que su ausencia incrementa el escurrimiento y el grado de descarga del mismo (Maass, 1985, Tsukamoto, 1975).

La mayoría de la información sobre cuencas proviene de investigaciones realizadas en zonas templadas. En cambio, en las tropicales los estudios son escasos, y como además las condiciones son diferentes, es difícil extrapolar los resultados de una zona a otra en lo referente a su manejo. Esto implica que los países tropicales deben realizar sus propias investigaciones, como es el caso de México, el cual necesita impulsar estudios de cuencas con enfoques ecológicos que correspondan a la gran diversidad de ecosistemas templados y tropicales de ladera con los que cuenta.

El Departamento de Ecología del Instituto de Biología de la UNAM está efectuando una investigación de cuencas denominada Evaluación del impacto de diferentes técnicas de manejo en la productividad primaria y ciclo de nutrientes de un ecosistema tropical, cuyo objetivo es conocer de manera integral el funcionamiento de un ecosistema tropical mediante el análisis de los parámetros básicos de su dinámica. La finalidad es determinar, en una etapa experimental futura, el impacto que tienen diferentes prácticas de manejo del suelo en los componentes biológicos, edáficos e hidrológicos del ecosistema. La investigación está conformada por diversos estudios, entre los que destaca el referente a la determinación de la dinámica de la relación lluvia-escurrimiento y la caracterización de otros aspectos hidrológicos básicos.

En la actualidad, las cuencas se encuentran en el periodo de calibración, pero se han hecho estudios para definir los regímenes de escurrimiento (magnitud, duración, distribución anual y variaciones); determinar la magnitud de lluvia que ocasiona escurrimientos; calcular el coeficiente de escurrimiento e índice de infiltración y elaborar hidrogramas unitarios para las cuencas.

Localización y características

El sistema de cinco pequeñas cuencas está en un área de 100 ha en la Estación de Biología Chame-la, del Instituto de Biología de la UNAM (19° 32' latitud norte, 105° 00' longitud oeste), localizada en la región de Chamela, Municipio de la Huerta, en el kilómetro 59 de la carretera federal núm.

200, sobre las costas centrales del estado de Jalisco (véase ilustración 1). La región se caracteriza por su topografía irregular, con lomeríos que van de 20 a 250 msnm y que conforman numerosos sistemas de cuencas pequeñas. La geología está representada por rocas ígneas terciarias y cuaternarias (Quiroz, A., comunicación personal).

El clima de la zona está entre los más secos dentro de los del rango cálido-húmedo; la temperatura media anual es de 24.9°C y la precipitación anual promedio es de 748 mm; el 80% del total de lluvia se distribuye de julio a noviembre (Bullock, 1986). La dinámica de este elemento delimita dos estaciones climáticas: la seca que transcurre de diciembre a junio, y la húmeda, de julio a noviembre. Para los años del estudio hidrológico (1983-1986), el patrón de la precipitación pluvial se señala en la ilustración 2. Existen dos tipos principales de vegetación en la zona: la selva baja caducifolia (Miranda y Hernández, 1963), localizada en las laderas y cimas de los lomeríos, tiene árboles cuya altura varía entre 5 y 12 m y especies que en la época seca tiran la totalidad de sus hojas, y la selva mediana subperenifolia (Miranda y Hernández, 1963), ubicada en las partes bajas

de las laderas y orillas de arroyos que abarcan áreas reducidas; la altura de los árboles es de 10 a 25 m y en el periodo seco pierden sus hojas en porcentajes que varían del 75 al 90%.

El sistema de cuencas estudiado se localiza en la cara occidental de una misma formación orográfica llamada Cerro el Colorado, con una altitud máxima de 180 msnm. Desemboca en el arroyo El Zarco, que se une al de El Colorado; éste, a su vez, vierte al río Chamela, el cual descarga en el Océano Pacífico (véanse ilustraciones 1 y 3). La zona se ubica, al norte, entre la cuenca de la corriente del río San Nicolás y al sur, en la corriente del río Cuixmala, ambas pertenecientes, de acuerdo con la SARH, a la región hidrológica número 15 de la Costa de Jalisco (*Regiones Hidrológicas SARH*, 1974).

El patrón de drenaje de las cuencas es rectangular, conformado por corrientes de segundo orden. El tipo de cuencas corresponde a las efímeras, que llevan la mayor cantidad de agua durante septiembre. El suelo es básicamente de textura migajón-arenosa, con profundidades de entre 20 y 50 cm y altos contenidos de materia orgánica, que van del 1 al 5% (Solís, en preparación). Sobre el cauce principal de cada cuenca predomina un sustrato pedregoso y hay pendientes entre 8 y 15% (véase ilustración 4). Las laderas tienen pendientes convexas con inclinaciones a veces mayores al 100%, aunque el promedio es de 30% (De Ita Martínez, 1983). En el cuadro 2 se muestran otras características importantes de cada cuenca.

Método

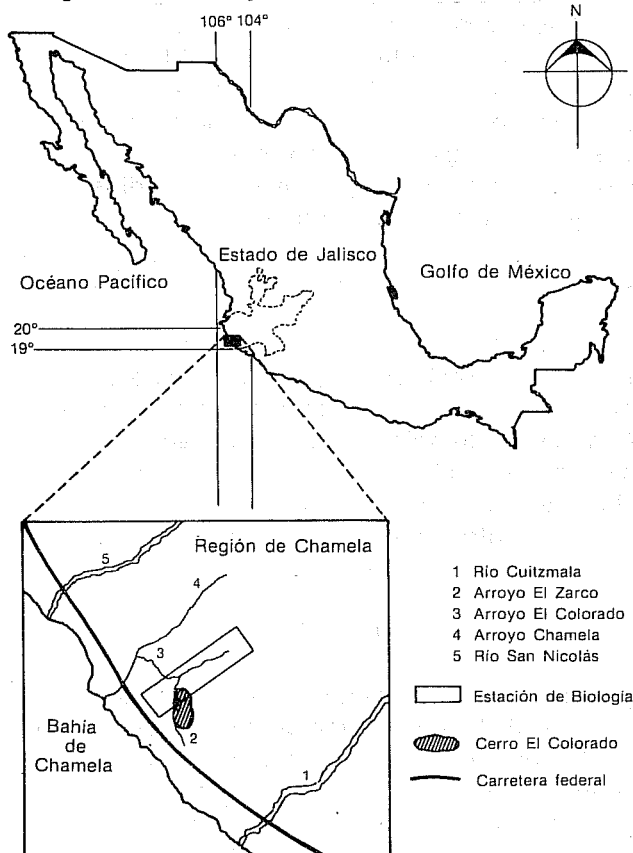
Criterios de selección

La definición de las cinco cuencas estudiadas contó con el asesoramiento de especialistas como C. Jordan, investigador sobre dinámica de ecosistemas, de la Universidad de Georgia, EUA y T. Swank, hidrólogo forestal del Laboratorio Hidrológico Forestal de Coweeta, EUA. La selección se hizo con base en la proximidad de una cuenca con otra, su localización sobre una misma formación geológica y la similitud de la vegetación.

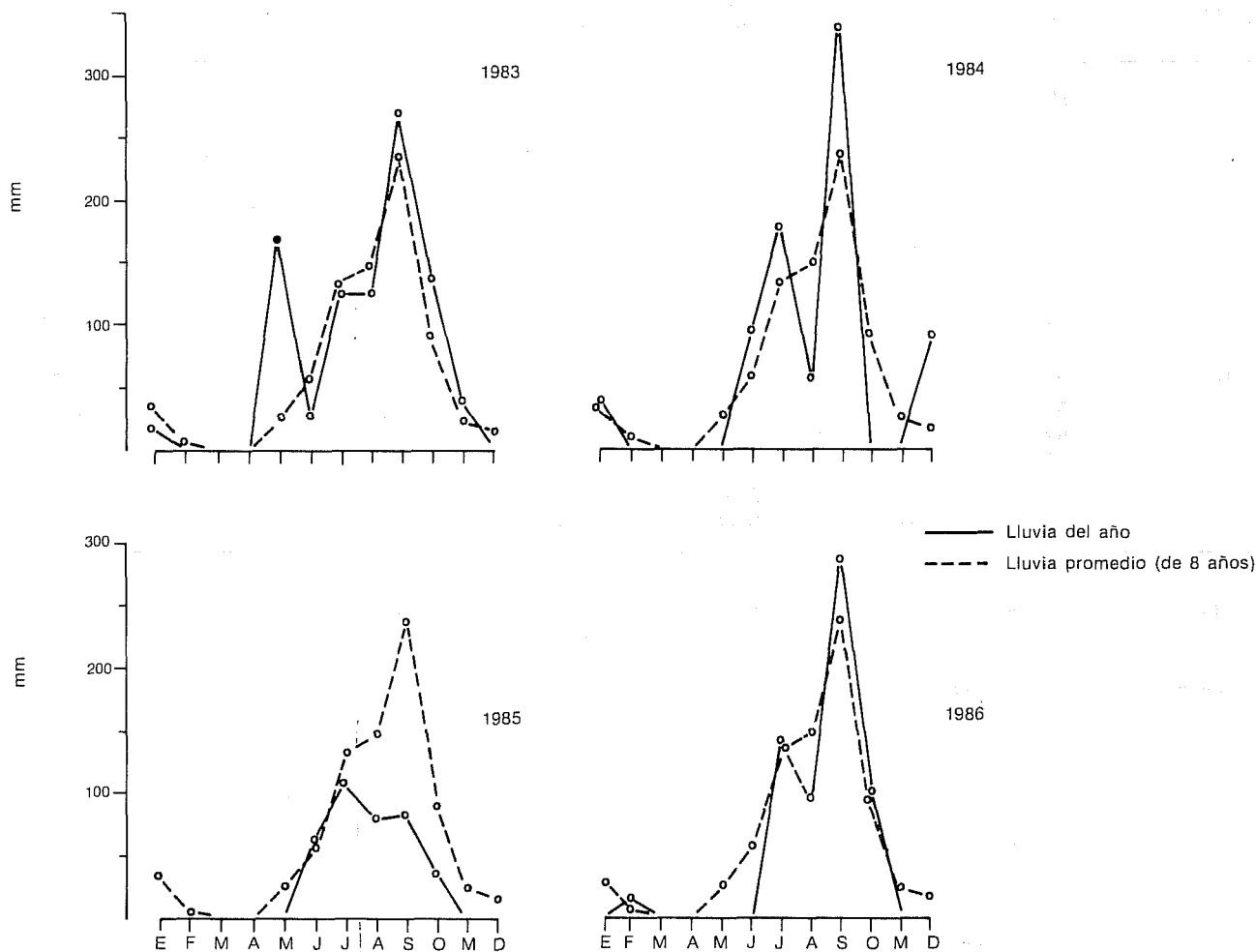
Equipo de campo

Para medir los escurrimientos, en la desembocadura de cada cuenca se instalaron cinco vertederos triangulares de sección controlada, con capacidad de 1 m de tirante y gasto máximo de

1. Región de Chamela y Estación de Biología



2. Precipitación pluvial en Chamela, Jalisco



0.86m³/s. Dos de ellos se adquirieron en Estados Unidos de Norteamérica y los otros tres fueron fabricados en el Centro de Instrumentos de la UNAM. El modelo de estos vertedores (Flume 3H) se ha empleado mucho en la calibración y el manejo experimental de cuencas en el Laboratorio Hidrológico Federal de Coweeta, Carolina del Norte, EUA. Los gastos se registraron con limnigrafos del modelo S-F3-2 con capacidad de medición de tirantes máximos de 1 m en intervalos mínimos de 15 minutos. La lluvia se registró con cuatro pluviómetros meteorológicos estándar (20 cm de diámetro). Dos de ellos se colocaron fuera del dosel de la vegetación (por medio de torres), y los otros dos en áreas abiertas. La intensidad de la lluvia se midió con dos pluviógrafos tipo sifón (facilitados por el Instituto de Ingeniería de la

UNAM), que se ubicaron en sendas cuencas. Se contó también con un pluviógrafo tipo báscula, localizado en la estación meteorológica de las instalaciones de la Estación de Biología. Los tiempos mínimos de registro para los pluviógrafos fueron de 15 minutos.

A partir de la ubicación de estos instrumentos (véase ilustración 3), se trazaron polígonos de Thiesen (Linsley *et al*, 1984) para calcular la lluvia sobre el área.

La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología llevó a cabo el levantamiento topográfico del sistema de cuencas en el estado de Jalisco, por medio de fotografías aéreas, con las que se elaboraron mapas a escala 1:2000. Las pendientes promedio de los cauces principales de cada una se obtuvieron por el método de Taylor y Schwarz (1952).

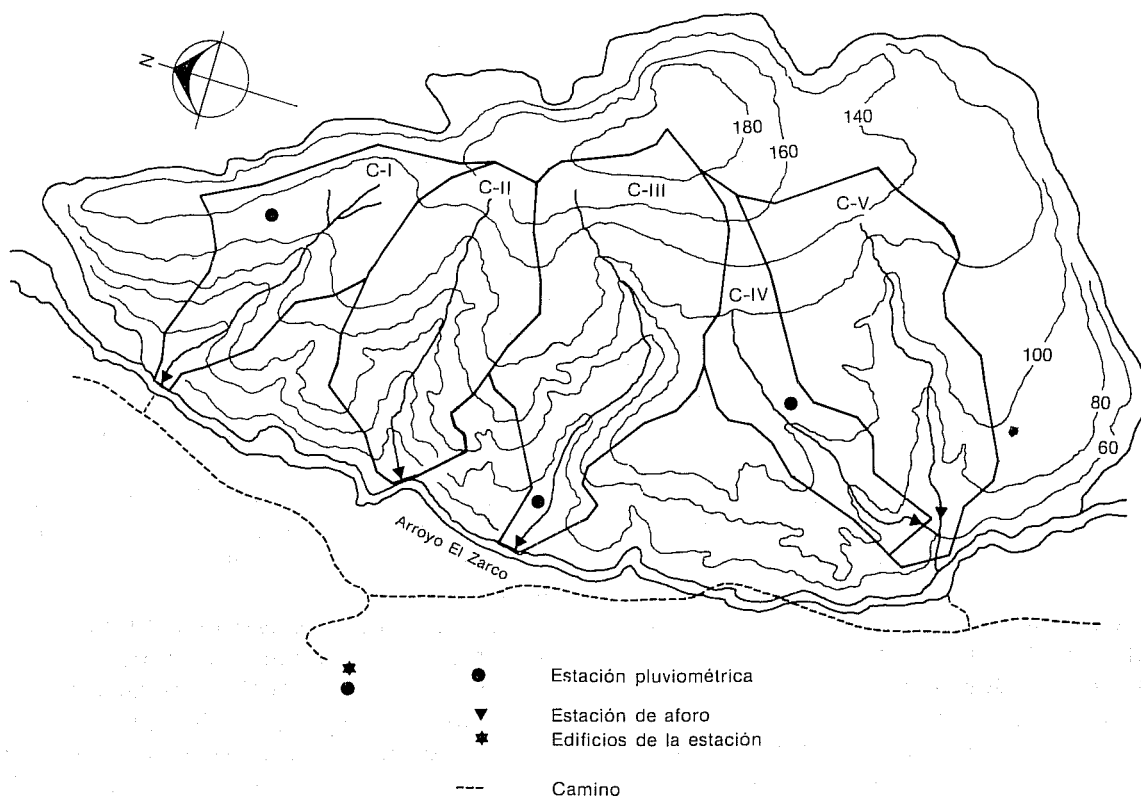
1. Volumen, lámina y tiempo de escurrimiento y su relación con la lluvia anual

Cuenca	Año	Volumen m ³	Lámina mm.	Q máximo ×10 m ³ /s	Tiempo días	Lluvia anual mm.	Lluvia anual escurrida %
I	83	1359.87	9.12	40.78	2.6	916	0.99
	84	3360.82	22.54	194.54	3.5	848	2.66
	85	1384.94	9.29	32.48	2.4	620	1.50
II	84*	4057.73	21.03	69.70	13.5	848	2.48
	86	868.04	4.50	16.20	9.5	620	0.73
III**	84	2594.47	9.25	47.86	+10.0	848	1.09
	86	3403.00	12.15	28.71	+8.0	620	1.96
IV	83	745.98	6.31	43.04	3.5	916	0.69
	84	2265.67	19.18	107.60	5.7	848	2.26
	86	213.38	1.81	5.10	1.6	620	0.29
V	84*	6078.99	23.56	232.20	9.5	848	2.78
	86	2190.85	8.49	40.78	6.8	620	1.37

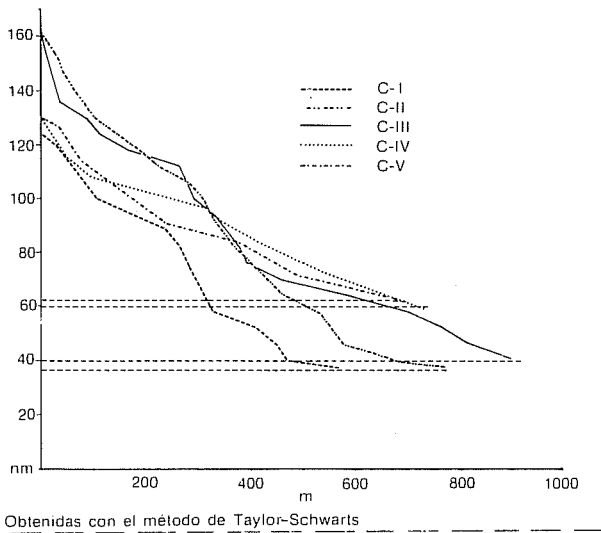
* Para estas cuencas falta el registro de julio de 1984, por lo que los valores totales están subestimados.

** Esta cuenca para los dos años presentó problemas de registro, por lo que no se tienen datos completos; se presenta la información parcial obtenida, como referencia.

3. Cuencas en el cerro El Colorado



4. Pendientes promedio de las cuencas*



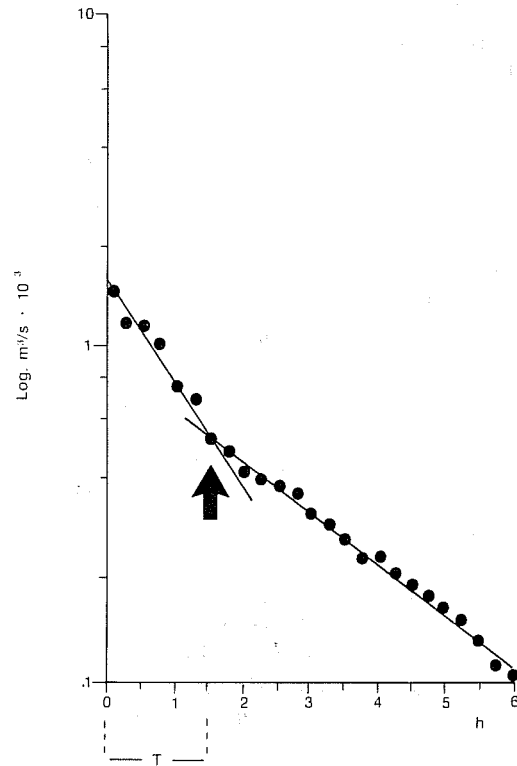
Los datos de lluvia permitieron construir los hietogramas correspondientes, con variaciones temporales de 15 min. Con la información proporcionada por los limnogramas, se elaboraron los hidrogramas correspondientes a los eventos registrados en cada cuenca mediante el método de Hibbert y Cunningham (1966). En los hidrogramas obtenidos se calculó, con el método logarítmico (Dominguez *et al*, 1983), el tiempo promedio del gasto directo para cada cuenca, separando éste del gasto base (véase ilustración 5). En cada cuenca el tiempo de escurrimiento directo (T) se correlacionó con la longitud y pendiente del cauce principal (L/S), para obtener la ecuación de predicción del tiempo medio de descarga. En la ilustración 6 se muestra la ubicación sobre la curva teórica obtenida, del tiempo de escurrimiento calculado mediante el método logarítmico y del directo esperado y calculado con la ecuación obtenida en la correlación.

El establecimiento de la relación entre lluvia y escurrimiento permitió calcular el coeficiente de escurrimiento y el índice de infiltración (véase ilustración 7). Se determinaron los hidrogramas unitarios por evento en cada cuenca y, superponiendo los resultados, se estimó un hidrograma unitario promedio por cuenca (véanse ilustraciones 8 y 9).

Resultados

La respuesta hidrológica para los eventos registrados en las cuencas se puede resumir como sigue:

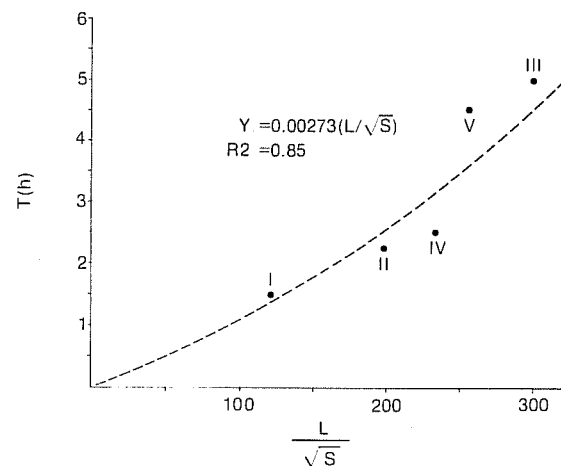
5. Determinación del punto de inflexión



Datos correspondientes al 17 de septiembre de 1983 (cuenca I)

tiempo total de escurrimiento = 47.5 h, $s = 42.6$
(mínimo = 5 h, máximo = 135 h)
volumen total anual por escurrimiento = 809.6 m^3 ,
 $s = 703.9$
(mínimo = 12 m^3 , máximo = 5246 m^3)
lámina total escurrida por evento = 3.7 mm, $s = 2.4$
(mínima = 0.08 mm, máxima = 20 mm)

6. Ubicación del tiempo de escurrimiento directo (calculado y esperado)



porcentaje de lluvia total

escurrida por evento = 4.0%, $s = 2.6$

(mínimo = 0.18%, máximo = 19.6%)

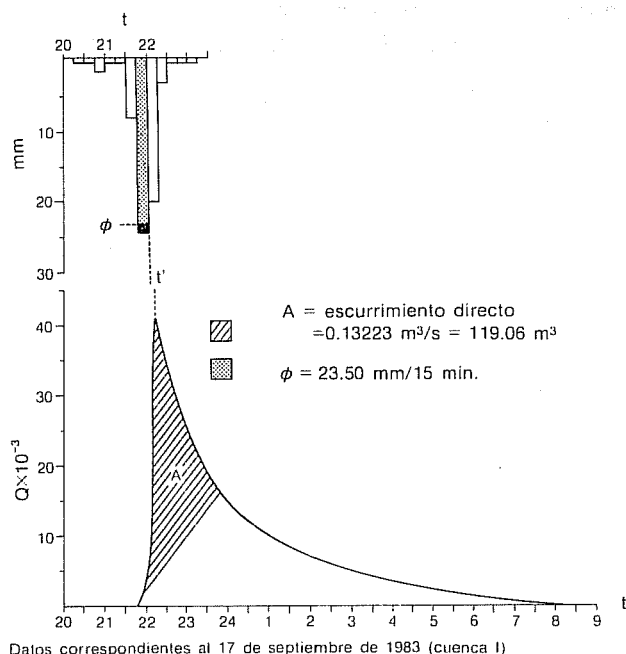
gasto máximo por evento = $19.11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$,

$s = 16.4$

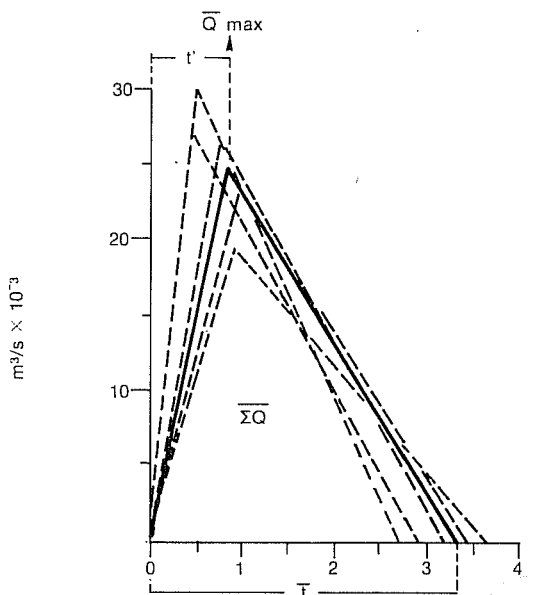
(mínimo = $0.98 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, máximo = $232 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

La estimación del total por año y por cuenca, del volumen y lámina, tiempo de escurrimiento y porcentaje de lluvia anual escurrida se presentan en el cuadro 1. El promedio del porcentaje de lluvia anual escurrido en las cinco cuencas fue de 1.57% ($s = 0.8$, C.V. = 54%). El coeficiente de variación puede indicar que hay años y cuencas que tienen la mitad de escurrimiento que otros años. El cuadro 3 muestra los eventos analizados en cada cuenca. Se utilizaron dos valores para el coeficiente de escurrimiento; el primero, C , toma en cuenta el total llovido y el segundo, C' , solamente considera la precipitación a partir de una hora antes de que se inicie el escurrimiento. En el mismo cuadro se muestra el índice de infiltración ϕ y las características generales de cada tormenta. Para las cinco cuencas se obtuvieron los siguientes promedios: $C = 1.44$ ($s = 1.3$), $C = 4.66$ ($s = 3.5$) y $\phi = 13.71 \text{ mm}/15 \text{ min}$ ($s = 8.2$). El cuadro 4 señala los mismos eventos del 3, pero agrupados por fechas iguales, con la finalidad de comparar las respuestas hidrológicas de las cuencas para una misma tormenta. En esta comparación, las

7. Determinación de C y ϕ



8. Hidrograma unitario promedio (cuenca IV)



Sobreposición de diagramas unitarios, tomando como referencias de acotamiento los parámetros promedio calculados a partir del conjunto de los diagramas unitarios sobrepuestos:

Q_{max} = gasto máximo promedio t' = tiempo de pico promedio
 Q = gasto total promedio t = tiempo de duración del gasto directo

cuencas I y V tienen los valores más altos del coeficiente de escurrimiento. Para cada una se obtuvo el hidrograma unitario promedio (véase ilustración 9).

Discusión

El año de 1985 se caracterizó por registrar una lluvia total anual no mayor de 500 mm, que está entre las más bajas del periodo de estudio y en los nueve años de registro meteorológico de la Estación de Biología. El patrón de distribución mensual de lluvia para dicho lapso estuvo muy por abajo del promedio (véase ilustración 2). Así mismo, los eventos lluviosos fueron muy espaciados. Como consecuencia, ese año no hubo escurrimientos en las cuencas estudiadas y circunvecinas. Esto indicó que, para esta región, las respuestas hidrológicas en cuencas pequeñas se originan si se tiene un total de lluvia anual alrededor del promedio, con una distribución repartida en la época de lluvias, de manera que haya una diferencia efectiva entre la lluvia total y la capacidad de infiltración del suelo que ocasione escurrimientos. Los eventos hidrológicos más importantes tienen lugar durante septiembre, mes en el que, a su vez, los sistemas fluviales colindantes de la región presentan sus mayores picos de avenidas.

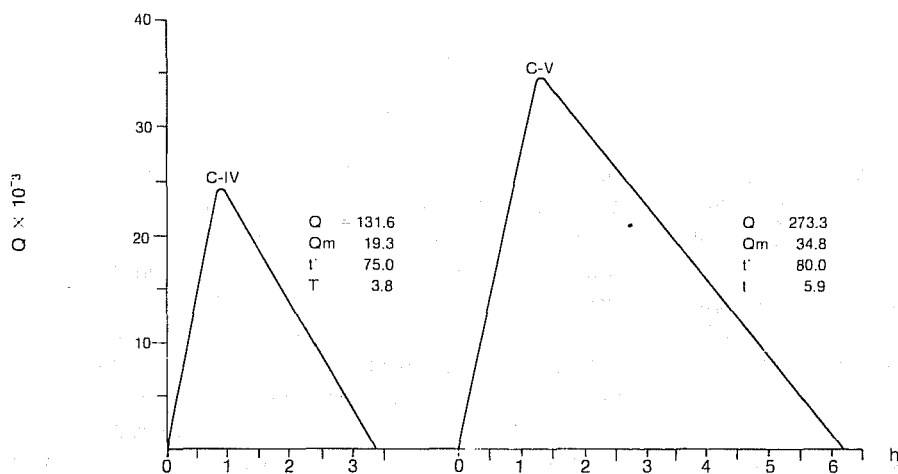
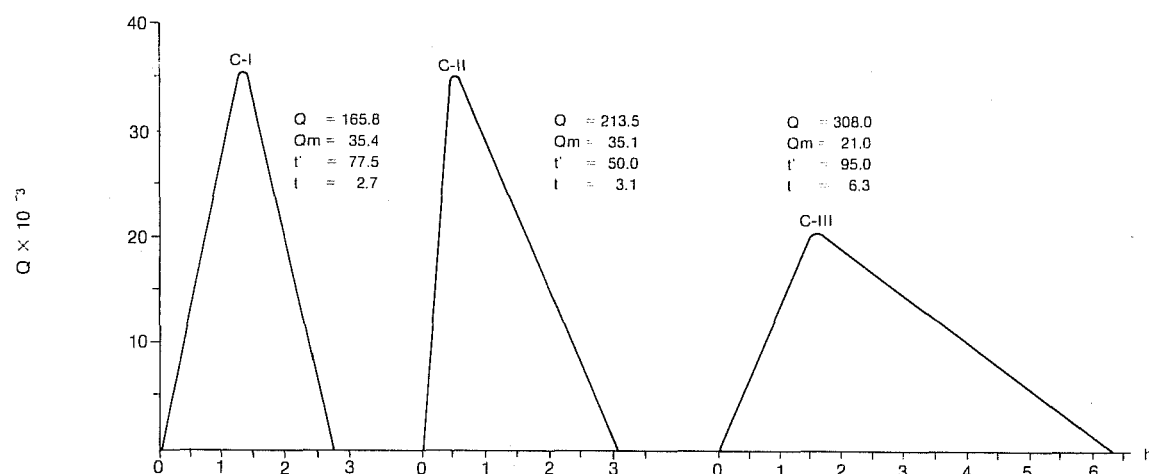
2. Características hidrológicas del sistema de cuencas

Cuenca	Area m ²	Perímetro m	Núm de cauces secundarios	Pendiente (S) cauce %	Longitud (L) cauce m	$L/\sqrt{S}$	Velocidad media de escurrimiento Km/h
I	149 102	2 057	5	15.5	475	120.6	0.32
II	192 982	1 851	12	13.4	725	197.7	0.32
III	280 383	2 486	8	8.9	900	300.2	0.18
IV	118 153	2 152	5	8.4	675	233.5	0.27
V	258 041	2 522	7	8.0	725	256.3	0.16

Las cinco cuencas son jóvenes y de drenaje simple, por lo que tienen velocidades lentas de descarga (véase cuadro 1), que se traducen en tiempos de respuesta relativamente grandes. Bajo condiciones no perturbadas, las cuencas de Cha-

mela tienen valores promedio de C y ϕ bajos, similares a los de otras comunidades no perturbadas (véase cuadro 5). Al hacer una comparación con estudios de cuencas no perturbadas y modificadas en una zona templada de México, se tiene

9. Hidrogramas unitarios (cinco cuencas)



Promedio de los parámetros:

Q gasto total (m³/s)
Qm gasto máximo (m³/s)
t' tiempo pico (min)
t tiempo total de escurrimiento (h)

3. Escurrimientos seleccionados para el cálculo del coeficiente de escurrimiento e índice de infiltración.

Cuenca	Fecha	(a) Lluvia total mm	(b)* Lluvia 1 h. mm	(d) Lámina escurrimiento mm	C=d/a %	C'=d/b %	ϕ mm/15 min	Observaciones
I	17/sep/83	57.7	55.84	0.80	1.38	1.43	23.50	El 100% de lluvia concentrada en 2.5 h., I=23.1 (1)
	12/jul/84	71.3	13.75	1.06	1.49	7.71	8.84	Lluvia previa de 9 h, con 25.3 mm, I=2.8 (2)
	06/sep/84	129.0	18.40	1.25	0.97	6.79	6.11	Lluvia previa de 18 h, con 86 mm, I=4.8 (3)
	14/sep/84	92.7	72.35	3.70	3.99	5.11	22.12	El 98% de la lluvia concentrada en 3 h, I=30.3 (4)
	21/sep/86	113.5	21.00	1.07	0.94	5.10	9.43	Lluvia previa de 11.5 h, con 58 mm, I=5.0 (5)
	01/oct/86	85.0	16.00	0.64	0.75	4.00	9.36	Lluvia previa de 10 h, con 60 mm, I=6.0 (6)
II	06/sep/84	130.4	18.73	0.64	0.49	3.42	6.85	(3)
	14/sep/84	98.8	74.78	1.36	1.51	1.82	25.33	(4)
	21/sep/86	111.9	21.00	0.44	0.39	2.10	9.66	(5)
III	14/sep/84	98.8	77.22	2.24	2.90	2.27	25.32	(4)
	21/sep/86	111.9	21.00	0.41	0.37	1.95	9.69	(5)
	20/oct/86	103.7	10.00	1.44	1.39	14.40	7.36	Lluvia previa de 14.5 h, con 51.5 mm, I=3.6
IV	17/sep/83	74.8	70.32	1.54	2.06	2.19	29.06	(1)
	20/sep/83	61.3	41.58	0.27	0.44	0.65	19.73	El 73% de la lluvia concentrada en 1 h, I=44.5
	06/oct/83	52.0	18.93	0.33	0.63	1.74	8.18	El 74% de la lluvia concentrada en 1 h, I=38
	12/jul/84	73.6	12.88	0.97	1.32	7.53	7.38	(2)
	06/sep/84	130.5	19.20	0.38	0.29	1.98	7.30	(3)
	14/sep/84	103.5	78.43	3.80	3.67	4.85	24.19	(4)
	21/sep/86	111.9	14.50	0.23	0.21	1.59	5.77	(5)
	06/sep/84	135.5	18.93	1.17	0.86	6.18	6.51	(3)
V	14/sep/84	103.5	78.43	5.33	5.15	6.80	22.66	(4)
	21/sep/86	111.9	11.00	1.34	1.20	12.18	7.16	(5)

C = Coeficiente de escurrimiento de la lluvia total.

C' = Coeficiente de escurrimiento de la lluvia de 1 h.

 ϕ = Índice de infiltración.

* Lluvia registrada 1 h antes del escurrimiento.

I = Intensidad de la lluvia (mm/h)

(Las fechas se han agrupado por cuencas, para una comparación de diferentes eventos en una misma cuenca)

el siguiente resultado: la cuenca del río Magdalena en el Distrito Federal, que es más grande que las de Chamela y con una mayor precipitación pluvial, mostró los siguientes rangos: de 1 a 3% para C, de 4 a 17 mm/10 min para ϕ , mientras que para Chamela, C fue de 1 a 3% y ϕ de 12 a 14.5 mm/15 min. En cuencas modificadas por la urbanización, como la de río Mixcoac también en el Distrito Federal, C estuvo entre 7 y 11% y ϕ fue de 0.5 mm/10 min, valores provocados por la ausencia de vegetación (Domínguez *et al.*, 1976).

El suelo en las cuencas es de textura predominantemente arenosa, lo que permite una capaci-

dad de infiltración alta. Sin embargo, la vegetación natural de Chamela contiene un elevado número de individuos y una cobertura de dosel de más del 100%, por lo que ésta participa como una primera etapa de pérdida de agua de lluvia por intercepción de la misma, cuyo promedio es de 30% (Cervantes, en preparación). El proceso evapotranspiratorio del ecosistema puede jugar un papel importante en la dinámica de los escurrimientos, ya que puede ser elevado si se considera la alta densidad de los árboles y la cobertura del dosel en la comunidad. Barradas y Fanjul (1985) estiman para Chámela una evapotranspiración

aproximada del 90%, a partir de un modelo para este fenómeno.

Un segundo nivel de intercepción que puede ser importante en Chamela es la hojarasca del suelo. Al haber una comunidad caducifolia, durante la caída foliar, al término de la época de lluvias, se forma un colchón de hojarasca de espesor considerable, con una tasa de descomposición baja, $k = 0.56$ (Martínez, 1983). Esto mantiene a lo largo del año, y aun en la época de lluvias, una capa considerable de hojarasca y de contenidos altos de materia orgánica (5.05%) (Solís, en preparación), que protegen al suelo de la lluvia, con lo que se conserva la estructura edáfica y, por tanto, la capacidad de infiltración (Greendland, 1967).

Estos aspectos se relacionan con el papel que puede desempeñar la vegetación para regular los escurrimientos y la capacidad de infiltración del suelo. La modificación de la cobertura forestal por otro tipo de vegetación, como pastizales o cultivos, aumenta en gran medida la producción de agua en los escurrimientos; el cuadro 5 muestra algunos ejemplos de estos incrementos.

Los coeficientes C y C' tienen valores diferentes para distintas tormentas en una misma cuen-

ca. Estos índices reflejan respuestas de escurrimiento dependientes de la distribución temporal de la tormenta, su intensidad, y si hubo o no tormentas previas. En todas las cuencas el valor más alto de C se relaciona con los valores más altos de ϕ (véase cuadro 4), según el patrón esperado en cuencas pequeñas. En las cinco estudiadas se observó que el C y ϕ más altos corresponden a tormentas, que a pesar de aportes totales no muy altos (50 -100 mm), están distribuidas en tiempos cortos (1 a 3 h), por lo que son lluvias muy intensas que incrementan con rapidez el valor de ϕ .

Para lluvias de gran aporte (<100 mm), pero distribuidas en tiempos más amplios (de 9 a 20 horas de lluvia acumulada), el C y ϕ son bajos, ya que la intensidad no es lo suficientemente alta para sobrepasar el valor de ϕ , (véase cuadro 3).

Los volúmenes totales escurridos por evento son muy variables dentro de una misma cuenca y entre ellas. El análisis del evento correspondiente al 6 de septiembre de 1984, con lluvia de 130 mm, no registró volúmenes y porcentajes elevados de lluvia total escurrida y los valores de C y ϕ fueron bajos para todas las cuencas. Sin embargo, para el evento del 14 de septiembre del mismo año, con lluvia de 100 mm, menor que la del día 6, se

4. Comparación del índice de infiltración y coeficiente de escurrimiento

Fecha	Cuenca	(a) Lluvia total mm	(b)* Lluvia 1 h mm	(d) Lámina de escurrimiento mm	$C = d/a$	$C' = d/b$	ϕ mm/15 min
06/sep/84	I	129.0	18.4 (0.31)	1.25	0.97	6.79	6.11
	II	130.5	18.7 (0.31)	0.64	0.49	3.42	6.85
	IV	130.5	19.2 (0.32)	0.38	0.29	1.98	7.30
	V	135.5	18.9 (0.32)	6.18	0.86	6.18	6.51
14/sep/84	I	92.7	72.4 (1.21)	3.70	3.99	5.11	22.12
	II	98.8	74.8 (1.25)	1.36	1.51	1.82	25.33
	III	98.8	77.2 (1.29)	2.24	2.27	2.90	25.32
	IV	103.5	78.4 (1.31)	3.80	3.67	4.85	24.19
	V	103.5	78.4 (1.31)	5.33	5.15	6.80	22.66
21/sep/86	I	113.5	21.0 (0.35)	1.07	0.94	5.10	9.43
	II	111.9	21.0 (0.35)	0.44	0.39	2.10	9.66
	III	111.9	21.0 (0.35)	0.41	0.37	1.95	9.69
	IV	111.9	14.5 (0.24)	0.23	0.21	1.59	5.77
	V	111.9	11.0 (0.18)	1.34	1.20	12.18	7.16

C = Coeficiente de escurrimiento de la lluvia total.

C' = Coeficiente de escurrimiento de la lluvia de 1 h.

ϕ = Índice de infiltración.

* Lluvia registrada 1 h antes del escurrimiento.

El valor en el paréntesis corresponde a la intensidad de lluvia (mm/h).

registró el mayor volumen y porcentaje de lluvia total escurrida para los cuatro años en todas las cuencas, así como valores de C y ϕ de los más altos. Esto se debe probablemente a que el evento del 6 de septiembre humedeció en gran medida al suelo, cerca del límite de su capacidad de infiltración. De esta manera, en el siguiente evento cercano (el del día 14), hubo una diferencia considerable entre la intensidad de la lluvia y la capacidad de infiltración del suelo, lo que se tradujo en un escurrimiento importante. Lo anterior indica el papel que juega el estado de humedad antecedente en el suelo, previo a un escurrimiento (véase cuadro 4). Para una misma fecha de tormenta, el valor de ϕ es similar para las cinco cuencas, observándose, además, que a un ϕ mayor corresponde una C mayor (véase cuadro 4).

La comparación de los hidrogramas unitarios promedio entre cuencas (véase ilustración 9), muestra que las III y V son las de mayor volumen y tiempo de descarga, así como las que presentan un tiempo pico más grande. Esto se debe a que son las cuencas más extensas, por lo que su área de captación de agua y su cobertura vegetal son mayores; esto a su vez, implica mayor intercepción. Las cuencas I y II son las de descarga más rápida y de volúmenes intermedios, porque ambas presentan las pendientes más pronunciadas, además de tener un tamaño intermedio. La IV es la de menor volumen y con un tiempo de descar-

ga corto, ya que se trata de la cuenca más pequeña. Todo esto demuestra que las modificaciones en la cobertura vegetal de las cuencas producirán cambios en los hidrogramas unitarios tanto en su forma como en sus valores promedio.

Cuando el tiempo promedio de descarga del gasto directo en cada cuenca en condiciones no perturbadas se relacionó con la pendiente S , y la longitud L , del cauce, en la relación L/S (véase ilustración 6), se obtuvo la siguiente secuencia comparativa entre cuencas: $I < II < IV < V < III$. De manera que la cuenca descarga con más rapidez si tiene una mayor pendiente y una longitud más corta; lo contrario sucede en las cuencas III y V. Sin embargo, esta secuencia puede ser alterada por procesos de perturbación, de manera que otras variables, como la deforestación y/o cambios en la estructura del suelo, pueden variar los valores actuales o esperados por la ecuación predictiva. Este cambio en dicha ecuación puede ser un indicador del efecto de perturbación y la magnitud de la misma.

Consideraciones finales

El estudio de cuencas experimentales pequeñas es de gran utilidad, ya que la relación lluvia-escurrimiento puede obtenerse con mayor precisión en condiciones naturales, así como los cambios que haya en esta relación bajo diversos

5. Valores de escurrimiento en bosques, pastizales y campos de maíz.

Tipo de Cobertura	Escurrimiento (% de lluvia)	Pendiente (%)	Localidad
Bosque	0.1	7.0	Abdijan, Costa de Marfil
Bosque	0.9	4.0	Bouake, Senegal
Bosque	1.0	1.2	Sefa, Senegal
Bosque	1.1	44.0	Usambara, Tanzania
Bosque	2.5	0.5	Ouagadougou, Alto Volta
Bosque	1.5	11.0	Chamela, México
Pastizal	1.4	32.5	Tengeru, Tanzania
Pastizal	3.0	6.0	Rodesia
Pastizal	4.9	7.0	Mpwapwa, Tangañica
Pastizal	5.3	3.0	Nigeria
Pastizal	7.0	3.5	Pretoria, Africa del Sur
Maizal	3.4	32.5	Tengeru, Tanzania
Maizal	14.6	3.0	Ibadan, Nigeria
Maizal	23.0	3.5	Nigeria
Maizal	23.0	6.0	Rodesia
Maizal	30.9	1.7	Sefa, Senegal

Los valores de escurrimiento están referidos al total de lluvia anual; a excepción de los valores de Chamela, los demás se tomaron de Maass (1985).

grados de perturbación. Este tipo de estudios es muy necesario para los diferentes ecosistemas y prácticas de manejo forestal y agropecuario en el país, ya que posibilitará el uso y conservación del suelo y del agua de una manera controlada, sostenida y predictiva, a fin de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las del futuro, en particular en las amplias zonas de ladera con que cuenta el territorio nacional.

Para el proyecto de productividad primaria y ciclo de nutrientes en Chamela, la aplicación de los diversos tratamientos experimentales agropecuarios y forestales deberá considerar el grado de susceptibilidad de cambio potencial en la respuesta hidrológica en cada cuenca. Esto permitirá la elección de la cuenca más conveniente y el tipo de tratamiento experimental. Por lo anterior, la determinación previa de la dinámica hidrológica y la relación lluvia-escurrimiento son básicas para la fase de experimentación en el manejo de cuencas ecológicas.

Referencias

- Barrada S.V. y L. Fanjul. "Equilibrio hídrico y evapotranspiración en una selva baja caducifolia de la costa de Jalisco", *Biótica*, 10, (2), México, 1985, 199-210.
- Bullok, S.H. *Climate of Chamela, Jalisco, and trends in the south coastal region of Mexico. Theoretical and Applied Climatology*, 1986 (en prensa).
- Castillo, O.A. *El recurso hídrico en el manejo integral de una cuenca semiárida en el estado de Hidalgo*. Tesis Colegio de Posgraduados, Centro de Edafología, Chapingo, México, 1985.
- De Ita Martínez, C. *Patrones de producción agrícola en un ecosistema tropical estacional en la costa de Jalisco*. Tesis, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 1983.
- Domínguez, M.R., V. Franco y A. Mijares. *Efectos hidrológicos de la urbanización*. SARH e Instituto de Ingeniería UNAM, México, 1976.
- Domínguez, M.R., V. Franco, J. Gracia y O. Fuentes. "Manual de diseño de obras civiles", *Hidrotecnia*. Sec. A, tema 1, caps. 2, 3 y 4. Instituto de Investigaciones Eléctricas, CFE, México, 1983.
- Greendland, D.J. *Soil structure and erosion hazard in Soil Conservation and Management in the Humid Tropics*. Greendland and Lal, John Wiley & Sons. Nueva York, EUA, 1977.
- Hamilton, L.S., King, P.N. *Tropical Forested Watersheds. Hidrologic and Solis Responses to Major Uses or Conversions*, Westview Press, Inc., EUA, 1983.
- Hewlett, J.D. y Nutter, W.L. *An Outline of Forest Hydrology*, University of Georgia Press, Athens, EUA, 1969.
- Hibbert, A.R. "Water yield changes after converting a forested catchment to grass", *Water Resources*, 5, 634-640, EUA, 1969.
- Hibbert, A.R. y Cunningham, G.B. *Streamflow Data Processing Opportunities and Applications*. International Symposium in Forested Hydrology. Proceedings of a National Science Foundation. Advanced Science Seminar. The Pennsylvania State University, Penn. Pergamon Press, Oxford, Nueva York, 1966.
- Linsley, R.K., Kohler, M.K. y Paulhus, J. *Hidrología para ingenieros*, 2a. ed. Mc. Graw-Hill, México, 1984.
- Lugo, A. y Brown, S. *Watershed Management in the Caribbean*, An Institute of Tropical Forestry Publications, Venezuela, 1985.
- Maass, M.M. Soil erosion and nutrient losses in seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. PhD Dissertation, University of Georgia, EUA, 1985.
- Martínez, Y.A. *Tasas de descomposición de materia orgánica foliar de especies arbóreas de selva, en clima estacional*, Tesis, Fac. de Ciencias, UNAM, México, 1980.
- Miranda, F. y Hernández, X.E. "Los tipos de vegetación de México y su clasificación", *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 28:19-179. Regiones Hidrológicas: 13, 14, 15, 16 y 17. Zona Pacífico Centro 1974. Actualización al Boletín Hidrológico # 41, tomo III. SARH. Dirección de Hidrología, México 1963.
- Seminario Internacional 1980. Producción agropecuaria y forestal en zonas de ladera de América Tropical. Turrialba, Costa Rica. The Rockefeller Foundation, N.Y.
- Swank, W.T. y Douglas, J.E. *Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine*. American Association for the Advancement of Science, EUA, 1974.
- Swank, W.T., J.E. Douglass y G.B. Cunningham. Changes in water yield and storm hydrographs following commercial clearcuttings on a southern Appalachian catchment. Proceedings of the Symposium of Hydrological Research Basins, Sondern. Landeshydrologie, Bern., 583-594, 1982.
- Swank, W.T. y Miner, N.H. "Conversion of hardwood-covered watersheds to white pine reduces water yield", *Water Resources Research*, 4, 5, EUA, 1968, 947-954.
- Swift, L.L.W. y Swank, W.T. "Long term responses of streamflow following clearcutting and regrowth", *Hydrological Science Bulletin des Sciences Hydrologiques*. 26, 3, 9. 1981.
- Taylor, A.B. y Shwarz, H.E. "Unit hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics", *Trans. Am. Geoph. Un.*, EUA, 33, 2, 1952.

Tsukamoto, Y. "Effects of forest litters on runoff cycle in a small experimental watershed", Pub. 117 de L'Association Internationale des Sciences Hydrologiques, Symposium of Tokyo, 1975, 487-495.

¹ Los autores manifiestan su agradecimiento a Santiago

Melchor Gutiérrez, técnico académico de la Estación Biológica Chamela, por su colaboración dinámica y constante en el campo; a Alfredo Pérez Jiménez, jefe de la Estación, por las facilidades aportadas, así como a todo el personal administrativo de dicha Estación por su colaboración.