

**CONGRESO
DE GERENCIA
DE RIESGOS
Y SEGUROS
INDUSTRIALES**

CEGERS '89

HOTEL MELIA CASTILLA MADRID, 13/14 MARZO-89

RIESGOS EXTRAORDINARIOS

D. José Luis García Rodríguez
Profesor Titular de la Escuela
Superior de Ingenieros de Montes.

RIESGOS EXTRAORDINARIOS: INUNDACIONES

D. José Luis García Rodríguez

**Profesor Titular de la Escuela Superior
de Ingenieros de Montes**

I N D I C E

- I. INTRODUCCION
- II. LA CUENCA Y EL FENOMENO TORRENCIAL
- III. ELEMENTOS PRINCIPALES DEL CICLO HIDROLOGICO
- IV. LAS AVENIDAS: CONCEPTOS BASICOS
 - IV.1. GENERALIDADES
 - IV.2. ORIGEN Y DESARROLLO
- V. LA PRECIPITACION: ANALISIS DEL AGUACERO
 - V.1. FORMACION Y TIPOS DE PRECIPITACION
 - V.2. DISTRIBUCION DE LA PRECIPITACION
 - V.3. PRECIPITACIONES MAXIMAS
- VI. LA ESCORRENTIA
 - VI.1. ORIGEN Y FORMAS DE ESCORRENTIA
 - VI.2. EXCESO DE LLUVIA. ESCORRENTIA DIRECTA
- VII. CAUDALES MAXIMOS
 - VII.1. ALGUNAS NOCIONES DE HIDRAULICA TORRENCIAL
 - VII.2. CALCULO DE LAS MAXIMAS AVENIDAS PROBABLES
 - VII.2.1. FORMULAS EMPIRICAS
 - VII.2.2. METODOS ESTADISTICOS
 - VII.2.3. METODOS HIDROLOGICOS
- VIII. PREVENCION Y PREDICCION

RIESGOS EXTRAORDINARIOS: INUNDACIONES

I.- INTRODUCCION

En esta ponencia se presentan algunos principios hidrológicos acerca de la magnitud de la avenida, intentando con ello ayudar a la mejor comprensión de los factores que incluyen en ella.

Se pasa revista a los efectos de los cambios de uso del suelo, construcción de obras en los cauces y otras alteraciones del régimen hidrológico. Se describen varias fuentes de información para el estudio del fenómeno torrencial y se revisa una variedad de métodos para predecir las descargas y alturas de las avenidas.

Finalmente, se intenta proporcionar a los planificadores de cualquier índole, una descripción simple de lo que implican este tipo de riesgos extraordinarios. Es importante que estas personas que tienen que elaborar los planes de prevención y control de este tipo de fenómenos naturales, conozcan cuales son las técnicas sobre las que están basados sus estudios y qué limitaciones tienen. No se pretende un estudio exhaustivo sino un acercamiento a la realidad que, por desgracia en nuestro país se viene produciendo con trágicas consecuencias, tanto económicas como humanas.

II.- LA CUENCA Y EL FENOMENO TORRENCIAL

Para situar el fenómeno de las inundaciones se tiene que enmarcar geográficamente el mismo. Para ello contamos con una serie de conceptos básicos que se pasan a continuación a comentar.

Se llama cuenca vertiente o cuenca de drenaje de un río, en una sección dada de un curso, la superficie limitada por el contorno a partir de la cual la precipitación caída se dirige hacia esa sección.

Se entiende por cuenca torrencial aquella superficie compuesta por -

una cuenca reducida con pendientes fuertes e irregulares, especialmente en las secciones altas. Posee una corriente natural de agua en montañas o colinas, llamado torrente, que puede presentar subidas y violentas crecidas que comienzan repentinamente, pero duran poco tiempo. Generalmente generan erosiones muy fuertes en las laderas y en el cauce de la cuenca y como con secuencia tiene lugar un arrastre importante de caudal sólido que se deposita a lo largo del lecho en regiones inferiores.

Pero volviendo al caso más general de la cuenca vertiente se puede decir que funciona como un colector que recibe la precipitación, pluvial y/o nival, y la transforma en escurrimientos. Esta transformación se hace con pérdidas de agua, función de las características climatológicas existentes en la cuenca y de sus características físicas. Pero al ingeniero hidrólogo, no sólo le interesa conocer el volumen de escurrimientos, balance hídrico, sino también su repartición en el tiempo, hidrogramas, función también de esas condiciones y características.

En este orden de ideas, la cuenca vertiente puede caracterizarse por su morfología, por la naturaleza del suelo y por la cobertura vegetal.

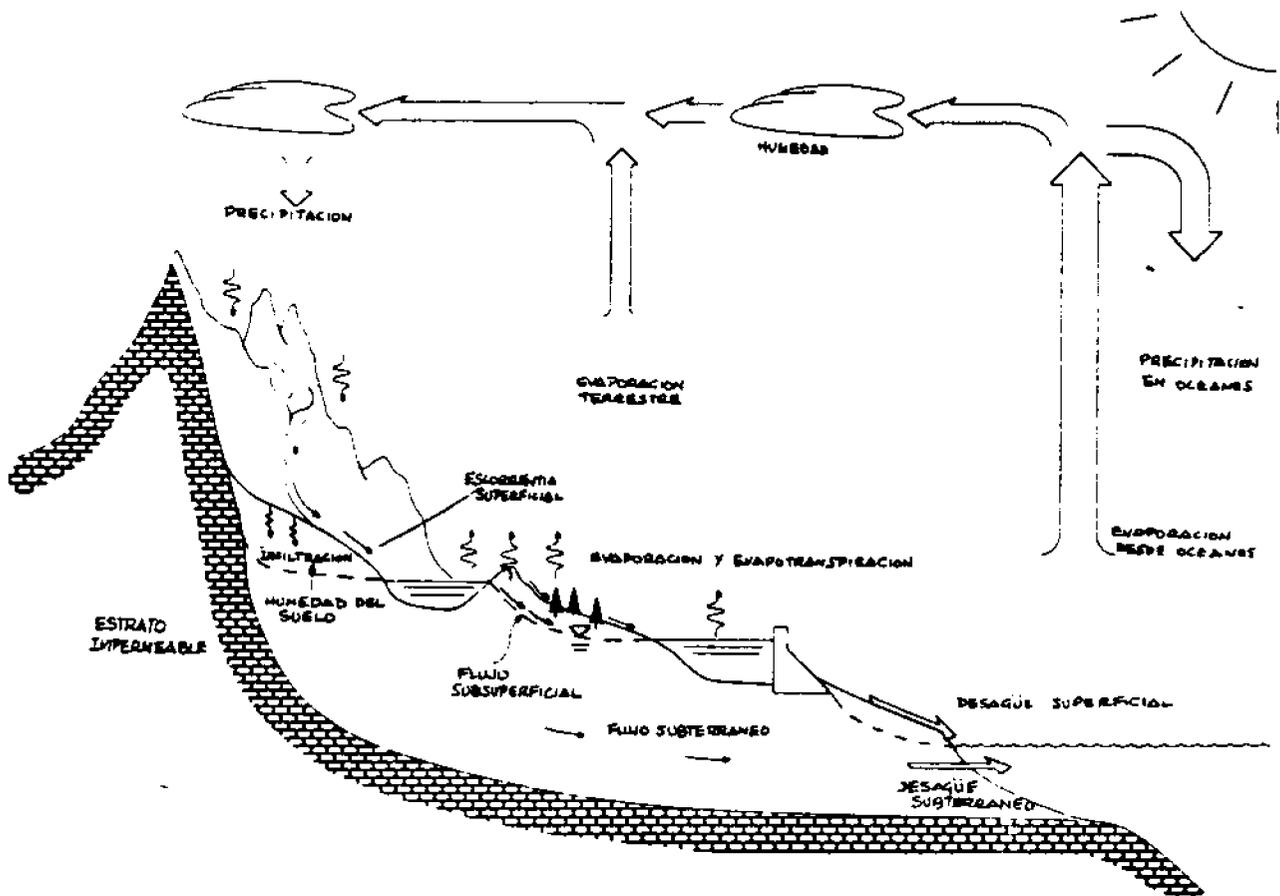
III.- ELEMENTOS PRINCIPALES DEL CICLO HIDROLOGICO

El ciclo hidrológico es el foco central de la Hidrología. El ciclo no empieza o termina, sino que sus numerosos procesos ocurren continuamente.

Como se refleja en el esquema adjunto, el agua evaporada de los océanos y de la superficie terrestre pasa a formar parte de la atmósfera; el vapor de agua es transportado y disipado en la atmósfera hasta que se condensa y precipita en la tierra y océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, se convierte en un flujo terrestre sobre la superficie del suelo, infiltra dentro del suelo, fluye a través del suelo como flujo subsuperficial, y descarga en cauces como escorrentía superficial. La mayor parte del agua, interceptada y la escorrentía superficial retorna a la atmósfera a través de la evaporación. El agua infiltrada puede percolar en profundidad para recargar acuíferos, emer -

giendo más tarde en manantiales o filtrando a regueros, pasando a formar parte de la escorrentía superficial, y finalmente fluyendo fuera de la -
cuenca, hacia el mar o evaporándose hacia la atmósfera, como un ciclo hidrológico continuo.

Se ha expuesto muy brevemente el ciclo hidrológico para centrar el problema que se plantea: las avenidas.



IV.- LAS AVENIDAS: CONCEPTOS BASICOS

IV.1. GENERALIDADES

De las muchas definiciones, se ha extraído la de Temez: "se denomina avenida, riada o crecida, al paso por el río de caudales extraordinarios - por su gran magnitud".

Sus efectos se pueden catalogar en dos tipos:

- Humanos (pérdida de vidas humanas en último extremo)
- Materiales (rotura de obras civiles en cauces y márgenes)

El estudio del fenómeno tiene un evidente interés para prevenirse y protegerse adecuadamente mediante el óptimo dimensionamiento de obras para controlar, total o parcialmente, sus efectos.

Estas áreas, pese a su inundación periódica, son ampliamente explotadas por la agricultura, comunicaciones y asentamientos urbanos. Es por esto, por lo que el conocimiento anticipado de su llegada, y de la cuantificación de sus caudales permite aprovechar el tiempo necesario para alertar a la población y adoptar las medidas pertinentes en cada situación.

IV.2. ORIGEN Y DESARROLLO

Las principales causas de la avenida en orden de mayor a menor frecuencia en su aparición se pueden enumerar de la siguiente manera:

- 1) Aguacero
- 2) Fusión de nive
- 3) Rotura de una obra del cauce

En la presente ponencia se expondrá únicamente el efecto debido al aguacero, por entender que las crecidas de origen nival son poco frecuentes en la mayor parte de nuestra geografía y menos aún las extraordinarias debidas a roturas de obras en los cauces.

En la génesis y desarrollo de las crecidas se pueden diferenciar tres procesos: precipitación, escorrentía y propagación de la onda de avenida por el cauce.

Estos procesos pueden producirse distanciados en el tiempo respecto del inicio de la avenida propiamente dicha, o simultáneamente con ella, - según sea el agente causante del fenómeno.

Para tener un conocimiento, conciso pero documentado del tema, se describen a continuación los tres procesos anteriormente citados.

V.- LA PRECIPITACION: ANALISIS DEL AGUACERO

Aunque no existe una terminología perfectamente definida, se designa generalmente por aguacero un conjunto de lluvias asociadas a una perturbación meteorológica concreta. Con esta significación el tiempo del aguacero puede oscilar entre unos minutos y una centena de horas y afectar a una superficie de algunos km^2 o de millares de km^2 . No obstante - también se entiende por aguacero un período de fuerte lluvia ininterrumpida, y que raramente sobrepasa su duración algunas horas.

V.1. FORMACION Y TIPOS DE PRECIPITACION

La condición necesaria para que se originen las precipitaciones es obviamente la presencia de nubes.

En general las nubes se forman por el enfriamiento del aire húmedo por debajo del punto de saturación. La única causa de origen de precipitaciones en cantidad considerable es la elevación de aire húmedo, de tal manera que las precipitaciones pueden ser clasificadas de acuerdo con el agente o la causa de esa elevación. No obstante, pueden simultanearse - los efectos causantes, provocando lluvias no encuadradas en una clase concreta.

Las precipitaciones pueden clasificarse en tres tipos:

- Precipitaciones ciclónicas o de frentes
- Precipitaciones convectivas
- Precipitaciones orográficas

Las precipitaciones ciclónicas están provocadas por la elevación -

del aire convergente en un área de baja presión o ciclón. Pueden venir asociadas o no a la presencia de frentes.

- Precipitaciones frontales Frente cálido
Frente frío
- Precipitaciones no frontales Borrasca en altura
o "gota fría"

Estas últimas están originadas por masas de aire que se separan de las corrientes en chorro que circulan de W a E a gran altura y latitudes relativamente altas.

Estas depresiones frías en niveles altos, provocan el ascenso del aire más cálido y húmedo de las capas inferiores, pudiendo dar lugar a lluvias muy intensas no excesivamente duraderas, generalmente. Este es el tipo de precipitaciones que se han hecho famosas en nuestro país por sus secuelas, pero éstas mismas vienen produciéndose desde tiempos remotos, provocando las avenidas históricamente más catastróficas.

Las precipitaciones convectivas resultan de la elevación de masas de aire que están más calientes que las circundantes. Estas precipitaciones suelen ocurrir en tiempos de calor; son de naturaleza tormentosa y pueden ser totalmente de lluvia o ir acompañadas de granizo.

La precipitación causada por la elevación del aire cálido y húmedo sobre barreras montañosas se denomina orográfica. El aire se eleva por simple efecto mecánico, provocando lluvias o nieves de intensidad y extensión muy irregular a barlovento de la cadena montañosa, desapareciendo rápidamente en el lado de sotavento.

De este breve repaso de los tipos de precipitaciones puede deducirse que los factores favorables a lluvias intensas irán unidos a los factores desencadenantes de las precipitaciones, como pueden ser la proximidad al mar o la presencia de cadenas montañosas.

V.2. DISTRIBUCION DE LA PRECIPITACION

se distinguen dos distribuciones, una espacial y otra temporal.

En la espacial las observaciones pluviométricas de los distintos puntos de la cuenca se vuelcan sobre el mapa de isoyetas: una isoyeta es una línea de lluvia constante.

En el tiempo la distribución viene definida por la intensidad de la lluvia en cada instante. Tal intensidad puede estudiarse al dibujar dos clases de curvas:

- El yetograma (hyetograph)
- La curva de alturas de lluvia acumuladas (cumulative rainfall Hyetograph) . Ver figura (1).

V.3. PRECIPITACIONES MAXIMAS

El cálculo de avenidas, así como el cálculo de cualquier obra hidráulica situada en el cauce de desagüe, requieren de un análisis previo de las precipitaciones máximas de la zona estudiada.

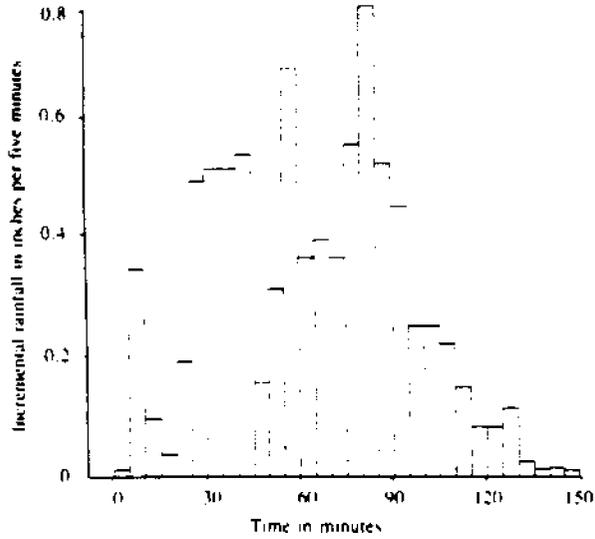
El Instituto Nacional de Meteorología proporciona los datos referentes a las precipitaciones máximas diarias, correspondientes a las estaciones que componen la red meteorológica nacional.

Una vez recopilados los datos necesarios para el estudio de las avenidas es necesario un tratamiento estadístico de los mismos.

El problema fundamental que se plantea es la obtención de una ley de distribución que defina la frecuencia $F(x)$ con que un determinado valor (precipitación o caudal) no es superado.

En la aplicación de la teoría de los valores extremos se suele expresar la probabilidad en términos del período de retorno o de recurrencia $T(x)$, que para un valor particular de x es el intervalo medio, expresado en años, en que el valor extremo alcanza o supera a x una vez solamente. La relación entre la probabilidad o frecuencia $F(x)$ y el período de retorno $T(x)$ viene dada por:

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)}$$



(a)

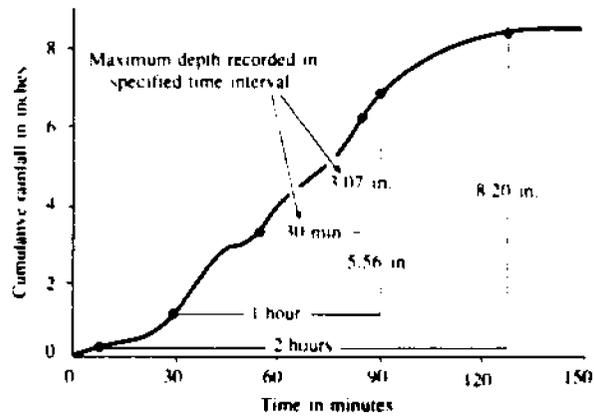


FIGURA 1.

Para la deducción de la ley, se parte de la serie de valores extremos, que se obtiene seleccionando los valores máximos diarios anuales en la serie histórica de que se dispone para cada estación meteorológica. Así se forma una nueva serie que constará de tantos datos como años de registro existan.

La distribución Gumbel (1934) ha sido utilizada con buenos resultados para el estudio de valores extremos independientes de variables meteorológicas, y parece ajustarse bien a los valores máximos de la precipitación en distintos intervalos de tiempo. De tal manera que aplicándose a los valores máximos diarios de series anuales de lluvias, se han logrado ajustes muy precisos para los mismos. La distribución Gumbel es de la forma siguiente:

$$F(x) = e^{-e^{-y}}$$

donde:

$F(x) = P$, es la probabilidad de que un valor extremo sea inferior a cierto valor x

e , es la base de los logaritmos neperianos

y , es la variable reducida, cuyo valor tomando dos veces logaritmos neperianos en la ecuación anterior

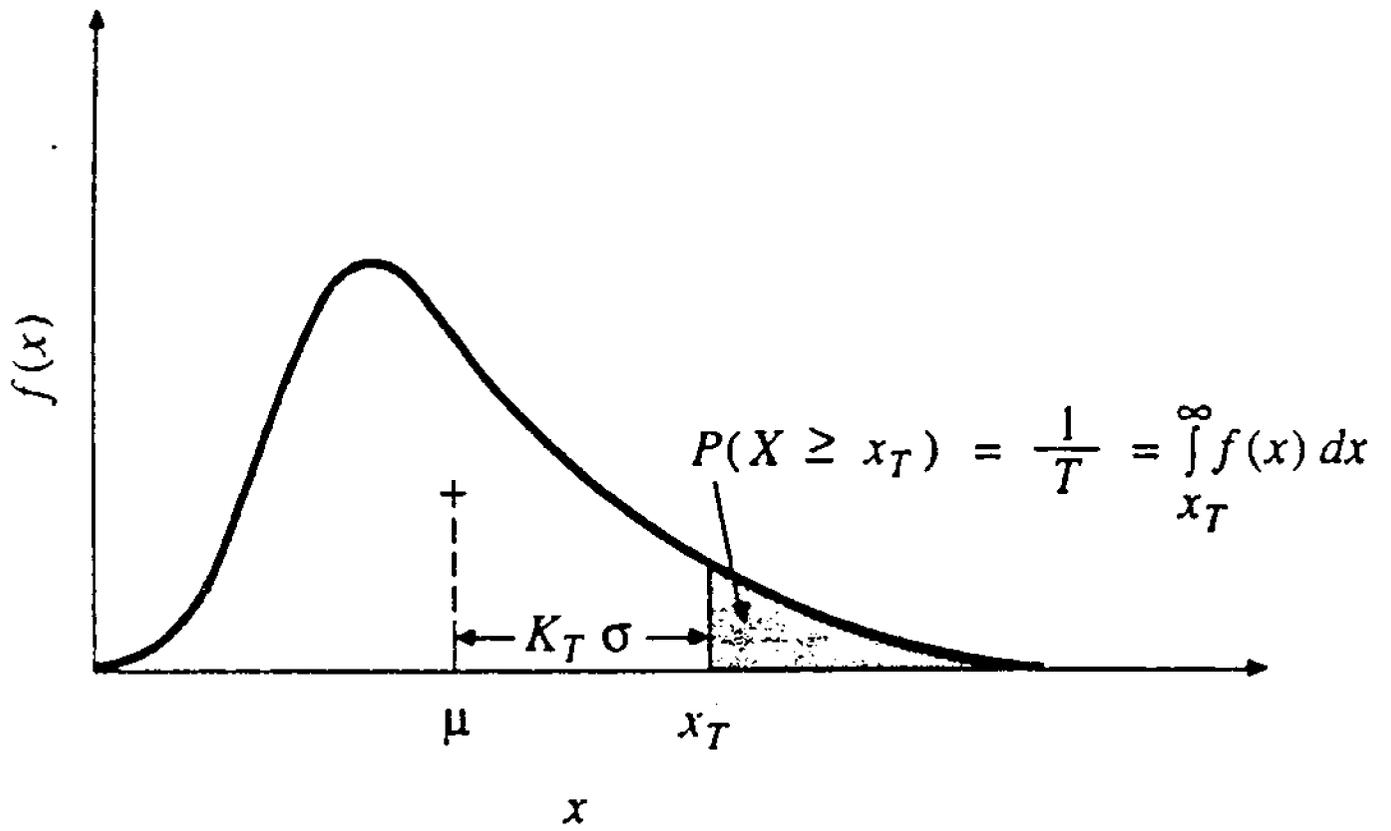
$$y = -\ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right]$$

Empleando esta distribución, las frecuencias teóricas pueden calcularse a partir de la media y la desviación típica de la serie considerada de valores máximos.

Los aguaceros que dan lugar a estas avenidas son modelados comúnmente por la distribución Extreme Value Type 1 (Chow, 1953; Tomlinson, 1980).

La magnitud x_T de un suceso hidrológico, aguacero, se puede representar por la media μ más el incremento Δx_T de la desviación desde la media, como puede comprobarse en la siguiente figura (2).

FIGURA 2



El incremento se puede expresar como el producto de la desviación σ y el factor de frecuencia K_T (Chow, 1951); que es $\Delta x_T = K_T \sigma$. El incremento Δx_T y el factor de frecuencia K_T son función del período de retorno y el tipo de distribución de frecuencia usado en el análisis. La ecuación, por lo tanto, se puede expresar como:

$$x_T = \mu + K_T \cdot \sigma$$

que se puede aproximar por:

$$x_T = \bar{x} + K_T s$$

donde:

- s, es la media de las precipitaciones máximas anuales
- K, es el factor de frecuencia, también K (T,n), es decir, función del período de retorno y del número de años.
- s, es la desviación típica de la variable reducida y, de la expresión general de la distribución Gumbel.

El valor del factor de frecuencia K(T,n), puede obtenerse de la tabla realizada por Elias Castillo y que aparece en la monografía de ICONA (nº 21) "Precipitaciones máximas en España".

En la misma publicación se habla de las curvas de alturas-duración-frecuencia. La expresión general de éstas es la siguiente:

$$x_{t|T} = at (t+c)^{-b} F(T,t)$$

donde:

$x_{t|T}$, es la lluvia de duración t (horas) con período de retorno T años.

a, b y c son coeficientes que hay que hallar para cada estación.

F (T,t), es la función de frecuencia.

Una vez hallados los coeficientes a, b y c, para cada estación, la ecuación general se ajusta a la ecuación $y = at (t+c)^{-b}$ si el ajuste es bueno $F(T,t) = 1 + K(T,n) V_t$, donde V_t es el coeficiente de variación $V_t = s/\bar{x}$.

Para $c = 0$, si se lleva sobre papel logarítmico la ecuación $y = at^{(1-b)}$, se reduce a una línea recta pendiente (1-b)

En este libro, se encuentran las fórmulas de altura-duración-frecuencia para duraciones de hasta 2 horas y para duraciones de 2 a 72 horas para diferentes períodos de retorno, donde el máximo es $T = 50$ años, por tanto - para la obtención de la precipitación prevista como productora de una avenida, se recurrirá al cálculo, mediante un programa estadístico de ordenador que nos proporcione el estudio mediante la distribución Gumbel de recurrencias mayores.

VI.- LA ESCORRENTIA

IV.1. ORIGEN Y FORMAS DE ESCORRENTIA

Al examinar el ciclo hidrológico, quedaron reflejados los diferentes recorridos que sigue el agua de lluvia. Para describir cuales de los diversos procesos de agua superficial varían con el tiempo durante un aguacero, se supone que la precipitación comienza y continúa indefinidamente con un valor constante en toda la cuenca. La precipitación contribuye y varía los procesos de almacenamiento y flujo como se muestra en la figura (3).

El eje vertical del diagrama representa el valor respecto de la precipitación, el valor con el cual fluye o empieza a acumularse en cada uno de los procesos mostrados en el gráfico en cualquier instante.

Se pueden observar tres tipos de escorrentía:

a) Escorrentía superficial o directa: es la precipitación que no se infiltra y llega a la red de drenaje, moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad.

b) Escorrentía subsuperficial: es el agua de precipitación que habiéndose infiltrado en el suelo, se mueve lateralmente por los horizontes superiores para reaparecer más tarde a la red de drenaje.

c) Escorrentía subterránea: es la precipitación que se infiltra hasta alcanzar la capa freática, circulando a través de acuíferos hasta alcanzar la red de drenaje.

En la práctica, al considerar en una cuenca concreta los caudales de crecidas debidos a una precipitación neta, se contempla como elemento característico de los distintos flujos de agua, sus tiempos de llegada a los cauces más que su recorrido hasta estos, distinguiendo en el caudal total producido en base a dichos tiempos, sólo "la escorrentía directa" y "el caudal base".

VI.2. EXCESO DE LLUVIA, ESCORRENTIA DIRECTA

El exceso de lluvia, o lluvia efectiva, como ya se ha comentado anteriormente, es la lluvia que ni es retenida en la superficie del terreno ni se infiltra en el suelo. Después de fluir por la cuenca y su red de drenaje, este exceso de lluvia se convierte en escorrentía directa de acuerdo con la teoría de Horton (1933).

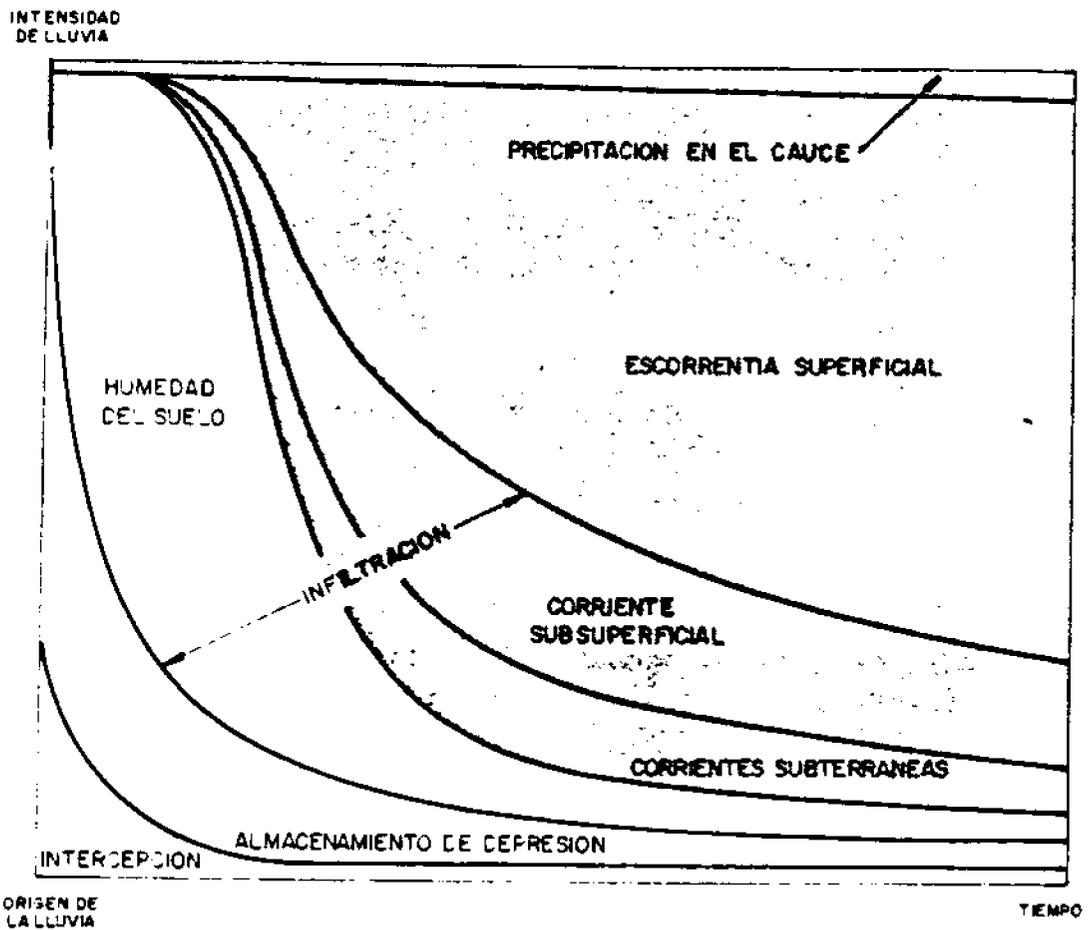
La evaluación de la escorrentía directa, o más exactamente del yetograma de precipitación eficaz, es un componente clave en cualquier metodología de cálculo de caudales máximos o de análisis de las relaciones lluvia-escorrentía.

La diferencia entre el yetograma de precipitación total y el yetograma de precipitación eficaz se denomina "abstracciones" o "pérdidas". Ver figura (4).

Estas pérdidas se deben a:

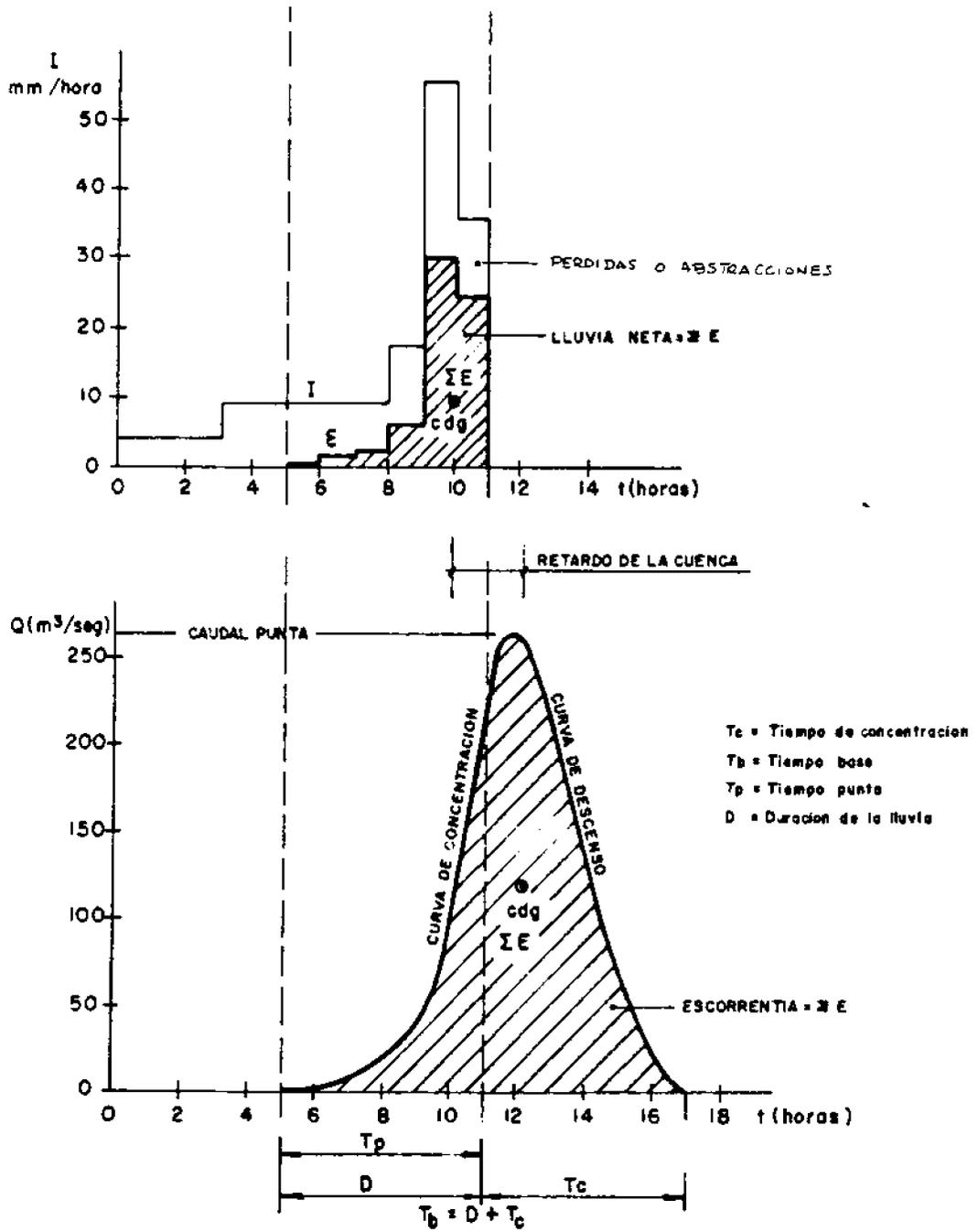
- intercepción de la cubierta vegetal.
- pérdidas por evapotranspiración durante el período de lluvia.
- almacenamiento de agua en la superficie del terreno.
- pérdidas por infiltración.

Existen dos enfoques básicos para el cálculo del exceso de lluvia. El primero de ellos evalúa cada uno de los cuatro procesos de forma individual para, posteriormente, sumar el conjunto de las pérdidas. La metodología más empleada calcula estas pérdidas de una manera global independientemente del proceso que las origine.



DISTRIBUCION DE LA PRECIPITACION

FIGURA 3.



HIETOGRAMA E HIDROGRAMA DE ESCORRENTIA

FIGURA 4.

Si bien se va a seguir este segundo enfoque en la ponencia, no se puede continuar sin comentar brevemente de nuevo, algunos conceptos acerca de la infiltración.

Infiltración

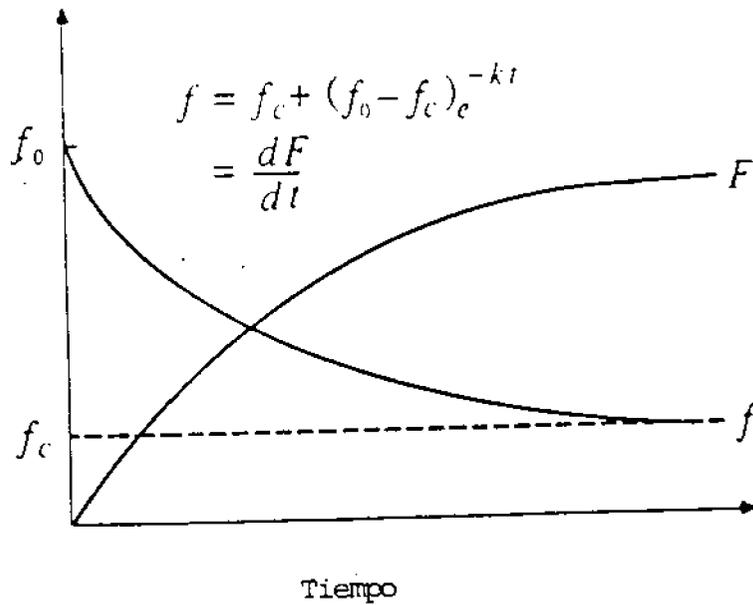
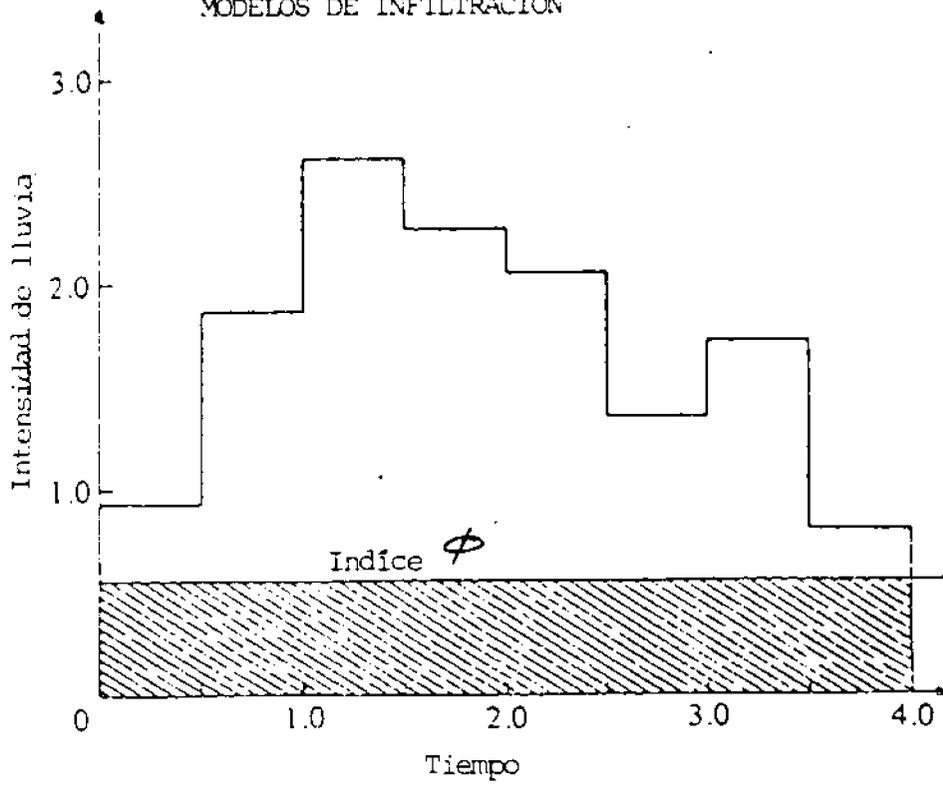
Se denomina así al fenómeno por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno al subsuelo. Este es el responsable de la mayor parte de la "Abstracción total".

Los factores que influyen en la capacidad de infiltración y en el volumen total de agua infiltrada son muy diversos. Entre otros se pueden considerar los siguientes:

- Tipo y superficie cubierta en contacto con el suelo.
- Propiedades físico-químicas del suelo.
- Porosidad y conductividad hidráulica del suelo.
- Contenido de humedad del suelo.
- Intensidad de la precipitación.

En el estudio de los diferentes modelos de infiltración se supone que el encharcamiento es inmediato. Sin embargo, al comienzo de un aguacero la intensidad de lluvia será inferior a la capacidad potencial de infiltración. El agua se infiltrará aumentando la humedad de las capas superficiales del suelo hasta su grado de saturación y disminuyendo su capacidad de infiltración, figura (5). El encharcamiento se producirá cuando esta capacidad de infiltración sea superior a la intensidad de la lluvia, a partir de ese momento habrá lluvia neta y, por tanto, escorrentía superficial.

FIGURA 5
MODELOS DE INFILTRACION



MODELO DE HORTON. Tasa de infiltración e Infiltración acumulada

MODELOS INTEGRADOS PARA EL CALCULO DE LA ESCORRENTIA DIRECTA. EL METODO DEL NUMERO DE CURVA.

Los métodos más utilizados para calcular el volúmen de escorrentía directa agrupan todas las abstracciones hidrológicas independientemente de los procesos que las originan. De los diversos métodos desarrollados, se expone el Método de Número de Curva o Número Hidrológico del U.S. Soil Conservation Service (1972) que es el más utilizado, de manera especial en proyectos agrícolas y forestales.

Este modelo establece una relación entre la precipitación y el volúmen de escorrentía directa en función del tipo de suelo, cubierta vegetal y condiciones hidrológicas de los usos del suelo. El método basado en la recopilación de datos obtenidos en numerosas parcelas experimentales y pequeñas cuencas, parte de la hipótesis de que el exceso de precipitación o escorrentía directa, P_e , es siempre menor o igual que la precipitación total P . Por otra parte, una vez que el agua empieza a escurrir, la cantidad de agua retenida por la cuenca, F_a , es menor o igual que la máxima cantidad de agua, S , que puede retener la cuenca. Ver figura (6)

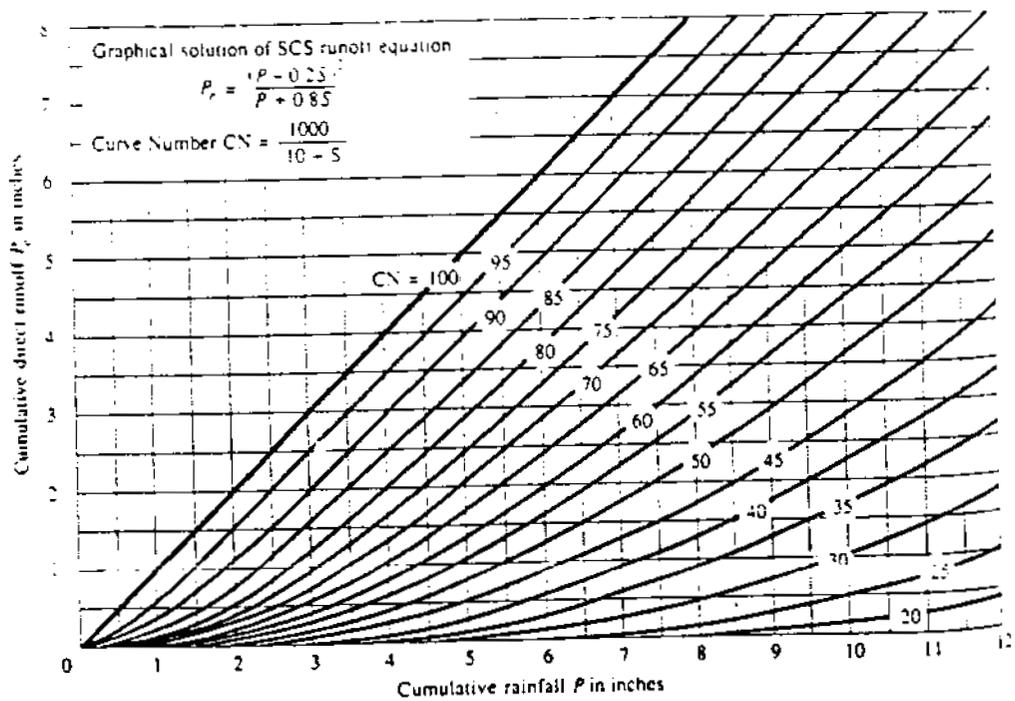
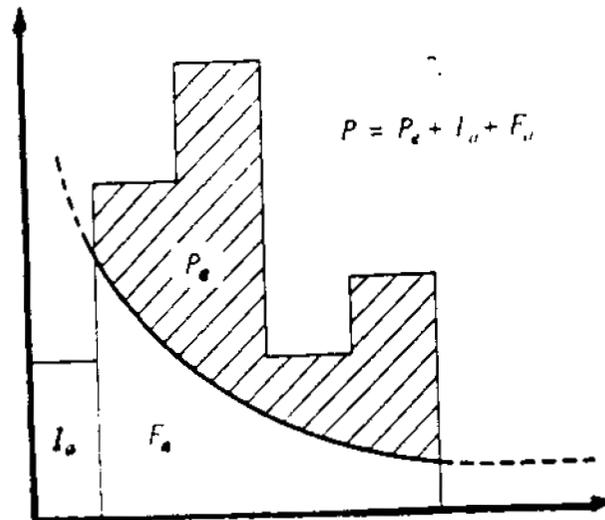


FIGURA 6. METODO DEL NUMERO DE CURVA

El modelo estima que habrá una cantidad de lluvia, abstracción inicial I_a , por debajo de la cual no existirá escorrentía. La escorrentía potencial será igual a $P - I_a$.

La hipótesis del método del S.C.S. es que la relación entre la retención actual y la potencial es igual a la relación existente entre la escorrentía actual y la potencial, es decir:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

por la ecuación de continuidad se sabe que:

$$P = P_e + I_a + P_a$$

de donde:

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

El S.C.S. determinó que $I_a = 0,25$, es decir el 20% de la capacidad de retención máxima de la cuenca. Introduciendo este valor, la expresión queda de la siguiente manera:

$$P_e \equiv Q = \frac{(P - 0,25S)^2}{P + 0,8S}$$

La relación entre la precipitación y escorrentía directa es función, por tanto, de la máxima capacidad de retención de la cuenca, S , parámetro que depende, a su vez, de las características edapológicas y de usos del suelo. El S.C.S. estandarizó una serie de curvas identificadas por un parámetro adimensional denominado número de curva. Este parámetro se relaciona con la capacidad máxima de retención por la siguiente expresión:

$$S = \frac{25.400}{N} - 254$$

El número de curva depende del complejo hidrológico "suelo-vegetación". Los suelos se clasifican en los cuatro grupos siguientes:

GRUPO A: Suelos con gran capacidad de infiltración. Arenas y gravas profundas bien drenadas.

GRUPO B: Suelos con moderada capacidad de infiltración. Texturas francas, menos profundos que los del grupo A.

GRUPO C: Suelos poco profundos y los que tienen mucha arcilla y colvides, aunque menos que los del grupo D.

GRUPO D: Suelos con potencial de escurrimiento máximo. Se incluyen en el mismo que la mayor parte de las arcillas que más aumentan de volumen al mojarse. También se incluyen los suelos con presencia de horizontes casi impermeables cerca de la superficie.

En cuanto a las condiciones que presenta la cubierta del suelo, es decir, la parte superficial del terreno, en relación con su mayor o menor capacidad de infiltración, hay que considerar que depende de la clase y densidad de la vegetación y de la forma y tipos de labores realizadas.

Se establecen las distintas clases de cubierta que figuran en la tabla (1) con gradaciones, de pobres a buenas para la infiltración, en sus condiciones hidrológicas.

Cuanto más denso es el cultivo, mejor es su condición hidrológica para la infiltración y menor es el valor del número (N) representativo de la esorrentía.

El número de curva de la cuenca será igual a la media ponderada de los números de curva asignados a los distintos recintos homogéneos, S_i . De esta manera la expresión será:

$$N = \frac{\sum N_i S_i}{S}$$

Hay que hacer un último comentario al presente método y es que los valores expresados en la table (1) son aplicables en condiciones medias de humedad del suelo (Condición II). Si las condiciones iniciales de humedad son más secas (condición I) o más húmedas (condición III), los números de curva equivalentes pueden deducirse en otras tablas de conversión, confeccionadas al efecto.

TABLA 1
 NUMEROS (N_p) DE LAS CURVAS DE ESCORRENTIA PARA LOS COMPLEJOS
 HIDROLOGICOS «SUELO-CUBIERTA»
 (Según el U.S. Soil Conservation Service)
 Condición II

Cubierta del suelo			Números N _p correspondientes a los grupos hidrológicos del suelo			
Clase	Laboreo	Condiciones hidrológicas para la infiltración	A	B	C	D
Barbecho	—	—	77	86	91	94
Cultivos alineados	R	Pobres	72	81	88	91
	R	Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
	C	Buenas	65	75	82	86
	C-T	Pobres	66	74	80	82
	C-T	Buenas	62	71	78	81
Cultivos no alineados, o con surcos pequeños o mal definidos	R	Pobres	65	76	84	88
	R	Buenas	63	75	83	87
	C	Pobres	63	74	82	85
	C	Buenas	61	73	81	84
	C-T	Pobres	61	72	79	82
	C-T	Buenas	59	70	78	81
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	R	Pobres	66	77	85	89
	R	Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
	C	Buenas	55	69	78	83
	C-T	Pobres	63	73	80	83
	C-T	Buenas	51	67	76	80
Pastizales (pastos naturales)	—	Pobres	68	79	86	89
	—	Regulares	49	69	79	84
	—	Buenas	39	61	74	80
	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
Prados permanentes	—	—	30	58	71	78
Montes con pastos (ganadero-forest.)	—	Pobres	45	66	77	83
	—	Regulares	36	60	73	79
	—	Buenas	25	55	70	77
Bosques (forestales)	—	Muy pobres	56	75	86	91
	—	Pobres	46	68	78	84
	—	Regulares	36	60	70	76
	—	Buenas	26	52	63	69
	—	Muy buenas	15	44	54	61
Caseros	—	—	59	74	82	86
Camino en tierra	—	—	72	82	87	89
Camino con firme	—	—	74	84	90	92

VII.- CAUDALES MAXIMOS

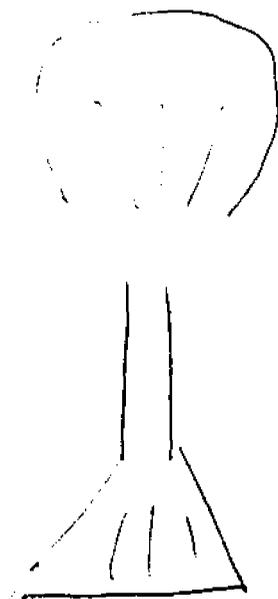
VII.1. ALGUNAS NOCIONES DE HIDRAULICA TORRENCIAL

El complejo físico de la cuenca vertiente, definido por su morfología, el suelo, la cubierta vegetal y el clima, representado fundamentalmente por las precipitaciones, establece las características torrenciales de la misma. Estas son:

- La magnitud e irregularidad de las pendientes de su red de drenaje.
- La intensidad y repentina aparición de las crecidas.
- El arrastre de grandes cantidades de materiales por las corrientes que depositan en ciertas partes de sus alveos.

Se define un curso torrencial como "la corriente natural de agua, cuyas crecidas son súbitas y violentas; sus pendientes fuertes, según Surell mayores del 5%, e irregulares y que por regla general deposita en ciertas partes de su lecho los materiales trasportados por las aguas, lo cual es causa de que éstas divaguen en el momento de las avenidas".

Schumm establece un esquema español para el estudio del sistema fluvial, que puede ser utilizado en el análisis de los torrentes y que es el siguiente:



AREA DE PRODUCCION

AREA DE TRANSPORTE

AREA DE SEDIMENTACION

AREA DE PRODUCCION

Denudación del terreno causada por las aguas que corren por su superficie, cuando ésta no se encuentra con una cubierta capaz de protegerle.

Inestabilidad de ladera, formación de innumerables borrhacadas y erosión hasta dejar al descubierto zonas de labor o de pastos.

AREA DE TRANSPORTE

Las aguas son lanzadas con gran velocidad, a causa de la pendiente.

Hundimientos y deslizamientos de ladera.

Erosión de tierras de labor y pastos (bosque)

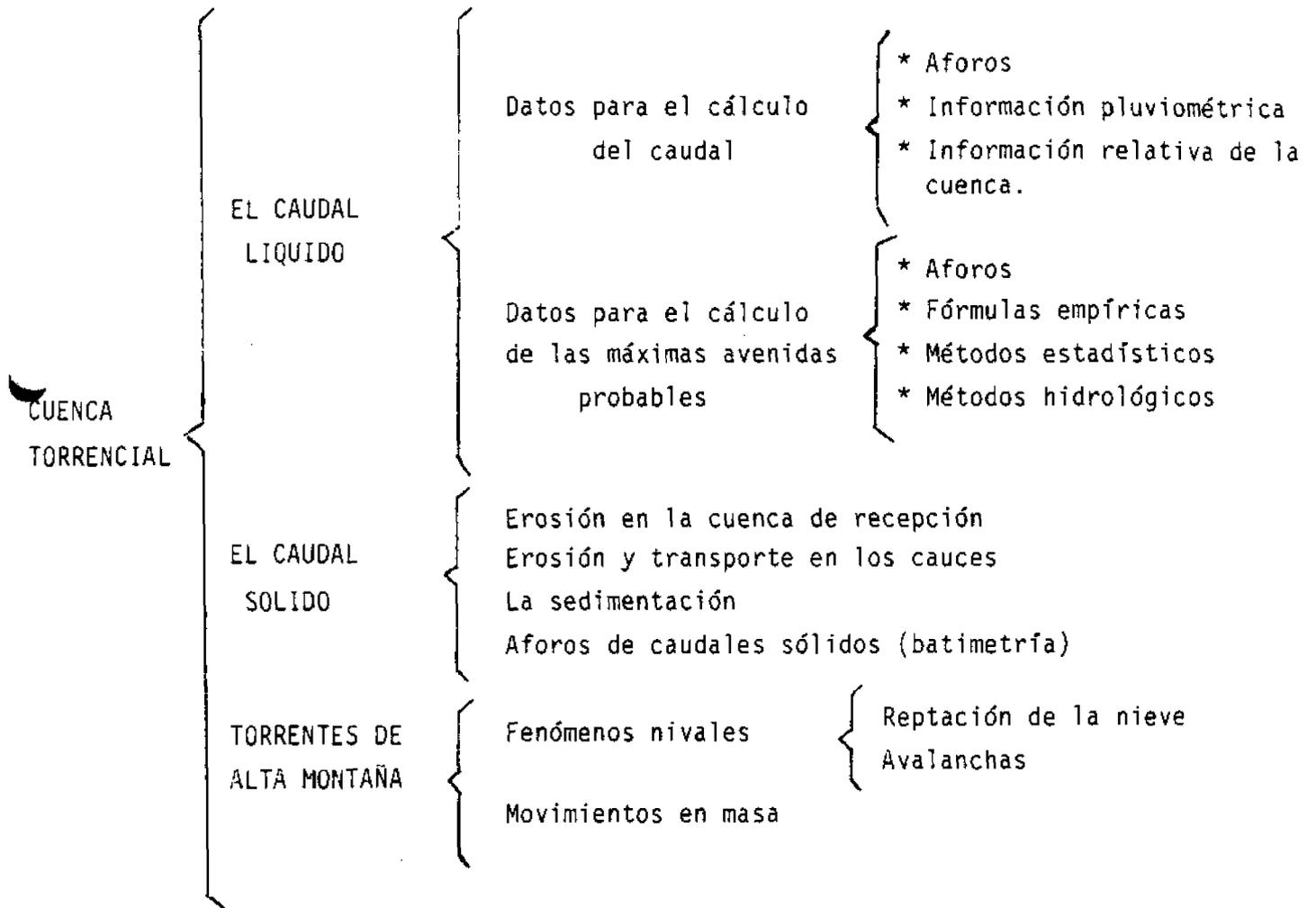
Las tierras erosionadas se suman a las que transporta la corriente provocando daños al depositarse.

AREA DE SEDIMENTACION

Constituye el proceso contrario a la erosión, y ocurre cuando la capacidad de transporte de las aguas se reduce hasta que el transporte no es posible.

Al acumularse los sedimentos, los embalses se aterran, las acequias y canales de riego se obstruyen, el agua para el consumo doméstico requiere técnicas adecuadas para su depuración, los cursos navegables pierden profundidad y en las tierras situadas en la llanura y valles disminuye la fertilidad, e incluso se arruinan totalmente. Todos estos daños ven multiplicada su magnitud como consecuencia de las inundaciones, desgraciadamente tan frecuentes en nuestra red hidrográfica.

Para el estudio del fenómeno torrencial descrito, se aconseja el seguir el siguiente esquema:



La misión de esta ponencia es despertar el interés por estos temas pero sin profundizar en el tratamiento de los mismos. Es por esto, por lo que a continuación se centra el estudio sobre el cálculo de caudales máximos, haciendo un resumen de las técnicas utilizadas en su evaluación.

VII.2. CALCULO DE LAS MAXIMAS AVENIDAS PROBABLES

En el presente apartado se pasa revista a los distintos métodos y modelos utilizados en el cálculo de caudales máximos. Las metodologías se pueden agrupar en tres tipos:

- Fórmulas empíricas
- Métodos estadísticos
- Métodos hidrológicos

Cada uno de estos tipos depende de unos datos de precipitación y de caudales. En el caso de estos últimos puede plantearse el caso de que exista información o no.

Estos datos foronómicos en España se recogen en boletines publicados por el Centro de Estudios Hidrográficos, aunque esta información no resulta tan completa como para abordar la totalidad de los casos que puedan presentarse.

En el caso de no existir información forométrica, lo que es bastante habitual en áreas de montaña, pueden ensayarse estos dos procedimientos:

- Utilizar los datos de otras zonas de características similares a las que se pretende estudiar, ajustando más adelante mediante coeficientes de aproximación.

- Cuando no se dispone de ningún tipo de información forométrica es preciso reunir al análisis de las precipitaciones de la zona para el cálculo de caudales de avenida.

VII.2.1. Fórmulas empíricas

Las fórmulas empíricas son expresiones del caudal máximo en función de diversos parámetros geomorfológicos de la cuenca.

Están basados en la hipótesis de que si el aguacero produce una precipitación uniforme sobre toda la cuenca, el volúmen total de precipitación será directamente proporcional a su área, S, e inversamente proporcional al tiempo de concentración, T_c . Dado que este último es del orden de \sqrt{S} , el caudal de avenida vendrá dado por una expresión generalizada del tipo:

$$Q = f(S^n)$$

Existe un gran número de fórmulas; entre ellas se destacan:

G. QUIJANO	$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)} = 17 \times S^{2/3}$	S = Superficie de la cuenca en m^2
ZAPATA	$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)} = 21 S^{0,6}$	
KRESNIK	$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)} = \frac{32}{50 + \sqrt{S}} \cdot S$	
RICHARDS	$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)} = 0,5 \cdot \frac{e \cdot I \cdot S}{3,6}$	

donde:

I, intensidad media en mm.h^{-1} para una lluvia de duración igual al tiempo de concentración.

S, área de la cuenca en km^2 ($S \leq 25 \text{ km}^2$)

e, coeficiente de escorrentía

Valores de e

Zona residencial	0,30 ÷ 0,50
Zona comercial e industrial	0,90
Area cubierta de bosques	0,05 ÷ 0,20
Parques, tierras cultivadas	0,05 ÷ 0,30
Superficie pavimentada	0,85

VII.2.2. Métodos estadísticos

Los métodos estadísticos estiman la crecida máxima que puede llegar

a tener un cauce a partir de una muestra de valores máximos de caudales, ajustándola a un modelo teórico de probabilidad.

El método análisis de frecuencia de los caudales es similar al utilizado con los registros pluviométricos como ya se examinó en el apartado dedicado a precipitaciones. A partir de la serie de valores máximos se ajusta una distribución teórica de probabilidades, estimándose los parámetros que definen dicha ley de probabilidad. Los parámetros se utilizan posteriormente para predecir, de acuerdo con el modelo adoptado, el intervalo de recurrencia medio de un determinado caudal máximo o la magnitud del caudal máximo para un período de retorno determinado.

Los modelos de distribución más utilizados son:

- Distribución log-normal
- Distribución gamma o Pearson III
- Distribución log Person III
- Distribución Gumbel

La elección de uno u otro modelo dependerá de la bondad del ajuste entre los datos observados y los valores estimados.

VII.3. METODOS HIDROLOGICOS

Los métodos hidrológicos intentan establecer una relación entre el volumen de precipitación y el volumen de escorrentía. La cuenca actuaría como un operador que transforma un input, precipitación, en un output, escorrentía. No se tienen en cuenta los procesos hidrológicos que suceden en la cuenca de drenaje.

Se revisan a continuación tres de los métodos más empleados para el cálculo de caudales máximos en cuencas pequeñas:

- El método racional
- El método de las isocronas
- Hidrograma unitario

Método racional

La idea expresada en la fórmula racional es que si una precipitación de intensidad constante, I , cae uniformemente en toda la cuenca, el volumen de escorrentía irá incrementándose conforme aumenta la superficie de la cuenca que vierta agua a la sección de control. Cuando toda la superficie de la cuenca contribuya, el caudal habrá llegado a su valor máximo.

$$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)} = 0,278 CIA$$

donde:

C , es el coeficiente de escorrentía de la cuenca

I , intensidad de la lluvia en mmh^{-1}

A , superficie de la cuenca en km^2

Para su aplicación es necesario definir algunos conceptos como el tiempo de concentración de la cuenca y la máxima precipitación horaria probable de la cual ya se habló en el apartado de precipitaciones.

Se denomina tiempo de concentración (T_c) de una cuenca el que invierte el agua de escorrentía superficial de una lluvia en recorrer la distancia hidráulicamente más alejada del punto que se quiere estudiar. De otra manera, sería el tiempo requerido hasta alcanzar el estado de equilibrio en el que toda la superficie de la cuenca aporta escorrentía.

Este método asume que que la precipitación más desfavorable es la de duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, por tanto $I = \frac{P}{T_c}$.

El empleo del método racional se ha generalizado para el cálculo de caudales máximos en pequeñas cuencas de carácter urbano, diseño de obras de fábrica en caminos y vías rurales, redes de saneamiento, etc. No debe utilizarse el método en cuenca de superficie mayor de 50 km^2 .

Método de las isocronas

El método de las isocronas es un método de síntesis de hidrogramas

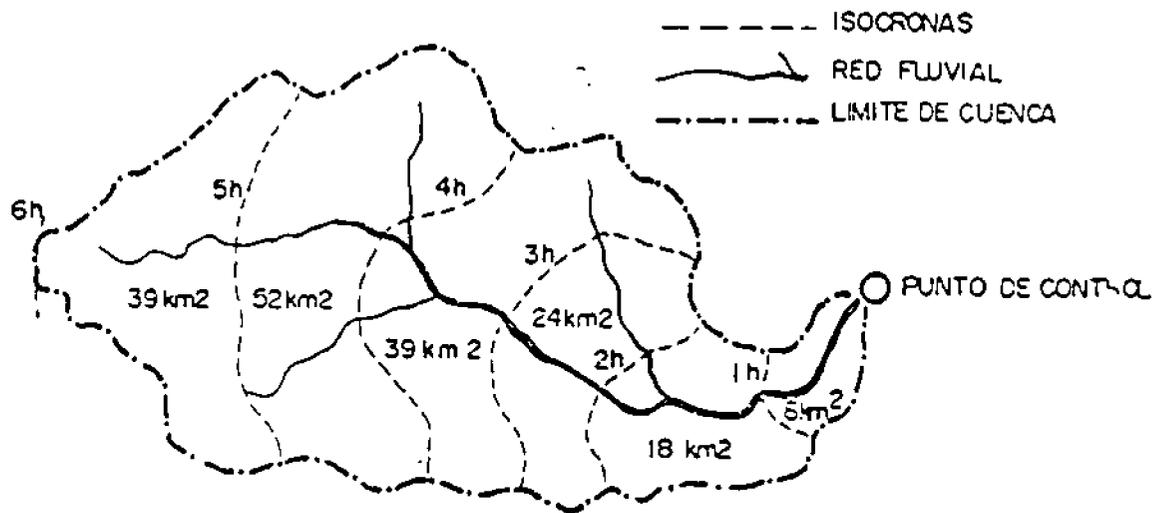
en ausencia de datos de caudales. Para emplear este método es necesario conocer:

- La intensidad de la precipitación
- La velocidad de propagación de la onda de crecida
- El coeficiente de escorrentía.
- La duración de la lluvia.

Para la aplicación de este método la cuenca se descompone en una serie de zonas S_1, S_2, \dots, S_n , delimitadas por las líneas isocronas, es decir, líneas que unen los puntos de la cuenca con igual tiempo de recorrido (travel time) del agua hasta la sección de control. Ver figura (7).

Una vez dibujadas las isocronas, se calcula el área comprendida entre ellas, A_1, A_2, \dots, A_n y se calculan los caudales producidos en cada superficie, Q_i . Calculados estos caudales se hallarían los caudales acumulados desde el inicio de la tormenta, suponiendo una lluvia de duración infinita. Para una lluvia de duración finita, se desplaza la curva acumulada al tiempo de duración de la lluvia; el hidrograma de la tormenta se calcula por diferencia de las dos curvas acumuladas, la original y la desplazada.

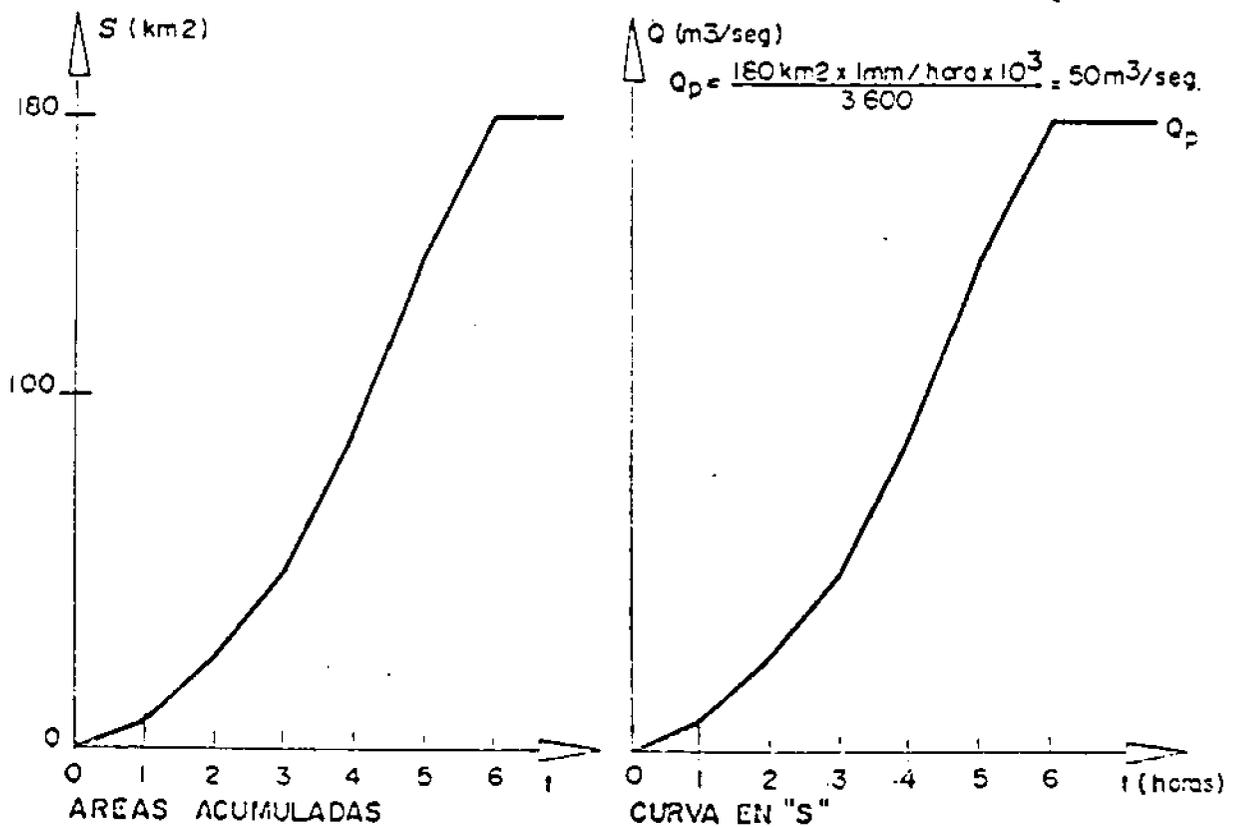
FIGURA 7



TIEMPO DE CONCENTRACION = 6 horas - ISOCRONAS HORARIAS

AREA = 180 km²

CUENCA CON SU TRAZADO DE ISOCRONAS



TRAZADO DE ISOCRONAS Y OBTENCION DEL HIDROGRAMA EN "S"
 PRECIPITACION DE 1mm/hora DE LLUVIA NETA

Hidrograma unitario (Sherman-1932)

El hidrograma unitario de una cuenca se define como un hidrograma de un volumen unitario de escorrentfa, normalmente 1 cm., producido por un aguacero de duración específica e intensidad constante unitaria.

El hidrograma unitario es un modelo lineal que puede ser utilizado para calcular el hidrograma resultante de diversas cantidades de exceso de lluvia. Las hipótesis básicas asumidas en este modelo son:

1.- El exceso de lluvia tiene una intensidad constante unitaria durante todo el aguacero.

2.- El exceso de lluvia cae uniformemente distribuido por toda la cuenca.

3.- El tiempo base de los hidrogramas producidos por tormentas de igual duración son iguales, con independencia de la intensidad de la tormenta.

4.- Proporcionalidad. Las lluvias de intensidad uniforme y la misma duración pero distintos volúmenes producen caudales proporcionales a los volúmenes respectivos.

5.- Superposición. La distribución temporal de la escorrentfa superficial de un período dados independiente de la concurrente en otros períodos.

Se suele utilizar en cuencas de pequeña y mediana extensión. En este sentido el modelo se comporta razonablemente bien para lluvias de duración a 1/3 a 1/5 del T_c , y para cuencas de extensión $50 \rightarrow 5.000 \text{ km}^2$ en terrenos llanos y 1.000 km^2 en terrenos montañosos. Ver figura (8).

Igualmente pueden calcularse hidrogramas unitarios en cuencas aforadas siguiendo un plan de cálculo establecido que no viene al caso.

Por otra parte puede calcularse el hidrograma unitario para lluvias de distinta duración (hidrograma en S). Ver figura (9).

Por último pueden calcularse hidrogramas unitarios en cuencas no aforadas mediante los hidrogramas sintéticos. Estos se basan en la falta de datos metereológicos y foronómicos. Para paliar esta situación se han desarrollado hidrogramas unitarios sintéticos que ofrecen al profesional un amplio abanico de posibilidades para definir el hidrograma unitario de la cuenca. Ver figuras (10) y (11).

El conjunto de métodos desarrollados para definir el hidrograma sintético se pueden agrupar en tres clases.

1) Métodos que establecen relaciones entre las características del hidrograma:

- Caudal punta, q_p
 - Tiempo base, T_b
 - Tiempo al poco, T_p
 - Características de la cuenca
- } Hidrograma de Snyder

2) Métodos basados en la representación de la forma del hidrograma unitario mediante funciones matemáticas, obteniendo hidrogramas adimensionales. El más popular es el definido por el U.S.S.C.S. (hidrograma triangular).

3) Hidrogramas basados en los modelos de conducción de avenidas.

Dentro de esta última destacan los siguientes:

a) Modelo TR-20 (U.S. Soil Conversation Service).

- Calcula hidrogramas de las tormentas (método del número de curva y el hidrograma sintético adimensional)

- Conduce a través de la red de drenaje.
- Combina o separa los hidrogramas en las confluencias

b) Modelo HEC-1 (U.S. Army Corps of Engineers'-1981)

- Programa que simula la escorrentía superficial conocida la precipitación.
- El modelo sigue el proceso que se expone a continuación:
 - 1) Cálculo del volumen de escorrentía procedente de las precipitaciones en forma de nieve y fusión del manto nivoso.
 - 2) Calcula para cada subcuenca la precipitación eficaz, incluyendo cuatro métodos para el cálculo del volumen de escorrentía, incluyendo el del número de curva.
 - 3) Cálculo del hidrograma. El usuario puede elegir entre los siguientes métodos:
 - Hidrogramas sintéticos de Snyder y del S.C.S.
 - Método de las isocronas
 - 4) Conducción de la avenida aplicando los métodos
 - Muskingun
 - Puls modificado
 - Onda cinemática
- Presenta un módulo para la combinación de hidrogramas.
- Otras actividades:
 - Organización de parámetros hidrológicos
 - Evaluación de medidas de control de avenidas
 - Cálculo de los costes económicos de los daños.

c) Modelo HYMO (Agricultural Research Service del U.S. Department of Agriculture - 1973)

- Utilizado en estudios de pérdidas de suelo en cuencas agrícolas.
- Utiliza el método del número de curva para el cálculo de la escorrentía directa.

- El hidrograma se calcula a partir de un hidrograma sintético en forma de función gamma de dos parámetros.
- La conducción de hidrogramas se realiza por una derivación del método Muskingum, denominado coeficiente de almacenamiento variable (USC).

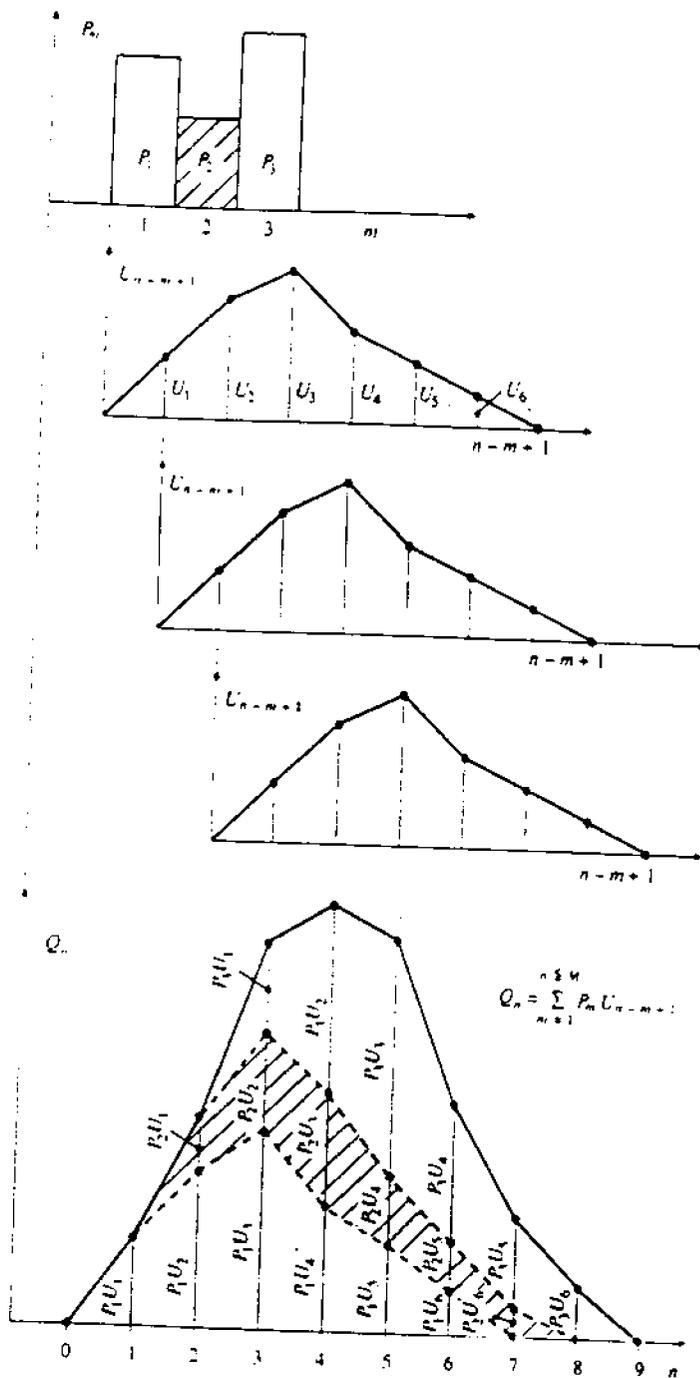
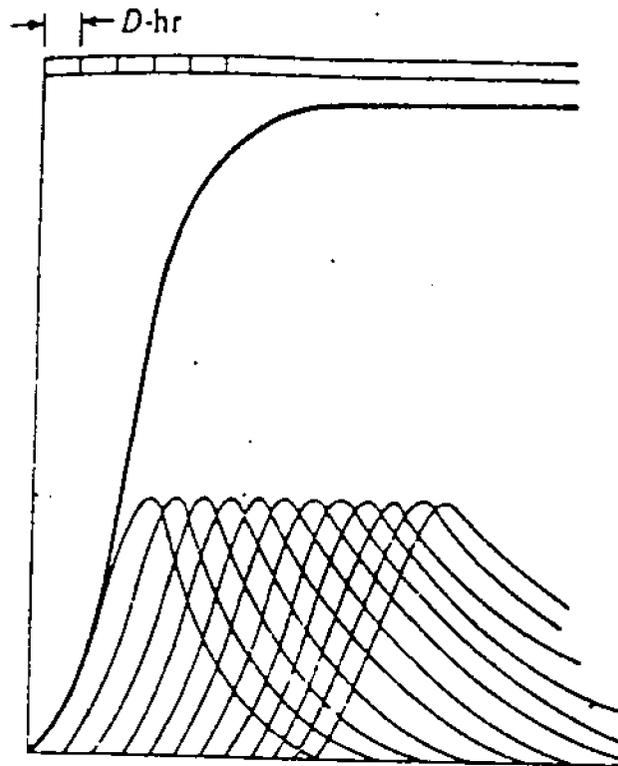


FIGURA 8. APLICACION DEL HIDROGRAMA UNITARIO

FIGURA 9. HIDROGRAMA EN S



(a)

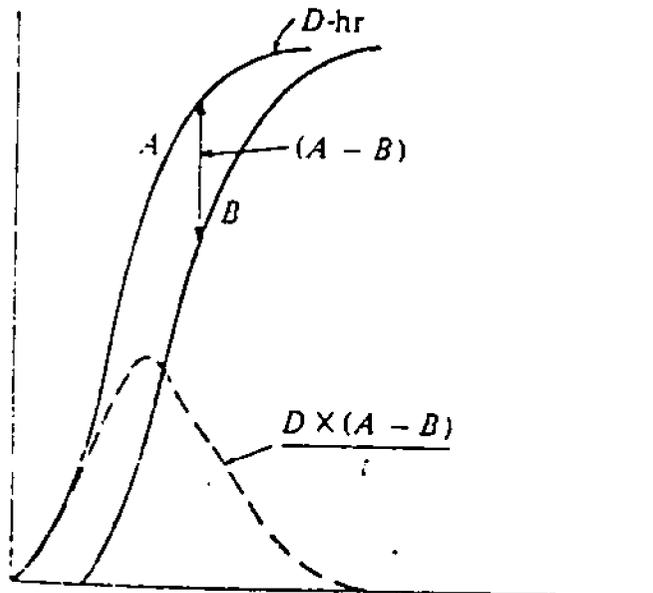
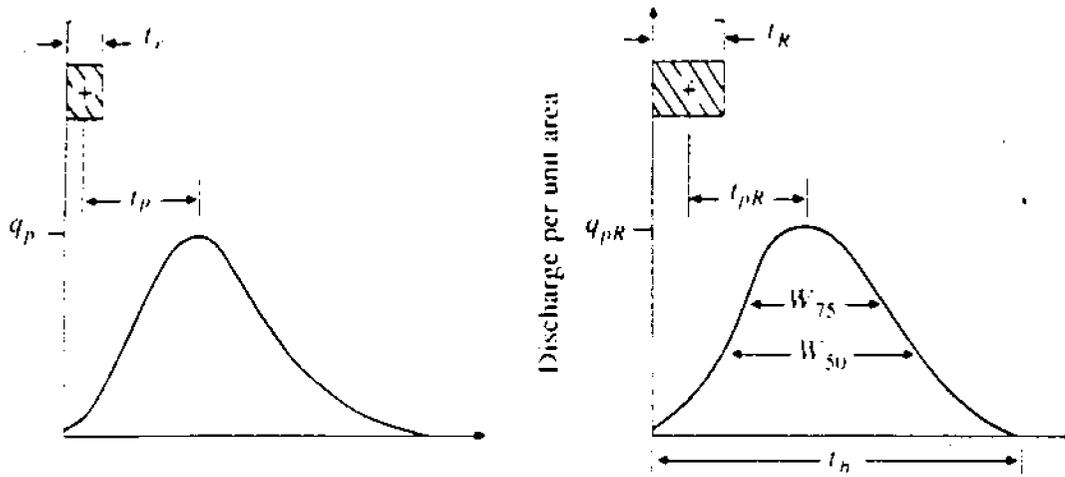
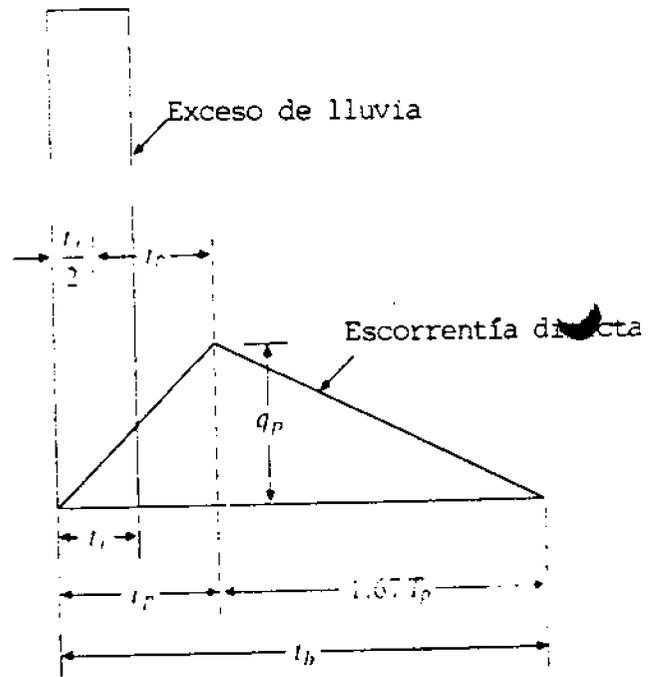
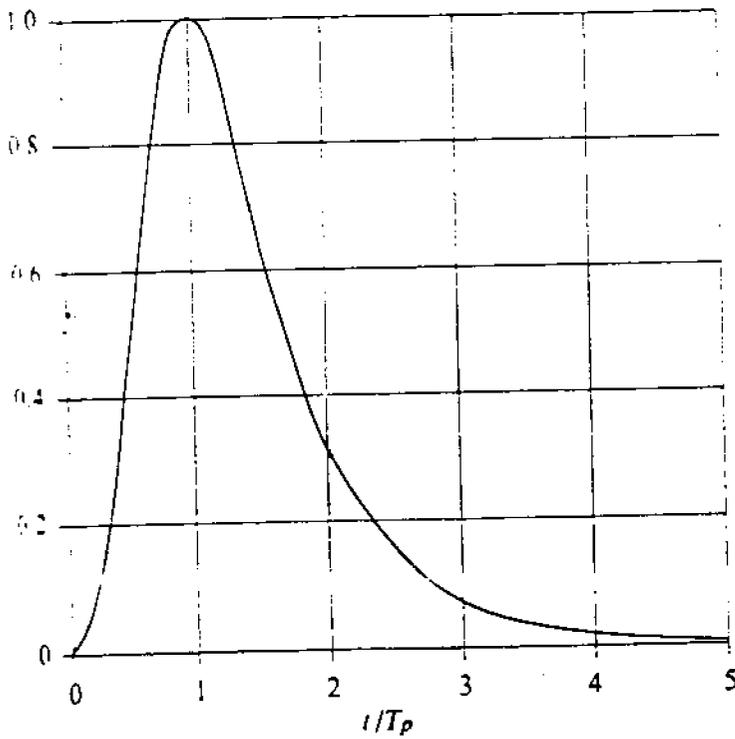


FIGURA 10 HIDROGRAMAS SINTETICOS

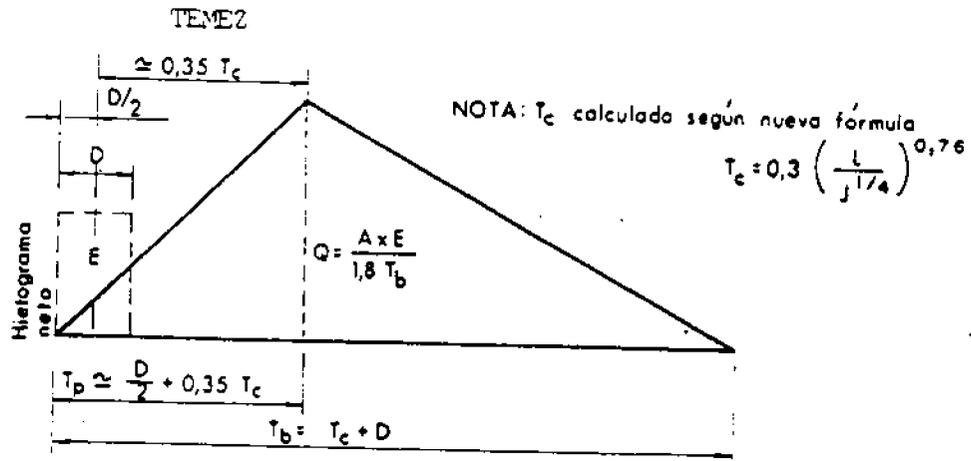


HIDROGRAMA DE ~~SYBER~~
SUNDEI

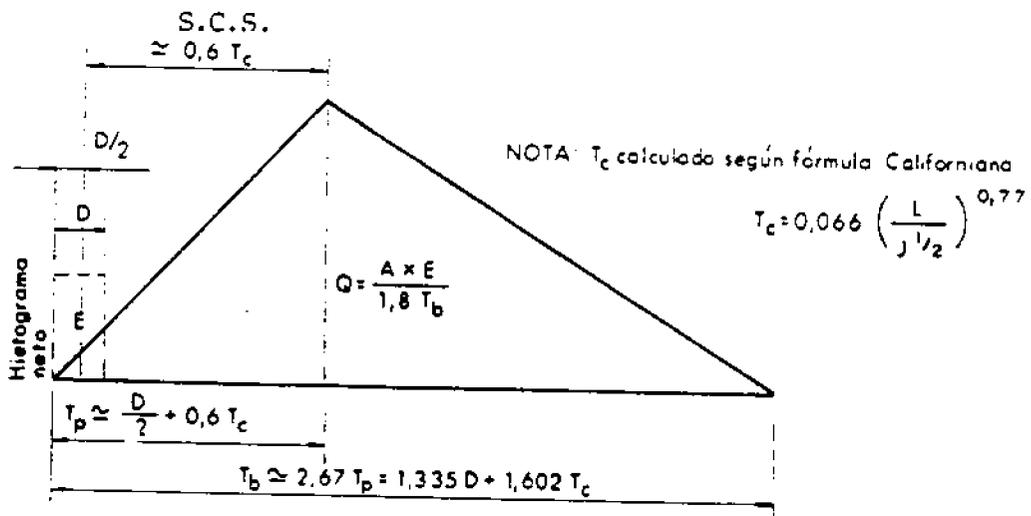


HIDROGRAMA DEL S.C.S.

FIGURA 11 . HIDROGRAMAS TRIANGULARES



a) Propuesta en este trabajo



VIII.- PREVENCIÓN Y PREDICCIÓN

La defensa contra las avenidas de las instalaciones y aprovechamientos que se desarrollan en áreas inundables por avenidas, se puede clasificar en dos tipos:

a) Medidas estructurales

- Presas de regulación
- Diques
- Balsas de retención
- Encauzamientos
- etc.

b) Medidas no estructurales

Son las que se tienen que potenciar si se quieren reducir los efectos negativos de las inundaciones.

El conjunto de medidas se agrupan en la denominada "ordenación agro-hidrológica", cuyos objetivos son: la conservación y restauración del suelo y del medio natural, la regulación de las avenidas, y la provisión hídrica. La incidencia en mayor o menor grado de los efectos del geodinamismo torrencial y el problema de la escasez del recurso agua, obligan a dar prioridad a uno u otro de los objetivos previamente establecidos, aun cuando exista una clara interrelación entre los mismos.

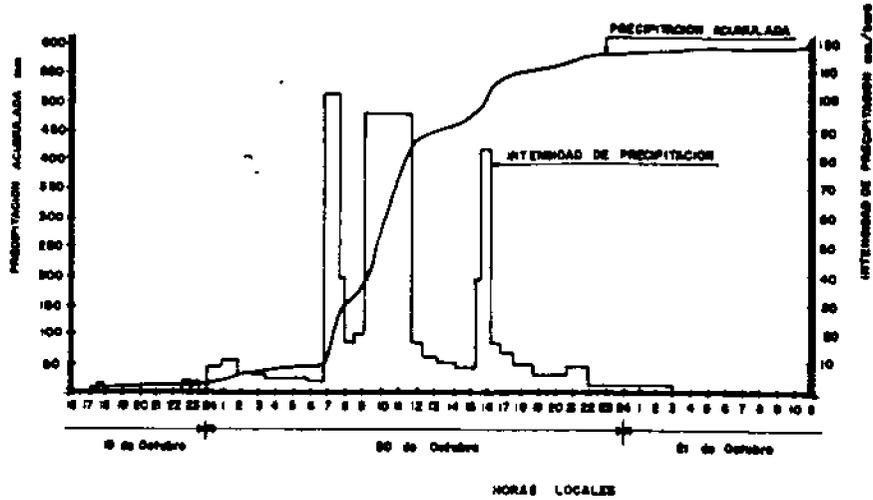
A continuación se muestran dos figuras (12) y (13) en las que puede apreciarse la reducción del caudal punta de la avenida en la misma cuenca, una vez que se actúa en ella mediante el uso racional de los recursos y la adecuación al medio de las acciones técnicas y biológicas.

Por último, dentro de este primer punto de la prevención, hay que hacer constar que la aparición de las avenidas, como tal fenómeno natural, es inevitable. No obstante ha de procurarse realizar las medidas anteriormente descritas, teniendo en cuenta el balance entre el coste de las actuaciones preventivas y el beneficio representado por el valor de las posibles pérdidas producidas por la inundación, a lo largo de un tiempo deter-

minado. La optimización de los costes, producidos por la adopción de las medidas de protección adoptadas y de los producidos por la inundación, se rá el auténtico problema a resolver.

Para dar soluciones a este problema hay que tener en cuenta que se trata de una tarea basada en una ciencia multidisciplinar, como es la Hidrología, y por tanto se requiere de un conocimiento muy preciso de todos los datos necesarios para la elaboración de planes de prevención.

En cuanto a la predicción ya se ha hablado en el desarrollo de la ponencia, por lo tanto, lo único que hay que resaltar es que una buena red de estaciones tanto forométricas, como pluviométricas, dará como resultado un mejor conocimiento de las máximas crecidas y la probabilidad de que se puedan presentar en distintos períodos de tiempo considerados.



Hidrogramas de simulación de influencia de la ordenación agrohidrológica en las avenidas en el Río Jarafuel

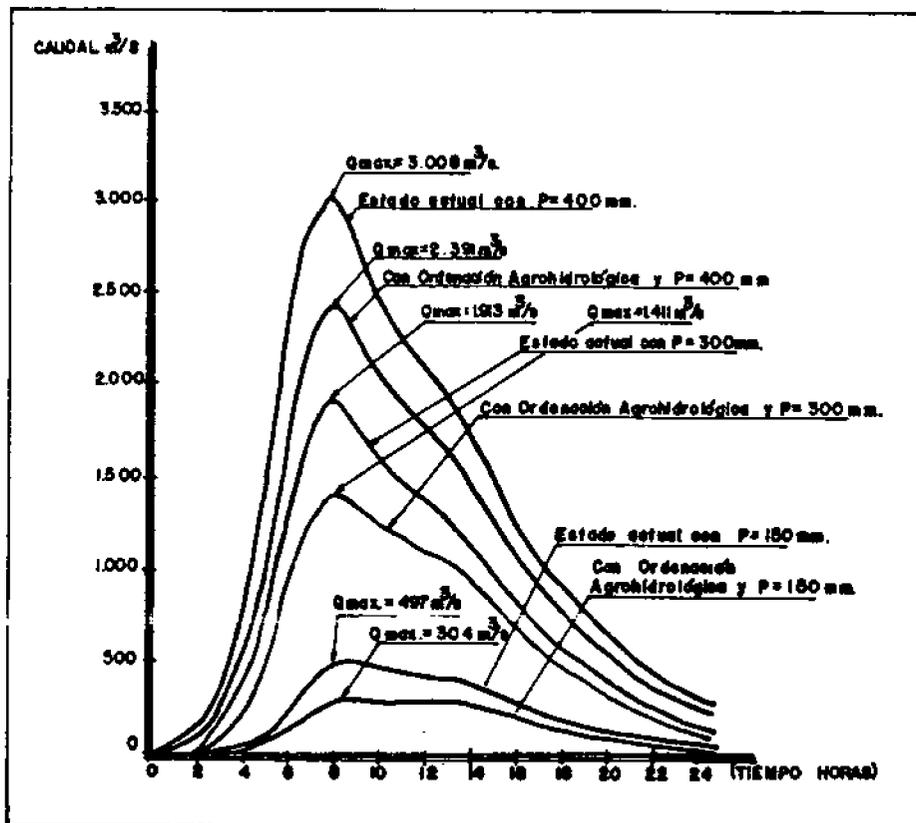
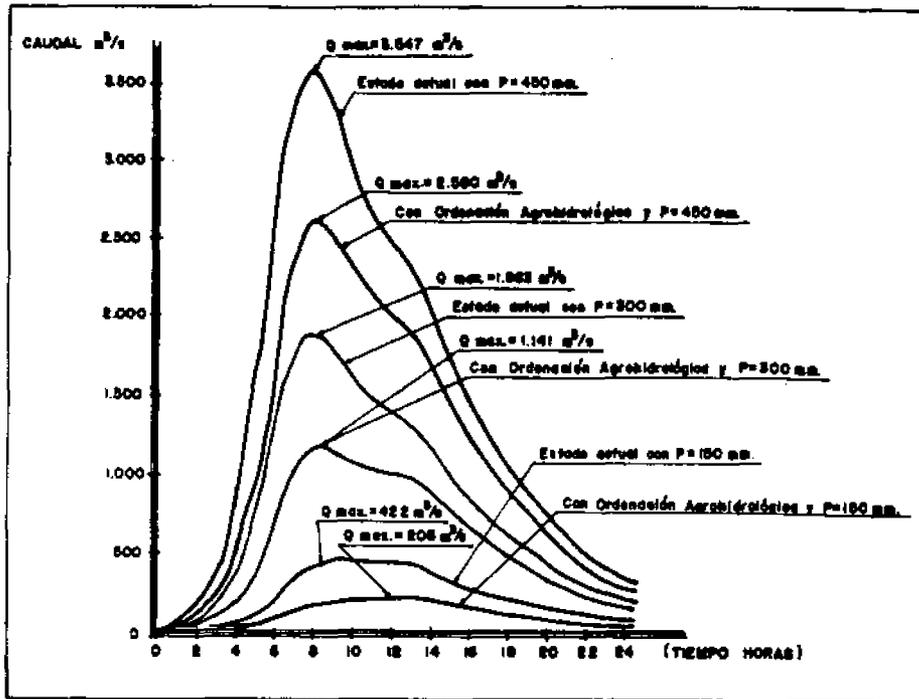


Figura (12)

Hidrogramas de simulación de influencia de la ordenación agrohidrológica en las avenidas en el Río Escalona



Hidrogramas resultantes de la simulación para conocer la influencia de los incendios forestales en las avenidas de los Ríos Jarafuel y Escalona

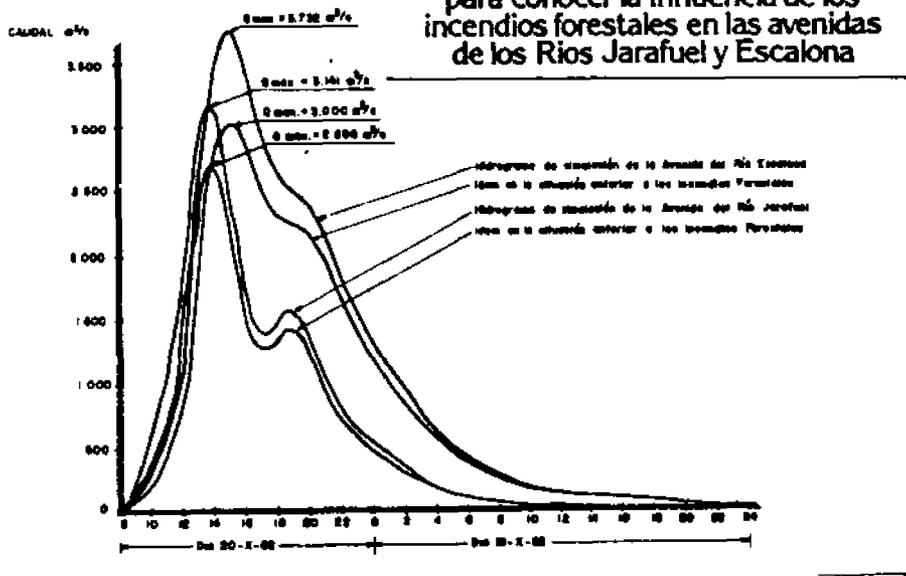


Figura (13)

BIBLIOGRAFIA

- BANCO DE BILBAO, Revista el Campo. Foletín de información agraria nº 98, 1985. Parques y Montes de España.
- BEDIENT, P.B. and HUBER, W.C., (1988). Hidrology and Floodplain Analysis. Addison-Wesley, Reading.
- CHOW V.T., MAIDMENT, D.R. and MAYS, L. (1988). Applied Hidrology, McGraw-Hill, New York.
- DUNNE, T. and LEOPOLD, L.B. (1978). Water in Enviromental Planning. W.H. Freeman. San Francisco.
- ELIAS CASTILLO, F. y RUIZ BELTRAN, L. (1979), Precipitaciones máximas de España. Estimaciones basadas en métodos estadísticos. ICONA, Monografía nº 21. (Madrid).
- LAMAS ROMERO, J.L. (1985), Factores climáticos e hidrológicos en la formación de avenidas. Geología y prevención de daños por inundaciones. I.G.M.E. (Madrid)
- LOPEZ CADENAS DE LLANO, F. y MINTEGUI AGUIRRE J.A. (1986), Hidrología de superficie. Tomo I. E.T.S. Ingenieros de MOntes (Madrid).
- TEMEZ, J.R. (1978), Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales, D.G. de Carreteras, MOPU (Madrid)

CURRICULUM

- Trabaja en ICONA en trabajos relacionados con la erosión.
- Doctor Ingeniero de Montes.
- Colaborador de empresas privadas consultoras como:
 - * INYPSA
 - * VAOTSA
 - * EILA - Consultores en temas de Hidrología
 - * IIT (Instituto de Investigación Tecnológica) en ICAI
- Trabajó en TRAGSA, empresa pública, relacionada con la construcción en el sector agro-forestal.
- Profesor en la E.T.S. Ingenieros de Montes en la unidad docente de Hidráulica General y Aplicada e Hidrología de Superficie y Conservación de Suelos.
- 32 años

