

114  
A  
114  
A  
114  
A

# **DRENAJE EN CUENCAS PEQUEÑAS**

Rolando Springall G.\*

\*Profesor investigador, Facultad de Ingeniería, UNAM

IdeI 143

6-X-71  
DONACION



FACULTAD INGENIERIA

Apunte  
233

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



\*612279\*

G.- 612279

G.- 612279

## RESUMEN

1. INTRODUCCION	1
1.1 Significado y propósito del estudio	1
1.2 Hidrología en una cuenca	2
1.3 Métodos de estudio	3
2. NOTACION	3
3. METODO DE CHOW	4
3.1 Fórmula propuesta	4
3.2 Factores que afectan al escurrimiento	6
3.3 Determinación del factor de escurrimiento, X	8
3.4 Determinación del factor climático, Y	8
3.5 Determinación del factor de reducción del pico, Z	8
3.6 Procedimiento de cálculo	10
4. METODO DE I-PAI WU	11
4.1 Modelo de Nash	11
4.2 Deducción de las fórmulas básicas	12
4.3 Cálculo de n	13
4.4 Determinación de $K_1$ y $t_m$	14
4.5 Desarrollo de hidrogramas instantáneos adimensionales	15
4.6 Procedimiento de cálculo	15
5. CONCLUSIONES	16
6. RECONOCIMIENTO	18
7. REFERENCIAS	18
FIGURAS	19

## RESUMEN

Se presentan dos métodos para calcular, por una parte, el gasto máximo y, por otra, el hidrograma de la avenida máxima que se puede originar con determinado periodo de retorno en cuencas pequeñas. Tienen la ventaja de que, conociendo las características hidrológicas de zonas adyacentes, se pueden aplicar a cuencas cercanas conociendo solo sus características físicas. Se muestra un plan de trabajo para hacer estudios de tipo climático tendientes a obtener zonas tipo que permitan aplicar tales métodos.

## ABSTRACT

Two methods are here presented for determining both the maximum flow and the hydrograph of the maximum flood, which may break out with a certain return period in small watersheds.

These methods excel others with regards to applicability on watersheds close to the one under study, provided their physical characteristics are known, as well as the hydrological characteristics, of the adjacent zones.

A working program is indicated for developing studies about climate; this would supply a classification of standard zones allowing the application of these methods.

---

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1 Significado y propósito del estudio**

Se ha estimado que un gran porcentaje del costo total del desarrollo de modernos caminos se gasta en la construcción y mantenimiento de estructuras, alcantarillas y puentes. En vista de esto, la Secretaría de Obras Públicas encargó al Instituto de Ingeniería el estudio de métodos que permitan mejorar la determinación de capacidad de drenaje de estas estructuras.

Los métodos que generalmente se emplean para determinar el área hidráulica del cruce involucran el uso de aproximaciones empíricas como la fórmula de Talbot. Estas aproximaciones no toman en cuenta muchos factores importantes en dicho problema, o bien tratan de considerarlos basándose en un coeficiente.

Por otra parte, al usar una aproximación empírica existe el peligro de que las limitaciones no sean tomadas en cuenta, o bien sean ignoradas. Por lo tanto, es necesario algún juicio o experiencia para aplicar los métodos empíricos, especialmente en la selección de los coeficientes. Esto es una grave limitación, pues aunque la experiencia del ingeniero es de gran valor, las condiciones generales varían sensiblemente de un problema a otro, lo que puede originar errores de importancia. Además, un proyectista sin experiencia, al usar aproximaciones empíricas tiende a sobrediseñar la estructura.

El propósito del presente estudio es proporcionar al ingeniero una

serie de criterios para determinar el gasto de diseño óptimo, con lo cual se podrá calcular la capacidad de las estructuras de drenaje, sin que se requiera una experiencia previa del proyectista. Estos criterios podrán aplicarse a cualquier área donde se disponga de datos fisiográficos y en el caso de no disponer de datos hidrológicos, correlacionarse con datos de este tipo en cuencas cercanas.

Aunque en sí los criterios para determinar el gasto máximo, e inclusive el hidrograma de la tormenta, son bastante prácticos y precisos, se requiere para su aplicación de datos fisiográficos y climatológicos. Los datos fisiográficos son fáciles de obtener, no así los climatológicos, de los cuales se dispone de muy pocos o ninguno. Teniendo en cuenta esto, el presente estudio se ha subdividido en dos etapas

1. Presentación de los métodos para el cálculo de gastos máximos en cuencas pequeñas
2. Análisis climatológico de diversas zonas de la República Mexicana.

En este primer informe se desarrolla solo la primera etapa con el objeto de poder fijar las bases de la segunda, en la cual el Instituto de Ingeniería sólo actuará como asesor.

## 1.2 Hidrología en una cuenca

Es conveniente aclarar lo que se entiende por una cuenca pequeña. La forma y la cantidad de escurrimiento para una cuenca pequeña están influidas principalmente por las condiciones físicas del suelo. Por lo tanto, el estudio hidrológico debe darle más atención a la cuenca misma. Para una cuenca muy grande, el efecto de almacenaje del cauce es importante, por lo cual deberá prestársele más atención a las características del cauce.

Es difícil distinguir una cuenca grande de una pequeña considerando solamente el tamaño de la misma. Desde el punto de vista hidrológico, dos cuencas del mismo tamaño pueden ser totalmente diferentes.

Una cuenca pequeña se define como aquella cuyo escurrimiento es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración y donde predominan las características físicas del suelo con respecto al cauce. Con esta definición, el tamaño de una cuenca pequeña puede variar desde unas pocas hectáreas hasta un límite que, para propósitos prácticos, Chow<sup>1</sup> considera de 250 km<sup>2</sup>.

El escurrimiento de una cuenca puede considerarse como el producto del ciclo hidrológico, el cual está influido por dos grupos importantes de factores: climatológicos y fisiográficos. Los primeros incluyen principalmente los efectos de la lluvia y la evapotranspiración. Los segundos pueden dividirse en características de la cuenca y del cauce. Las de la cuenca incluyen factores geométricos y físicos.

En cuencas pequeñas, los gastos máximos son causados generalmente por lluvias de corta duración. Una parte de la precipitación se pierde a través del proceso de interceptación, evapotranspiración e infiltración. La parte restante, que eventualmente llega a ser escurrimiento, es conocida como lluvia en exceso. La proporción entre esta última y la precipitación total depende de los factores climatológicos, así como de los fisiográficos tales como la condición de humedad del suelo, tipo de superficie del suelo y subsuelo, y de la vegetación.

El escurrimiento de una cuenca puede considerarse compuesto por dos partes: un flujo base, el cual proviene del escurrimiento subterráneo, y un escurrimiento directo, el cual es producido por la lluvia en exceso. A la salida de una cuenca puede medirse el escurrimiento que sale y construir su hidrograma correspondiente, el cual es la representación gráfica del gasto contra el tiempo. El hidrograma puede considerarse como la expresión integral de las características fisiográficas y climatológicas que gobiernan la relación entre la lluvia y el escurrimiento de la cuenca.

### 1.3 Métodos de estudio

En este trabajo se indican dos métodos para calcular el gasto máximo, uno debido a Chow y otro a I-Pai Wu<sup>2</sup>.

El método de Chow permite conocer el gasto máximo para un determinado periodo de retorno. El método de I-Pai Wu sirve para calcular además del gasto máximo, su hidrograma correspondiente. Los métodos se presentan tal como fueron deducidos por sus autores, lo cual implica que una serie de fórmulas solo serán válidas para la zona de estudios de cada autor. Esta es una limitación que se debe tener en cuenta si se quiere aplicar dichas fórmulas. En las conclusiones se analizan cuáles son esas fórmulas, sus ventajas y limitaciones.

## 2. NOTACION

A            área de la cuenca, en km<sup>2</sup>

d	duración total de la tormenta, en h
e	base de los logaritmos naturales
K	coeficiente de almacenaje de un recipiente lineal, en h
$K_1$	coeficiente de almacenaje de una cuenca, en h
L	longitud del cauce principal, en m
m	número de tramos de igual longitud
n	número de recipientes lineales; argumento de la función gamma
N	número de escurrimiento
P	lluvia en la zona en estudio para una duración dada de d horas, en cm
$P_b$	lluvia en la estación base para una duración dada de d horas, en cm
$P_e$	lluvia en exceso en la zona de estudio para una duración dada de d horas, en cm
$P_{eb}$	lluvia en exceso en la estación base para una duración dada de d horas, en cm
Q	gasto cualquiera del hidrograma, en $m^3/\text{seg}$
$Q_o$	gasto sobre la curva de recesión en el tiempo $t_o$ , en $m^3/\text{seg}$
$Q_b$	gasto base, en $m^3/\text{seg}$
$Q_d$	gasto de diseño, en $m^3/\text{seg}$
$Q_m$	gasto del pico del hidrograma del escurrimiento directo, en $m^3/\text{seg}$
$Q_1$	gasto sobre la curva de recesión en el tiempo $t_1$ , en $m^3/\text{seg}$
$q_m$	gasto del pico del hidrograma unitario, en $m^3/\text{seg}$ por cm de escurrimiento directo, para una duración de d horas de lluvia en exceso
S	pendiente media del cauce, en porcentaje
$S_m$	pendiente del tramo m
t	tiempo en que ocurre el gasto Q, en h
$t_p$	tiempo de retraso, en h
$t_m$	tiempo de pico, en h
V	almacenaje; volumen total de escurrimiento, en $m^3$
X	factor de escurrimiento, en $cm^3/h$
Y	factor climático
Z	factor de reducción del pico
$\Gamma(n)$	función gamma con argumento n

### 3. METODO DE CHOW

#### 3.1 Fórmula propuesta

El método de Chow fue deducido basándose en el concepto de hidrogramas unitarios e hidrogramas unitarios sintéticos. El desarrollo del método se presenta a continuación.

El gasto del pico del escurrimiento directo de una cuenca puede cal-

cularse como el producto de la lluvia en exceso por el gasto de pico de un hidrograma unitario, o sea

$$Q_m = q_m P_e \quad (1)$$

Considerando una lluvia en exceso igual a 1 cm por d horas y un área drenada de A km<sup>2</sup>, el equilibrio del escurrimiento será igual a 2.78 A/d. La relación del gasto de pico del hidrograma unitario  $q_m$  a 2.78 A/d, se define como factor de reducción del pico, Z

$$Z = \frac{q_m d}{2.78A} \quad (2)$$

y entonces

$$q_m = \frac{2.78AZ}{d} \quad (3)$$

Si se sustituye la ec 3 en la ec 1

$$Q_m = \frac{2.78AZ P_e}{d} \quad (4)$$

El factor  $2.78P_e/d$  puede remplazarse por el producto de dos factores: X y Y. X es el factor de escurrimiento expresado por

$$X = \frac{P_{eb}}{d} \quad (5)$$

El factor climático es Y. Considerando que  $P_e/P_{eb} = P/P_b$ , este factor se puede representar por

$$Y = 2.78 \frac{P}{P_b} \quad (6)$$

por lo tanto, la ec 4 puede escribirse

$$Q_m = AXYZ \quad (7)$$

Si el gasto base en el tiempo del gasto de pico es  $Q_b$ , entonces el de

diseño es

$$Q_d = Q_b + Q_m \quad (8)$$

### 3.2 Factores que afectan al escurrimiento

Los factores que afectan al escurrimiento, considerados en este método, pueden dividirse en dos grupos. Uno que afecta directamente a la cantidad de lluvia en exceso o escurrimiento directo, el cual consiste principalmente en el uso de la tierra, condición de la superficie, tipo de suelo, y la cantidad y duración de la lluvia. El otro grupo afecta la distribución del escurrimiento directo e incluye el tamaño y la forma de la cuenca, la pendiente del terreno y el efecto de retención del flujo por medio del tiempo de retraso. Esta distribución del escurrimiento directo está expresada en términos del hidrograma unitario\*.

Existe una cierta interdependencia entre los dos grupos de factores. Sin embargo, esta interdependencia es desconocida y, para propósitos prácticos, puede considerarse que no afecta a la relación entre el escurrimiento directo y la lluvia en exceso. Esta hipótesis es la base para poder establecer la ec 1.

Para tomar en cuenta el efecto del primer grupo, se tiene el número de escurrimiento, N. Este número N es un coeficiente de peso del escurrimiento directo, y es función del uso del suelo y de las características de este.

Los suelos se clasifican, según afecten las características del material en el escurrimiento, en cuatro tipos:

Tipo A. (Eskurrimiento mínimo). Incluye gravas y arenas de tamaño medio, limpias, y mezcla de ambas.

Tipo B. Incluye arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo.

Tipo C. Comprende arenas muy finas, arcillas de baja plasticidad, mezclas de arena, limo y arcilla.

Tipo D. (Eskurrimiento máximo). Incluye principalmente arcillas de alta plasticidad, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie.

---

\* El hidrograma unitario de una cuenca se define como el hidrograma del escurrimiento directo resultante de 1 cm de lluvia en exceso generada uniformemente sobre el área de la cuenca en una cantidad también uniforme durante un periodo específico de tiempo o duración.

Conocido el tipo de suelo de acuerdo con la clasificación anterior, y tomando en cuenta el uso que tenga el suelo, con la tabla 1 se podrá conocer el valor de N. Para condiciones de escurrimiento compuesto, se deberá determinar un número de escurrimiento pesado, considerando el área total unitaria. Por ejemplo, en una cuenca, el 37.4 por ciento del área es impermeable y el área restante es potrero, tipo B, el número de escurrimiento pesado se calcula como sigue:

	No de escurrimiento	Producto
Superficie impermeable	37.4 x 100	= 37.4
Potrero, tipo B	62.4 x 58	= <u>36.3</u>
		73.7

El número de escurrimiento pesado es 73.7.

TABLA 1. SELECCION DEL NUMERO DE ESCURRIMIENTO N

Uso de la tierra o cobertura	Condición de la superficie	Tipo de suelo			
		A	B	C	D
Bosques (sembrados y cultivados)	Ralo, baja transpiración	45	66	77	83
	Normal, transpiración media	36	60	73	79
	Espeso o alta transpiración	25	55	70	77
Caminos	De tierra	72	82	87	89
	Superficie dura	74	84	90	92
• Bosques naturales	Muy ralo o baja transpiración	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	36	60	70	76
	• Espeso, alta transpiración	26	52	62	69
	Muy espeso, alta transpiración	15	44	54	61
Descanso (sin cultivo)	Surcos rectos	77	86	91	94
Cultivos de surco	Surcos rectos	70	80	87	90
	Surcos en curvas de nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Cereales	Surcos rectos	64	76	84	88
	Surcos en curvas de nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Leguminosas (sembradas con maquinaria o al voleo) o potrero de rotación	Surcos rectos	62	75	83	87
	Surcos en curvas de nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curvas de nivel, pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel, normal	25	59	75	83
	Curvas de nivel, bueno	6	35	70	79
Potrero (permanente)	Normal	30	58	71	78
Superficie impermeable		100	100	100	100

Una vez conocido el número de escurrimiento, el valor de la lluvia en exceso,  $P_e$ , puede calcularse para un tirante de lluvia dada,  $P$ , a partir de la fig 1 o bien por la ecuación

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (9)$$

### 3.3 Determinación del factor de escurrimiento, X

Para calcular el valor de  $X$ , se requiere conocer la precipitación en exceso de la estación base,  $P_{eb}$ . Para conocer  $P_{eb}$ , se usa la ec 9 o bien la fig 1, basándose en la lluvia registrada en la estación base durante la tormenta de  $t$  horas,  $P_b$ . La estación base es donde se conoce la distribución de la lluvia respecto al tiempo, o sea, donde se tiene un pluviógrafo.

Para determinar  $P_b$ , se deberán conocer las curvas intensidad de lluvia-duración de la tormenta-periodo de retorno<sup>3</sup>, o sea, se requiere de un análisis climático de los registros. Se puede calcular para cada periodo de retorno una gráfica que ligue al tiempo de la tormenta y al factor  $X$  con base en el número de escurrimiento  $N$ , haciendo el cálculo más directo.

### 3.4 Determinación del factor climático, Y

Este factor trata de tomar en cuenta, por una parte, la forma como se distribuye el escurrimiento y, por otra, el hecho de que el sitio donde se quiere valuar el gasto está alejado de la estación base. Sirve para transportar la tormenta.

El valor de  $Y$  está dado por la ec 6. La liga entre la estación base y la zona en estudio se debe hacer tomando en cuenta las condiciones más desfavorables. Para tomar en cuenta la variación de  $P_b$  a  $P$ , o sea lo que llueve en la estación base a lo que llueve en la zona en estudio, Chow emplea un plano de isoyetas de precipitaciones diarias con periodo de retorno de 50 años. En última instancia, se puede hacer la liga con base en alturas de lluvias producto de la tormenta más desfavorable registrada.

### 3.5 Determinación del factor de reducción del pico, Z

El factor  $Z$ , representado por la ec 2, es igual a la relación entre el gasto

del pico de un hidrograma unitario debido a una lluvia de duración dada,  $d$ , y el escurrimiento de equilibrio, o sea el escurrimiento de la misma intensidad de lluvia pero de duración infinita.

El valor de  $Z$  se puede calcular como una función de la relación entre la duración de la tormenta  $d$  y el tiempo de retraso  $t_p$ . Dicho tiempo  $t_p$  se define como el intervalo de tiempo medido del centro de masa de un bloque de intensidad de lluvia al pico resultante del hidrograma. Para un hidrograma unitario instantáneo\* este tiempo de retraso es igual al tiempo de pico del escurrimiento (fig 2).

Debe aclararse que el tiempo de retraso así definido no corresponde exactamente al concepto clásico de tiempo de concentración\*\*. Para cuencas de gran tamaño y configuración de drenaje complejo, el escurrimiento de agua originado en la parte más remota de la cuenca, generalmente llegará a la salida demasiado tarde para contribuir al pico del flujo. De acuerdo con esto, el tiempo de retraso generalmente es menor que el tiempo de concentración para una cuenca grande. Para cuencas pequeñas y de configuración de drenaje simple, el tiempo de retraso se aproxima mucho al de concentración.

Por otra parte, el tiempo de retraso depende principalmente de la forma del hidrograma y de las características fisiográficas de la cuenca, y es independiente de la duración de la lluvia. Chow encontró para su zona en estudio que el tiempo de retraso se podía representar como

$$t_p = 0.0050 \left[ \frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.64} \quad (10)$$

lo cual aparece en la gráfica de la fig 3.

Conocido el valor de  $t_p$  de la cuenca en estudio, para cada duración de tormenta se puede calcular  $Z$ . La relación  $d/t_p$ , con  $Z$  obtenida por Chow, se muestra en la fig 4.

Teóricamente, la fig 4 indica que  $d$  no puede ser mayor que  $2t_p$ , ya que el gasto del pico ocurrirá antes de que termine la lluvia en exceso. Si  $d \geq 2t_p$ , el

- 
- \* El hidrograma unitario instantáneo es un hidrograma hipotético, cuya duración de lluvia en exceso se aproxima a cero como un límite, mientras se mantiene fija la cantidad de lluvia en exceso igual a 1 cm.
  - \*\* El tiempo de concentración es el requerido por el escurrimiento superficial para llegar de la parte más remota de la cuenca al punto en estudio.

hidrograma unitario alcanzará y mantendrá un máximo valor. En otras palabras,  $Z = 1$  para  $d/t_p = 2$ .

### 3.6 Procedimiento de cálculo

Para aplicar el método de Chow, se requieren los datos siguientes:

#### I. Datos fisiográficos

- Area de la cuenca por estudiar
- Longitud del cauce principal
- Pendiente media del cauce principal
- Tipos de suelo en la cuenca (subcap 3.2)
- Uso del suelo en la cuenca (tabla 1)

#### II. Datos climatológicos

- Curvas intensidad-duración-periodo de retorno para la estación base de la zona en estudio.
- Forma de ligar la estación base con la cuenca en estudio.

El procedimiento de cálculo para obtener el gasto máximo con un determinado periodo de retorno empleando el método de Chow es el siguiente:

- a) Con los datos del tipo y uso del suelo se calcula el valor de  $N$ , empleando la tabla 1
- b) Se escoge una cierta duración de lluvia,  $d$
- c) De las curvas intensidad-duración-periodo de retorno, con el valor de  $d$  asignado en b) y el periodo de retorno escogido, se calcula la intensidad de lluvia para esa tormenta. Multiplicando la intensidad de lluvia por la duración  $d$ , se obtiene la precipitación total  $P_b$ , en cm
- d) Con el valor de  $N$  calculado en a) y el valor de  $P_b$  en c), se calcula la lluvia en exceso en la estación base,  $P_{eb}$ , empleando la ec 9 o la fig 1
- e) Con el valor de  $P_{eb}$  calculado en el paso anterior y el valor de  $d$  escogido en b), se calcula  $X$
- f) Usando la ec 6 se calcula  $Y$
- g) Con la longitud y la pendiente del cauce, aplicando la ec 10 o la fig 2, se calcula el valor de  $t_p$

- h) Se calcula la relación  $d/t_p$ , y empleando la fig 4 se obtiene el valor de Z
- i) Aplicando la ec 7 se calcula el gasto
- j) Se repiten de c) a i) para otras duraciones de tormenta d
- k) Se representa, mediante una gráfica, el gasto contra sus duraciones de tormenta escogida. El mayor gasto es el de diseño
- l) Si la corriente es perenne, se le agrega al gasto máximo determinado en II, el flujo base  $Q_b$ .

#### 4. METODO DE I-PAI WU

##### 4.1 Modelo de Nash

El método de I-Pai Wu se basa en el modelo lineal propuesto por Nash<sup>4</sup> para obtener hidrogramas unitarios instantáneos.

El modelo de Nash asimila una cuenca a un sistema de n recipientes lineales iguales, con el mismo coeficiente de almacenaje, K, colocados en serie. Considera que

- a) Para un recipiente lineal, el almacenaje, V, está relacionado con el gasto, Q, mediante la expresión

$$V = KQ \quad (11)$$

- b) Para una entrada instantánea, el gasto que sale de un recipiente lineal es

$$Q = \frac{2.78V}{K} e^{-t/k} \quad (12)$$

Para un número n de recipientes lineales en serie con el mismo coeficiente de almacenaje, de acuerdo con la ec 12, el gasto que sale es

$$Q = \frac{2.78V}{K} \frac{\left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-t/k}}{\Gamma(n)} \quad (13)$$

El hidrograma instantáneo queda así definido por una expresión que contiene un solo término con dos parámetros, n y K, los que determinan la forma del

mismo. En las expresiones anteriores, el almacenaje,  $V$ , para una cuenca real se expresa

$$V = P_e A \quad (14)$$

#### 4.2 Dedución de las fórmulas básicas

De la ec 13, si se toma su primera derivada respecto al tiempo y se iguala a cero, se calcula el tiempo para el cual ocurre el gasto máximo; este se denomina tiempo de pico y es

$$t_m = (n-1) K \quad (15)$$

Tomando en cuenta las ecs 14 y 15, la ec 13 puede escribirse

$$\frac{Q t_m}{A P_e} = \frac{2.78 (n-1) R^{n-1} e^{-R}}{\Gamma(n)} \quad (16)$$

donde

$$R = \frac{t}{K} = \frac{t}{t_m} (n - 1) \quad (17)$$

La ec 16 es la fórmula general para los hidrogramas instantáneos empleada en este método. El miembro de la derecha de esta ecuación puede escribirse como  $f(n,t)$ , lo cual significa que es función de  $n$  y  $t$ .

Si recordamos que para  $t = t_m$ ,  $Q = Q_m$ , la ec 16 puede escribirse, tomando en cuenta lo anterior, como

$$\frac{Q_m t_m}{A P_e} = 2.78 f(n, t_m) \quad (18)$$

donde

$$f(n, t_m) = \frac{(n-1) R^{n-1} e^{-R}}{\Gamma(n)}$$

pero de acuerdo con la ec 17

$$R = \frac{t_m}{t_m} (n - 1) = n - 1$$

y entonces

$$f(n, t_m) = \frac{(n - 1)^n e^{1-n}}{\Gamma(n)} \quad (19)$$

Finalmente, de la ec 18 se obtiene la expresión para calcular el gasto máximo

$$Q_m = \frac{2.78A P_e}{t_m} f(n, t_m) \quad (20)$$

donde  $f(n, t_m)$  es definida por la ec 19.

Para aplicar la ec 20, se necesita conocer, además del área de la cuenca, la lluvia en exceso,  $P_e$ , el valor de  $n$ , y  $t_m$ . Por lo que respecta a  $P_e$ , se puede calcular empleando el criterio propuesto por Chow, usando la ec 9 o la fig 1. Tanto  $n$  como  $t_m$  dependerán de las características de los hidrogramas.

### 4.3 Cálculo de $n$

El valor de  $n$  se puede correlacionar con la curva de recesión de los hidrogramas de las cuencas. Por lo tanto, el valor de  $n$  se puede determinar de la curva de recesión y, recíprocamente, la curva de recesión puede determinarse del valor de  $n$ .

La curva de recesión del hidrograma se inicia desde el punto en que la entrada superficial al cauce cesa y el flujo se deriva totalmente del agua almacenada en el mismo. Si se considera una relación respecto al gasto que sale, la curva de recesión puede dibujarse como una línea recta en un papel semilogarítmico. El coeficiente de almacenaje  $K_1$  puede determinarse como

$$K_1 = \frac{t_1 - t_0}{L_n \frac{Q_0}{Q_1}} \quad (21)$$

La curva de recesión de un hidrograma adimensional puede expresarse

$$\frac{K_1}{t_m} = \frac{\frac{t_1 - t_0}{t_m}}{L_n \frac{Q_0/Q_m}{Q_1/Q_m}} \quad (22)$$

Tomando en cuenta la expresión que define el gasto para cualquier tiempo, ec 16, y combinándola con la ecuación anterior, se obtiene

$$\frac{K_1}{t_m} = \frac{1}{n-1} \frac{\log \frac{t_0}{t_1}}{\log \frac{Q_0}{Q_1}} \quad (23)$$

La ec 23 puede usarse para calcular el valor de  $n$ . Efectuando una solución gráfica de la ecuación anterior, como se muestra en la fig 5, se elimina la necesidad de conocer los gastos  $Q_0$  y  $Q_1$  en los tiempos  $t_0$  y  $t_1$ , respectivamente. En otras palabras, conociendo  $K_1/t_m$  se podrá encontrar  $n$ , usando la gráfica de la fig 5. De dicha figura, se observa que I-Pai Wu encontró, para su zona en estudio, que  $K_1/t_m = 4/n$ , aproximadamente.

#### 4.4 Determinación de $K_1$ y $t_m$

Como  $K_1$  y  $t_m$  son funciones directas de la forma de los hidrogramas de una cuenca, y a su vez el hidrograma representa las características intrínsecas de la misma, se puede pensar en relacionar estos valores con dichas características.

I-Pai Wu hizo una serie de correlaciones tratando de ver cuáles eran los parámetros de la cuenca que más influían en la variación de  $K_1$  y  $t_m$ , y llegó a la conclusión de que solo era necesario incluir el área de la cuenca,  $A$ , la longitud del cauce principal,  $L$ , y la pendiente de este,  $S$ . Encontró que

$$t_m = 4660 A^{1.085} L^{-1.233} S^{-0.668} \quad (24)$$

y

$$K_1 = 19\,300A^{0.937} L^{-1.474} S^{-1.473} \quad (25)$$

donde S se puede calcular por tramos, aplicando la fórmula

$$S = \left[ \frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad (26)$$

#### 4.5 Desarrollo de hidrogramas instantáneos adimensionales

El hidrograma instantáneo adimensional se define como una gráfica cuya ordenada es  $Q/Q_m$  y cuya abscisa es  $t/t_m$ . Tomando en cuenta las ecs 16 y 18, se llega a

$$\frac{Q}{Q_m} = \left( \frac{t}{t_m} \right)^{n-1} \left[ e^{-(n-1)} \right] \left( \frac{t}{t_m} - 1 \right) \quad (27)$$

que relaciona a  $Q/Q_m$  con  $t/t_m$  para cualquier valor de n. Esta ecuación se encuentra en forma de gráfica para diferentes valores de n en la fig 6.

#### 4.6 Procedimiento de cálculo

Si se analiza la expresión que proporciona el gasto máximo, ec 20, se ve que este es directamente proporcional a  $P_e$ , e independiente de la duración de la tormenta, d, la cual está implícita en  $P_e$ . Por lo tanto, se requiere conocer la duración más desfavorable; esta última, según I-Pai Wu, se aproxima al valor del tiempo de pico.

Para aplicar el método de I-Pai Wu se requieren los datos siguientes:

##### I. Datos fisiográficos

Area de la cuenca por estudiar

Longitud del cauce principal

Pendiente media del cauce principal

Tipos de suelo en la cuenca (subcap 3.2)

Uso del suelo en la cuenca (tabla 1)

## II. Datos climatológicos

Curvas intensidad-duración-frecuencia de la zona en estudio

Liga entre la estación base y la cuenca en estudio.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- a) Con el tipo y uso de suelo, se calcula el valor de  $N$ , empleando la tabla 1
- b) Se escoge la duración de la tormenta más desfavorable,  $d$
- c) De las curvas de intensidad-duración-frecuencia, con la duración escogida en el paso anterior y la frecuencia con que se desea calcular el gasto máximo, se determina la intensidad de lluvia. Multiplicando la intensidad de lluvia por su duración correspondiente, se obtiene la precipitación total,  $P_b$ , en cm
- d) Con el valor de  $N$  calculado en a) y el valor de  $P_b$  del inciso anterior, se calcula la lluvia en exceso,  $P_{eb}$ , empleando la ec 9 o la fig 1
- e) Si la estación base no está en la cuenca en estudio, se deberá transportar la tormenta en forma similar a como se efectúa en el método de Chow al emplear el coeficiente  $Y$ . Así, se obtiene

$$P_e = P_{eb} \frac{P}{P_b}$$

- f) Con las características de la cuenca se calculan  $K_1$  y  $t_m$  empleando las ecs 24 y 25
- g) Con  $K_1/t_m$  y usando la fig 5, se calcula  $n$
- h) Conocida  $n$  se calcula  $f(n, t_m)$  con la ec 19
- i) Se deduce el gasto máximo a partir de la ec 20
- j) Con  $Q_m$ ,  $t_m$  y  $n$  se obtiene el hidrograma correspondiente empleando los hidrogramas instantáneos adimensionales en la gráfica de la fig 6.

## 5. CONCLUSIONES

Una vez expuestos los métodos para calcular el gasto máximo, se deduce que realmente son sencillos y prácticos de aplicar. El problema que se debe afrontar es la escasez de estudios climatológicos existentes en la República Mexicana sobre curvas de intensidad-duración-frecuencia y tiempos de retraso o picos de hidrogramas.

Una de las ventajas principales del método de Chow es la posibilidad

de usarlo con conocer solo algunos parámetros y datos, que no son necesariamente los que exige el método. En caso necesario, se pueden efectuar combinaciones empleando otras fórmulas para deducir los diversos parámetros, tratando siempre de formarse una idea del resultado.

Si se realiza el método de Chow, se observa que para poderlo aplicar se requiere obtener, para la zona en estudio, por una parte, la fórmula del tiempo de retraso que sustituya a la ec 10 propuesta por el autor del método y por otra, la liga entre  $Z$  y  $d/t_p$ . Realmente, parece que lo más importante es  $t_p$  y no la liga entre  $d/t_p$  y  $Z$  que varía poco y no origina errores muy grandes.

El cálculo del tiempo de retraso implica el análisis de una serie de hidrogramas. Afortunadamente, se cuenta con bastantes registros al respecto para poder efectuar el estudio. Por otra parte, deducir el tiempo de retraso involucra conocer el tiempo de pico, ya que de acuerdo con su definición cumplen la relación.

$$t_m = t_p + \frac{d}{2}$$

Esto indica que al mismo tiempo se puede deducir una expresión que sustituya a la ec 24 propuesta por I-Pai Wu. Si se observa la diferencia que existe entre la expresión propuesta para  $t_p$  (ec 10) y la de  $t_m$  (ec 24), se ve la importancia de deducir dichas expresiones para cada zona en estudio.

Otra expresión por deducir para aplicar el método de I-Pai Wu es la relación entre  $K_1$  y las características de la cuenca. El valor de  $K_1$  se deduce de los hidrogramas aplicando la ec 21.

Parece que el camino lógico a seguir para poder aplicar estos métodos, debido a los pocos estudios climáticos existentes, es tratar de hacer un análisis preliminar a este respecto<sup>5</sup>. Esto corresponde a la etapa II de este estudio, y puede sintetizarse en la forma siguiente:

- a) Recopilación de datos hidrológicos
- b) Arreglo de los datos y procedimiento
- c) Cálculo de curvas de intensidad-duración-frecuencia
- d) Correlación entre estaciones pluviométricas para determinar zonas homogéneas
- e) Obtención de tiempos de pico y su relación con las características fisiográficas de las cuencas

#### f) Análisis de hidrogramas.

El plan anterior se deberá efectuar, en principio, en diversas zonas del país donde se disponga de información suficiente, a partir de las cuales se tratará de cubrir toda la República Mexicana. Probablemente, muchas zonas del país no se podrán analizar por falta de datos.

Hacer estudios de este tipo proporcionará los elementos necesarios para efectuar los cambios requeridos en los métodos presentados y poderlos aplicar con más aproximación. Además, permitirá hacer diversos análisis tendientes a encontrar otro tipo de relaciones lluvia-escurrencimiento, que se adapte mejor a las necesidades actuales.

### 6. RECONOCIMIENTO

El Ing. José Luis Sánchez Bribiesca hizo la revisión crítica del manuscrito.

### 7. REFERENCIAS

1. Ven Te Chow, *Hydrologic Determination of Waterway Areas for the Design of Drainage Structures in Small Drainage Basins*, Boletín No 462, Universidad de Illinois (1962)
  2. I-Pai Wu, *Designs Hydrographs for Small Watersheds in Indiana*, Journal of the Hydraulics Division ASCE, Vol 89, No HY6 (nov 1963)
  3. Ch. O. Wisler y E. F. Brater, *Hidrology*, John Wiley & Sons, Nueva York (1963)
  4. Ven Te Chow, *Handbook of Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book, Co. (1964)
  5. R. Springall, *Estudio de la cuenca del río Cerro Gordo, Gro.*, Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe No 199, México, D. F. (nov 1968)
-

G.- 612279

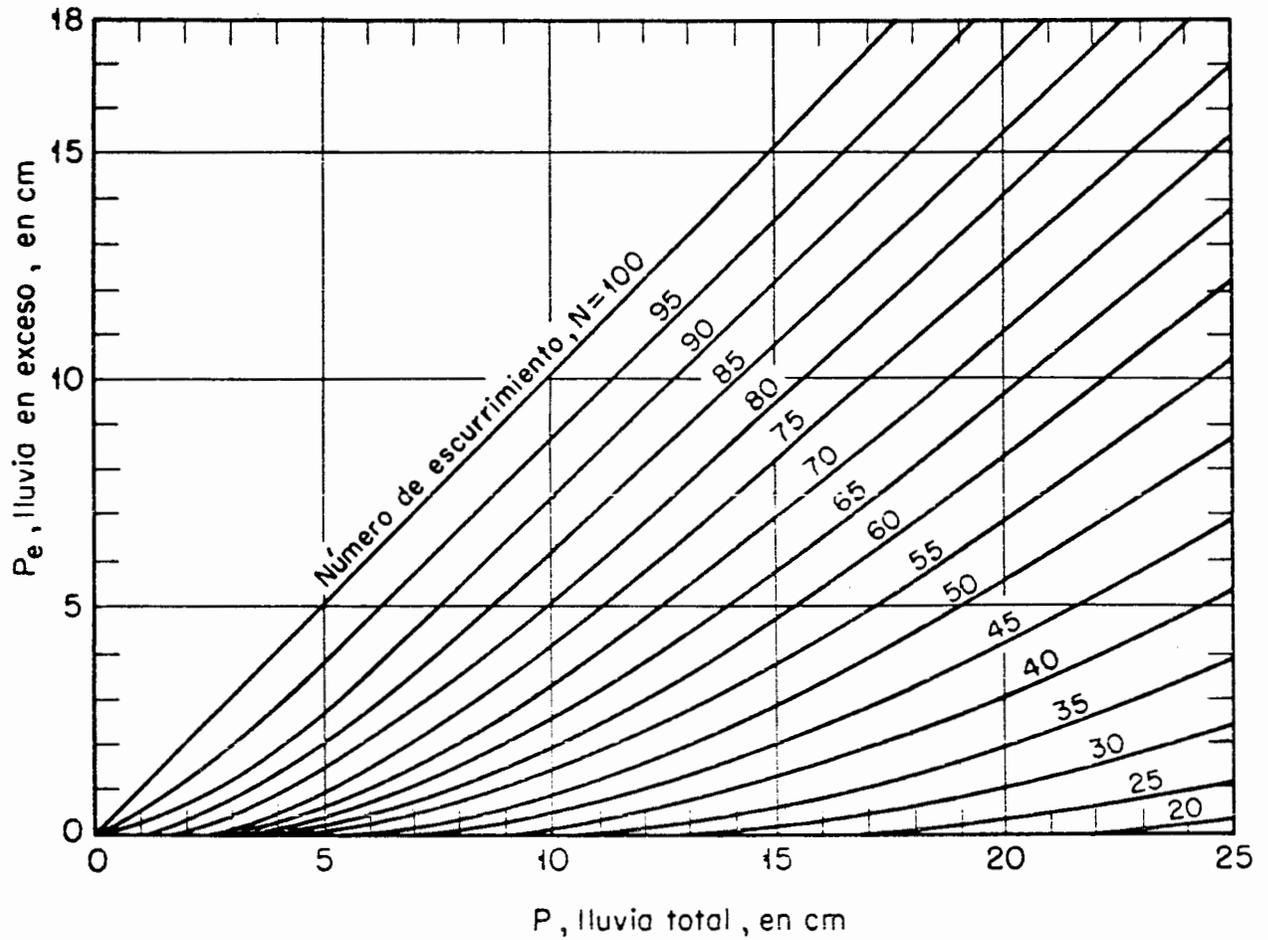


Fig 1. Relación entre la lluvia total y la lluvia en exceso para diferentes números de escurrimiento

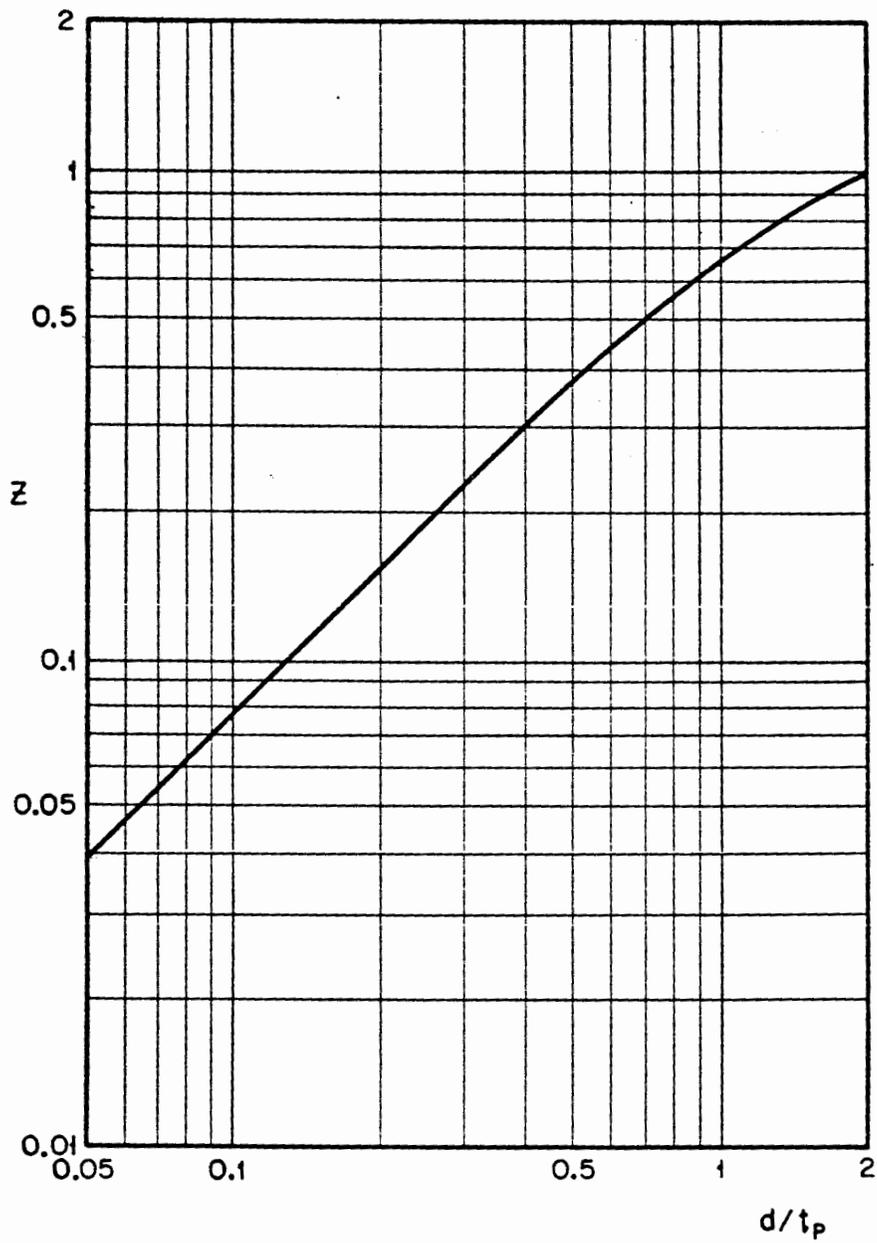


Fig 4. Relación entre Z y  $d/t_p$

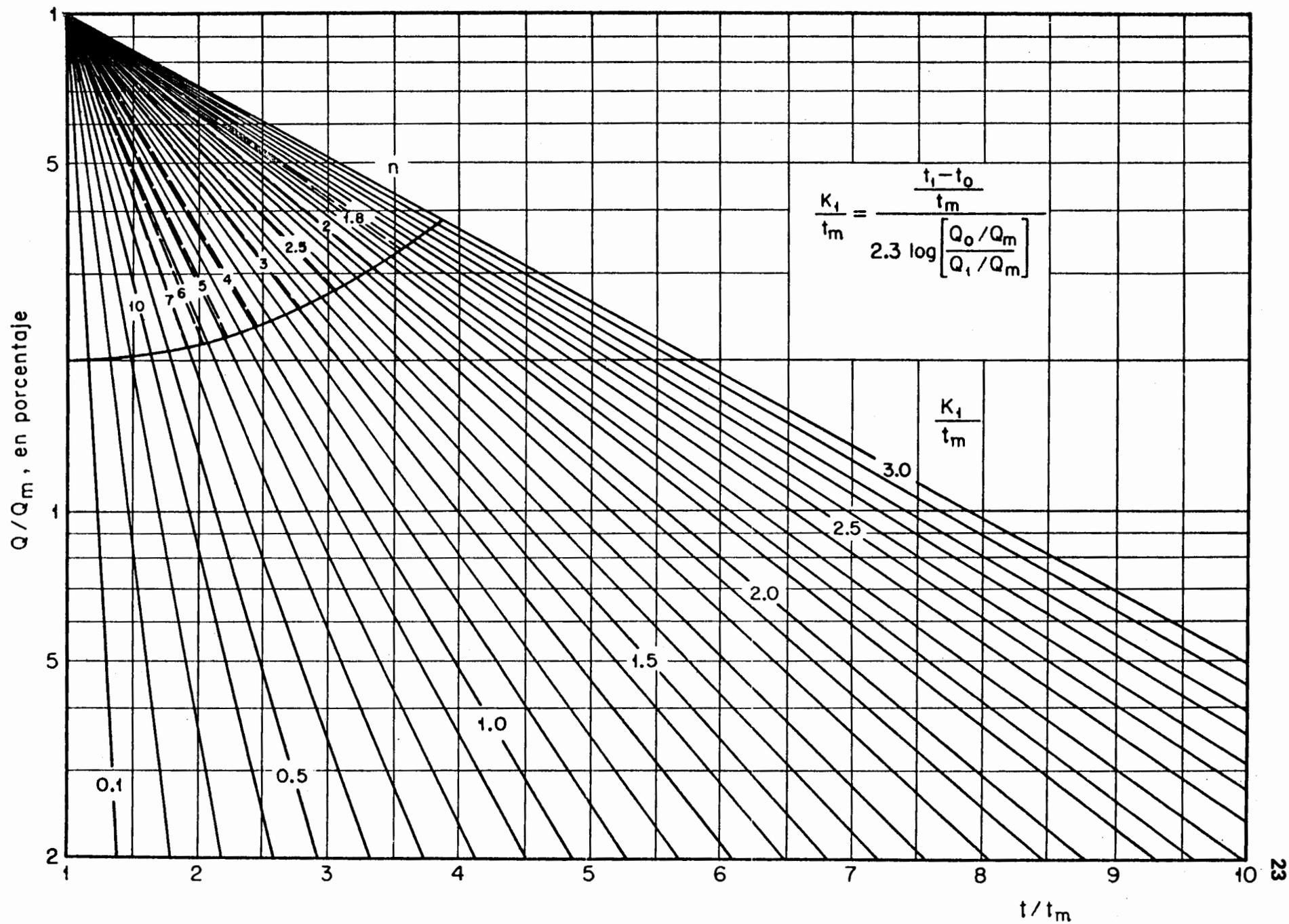


Fig 5. Relación entre  $n$  y  $K_1/t_m$

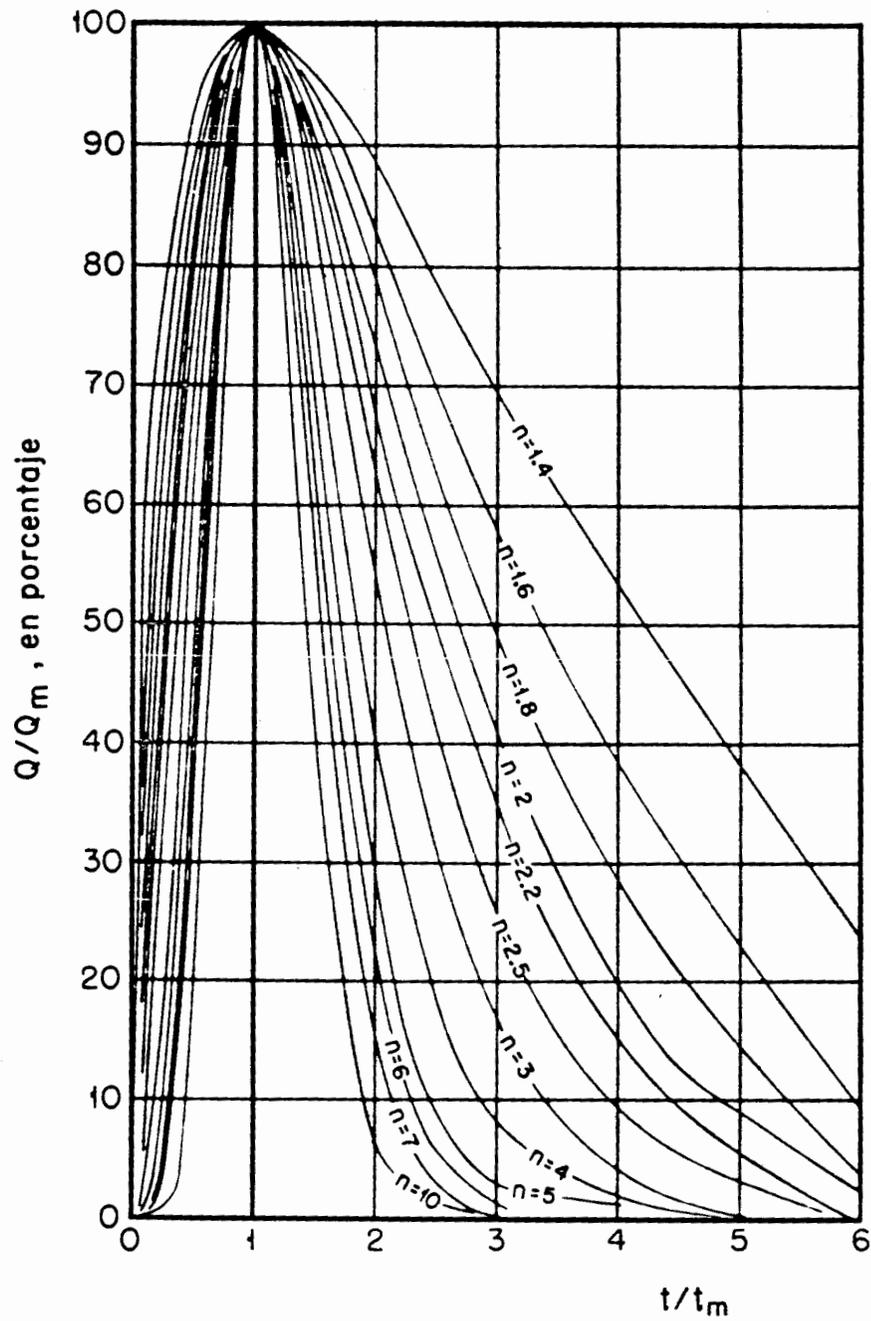


Fig 6. Hidrograma instantáneo adimensional

Apunte  
233

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



\*612279\*

G.- 612279