

## Procedimiento para obtener hidrogramas de diseño en cuencas altas

Victor Toledo Reyes  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*En este trabajo se presenta un procedimiento para obtener hidrogramas de diferentes periodos de retorno a la salida de cuencas altas sin llanuras de inundación, con el fin de utilizarlos para el diseño de diversas obras hidráulicas, ya sea a la salida de las cuencas altas o en zonas más bajas con llanuras de inundación. En este último caso, el procedimiento puede ser muy útil como generador de hidrogramas de diseño de entrada para modelos numéricos de tránsito de avenidas. Los hidrogramas se obtienen repitiendo el cálculo de la convolución de hidrogramas unitarios con diferentes hietogramas de escurrimiento directo, hasta encontrar un hidrograma cuyo gasto pico sea del orden de los estimados mediante análisis de frecuencias de gastos máximos anuales. Los hietogramas se generan mediante números aleatorios con base en curvas de precipitación, duración, y periodo de retorno y valores de precipitación media. El procedimiento se aplica a las cuencas formadoras del río De la Sierra en Chiapas y Tabasco, México. Se presentan hidrogramas de diseño preliminares, debido a que fueron obtenidos sin datos pluviográficos de la zona, y con registros cortos de datos pluvio e hidrométricos.*

**Palabras clave:** hidrogramas de diseño, cuencas altas, generación de hietogramas, tormentas hipotéticas, análisis de frecuencias, hidrogramas unitarios, tránsito de avenidas.

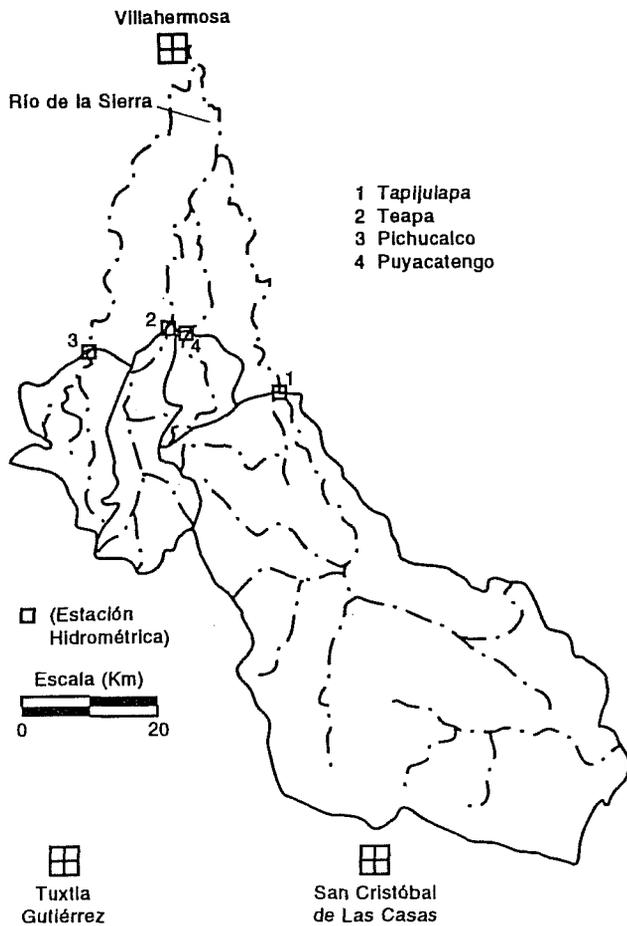
### Introducción

La obtención de hidrogramas de respuesta de cuencas altas a lluvias de una determinada duración y diferentes periodos de retorno, es fundamental para el diseño de obras hidráulicas de control de ríos, ya sea a la salida de las cuencas o en zonas más bajas. Tal es el caso del río De la Sierra (ver ilustración 1), en donde los escurrimientos provenientes de las cuencas altas provocan con frecuencia serias inundaciones, debido a la insuficiencia de obras de control del río. En estos casos, la utilidad de contar con hidrogramas de diseño a la salida de las cuencas formadoras del río estriba en que éstos pueden ser transitados hasta distintos puntos de interés, mediante modelos numéricos, para simular el comportamiento hidráulico de obras como bordos de protección y canales. De esta manera se podrá

proponer el diseño y la construcción de las obras hidráulicas más adecuadas y económicamente factibles, de tal forma que los daños por inundación sean minimizados.

Los hidrogramas de diseño se calculan tradicionalmente mayorando avenidas registradas; sin embargo, si los hidrogramas se requieren a la salida de cuencas altas que no tengan lagunas de inundación, se pueden usar hidrogramas unitarios y algún método para obtener hietogramas de tormentas de diseño. En el presente trabajo se propone un procedimiento de este tipo y se expone cada una de sus etapas aplicándolas a las cuencas altas del río De la Sierra, con el propósito de mostrar su utilidad. Los resultados que se presentan son preliminares debido a que no se contó con datos pluviográficos de la zona, y a la corta longitud del registro de datos pluvio e hidrométricos con que fueron obtenidos.

1. Cuencas generadoras del Río de la Sierra



simular el proceso lluvia-escorrentamiento en las cuatro cuencas generadoras del río De la Sierra: cuencas de los ríos Tapijulapa, Teapa, Pichucalco y Puyacatengo (ilustración 1). En el estudio se presentan cinco hidrogramas unitarios para cada una de las cuencas. Los hidrogramas unitarios se obtuvieron con el fin de utilizarlos como parte de un sistema de pronóstico hidrológico, y como base para obtener hidrogramas de salida de las cuencas para el diseño de diversas obras hidráulicas de control del río, como un canal de desvío en Villahermosa.

Para la identificación de los hidrogramas unitarios, (Espinosa *et al.*, 1992), se analizaron cerca de treinta tormentas con duración de uno a tres días, ocurridas de 1974 a 1983, y se utilizó el programa de cómputo HEC-1 del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América (Hydrologic Engineering Center, 1990). Se contó con datos pluviométricos de lluvia diaria acumulada y datos hidrométricos. Sin embargo, no se dispuso de datos pluviográficos. Para la distribución de la lluvia en el tiempo se emplearon curvas normalizadas de distribución temporal de la lluvia; esto es, por ensayo y error se encontró una distribución temporal que proporcionaba un ajuste aceptable del hidrograma calculado con el observado. El programa HEC-1 modifica iterativamente los parámetros de una función exponencial de la infiltración para lograr dicho ajuste, por lo que los hidrogramas unitarios identificados son confiables, no así los valores de infiltración.

En el siguiente cuadro se presentan los valores de las ordenadas de los hidrogramas unitarios obtenidos con lluvias de duración no mayor a un día, las cuales producen una respuesta rápida de las cuencas.

Obtención de tormentas hipotéticas

Las tormentas hipotéticas se obtienen ajustando una distribución de probabilidad a un conjunto de datos de precipitaciones máximas anuales, medidos en estaciones climatológicas ubicadas en un área

1. Hidrogramas unitarios utilizados. Ordenadas cada dos horas

Cuenca	Fecha	Ordenadas del hidrograma unitario (m <sup>3</sup> /s/mm)
Tapijulapa	Dic. 79	0, 63, 108, 78, 56, 40, 29, 21, 15, 11, 8, 6, 4, 3, 2, 1, 1, 1, 0
Teapa	Dic. 79	0, 14, 22, 13, 7, 4, 2, 1, 0
Pichucalco	Oct. 79	0, 1, 2, 5, 7, 8, 8, 7, 6, 4, 3, 2, 1, 1, 1, 0
Puyacatengo	Sep. 74	0, 3, 5, 4, 3, 2, 2, 1, 1, 1, 0

Procedimiento para obtener los hidrogramas de diseño

Los hidrogramas de diseño se obtienen mediante la convolución de hidrogramas unitarios con hietogramas generados mediante números aleatorios, con base en curvas de precipitación, duración, y periodo de retorno (P-D-Tr) y valores de precipitación media de tormentas hipotéticas de una determinada duración. El cálculo de la convolución se repite con un nuevo hietograma hasta que el gasto máximo del hidrograma obtenido sea del orden (con un error de 1%) de los estimados mediante análisis estadístico de gastos máximos medidos a la salida de las cuencas. Cada etapa se presenta a continuación.

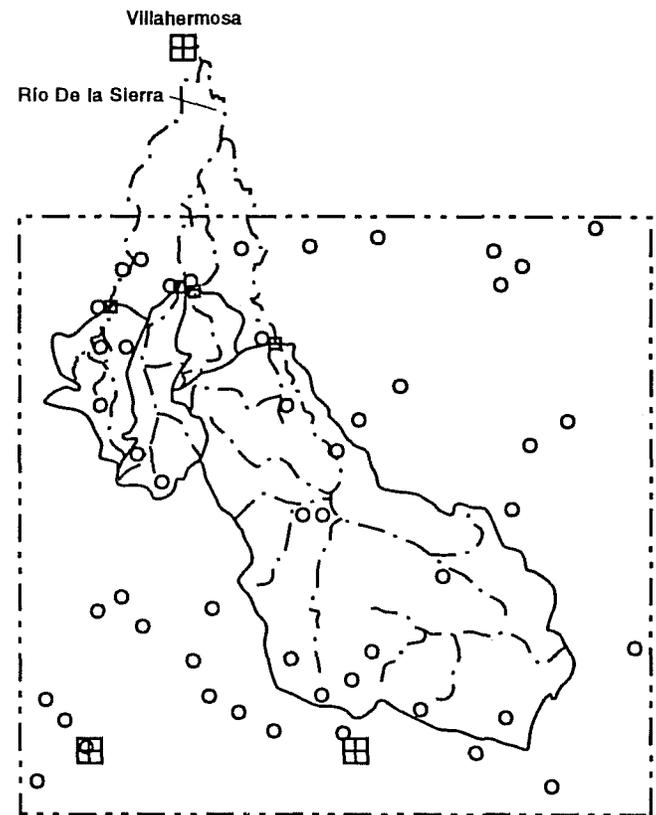
Hidrogramas unitarios utilizados

En 1992, en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, se realizó la primera parte del estudio *Tránsito de avenidas en la cuenca baja del río Grijalva* (Espinosa, *et al.*, 1992), que consistió en

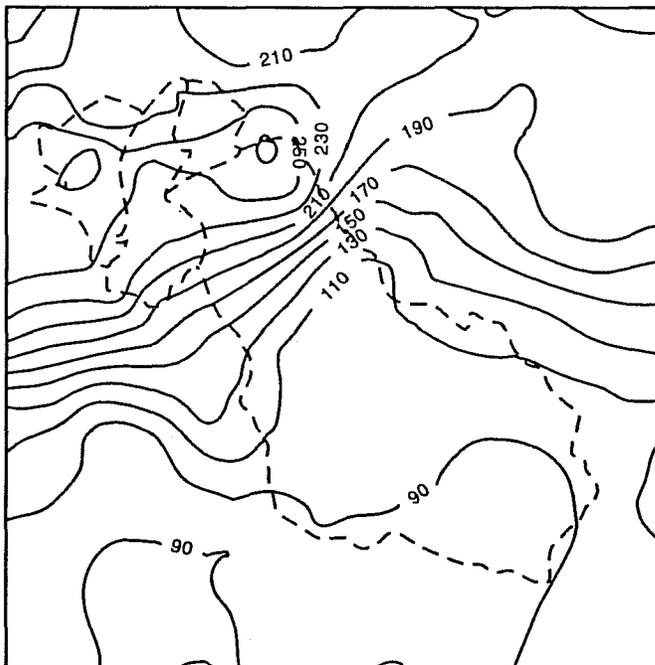
que contiene a las cuencas de interés (ver cuadro 2). En este trabajo se tomó la precipitación diaria acumulada máxima de los años 1968 a 1983 en cada estación. En otras palabras, para cada año se toma una tormenta hipotética, cuyos valores de precipitación acumulada diaria en cualquier punto de medición son mayores o iguales a cualquier tormenta real ocurrida ese año. Se utilizó la distribución Gumbel (Aparicio, 1989) para el ajuste estadístico de los datos en cada estación. Se escogió dicha distribución, ya que se ha encontrado que es la que mejor se ajusta a datos de intensidad de lluvias, en la mayoría de sitios (62%) que cuentan con datos en todo el país (SCT, 1991). En este trabajo, debido a la corta longitud del registro de datos, no se comparó la bondad de ajuste de los datos con distintas distribuciones. Con la finalidad de mostrar la aplicación del procedimiento, se toman los resultados obtenidos con dicha distribución.

Los valores de precipitación calculados en cada estación para cada periodo de retorno, permiten construir isoyetas y calcular la precipitación media que ocasionaría la tormenta hipotética. En la ilustración 2 se señalan con círculos la ubicación de las estaciones climatológicas utilizadas para obtener las tormentas hipotéticas. En las ilustraciones 3, 4, 5, 6 y 7 se muestran las isoyetas de lluvia máxima diaria (mm) para periodos de retorno de cinco, diez, veinticinco, cincuenta y cien años.

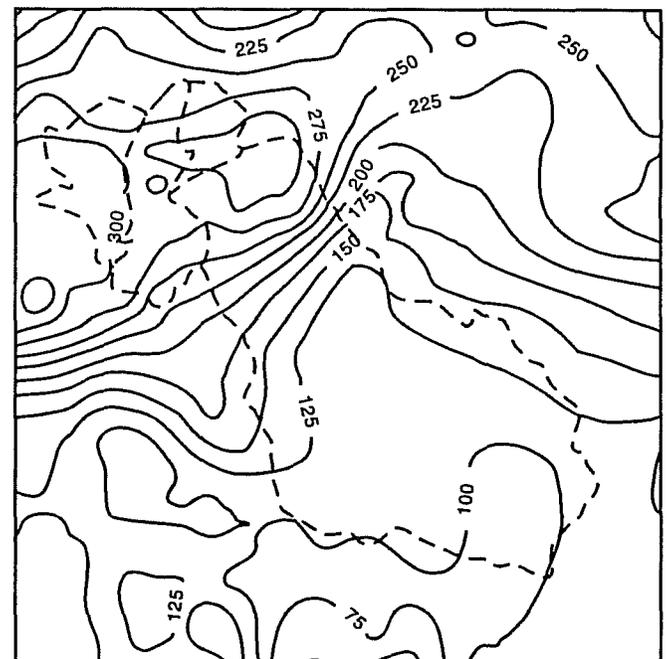
2. Ubicación de estaciones climatológicas utilizadas (50)



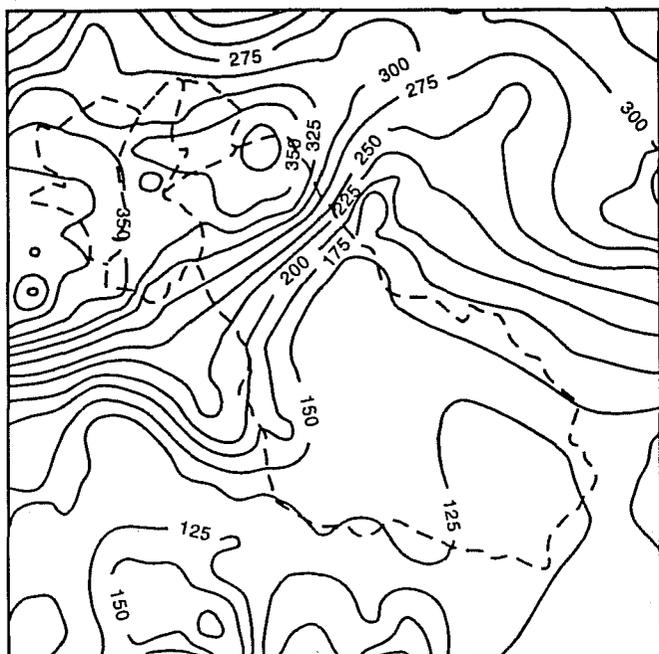
3. Lluvia máxima diaria (mm) Tr=5 años



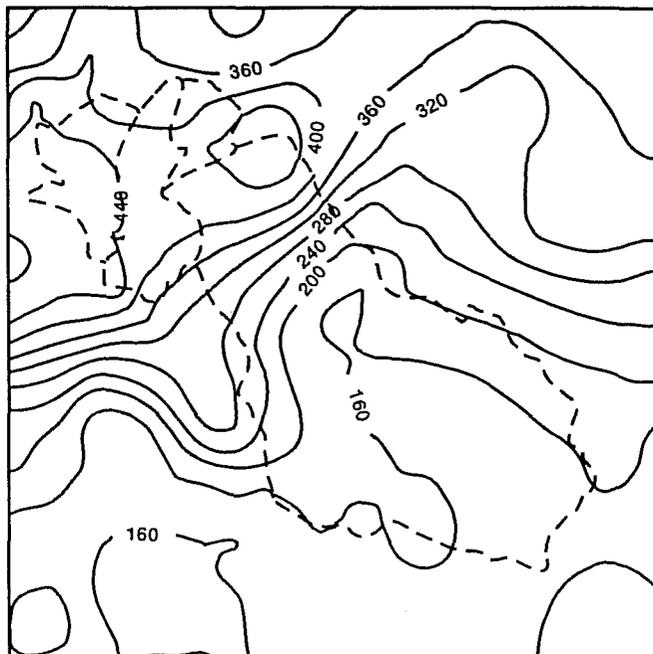
4. Lluvia máxima diaria (mm) Tr=10 años



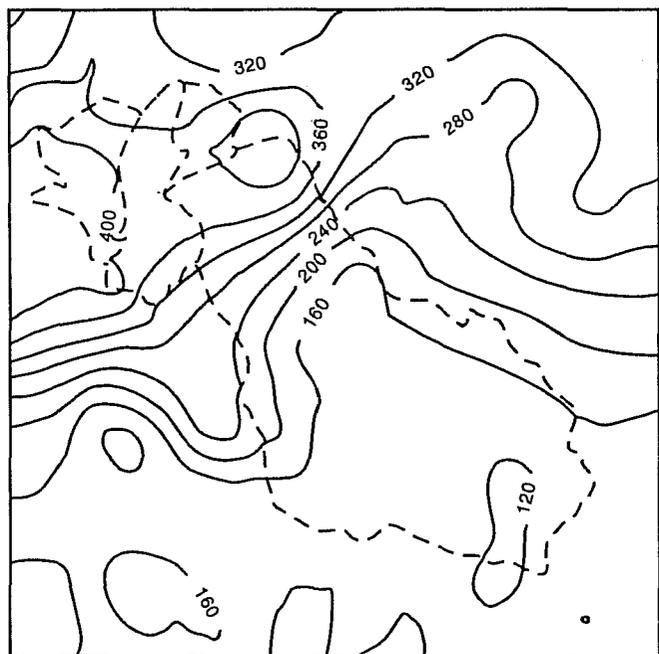
5. Lluvia máxima diaria (mm) Tr=25 años



7. Lluvia máxima diaria (mm) Tr=100 años



6. Lluvia máxima diaria (mm) Tr=50 años



Las isoyetas se construyeron mediante la estimación de valores puntuales en los nodos de una malla mediante el método Kriging (Collado,1989). Y la precipitación media se calculó promediando los valores puntuales, estimados con dicho método, dentro de cada cuenca. En el cuadro 2 se presentan los valores obtenidos.

*Distribución temporal de la precipitación media*

La precipitación media se distribuye aleatoriamente en el tiempo, con restricciones provenientes de curvas de intensidad, duración, periodo de retorno  $P(Dt, Tr)$ . Cada valor  $HI(i)$ ,  $i=1, \dots, n$ , del hietograma se obtiene con un número aleatorio, que debe cumplir las  $N$  siguientes condiciones:

$$HI(i) < P(Dt, Tr)$$

$$HI(i) + \dots + HI(i-k-1) < P(kDt, Tr) \tag{1}$$

$$HI(i) + HI(i-1) + \dots + HI(i-N-1) < P(NDt, Tr)$$

en donde  $P(Dt, Tr)$  es precipitación máxima acumulada en el tiempo  $Dt$  para un periodo de retorno  $Tr$ ,  $k = 2, \dots, N-1$ .  $Dt$ , es un incremento de tiempo

**2. Precipitación media (mm) que producen en cada cuenca las tormentas hipotéticas de distintos periodos de retorno**

Cuenca	Area km <sup>2</sup>	Precipitación media (mm)				
		Tr=5	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=100
Tapijulapa	3219	122	145	173	191	211
Teapa	476	235	279	333	371	411
Pichucalco	411	252	299	356	397	439
Puyacatengo	169	244	290	343	376	414

cualquiera que debe coincidir con el intervalo de discretización de los hidrogramas unitarios, y NDt es el tiempo máximo para el cual es confiable la extrapolación del valor de P. Las condiciones anteriores aseguran que en cualquier intervalo de tiempo, to, del hietograma generado, la suma de los valores HI(i) en ese tiempo no sobrepase el valor P(to,Tr). La suma de los valores HI(i) en todo el hietograma generado debe ser igual al valor de la precipitación media de la tormenta hipotética.

Las curvas de P(Dt,Tr) deben de ser obtenidas con datos de estaciones pluviográficas ubicadas dentro o cerca de las cuencas de estudio, o estar ubicadas en sitios con características climatológicas similares.

*Cálculo de curvas de P-D-Tr*

Para la obtención de curvas de P-D-Tr no se contó con datos de intensidad de lluvias en las cuencas de interés, por lo que se comparó la lluvia máxima diaria de todas las estaciones utilizadas, con la lluvia máxima diaria para diferentes periodos de retorno de estaciones de la cuenca del río Papaloapan, que cuentan con datos de intensidad de lluvias (SARH, 1977).

En el cuadro 3 se muestran los valores obtenidos para algunas estaciones. Nótese la similitud de valores de las estaciones tanto de Teapa y Santa María Jacatepec, como de Chenalo y Jayacatlán. Los datos de intensidad de lluvias de 1950 a 1977 de dichas estaciones se utilizaron para obtener curvas de P-

D-Tr con el método descrito por Aparicio (1989). Véase la ilustración 8.

*Cálculo de gastos máximos con datos hidrométricos*

En el cuadro 4 se presentan valores de gastos máximos estimados con datos hidrométricos, para distintos periodos de retorno, obtenidos mediante la distribución Gumbel (Aparicio, 1989). Al igual que en la obtención de las tormentas hipotéticas, como no se contó con registros de datos actualizados, no se comparó la bondad de ajuste de distintas distribuciones de probabilidad. Para los propósitos de este trabajo, se tomaron los resultados obtenidos con dicha distribución, sin darse una medida de su confiabilidad.

*Obtención de los hidrogramas de diseño*

El hidrograma de diseño, QD, se obtiene convolucionando un hidrograma unitario, HU, con un hietograma, HI, esto es

$$QD(k) = \sum_{j=1}^k HI(j) HU(k-j+1); k = 1, \dots, q \quad (2)$$

Donde q, es el número de valores del hidrograma QD, el cual está dado por  $q = n + n_{hu} - 1$ , n es el número de valores del hietograma y,  $n_{hu}$ , es el número de valores del hidrograma unitario. Este cálculo se puede repetir un gran número de veces en la computadora, cada vez con un nuevo hietograma, hasta que el gasto máximo del hidrograma calculado

3. Algunas estaciones en las cuencas de los ríos Papaloapan y De la Sierra con valores similares de lluvia máxima en 24 hs (mm) para distintos periodos de retorno .

CLAVE	LAT. N	LON. W	ALT.	EST. Y CUENCA	Tr(años)=	5	10	25	50	100
07030	16 48	92 42	2300	CHAMULA (Sierra)		90	110	135	153	171
07149	16 50	92 37	1600	CHENALHO (Sierra)		89	105	125	140	155
20046	17 25	96 50	1150	JAYACATLAN (Pap.)		85	104	127	145	162
07207	16 53	92 43	2156	LARRAINZAR (Sierra)		91	112	138	157	177
20007	17 01	96 06	2060	S.P. AYUTLA (Pap.)		95	111	131	145	160
07031	16 43	92 18	2030	CHANAL (Sierra)		74	84	97	106	115
20131	17 39	97 07	1900	SGO. APOALA (Pap.)		68	84	104	119	134
20137	17 43	97 33	2000	SGO. TEOTONGO (Pap.)		63	80	103	119	136
07082	17 26	93 6	-	IXTACOMITAN (Sierra)		247	284	330	365	399
27045	17 33	92 57	50	TEAPA (Sierra)		246	288	340	380	419
20042	17 52	96 12	42	S.MA. JACATEPEC (Pap.)		246	287	338	377	415
27068	17 33	92 56	-	PUYACATENGO (Sierra)		238	275	323	359	394
27070	17 22	92 45	-	OXOLOTAN (Sierra)		255	297	350	389	428
20014	18 01	96 17	42	CANTON (Pap.)		253	297	352	393	434

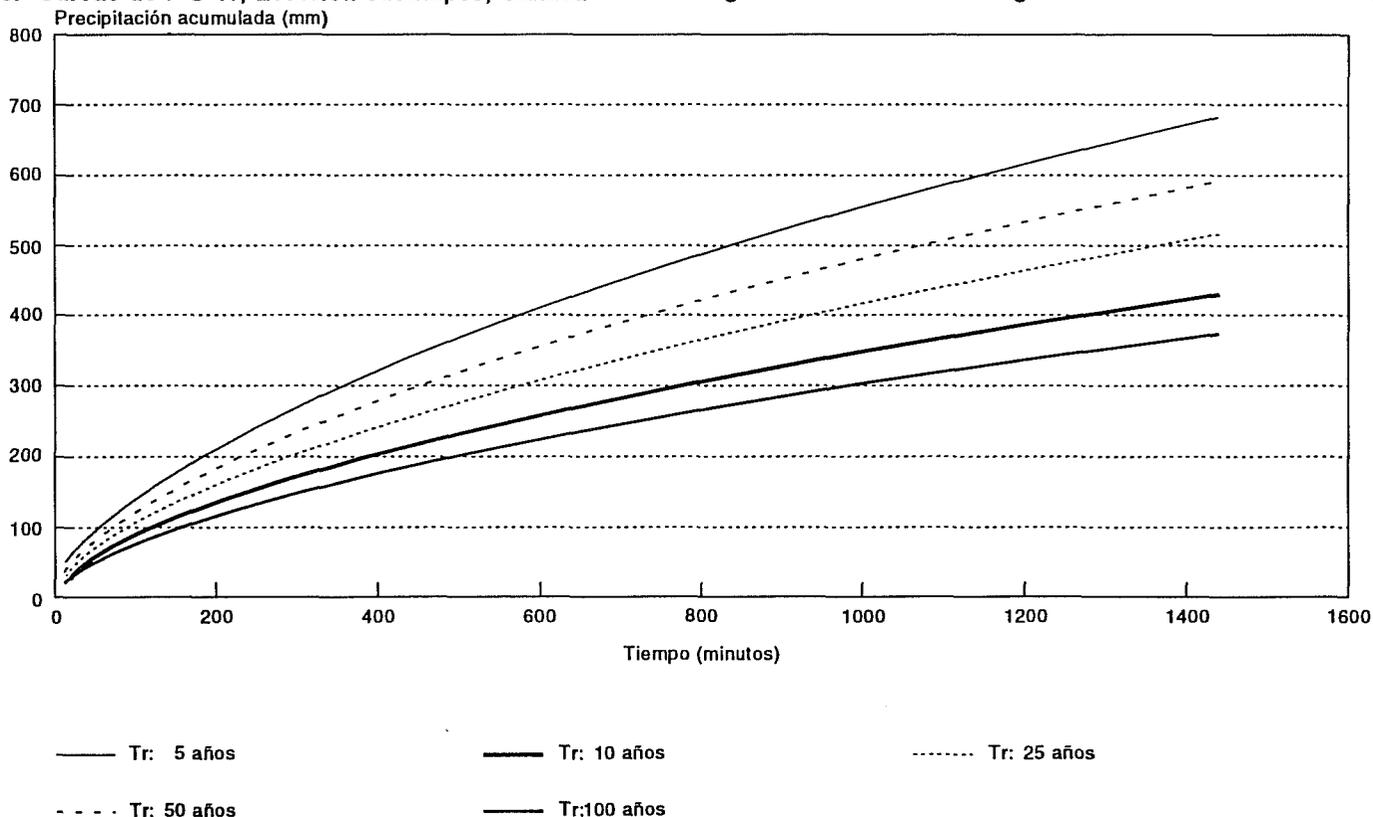
sea del orden (con un 1% de margen de error) de los gastos máximos estimados con datos de estaciones hidrométricas para el mismo periodo de retorno. Este margen de error también puede limitarse a que sea del orden del intervalo de confianza de la distribución que mejor se ajuste a los datos.

A los hietogramas se resta el porcentaje de lluvia que se infiltra, hipotéticamente, en la cuenca. Este porcentaje toma un valor inicial de 5% y se incrementa sucesivamente en 5% si no se obtiene el hidrograma con el margen de error, después de muchas iteraciones.

### Hidrogramas de diseño obtenidos

Nótese (ilustraciones 3, 4, 5, 6 y 7) que las cuencas más pequeñas, Teapa, Pichucalco y Puyacatengo, tienen una distribución de lluvia máxima diaria que puede considerarse homogénea en cada una de ellas; mientras que la cuenca del río Tapijulapa presenta un rápido descenso de la precipitación de la parte más baja hacia arriba y luego en la parte superior, aproximadamente dos tercios de la cuenca, la cantidad de lluvia es menor y su distribución puede considerarse homogénea, lo cual se refleja en la precipitación media en cada cuenca (véase cuadro 2).

### 8. Curvas de P-D-Tr, Estación Jacatepec, Oaxaca



### 4. Gastos máximos en cada cuenca para diferentes periodos de retorno

Cuenca	Datos	Gastos máximos (m <sup>3</sup> /s)				
		Tr=5	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=100
Tapijulapa	64-81	2612	3281	4127	4754	5377
Teapa	50-81	1455	1836	2317	2674	3028
Pichucalco	56-79	941	1138	1386	1570	1753
Puyacatengo	50-80	522	640	788	898	1008

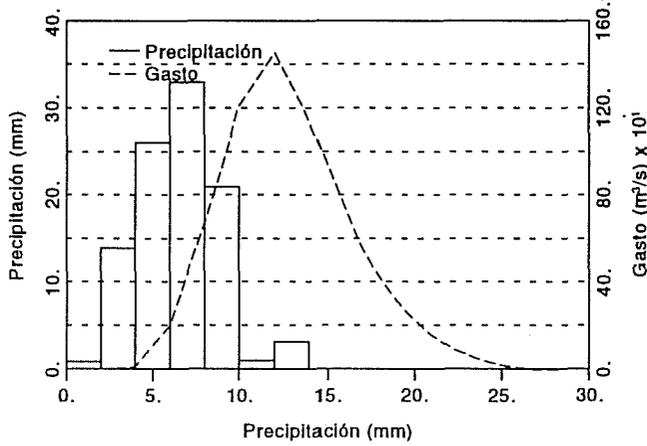
Tomando en consideración este patrón de lluvias se utilizaron las curvas de P-D-Tr obtenidas con datos de la estación Jacatepec, para obtener los hidrogramas de diseño en las cuencas pequeñas. En la cuenca Tapijulapa, se tomó un promedio pesado de datos de la estación Jacatepec y de la estación Jayacatlán, dándose un peso de un tercio a la primera y dos tercios a la segunda. Cada valor del hietograma se obtuvo con cinco condiciones tomadas de las curvas de P-D-Tr (N = 5, en las condiciones 1), y se utilizaron los hidrogramas unitarios mostrados en el cuadro 1.

En las ilustraciones 9 a 28 se presentan los hietogramas de lluvia efectiva y los hidrogramas de diseño obtenidos para periodos de retorno de cinco, diez, veinticinco, cincuenta y cien años en cada cuenca. En todos los casos se puede obtener un gran número de hidrogramas de diseño. Esto es,

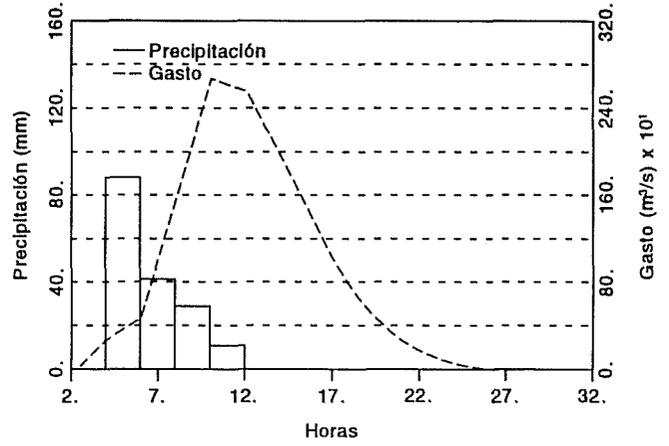
diferentes hietogramas pueden producir hidrogramas de aproximadamente el mismo gasto pico, volumen y tiempo base, variando en cada caso el tiempo pico, dependiendo de dónde se concentre la mayor cantidad de lluvia en el hietograma generado (ver ilustraciones 9, 15 y 26).

Esto puede ser aprovechado para el tránsito de los hidrogramas, ya que se pueden probar distintas combinaciones de hidrogramas de diseño variando el tiempo pico en cada cuenca, para encontrar la combinación que produzca la mayor avenida en determinado punto.

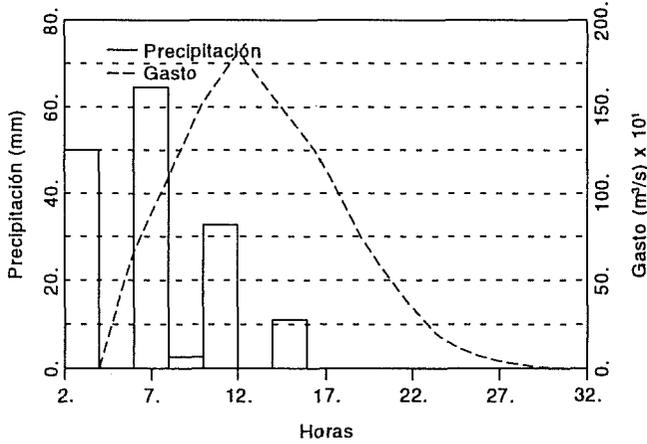
9. Teapa Tr=5 años



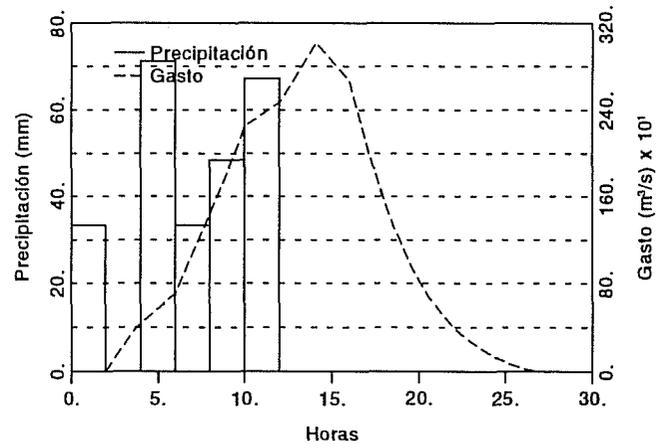
12. Teapa Tr=50 años



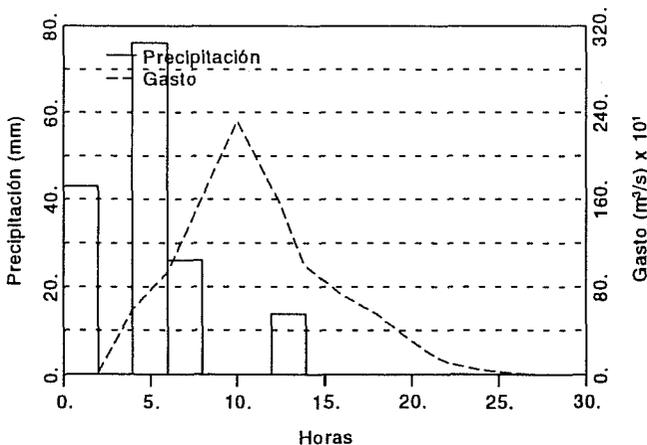
10. Teapa Tr=10 años



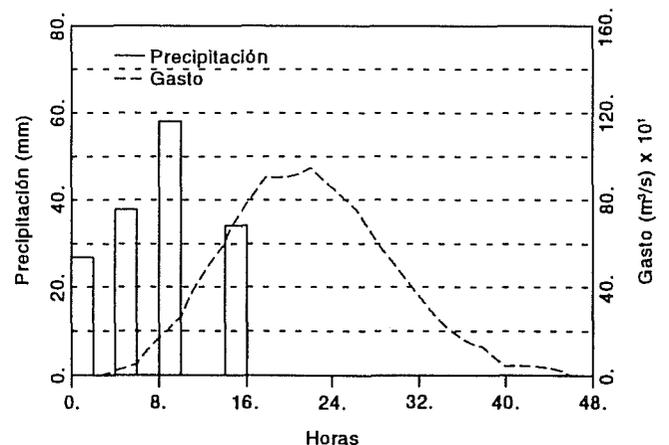
13. Teapa Tr=100 años



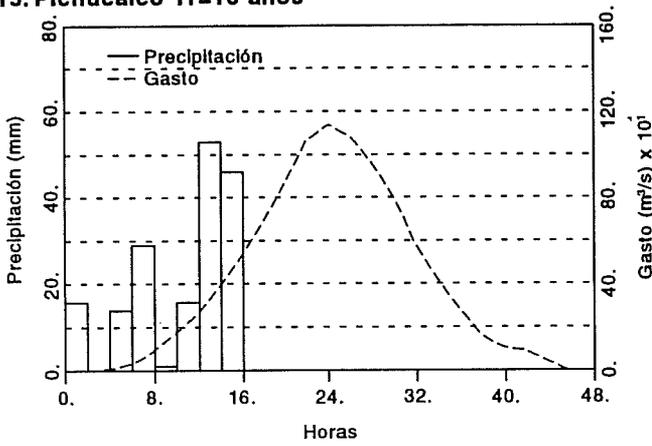
11. Teapa Tr=25 años



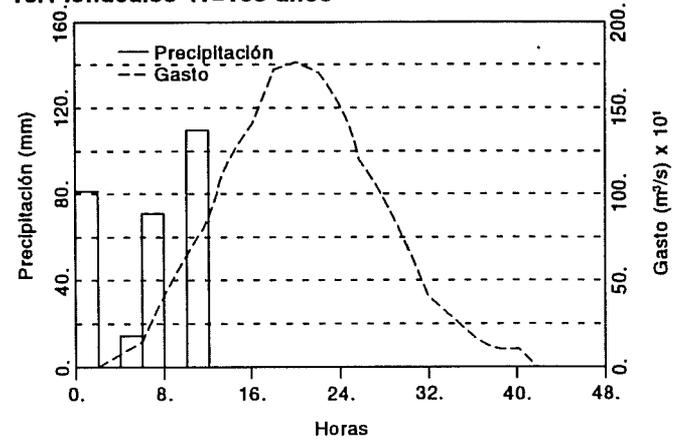
14. Pichualco Tr=5 años



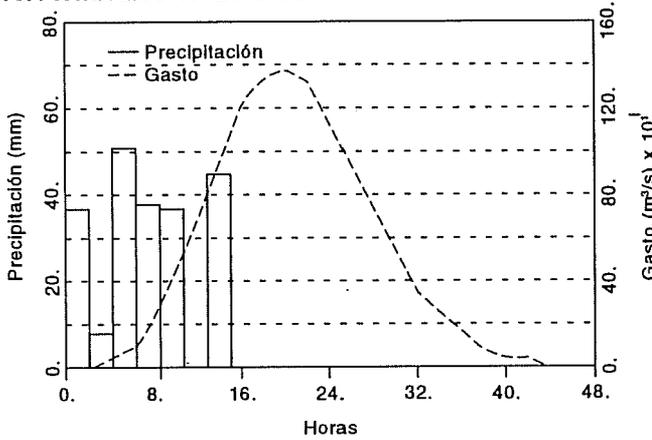
15. Pichualco Tr=10 años



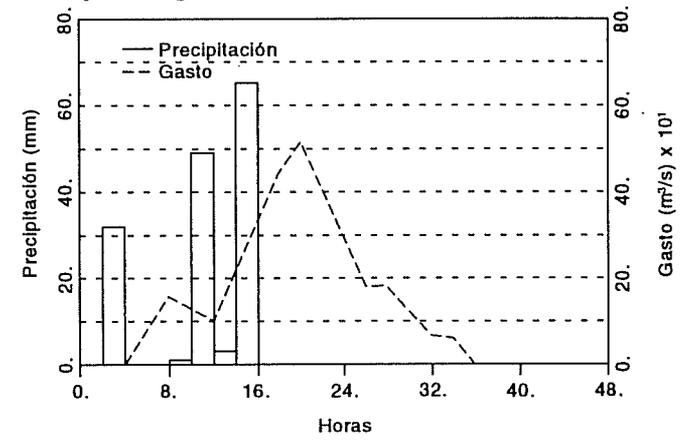
18. Pichualco Tr=100 años



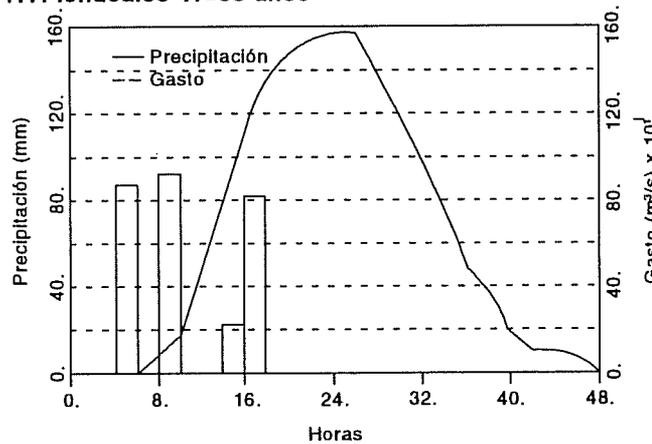
16. Pichualco Tr=25 años



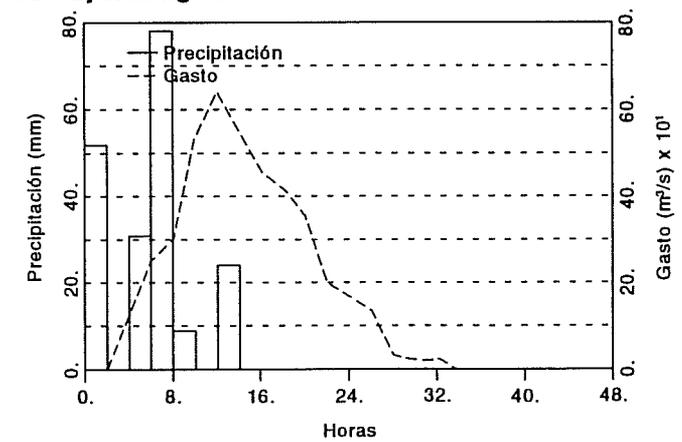
19. Puyacatengo Tr=5 años



17. Pichualco Tr=50 años



20. Puyacatengo Tr=10 años

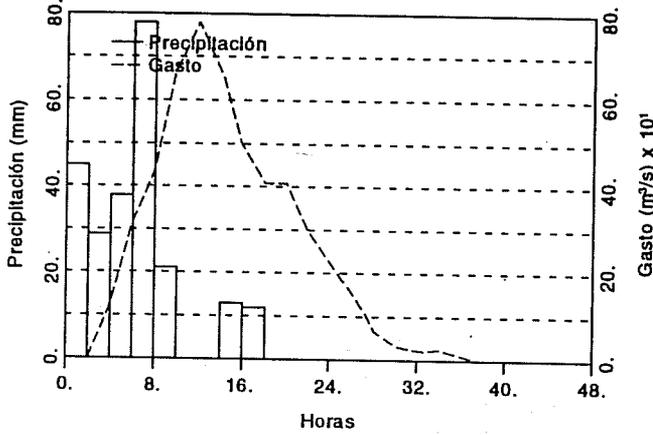


Asimismo, se pueden utilizar hidrogramas unitarios de respuesta menos rápida, que produzcan hidrogramas con un tiempo base mayor.

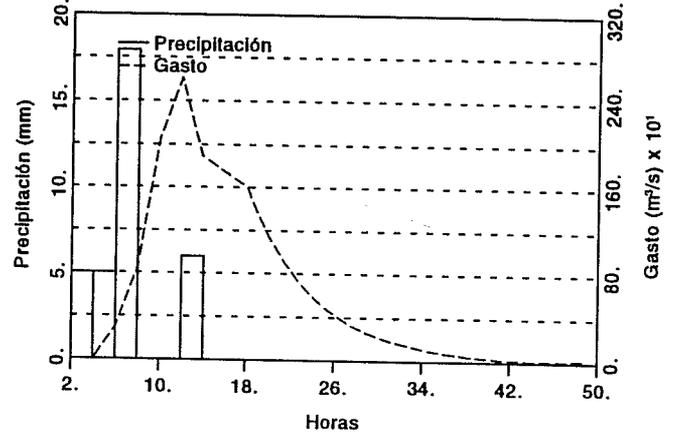
La lluvia efectiva (hipotética) en cada caso es del

orden del 60% del total de la lluvia media de las tormentas hipotéticas, esto es razonable ya que las tormentas reales que produjeron gastos máximos para periodos de retorno de cinco, diez y veinticinco

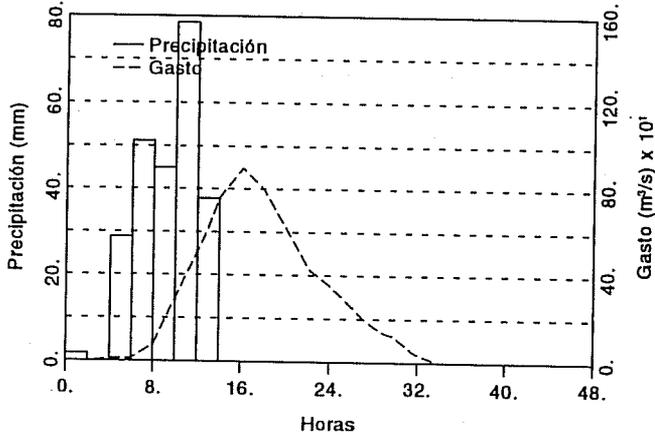
21. Puyacatengo Tr=25 años



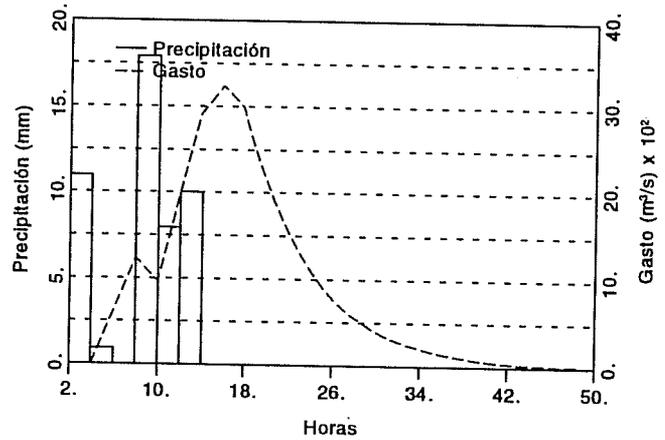
24. Tapijulapa Tr=5 años



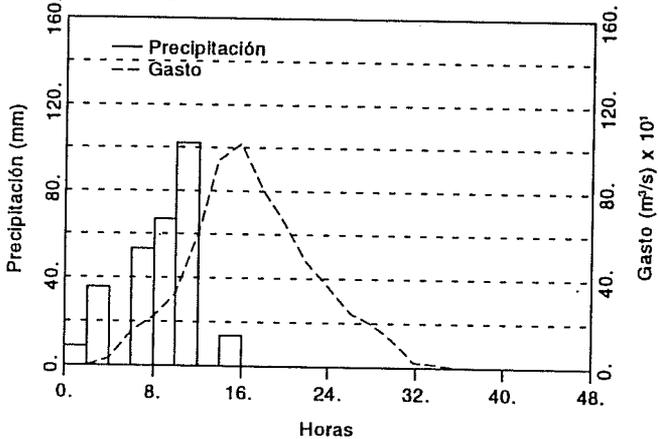
22. Puyacatengo Tr=50 años



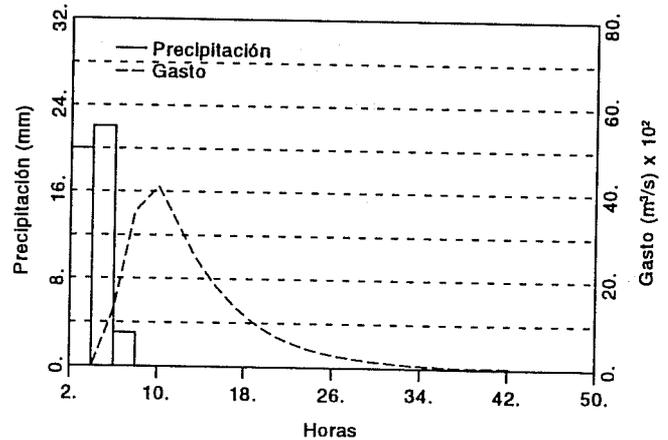
25. Tapijulapa Tr=10 años



23. Puyacatengo Tr=100 años



26. Tapijulapa Tr=25 años

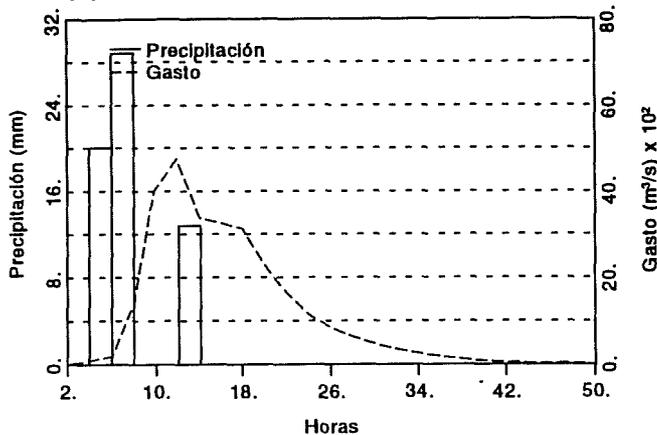


años, producen una lluvia media mucho más baja (Espinosa, *et al.*, 1992) en algunos casos hasta del orden de un 50%, de la que producirían las tormentas hipotéticas.

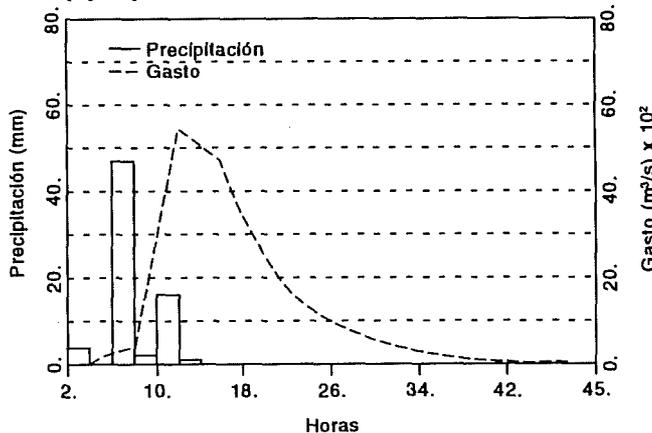
### Conclusiones

Se presenta un procedimiento que permite calcular hidrogramas a la salida de cuencas altas, esto es,

27. Tapijulapa Tr=50 años



28. Tapijulapa Tr=100 años



sin llanuras de inundación, para diferentes periodos de retorno; los cuales pueden ser transitados por las cuencas intermedias y bajas con el propósito de diseñar obras hidráulicas de control de ríos.

El procedimiento se aplicó a las cuencas formadoras del río De la Sierra, con el propósito de mostrar su utilidad, obteniéndose hidrogramas de diseño preliminares para periodos de retorno de cinco, diez, veinticinco, cincuenta y cien años. No se da una medida de la confiabilidad de los resultados que se presentan, debido a que fueron obtenidos sin datos pluviográficos de la zona de estudio, y a que por la

corta longitud de los registros de datos pluviométricos e hidrométricos no se hizo un análisis de bondad de ajuste de dichos datos con distintas distribuciones de probabilidad.

Para aplicar el procedimiento, se utilizaron datos de intensidad de lluvias de estaciones ubicadas en la cuenca del Papaloapan con lluvias máximas diarias similares a estaciones en el río De la Sierra, para los mismos periodos de retorno. Los hidrogramas en cada caso no son únicos. Diferentes hidrogramas generados con el procedimiento propuesto producen hidrogramas con aproximadamente el mismo gasto máximo, volumen y tiempo base, variando el tiempo pico; dependiendo si la lluvia se concentra al principio, en medio, o al final del hidrograma. Esto puede ser aprovechado en la simulación del tránsito de los hidrogramas, para encontrar la combinación de hidrogramas con distinto tiempo pico, que produzca la avenida más desfavorable, en un determinado sitio. Es en este último caso, donde el procedimiento que se propone muestra su mayor utilidad; como un generador de hidrogramas de diseño para modelos numéricos de tránsito de avenidas, con fines de diseño de obras hidráulicas de control de ríos.

Revisado: febrero, 1994

Referencias

Aparicio, J., 1989. Fundamentos de Hidrología de Superficie. México, editorial Limusa. 303 pp.  
 Collado, J., 1988. Estimación Óptima de la Precipitación Media con el Método Kriging. Ingeniería Hidráulica en México, III(4):34-35.  
 Espinosa, L., J. Magaña. V. Toledo, J. Aparicio, 1992. Tránsito de avenidas en la cuenca baja del río Grijalva. Primera parte: Modelo de lluvia escurrimiento en el río De la Sierra. Informe final, IMTA.  
 Hydrologic Engineering Center, 1990. HEC-1 Flood Hydrograph Package. US Army Corps of Engineers.  
 Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Comisión del Papaloapan, 1977. Datos hidrométricos 1977, boletín No. 24.  
 Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Subsecretaría de Infraestructura, 1991. Isoyetas de intensidad-duración-frecuencia, República Mexicana.

**Abstract**

Toledo, V. "Procedure to Obtain Design Hydrographs in High Catchments" *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, Vol IX, Num 2, pages 33-43, May-August, 1994.

*In this paper a procedure to obtain hydrographs for several return periods at the effluent of high catchments (without flood lagoons) is presented, in order to use them in design of hydraulics works, at the effluent of the catchments or in lower areas with flood lagoons. In the last case, such a procedure is useful as an input hydrographs generator for flow routing models. Hydrographs are obtained through unit hydrograph convolution with different rainfall excess hyetographs, until a hydrograph is obtained with a discharge peak similar to the estimated with maximum annual flow frequency analysis. Hyetographs are generated through random numbers base on rainfall depth, time, and return period curves, and mean rainfall values. The procedure is applied to the upper Sierra River catchments, in Chiapas and Tabasco, México. Preliminary design hydrographs are presented, due to the lack of pluviographic data from the study area, and to the use of short records of pluvio- and hydrometric data.*

**Key words:** design hydrographs, high catchments, hyetographs generation, hypothetical storms, frequency analysis, unit hydrographs, flow routing.