

Hacia el conocimiento de la intensidad máxima absoluta de las precipitaciones atmosféricas^(*). Una deducción más de las «curvas IDF. Barcelona-Fabra»⁽¹⁾

Por CESAR GOMEZ CAFFARENA

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Presas e Hidrología de IBERINSA

El autor no pretende descubrir un Mediterráneo seguramente descubierto en otras publicaciones y estudios. Sólo pretende poner en conocimiento del Ingeniero de Caminos «de a pie», es decir, no versado en meteorología ni hidrología, a través del más antiguo de los órganos de los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, la Revista de Obras Públicas, un pequeño avance, que desearía fuese discutido en la misma revista, sobre un punto sobre el que ha sido numerosas veces consultado: Cómo se puede llegar a determinar la intensidad pluviométrica máxima probable, en pequeñas áreas para las que se pueden deducir «tiempos de concentración» sumamente pequeños, menores desde luego de 10 y 5 minutos.

Al autor le parece haber encontrado un camino en el artículo «CURVAS IDF. BARCELONA-FABRA», publicado en la R.O.P. núm. 3.255, de febrero de 1987 (1).

1. ANTECEDENTES

Desde que me he dedicado a la Hidrología para Saneamientos, Autopistas, Carreteras y Ferrocarriles (1970 al presente) me he tropezado con el problema de los «tiempos de concentración» muy pequeños. Llamo muy pequeños a los menores de 10 minutos, 5 minutos e incluso de 1 minuto.

Aunque el «tiempo de concentración» no es un concepto totalmente claro: Tiempo que tarda la escorrentía de superficie en alcanzar su punto de evacuación; lo que si está claro es que se trata de la única forma de utilizar el mal calificado método racional, basado en la fórmula:

$$Q = C.I.A. \quad [1]$$

Expresión en la que:

Q = Caudal escurrido (en volumen de líquido por unidad de tiempo).

C = Coeficiente adimensional de escorrentía,

en el que radica toda la irracionalidad de la fórmula racional [1], ya que su valor oscila desde cero a más de la unidad, como puedo demostrar en otra ocasión.

I = Intensidad probable de la precipitación (en altura de la misma por unidad de tiempo = velocidad de caída de la precipitación), constante durante el tiempo de concentración, para que la fórmula [1] goce del calificativo de racional.

A = Superficie en la que se produce la escorrentía.

Es evidente que todo lo que la fórmula [1] dice es:

«Caudal escurrido = Velocidad $\times$ Area $\times$ $\times$ Coeficiente de reducción (que puede ser el que Vd. quiera o el que a Vd. le manden)».

Los argumentos que a uno le dejan para discutir son:

- El valor de la intensidad máxima probable, («I») para cada tiempo de concentración («t») (horas o minutos según la importancia de la cuenca «A»).
- El coeficiente de escorrentía «C».

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de septiembre de 1988.

Dedico este estudio exclusivamente a la variable «I» en el supuesto de que ésta tiene en cada lugar de la tierra un valor máximo probable para cada tiempo de concentración «t», definiendo dicha probabilidad «P» de no ser sobrepasada, por:

$$P = 1/T$$

siendo,

T = período de retorno o recurrencia (en años) de forma que siempre debe entenderse que «I_T» es la intensidad que se produce, como promedio, una vez cada «T» (años) de forma que la probabilidad de que en un año, tomado al azar, se alcance o supere la intensidad «I_T» es $P = 1/T$

O sea que, dicho de otra forma, en un año cualquiera:

- La probabilidad de que se produzca I₂ es $P = 1/2 = 0,5$
- La probabilidad de que se produzca I₅₀₀ es $P = 1/500 = 0,002$

Llamo aquí la atención, desde ahora, sobre la falta de significado del valor o concepto I₁ ya que, la probabilidad de que se produzca I₁ es P = 1, o sea que se tiene la certeza absoluta de que cualquier año se producirá un intensidad I₁ o mayor, o bien, que nunca se presentará ningún año, por seco que sea, en que deje de caer precipitación con intensidad menor que I₁.

Para poder asegurar que I₁ es mayor que cero sería necesario haber medido todas las intensidades de precipitación en Barcelona (por ejemplo), desde que existen precipitaciones sobre este lugar de La Tierra. Es tan absurdo llegar a determinar por métodos estadísticos (los únicos que pueden utilizarse para esto) la intensidad I₁ como la intensidad de I_{1.000.000}, ambas inasequibles para nuestra cortísima estadística (la máxima 60 años en Fabra, Barcelona).

Pero vuelvo a mi experiencia, es decir a mis «antecedentes»: ¿Por qué mi empeño en conocer (o intentarlo) la «intensidad máxima absoluta de las precipitaciones atmosféricas» en algún lugar de España (especialmente si es en Barcelona)?

Y ¿Por qué (si llego a ello) publicarlo?

1.º Porque existe una Instrucción de Carreteras (2).

2.º Porque, aunque derogado (3), ha existido el Decreto 2508/1975, de 18 de septiembre, sobre previsión de daños por avenidas (4), que fue espoleado por la «Circular a todos los Servicios en relación a informes sobre obras en cauces públicos» (5), redactada y remitida por el entonces Comisario Central de Aguas, circular igualmente derogada por (3).

La Instrucción de Carreteras (2), textualmente dice (pág. 5): «4.2.4.3.2. Cálculo de las precipitaciones.

La correlación entre la intensidad media de precipitación de duración variable y la intensidad de la precipitación horaria máxima que se refiere al mismo período de retorno viene dada por la fórmula:

$$I_t = 9,25 I_h t^{-0,55} \quad [2]$$

En la que: I_t es la intensidad media horaria que corresponde a la precipitación de duración t, en mm/h.

I_h es la intensidad media de la precipitación horaria máxima, en mm/h.

t es la duración de la precipitación, en minutos».

Debo añadir que «t» es también el tiempo de concentración y que, por tanto, cuando «t» tienda a cero, la intensidad de cálculo en [1], «I₁» tenderá a infinito.

Por otra parte, el Decreto 2508/1975 (como ya he dicho derogado, así como la Ley de Aguas, que cita) decía:

«Artículo primero.—Uno. El M.O.P., sin perjuicio de la facultad que le corresponde de deslindar el dominio público y conforme al artículo 248 de la Ley de Aguas (antigua), determinará la zona delimitada por la línea que alcancen las avenidas (?), cuyo período de recurrencia sea de 500 años.

Dos. Mientras se completan los estudios pertinentes y se procede a la determinación de esa línea allí donde aún no haya sido definida, se entenderá que en terreno rústico ésta discurre a una distancia de cien metros (!), contados a partir de ambos límites del alveo del cauce».

Renuncio a comentar todos los disparates

contenidos en los dos artículos transcritos. Ellos mismos se comentan.

Una vez sobrepasadas «las últimas catástrofes» que dieron lugar a tal Decreto, éste cayó naturalmente en su inoperancia implícita, hasta que sucedieron las nuevas catástrofes del Júcar y Cataluña (en 1982) y de Vizcaya y Cantabria (en 1983), lo que motivó la Circular (5), de 3-6-83, que dice abreviadamente:

«... han de contemplarse con especial atención los estudios hidrológicos e hidráulicos que figuran en los Proyectos correspondientes, señalándose que, en concordancia con el Decreto 2503/1975 de 18-9 (4), sobre previsión de daños por avenidas, han de proyectarse las obras de forma que puedan desaguar las avenidas de 500 años.

Los informes que se emitan deben... en dichos informes debe establecerse una conclusión, así mismo en forma expresa y concreta, en relación a la suficiencia de capacidad de desagüe para la avenida citada de 500 años.

Si la obra proyectada no tuviese la indicada capacidad de desagüe, deberá requerirse nuevo Proyecto de los peticionarios».

Todo ello en clara contradicción con la Instrucción de Carreteras (2) y sin que ésta fuese derogada por disposición de mayor rango, con lo que seguía vigente la tabla 4.1.

La indicada Circular (5), de 3-6-83, produjo en numerosos compañeros de la Administración un celo exagerado sobre su cumplimiento. Algunos han llegado a entender que las cunetas son cauces públicos y han obligado a los proyectistas a dimensionar para 500 años, lo que la Instrucción de Carreteras no exige que se haga más que para 10 años.

A esto se une el que el desagüe de cunetas tenga, a veces, tiempos de concentración del orden de:

$$t = 1 \text{ minuto}$$

Anteriormente a la Circular (5), los que hacíamos los estudios hidrológicos, teníamos (allá por los años 70) la «bula» de establecer como tiempo de concentración mínimo:

$$t = 10 \text{ minutos}$$

Y así al entrar en la fórmula [2], o de Mon-

TABLA 4.1.

DE LA INSTRUCCION DE CARRETERAS (5.1. Pág. 2)

Tipo de estructura	Carretera	Período de retorno (años)
Puentes en puntos en los que la retención de la riada puede provocar daños en el puente o su pérdida	Todas	50 - 100
Puentes en otras circunstancias	Principal Secundaria	50 - 100 25
Caños, tajeas, alcantarillas y pontones	Principal Secundaria	25 10
Cunetas y drenaje longitudinal	Principal Secundaria	10 5
Vías urbanas, excepto cauces y sumideros	Todas	10
Cauces y sumideros (1)	Todas	2 - 5

(1) Se puede tolerar la formación de remansos de corta duración.

tana, como queda aclarado en (1), resultaba:

$$t_{-0.55} = 0,2818$$

Mientras que para $T = 1$ min. hubiera resultado:

$$t_{-0.55} = 1$$

Esto es una intensidad «I» 3,5 veces mayor, o lo que es lo mismo un caudal «Q» 3,5 veces mayor.

Y esto para un período de retorno $T = 10$ años, pero si hubiésemos operado con $T = 500$ años, probablemente nos hubiera resultado otras 2 veces mayor, es decir que la fórmula [2], unida al Decreto (3) nos hubiera llevado a dimensionar absurdamente para una caudal $3,5 \times 2 = 7$ veces mayor.

Desgraciadamente esto que a mi no me sucedió pero que ha sucedido a compañeros que han venido a pedirme auxilio o recusos para evitarlo, ha dado lugar a que me preocupe del tema, de forma más eficaz que recomendarles que para «t» menor que 10 min. tomasen la tangente a la curva [2] en el punto $t = 10$ min., para reducir algo el «desaguisado».

2. ¿QUE ES LA INTENSIDAD MAXIMA DE UNA PRECIPITACION?

Ya he dicho que la intensidad de una preci-

pitación es la velocidad de caída de la misma. Pero se trata siempre de una velocidad media de caída, es decir, la velocidad media de la caída en un área no infinitamente pequeña.

Por ejemplo, si examinamos (6) en su pág. 69, Tabla 1, vemos las siguientes velocidades máximas de caída según numerosos investigadores.

Tipo de precipitación	Velocidad max. observada (m/s)
Gota de lluvia de $\varnothing = 5,5$ mm	9,3 a 8,0
Copo de nieve aglomerado	1,0
Esfera de granizo de $\varnothing = 76$ mm	52

Pero es evidente (y más de uno lo habrá sufrido) que si vamos en un automóvil y en nuestro parabrisas pega una bola de granizo de $\varnothing = 76$ mm a 52 m/s = 187 km/h., suponiendo que sólo astille nuestro cristal especial y no nos mate, podremos parar el coche y observar que sobre el cristal no vuelve a caer ninguna bola igual, o si lo hace, pasan minutos. Es decir la Naturaleza no lanza el granizo sobre un punto, como si fuera la metralleta de un excelente tirador. Ni siquiera lo lanza sobre $0,5$ m² de superficie de cristal. Luego la velocidad de:

$$52 \text{ m/s} = 187 \text{ Km/h} = 187 \times 10^6 \text{ mm/h} = 3.120.000 \text{ mm/min.}$$

No es una velocidad media sino una velocidad máxima instantánea. A un hidrólogo sólo le sirve para tener mucha precaución cuando advierta que está granizando. Respecto a la lluvia y la nieve no hay peligro de muerte instantánea.

Así pues, sólo podemos hablar de intensidades máximas como velocidades medias medidas sobre una pequeña pero representativa superficie, es decir sobre la superficie de un pluviógrafo, de forma que lo medido sea representativo. (Ver (6) págs. 81 a 83, Tabla III, y págs. 87 a 93).

Supuesto esto, todos comprenderemos la enorme dificultad en determinar lo que yo pretendo: Mediante un aparato ineludiblemente imperfecto deducir la INTENSIDAD MAXIMA (FORZOSAMENTE INSTANTANEA) DE UNA PRECIPITACION, útil para interpolar entre

«t» = 5 min. y 0 min. de duración, en el caso de Fabra (Barcelona) o entre «t» = 10 min. y «t» = 0 min. en otros casos. Con esto último me estoy refiriendo a la inmensa labor del doctor Ingeniero Agrónomo Francisco Elías, (7) y (8), publicaciones en que no ha bajado de dicho tiempo «t» = 10 min., aunque en Fabra (1) se han determinado hasta «t» = 5 min.

Así pues, tengo que definirme así:

— «La intensidad máxima de una precipitación es aquella cuya duración es de prácticamente «t» = 0 minutos de duración, y que se deduce por métodos extrapolativos, por considerar físicamente imposible deducirla, hoy día, por medio de mecanismos que lo hagan representativamente, respecto a una superficie no demasiado pequeña» (ver (6) pág. 83, Tabla III).

3. ¿POR QUE SE NECESITA CONOCERLA?

En realidad existe el tiempo de concentración.

Supongamos una superficie lisa y cuadrada en planta, pero compuesta por cuatro planos (triángulos) inclinados iguales y convergiendo en un sumidero en el centro del cuadrado de 10 m. de lado. Si llueve sin viento y con intensidad fuerte y uniforme y la superficie es impermeable, se puede admitir que el agua escurrirá hacia el centro a una velocidad no menor de 1 m/s. Para esta velocidad, el tiempo de concentración será:

$$t = e/v = 10 \times 2\sqrt{2}/2 = 7,07 \text{ s.} = 0,118 \text{ min.}$$

Es decir, mucho menos de 1 minuto.

Calcular la velocidad de escurrimiento del agua sobre una superficie dada no es fácil, pero en el ejemplo que he puesto, con no mucha inclinación, son muchas las fórmulas empíricas que dan velocidades mayores de 1 m/s.

Basta este ejemplo para concluir que es útil o puede serlo, si no se recurre a hiperdimensionar, conocer la intensidad máxima probable, para distintos periodos de retorno, para un tiempo de duración o concentración indefinidamente pequeño, esto es, para «t» = 0.

4. ¿COMO SE PUEDE CONOCER?

Es muy probable que, actualmente, se haya aproximado mucho más el conocimiento directo de intensidades de precipitación en tiempos de duración muy cortos. Pero dudo que medir el valor para «t» = 0 se haya conseguido.

Veo en (6), pág. 151, la Fig. II-30. «Las alturas de lluvia record en el mundo para diferentes duraciones»: En Opid Camp (California) en abril de 1926 se midieron 16 mm. en 1 minuto ($I = 16 \text{ mm/min}$) y en Haughton Grove (Jamaica) 42 mm en 3 min. ($I = 14 \text{ mm/min.}$) pero no aparecen series de 1 ni de 3 minutos de duración.

En (9), pág. 9-50, Fig. 0-45, aparecen 6 ciudades U.S.A. para las que se han determinado las curvas IDF (intensidad, duración, frecuencia) entre duraciones de 5 minutos a 24 horas. Pero no menos de 5 min. Más adelante volveré a referirme a esta interesante figura. De momento, me basta con concluir que no existen estadísticas suficientes para deducir directamente lo que pretendo.

No obstante y puesto que he citado a (9) y a (6), debo añadir que en el 1.º de ambos tratados figura también un gráfico (fig. 9-44, pág. 9.47) que contiene «Los puntos record mundiales de precipitación». En este otro gráfico, el record para 1 minuto de duración está en Unionville, M. D. con una precipitación de 30 mm. y por tanto una intensidad $I = 30 \text{ mm/min.}$ casi el doble de la antes citada (sin que figure la fecha). Ambas figuras proceden de la misma publicación (10), pero la publicada por (9) es de 1950, lo que hace presumir que el 2.º record citado se ha producido en la década de los 40.

Pero este apartado no es para citar records sino sólo para aseverar que el camino actual para conocer cómo se puede deducir la intensidad máxima absoluta de las precipitaciones es la EXTRAPOLACION ESTADISTICA, con la cual se obtiene también su frecuencia, aunque ello da lugar a convertir la incógnita buscada en una variable función del tiempo T, o período de retorno.

Con ello solamente comenzamos a aproximarnos a un conocimiento evidentemente útil

y asequible a ser aplicado no sólo en Fabra sino en muchos otros lugares de España.

5. LEYES VIGENTES

5.1. Simbología

Prescindiendo de la utilizada hasta aquí y para evitar confusiones, expongo la siguiente:

I = intensidad de precipitación, en mm/min., que se supone constante durante un lapso de «t» minutos, tomando «t» hasta su mínima duración, $t = 0$.

I_T = La máxima correspondiente a un período de retorno, $T = 2,5 \dots 500$ años, en mm/min.

t = duración de la precipitación de intensidad constante, en minutos (min).

a = parámetro en la ley de Montana. (Positivo).

b = parámetro en la ley de Montana. (Negativo).

f = parámetro en la ley de Talbot. Equivale a mm.

g = parámetro en la ley de Talbot. Equivale a min.

m, n = parámetros en la ley de ¿Fuller? (Positivos).

A, U = parámetros en la ley de Gumbel.

M = grado entero de un polinomio de ajuste.

N = número de puntos a ajustar mediante un polinomio de grado M .

T = período de retorno, en años.

YC = Valor ajustado mediante el polinomio de grado M .

E = error o diferencia.

$E.M.C.$ = error medio cuadrático.

E . Máx = error máximo.

5.2. Leyes Simples

Llamo leyes simples a aquéllas en que los valores de la incógnita (en este caso «I») vienen determinadas, tanto para obtener su duración «t», como su probabilidad o su período de retorno «T», por sólo dos parámetros.

En este estudio y debido a que en su base de partida, el ya citado artículo: «Curvas IDF. Barcelona-Fabra» (1) se han utilizado leyes de

dos parámetros, utilizo solamente las mismas leyes. Por ahora carezco de los datos básicos para operar con leyes de más de dos parámetros.

5.3. Leyes más Complejas

Una ley más compleja que vengo utilizando con mi equipo, y que podría denominar ley de Galton-Gibrat-Guitart (11) se puede expresar así:

$$I_i = R + S \cdot T^z \quad [3]$$

En la que

R, S, T = parámetros a determinar.

z = valor definido por la integral de Gauss.

$$P(I) = \frac{1}{(2\pi)^{0.5}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2/2} \cdot dz \quad [3.1.]$$

Con esta ley se han obtenido resultados muy aceptables en España y parte de Europa.

Posiblemente hay otras leyes «más complejas» igual o más acertadas, pero yo no las conozco.

6. OPERANDO CON LAS LEYES SIMPLES POR EXTRAPOLACION

6.1 Ley de Montana

$$I = at^{-b} \quad [4]$$

Es una ley sumamente simple y lógicamente la más antigua ideada por los hidrólogos y, en contra de lo que aseguran los autores de (1), con ella se han obtenido extraordinarios resultados, como se comprueba en (8) para valores de «t» mayores de 10 minutos.

Un buen resultado, puede verse también en (9) en la ya citada fig. 9-44 de la pág. 9-47: la recta en papel logarítmico.

$$R = 15,3 D^{0,486}$$

En la que:

R = Precipitación, en pulgadas.

D = Duración de la misma en horas.

Transformada en mm. y minutos queda en la forma:

$$Pr = 53,13 t^{0,486} \quad [5]$$

Siendo:

Pr = altura de la precipitación, en mm.
Para expresar la intensidad en mm/min.

$$I = \frac{Pr}{t} \quad I = 53,13 t^{-0,514}$$

Con ella resulta que para $t = 1$ min., $I = 53,13$ mm/min., pero para $t = 1$ min. ya he dicho que las máximas intensidades registradas en La Tierra, hasta el año 1950 (apartado 4):

Opid's Camp (California), abril 1926

$I = 16$ mm/min

Unionille, M. D. (Maryland, USA) (13).

$I = 30$ mm/min.

En cualquier caso si se compara la expresión [5] con la [2], de la Instrucción de Carreteras, se ve que en esta última para toda España, la intensidad correspondiente a 1 minuto se la hace igual a $9,25 \times I_0$, lo que implica un desconocimiento total de la inmensa variedad pluviométrica de España, incluyendo las Islas Canarias.

En la figura citada puede verse, que la ley se ajusta bien para duraciones de más de 30 días (Cherrapunji, India) se separa entre 6 horas y 20 días, vuelve a ajustarse bien entre 15 minutos y 5 horas y finalmente mal para menos de 8 min.

Otro tanto ocurre en el mismo (9), un poco más adelante, en la fig. 9-45 de la pág. 9-50 tomada de (12). Cinco de los 6 ábacos que componen la figura (Chicago, Illinois; Boston, Massachusetts; Santa Fe, New Mexico; New Orleans, Louisiana y Miami, Florida), prueban por su forma, no recta sino curvada, que las intensidades de estos lugares no cumplen la ley de Montana. El ábaco de Seattle, Washington da unas curvas más próximas a rectas. Pero en cualquier caso todas ellas no pasan de una duración mínima «t» menor de 5 minutos.

Esto y el hecho de que para $t = 0$ resulta $I =$ infinito tiran por tierra el principio de que una velocidad («I») no puede ser infinita y, por consiguiente, la ley de Montana es absolutamente inválida, para el objeto al que pretendo aproximarme.

Los parámetros «a» y «b» para Barcelona-Fabra han sido determinados por los autores de (1) en la Tabla II, que reproduzco parcialmente

TABLA II (I)

MONTANA $i = a \cdot t^b$ Período de retorno	a	b	Correlación
2	6.199	- 0.584	0.9950551
5	7.299	- 0.526	0.9953169
10	8.166	- 0.510	0.9954763
15	8.632	- 0.502	0.9955578

a continuación, suprimiendo las correspondientes a $T = 1$ años, que como he dicho en el apartado 1, no tiene significado.

Ignoro cómo se ha determinado el período de retorno, pero observo que el coeficiente de correlación es mejor a medida que aumenta «T» (años).

6.2. Ley de Talbot

$$I = \frac{f}{g + t} \quad [6]$$

Es también una ley muy simple y mucho más lógica que la de Montana. No quiero decir que sea más cierta a pesar de los ilustres hidrólogos que la avalan: Gaspar, Niemczynowicz y Chen-lung-Chen, como dicen los autores de (1). Según Remenieras (6), fue propuesta por Talbot en 1904 (pág. 157).

Luego hablaré de su comportamiento para valores muy altos de «t», pero es evidente que es mucho más lógica que la de Montana, ya que:

$$\text{Para } t = 0, \quad I = \frac{f}{g} \text{ (mm/mín.)}$$

y no infinito.

Por ejemplo, según (6), L. Besson determinó en 1931 la intensidad máxima de París y su región en:

$$I = 7620/34 = 224 \text{ mm/mín.}$$

si bien, también como una extrapolación o curva envolvente, sin fijar su período de retorno.

Reproduzco a continuación los valores de «f» y «g» determinados por los autores de (1), con la misma excepción para $T = 1$ año.

Por el contrario que en la parte de esta ta-

TABLA II (II)

TALBOT $i = f/(g + t)$ Período de retorno	f	g	Correlación
2	46.886	16.177	0.9999286
5	61.683	17.804	0.9999124
10	74.624	19.031	0.9998937
15	82.998	19.754	0.9998808

bla para los parámetros «a» y «b» de Montana, el coeficiente de correlación (que es extraordinario) empeora lentamente a medida que aumenta «T».

Para mí esto es un indicio de que las leyes de Montana y de Talbot son ambas buenas. Esto no lo puedo demostrar, pero si indicar que ambas pueden ser compaginables, lo que paso a «hacer ver» en el apartado siguiente:

6.3. Comparación entre las Leyes de Montana y Talbot

Desde un principio he pensado que las leyes de Montana y de Talbot deben tener algo en común, por lo que mi trabajo algorítmico ha empezado por este aspecto.

Además son, de las 4 leyes que analizo, las únicas que, explícitamente, relacionan «I» con «t», ya que las otras dos lo hacen entre «I» y «T».

Para esta comparación utilizo, a modo de ejemplo, la tabla II de los autores de (1), que he reproducido anteriormente.

Denominando para abreviar,

I^M = Intensidad dada por la ley de Montana [4]

I^T = Intensidad dada por la ley de Talbot [6], se tiene la tabla 1.

La tabla I invita, antes de continuar este estudio a una representación gráfica, aunque no sea más que parcial, de algunos de los pares de valores « I^M » e « I^T », como son los:

GRAFICO 1.—Leyes de Montana y Talbot para $T = 2$ años.

GRAFICO 2.—Leyes de Montana y Talbot para $T = 15$ años.

Tanto la tabla I, como los gráficos 1 y 2, expuestos a continuación, están indicando a mi juicio de una manera clara que las leyes de Montana y Talbot pueden ser complementarias:

TABLA I

t	Para T = 2		Para T = 5		Para T = 10		Para T = 15	
	I_M	I_T	I_M	I_T	I_M	I_T	I_M	I_T
0	∞	2.8983	∞	3.4646	∞	3.9212	∞	4.2016
5	2.4217	2.2140	3.1304	2.7049	3.5936	3.1053	3.8479	3.3539
10	1.6156	1.7911	2.1740	2.2185	2.5235	2.5705	2.7171	2.7895
20	1.0778	1.2960	1.5098	1.6317	1.7721	1.9119	1.9186	2.0878
30	0.8505	1.0154	1.2198	1.2903	1.4410	1.5220	1.5653	1.6682
40	0.7190	0.8346	1.0485	1.0671	1.2444	1.2641	1.3548	1.3890
50	0.6311	0.7085	0.9324	0.9097	1.1105	1.0810	1.2112	1.1899
60	0.5674	0.6155	0.8471	0.7928	1.0119	0.9442	1.1053	1.0407
70	0.5185	0.5441	0.7812	0.7025	0.9354	0.8382	1.0230	0.9247
80	0.4796	0.4875	0.7282	0.6307	0.8738	0.7535	0.9567	0.8320
90	0.4478	0.4416	0.6844	0.5722	0.8229	0.6844	0.9017	0.7562
100	0.4210	0.4036	0.6475	0.5236	0.7798	0.6269	0.8553	0.6931
110	0.3982	0.3716	0.6159	0.4826	0.7428	0.5783	0.8153	0.6397
120	0.3785	0.3443	0.5883	0.4476	0.7106	0.5367	0.7805	0.5939

ambas tiene prácticamente puntos de tangencia que, aproximadamente, se dan en los siguientes valores de «t»:

Para T = 2 años, t = 90 min.

Para T = 5 años, t = 45 min.

Para T = 10 años, t = 45 min.

Para T = 15 años, t = 45 min.

Así pues, de esta comparación se puede concluir: LAS LEYES DE MONTANA Y TALBOT PUEDEN SER COMPLEMENTARIAS, AL MENOS EN BARCELONA-FABRA.

Es cuestión de determinar con precisión el 2.º punto de cruce. De este punto, hacia la izquierda (para los menores valores de «t») se toma-

ría como válida la ley de Talbot y viceversa, hacia la derecha la ley de Montana.

6.4. Ley de ¿Elías?

Ante todo y antes de seguir, debo de pedir perdón al insigne doctor Elías (probablemente el mejor pluviólogo» de España en la actualidad) por poner interrogantes a la ley, que podría ser suya, pero que, su forma de exponerla me hace sospechar que no lo sea.

En efecto en el Capítulo 3. «FORMULAS DE ALTURA-DURACION-FRECUENCIA» de (8) dice: «La mayoría de las fórmulas de altura-duración-frecuencia (o lo que sería lo mismo I.D.F., simplemente dividiendo altura entre duración = intensidad, «I») de la precipitación uti-

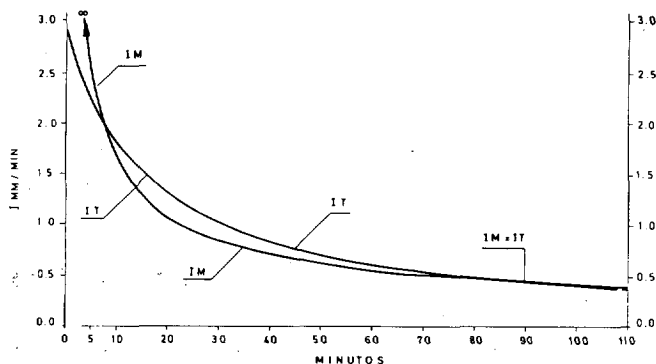


Gráfico 1.—Comparación entre las intensidades máximas probables según las fórmulas de Montana y la de Talbot para el período de retorno T = 2 años (Tabla 1).

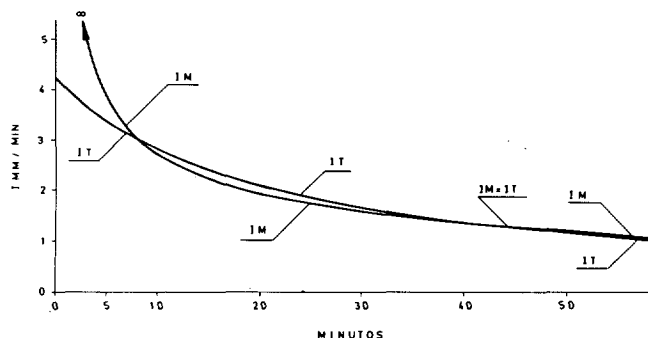


Gráfico 2.—Comparación entre las intensidades máximas probables según las fórmulas de Montana y la de Talbot para el período de retorno T = 15 años.

lizadas en hidrología aplicada son casos particulares de la fórmula general:

$$x_{t,T} = a t (t + c)^{-b} F(T,t) \quad (a) \quad [7]$$

$X_{t,T}$ es la lluvia de duración t (horas) con período de retorno T . a , b y c son coeficientes que hay que hallar para cada localidad. $F(T,t)$ es la «función de frecuencia».

Naturalmente, la fórmula análoga de intensidad será:

$$I_{t,T} = a(t+c)^{-b}F(T,t) \quad [8]$$

Conviene aclarar que la «función de frecuencia» es transformada en un parámetro independiente de la ecuación fundamental ya que sólo es utilizada para transformar « $X_{t,T}$ » (o « $I_{t,T}$ ») en « X_t » (o « I_t »), de forma que (pág. 25 y 26):

$$«X_{t,T} = \bar{X}_t [1 + K(T,n) V_t]»$$

o bien

$$I_{t,T} = \bar{I}_t [1 + K(T,n) V_t]$$

$$«K(T,n) = \frac{Y_T - \bar{Y}_n}{S_n}»$$

$V_t = S_t/X_t =$ coeficiente de variación.

Si la fórmula general (a) es adecuada para representar los valores de la precipitación máxima en una estación, será posible determinar unos coeficientes (o parámetros «a», «b» y «c») tales que los valores de « X_t » se ajusten a la ecuación:

$$Y = a t (t + c)^{-b}$$

Si el ajuste es bueno (pero no especifica cuando es bueno), la «función de frecuencia» $F(T,t)$ tomará la forma:

$$F(T,t) = 1 + K(T,n) V_t, \text{ etc.}$$

(Todo esto lo he transcrito para que los más entendidos que yo en Estadística sepan como el doctor Elías transforma la expresión (a) (o [7], según mi notación) en:

$$X_{t,T} = a t (t+c)^{-b} [1 + K(t,n) V_t] \quad [7.1.]$$

$$(I_{t,T} = a (t+c)^{-b} [1 + K(t,n) V_t]) \quad [8.1.]$$

Siendo los nuevos símbolos:

$K =$ constante función de « T » y « n » (ver tabla n.º 4, pag. 525).

$n =$ número de años en que se han obtenido valores máximos.

$x =$ media de las precipitaciones máximas anuales (pág. 23)

$Y_T =$ variable reducida para un período de retorno « T » (años).

Y^n y $S^n =$ media y desviación típica de la variable reducida « Y », para una serie de « n » años respectivamente.

$S_x =$ error típico de los máximos anuales.

Una vez transcritos los argumentos estadísticos del doctor Elías, paso a comentar que dicho señor ha analizado una serie de estaciones españolas, para « t » entre 10 minutos y 2 horas, encontrando que una buena parte de ellas, concretamente nueve tienen sus «puntos alineados en papel logarítmico», y que, por consiguiente dan fórmulas del tipo:

$$X_t = a t^{-b} \quad [9]$$

Es decir

$$I_t = a t^{-b} \quad [4]$$

O, lo que es lo mismo, inciden en la ley de Montana, de la cual ya he dicho (o, al menos, hecho ver) que no puede ser válida para valores de « t » muy pequeños ya que cuando « t » tiende a cero, hace tender « I » (una velocidad) a infinito.

Y me permito aquí dudar de que los «puntos» de dichas nueve estaciones estén suficientemente alineados en papel logarítmico, para lo cual, prescindiendo de la reproducción del Gráfico n.º 3 (pág. 465 a 483), me atrevo a juzgar lo siguiente, sin entrar en análisis matemáticos que harían demasiado prolijo este estudio:

Estación	Recta [9]	Calificación personal del ajuste
Albacete	$X_t = 15.7 t^{0.25}$	Regular; para $t = 10$ min. alto
Badajoz	$X_t = 19.2 t^{0.43}$	Bueno; para $t = 10$ min. bien
Cáceres	$X_t = 16.5 t^{0.31}$	Bueno; para $t = 10$ min. muy alto
Igueldo	$X_t = 23.7 t^{0.36}$	Bueno; para $t = 10$ min. alto

La Coruña	$X_t = 17.1$ $t^{0.45}$	Muy bueno; para $t = 10$ min. muy bien
Vigo	$X_t = 16.2$ $t^{0.35}$	Bueno; para $t = 10$ min. exacto
Valladolid	$X_t = 13.6$ $t^{0.32}$	Perfecto; para $t = 10$ min. exacto
Tortosa	$X_t = 36.0$ $t^{0.52}$	Bueno; para $t = 10$ min. muy bien
Ponferrada	$X_t = 12.4$ $t^{0.39}$	Bueno; para $t = 10$ min. muy bien

En su conjunto veo que la ley de Montana, en las estaciones citadas, ajustaría mucho mejor a partir de 10 ó 30 min. en las siguientes estaciones: Albacete (30 min.), Cáceres (30 min.), Igueldo (20 min.) y Tortosa (20 min.).

En cualquier caso pienso que aunque el doctor Elías haya encontrado suficientemente alineados en papel logarítmico los puntos de las estaciones referidas, hubiera encontrado más ajustadas TODAS las estaciones a la expresión general:

$$\bar{X}_t = a t (t + c)^{-b} \quad [7]$$

Con $C \neq 0$, por pequeño que este parámetro a veces resulte, ya que esta ley [7], elimina los inconvenientes de la [9] (de Montana).

En efecto, continuando con la misma publicación [9] y pasando al Gráfico n.º 4 (pág. 485 a 507), se ve para los «puntos no alineados en papel logarítmico», buenos, muy buenos y excelentes ajustes de la ley [3], como a continuación específico en la siguientes y restantes once estaciones, con mi juicio personal.

Pág.	Estación	$X_t = a t (t + c)^{-b}$ [8]	Juicio del ajuste
487	Alicante	$X_t = 37.4t (t + 0.4)^{-0.98}$	Excelente
489	Almería	$X_t = 24.2t (t + 0.3)^{-0.82}$	Muy bueno
491	Barcelona	$X_t = 47.4t$ $(t + 0.45)^{-1.03}$	Bueno
493	Logroño	$X_t = 24.5t$ $(t + 0.35)^{-1.16}$	Bueno
495	Matacán (Salamanca)	$X_t = 24.2t$ $(t + 0.45)^{-1.14}$	Bueno

497	Soria	$X_t = 21.8t$ $(t + 0.25)^{-1.02}$	Excelente
499	Valencia	$X_t = 46.7t$ $(t + 0.35)^{-0.83}$	Muy bueno
501	Madrid	$X_t = 16.2t (t + 0.2)^{-0.96}$	Muy bueno
503	Murcia	$X_t = 25.5t (t + 0.4)^{-1.02}$	Excelente
505	Toledo	$X_t = 15.8t (t + 0.1)^{-0.88}$	Excelente
507	Zaragoza	$X_t = 25.6t (t + 0.4)^{-1.19}$	Excelente

Respecto a Barcelona, ignoro si el doctor Elías ha ajustado su ley para los datos del Observatorio de Fabra (pág. 377). En cualquier caso no ha utilizado más que 30 máximos, de 1941 a 1970, obteniendo las siguientes particularizaciones:

$$I = \frac{a}{60} \left(\frac{t}{60} + 0.45 \right)^{-1.03}$$

en la que (pág. 532)

— Para $T = 2$ años, $a = 44.6$. Para $T = 5$ años, $a = 63.3$. Para $T = 10$ años, $a = 75.9$ y para $T = 50$ años, $a = 103.4$.

Con ellos se obtiene la siguiente tabla de valores.

TABLA 2

INTENSIDADES DE PRECIPITACIONES EN BARCELONA OBTENIDAS MEDIANTE LA LEY DE ELÍAS?

t (min.)	Para $T = 2$ años I_E	Para $T = 5$ años I_E	Para $T = 10$ años I_E	Para $T = 50$ años I_E
0	1.6919	2.4013	2.8793	3.9225
5	1.4203	2.0158	2.4170	3.2928
10	1.2230	1.7358	2.0813	2.8354
20	0.9559	1.3567	1.6268	2.2162
30	0.7837	1.1122	1.3336	1.8168
40	0.6635	0.9417	1.1291	1.5382
50	0.5749	0.8159	0.9784	1.3328
60	0.5070	0.7195	0.8627	1.1753
70	0.4532	0.6432	0.7713	1.0507
80	0.4097	0.5814	0.6971	0.9497
90	0.3736	0.5303	0.6359	0.8662
100	0.3434	0.4873	0.5843	0.7961
110	0.3176	0.4507	0.5405	0.7363

Ya que no me he resistido a hacer esta tabla, aunque con ella no puedo establecer ninguna comparación, como anteriormente he hecho con los resultados de las leyes de Mon-

tana y Talbot, a favor de la 2.^a, dibujaré su gráfico. La comparación no es posible, aún en el caso de que se trate de la misma serie de Fabra ya que en (1) se han tomado 54 años de la serie, mientras que en (8) solamente 30. De 1941 a 1970, como ya he dicho.

Paso pues a mostrar el gráfico 3. Una superposición con los gráficos 1 y 2 sólo daría lugar a confusión. La comparación con la ley de Talbot la podré hacer cuando disponga de la serie completa del Observatorio de Fabra, pero me parece que la ley de ¿Elías? dará mejores resultados por el hecho de disponer de 3 parámetros, lo cual es siempre mayor garantía de ajuste para una ley experimental.

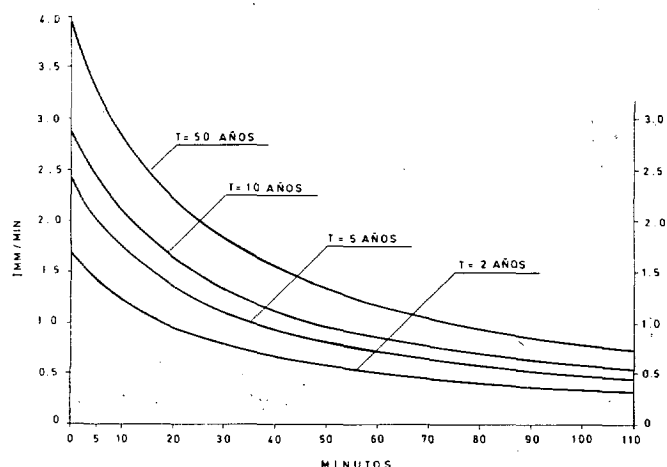


Gráfico 3.—Curvas IDF para Barcelona según Elías (Período 1941-70).

6.5. Ley de ¿Fuller?

Esta ley es la que los autores de (1) expresan así:

$$l = m + n \ln T \quad [8]$$

Aparentemente, sólo liga la intensidad «l» con su frecuencia «T», pero realmente también lo hace con la duración «t» a través de las correlaciones «t», «m» y «n» que figuran en la tabla III, todas ellas con coeficiente de correlación que va de un máximo, $r = 0.9996$, para $t = 5$ y $t = 10$ min. a un mínimo, $r = 0.9991$ para $t = 45, 50, 55$ y 60 min.

Es de gran interés comprobar que la máxima correlación se produce para $t = 5$ min., puesto que investigo valores menores.

Los autores de (1) no han «bautizado» esta ley. Yo me atrevo a hacerlo con interrogantes. En efecto, una de las máximas autoridades en Hidrología, Ven Te Chow, en colaboración con otros como C.S. Gilman, S. Pettersen, etc., en (9) en la «Sección 8-I.—Análisis estadístico y probable de los datos hidrológicos. Parte I.—Análisis de frecuencia. IV Proceso de análisis. 2. La relación K-T» pág. 8-23, indica que Fuller, [10] en el T.A.S.C.E., vol. 77. págs. 564-617, 1914, dedujo la primera fórmula empírica para el análisis de frecuencia de máximos anuales:

$$X = \bar{X} (1 + 0.8 \log T) \quad (8-1.49)$$

Así pues por mi parte no habría inconveniente en denominar a [8] como ley de Fuller, salvo que, por su simplicidad, alguien descubra una paternidad más antigua.

En cualquier caso y para no obligar al lector a leer éste artículo teniendo a mano (1), igual que he hecho con la tabla II, reproduzco a continuación la tabla III.

TABLA III (1)

t (min.)	m	n	Correlación
5	1.803	0.571	0.9996
10	1.446	0.479	0.9996
15	1.204	0.433	0.9995
20	1.025	0.394	0.9994
25	0.895	0.364	0.9993
30	0.791	0.337	0.9992
35	0.702	0.304	0.9992
40	0.632	0.278	0.9992
45	0.574	0.253	0.9991
50	0.523	0.232	0.9991
55	0.481	0.214	0.9991
60	0.446	0.199	0.9991

He realizado una comparación entre los resultados obtenidos aplicando la ley de ¿Fuller?, con las de Montana y de Talbot: las intensidades que da la ley de ¿Fuller? son prácticamente iguales a las que da la de Talbot, aunque casi siempre algo mayores, las de Talbot, como muestro en la siguiente tabla 3:

La extraordinaria igualdad de valores hace absurdo el dibujo de un gráfico.

6.6. Ley de Gumbel

Sería ociosa una disertación sobre la ley de

Gumbel:

$$I_T = U - 1/A (\ln \ln \frac{T}{T-1}) \quad [9]$$

TABLA 3

COMPARACION PREVIA ENTRE LAS INTENSIDADES DE BARCELONA-FABRA, SEGUN LAS LEYES DE TALBOT « I_T » Y LA DE FULLER « I_F », PARA $T = 2$ AÑOS

t (min.)	I_T	I_F	$I_T - I_F$
5	2.214	2.199	0.015
10	1.791	1.778	0.013
20	1.296	1.298	- 0.002
30	1.015	1.024	- 0.009
40	0.835	0.825	0.010
50	0.709	0.683	0.026
60	0.616	0.584	0.032

Esta ley ha sido un auténtico avance en la pluviometría. El doctor Elías (7) y (8) ha proporcionado mediante ella un avance extraordinario en la obtención de las frecuencias de las máximas precipitaciones en España: Para obtener leyes más perfectas es necesario estudiar leyes de mayor aproximación, mediante la introducción de tres parámetros como en (11), aunque con ello es relativamente poco lo que se mejora en pluviometría, como he dicho.

Es cierto lo que dicen los autores de (1): la ley de Gumbel da valores menores que la ley de Galton y ésta se aproxima más a los obtenidos mediante las leyes de Talbot y de Fuller. Pero la ley de Galton (1875), exclusivamente estadística y no pluviométrica (ésta como todas las leyes estadísticas son experimentales, no tienen demostración matemática) ha sido superada por la de Gumbel (1941) quien la ha defendido, tanto para caudales máximos, como para sequías, en 1942, 1943, 1945, 1949, 1954, 1955, 1958 y 1963, según algunas referencias de Ven Te Chow (9), págs. 8-38 a 8-41,

La ley de Gumbel, tiene el «lógico» inconveniente de no poder determinar el valor máximo de la intensidad para $T = 1$ año, puesto que daría $I = -\infty$, salvo que A fuera $A = \infty$ y quedaría indeterminado.

Pero antes de llegar al absurdo $I = -\infty$, es decir, a medida que nos aproximamos a

$T = 1$ ($P = 1$) se obtienen valores de « I », bastante racionales, como muestro a continuación, no sin antes recordar, por obvio que parezca: $P = 1/T =$ probabilidad de que la intensidad I_T no sea sobrepasada en un año tomado al azar, por ejemplo, el año que viene.

Sea $Q = 1 - P = (T-1)/T =$ probabilidad contraria a P .

Dando valores a « Q » se obtienen los siguientes valores de « T » y las intensidades máximas « I_T », para una duración $t = 5$ min. mediante los parámetros $A = 1.776$ y $U = 1.846$, transcritos de (1).

Q	T (años)	I (mm/min)
10^{-1}	$1/(1-10^{-1}) = 1.1$	1.376
10^{-2}	$1/(1-10^{-2}) = 1.01$	0.986
10^{-3}	$1/(1-10^{-3}) = 1.001$	0.758

Es decir que la probabilidad de que en Barcelona, un año cualquiera, n caiga una precipitación, en 5 minutos, de intensidad menor de $I = 0.758$ mm/min. es pequeñísima.

$$Q = 1 - P = 0.001 = 10^{-3}$$

Pero no imposible, es decir: $T = 1$, $P = 1$, $Q = 0$.

Esto es más creíble que el valor dado por la ley de Galton que según (1), pág. 92, viene a decir:

Es imposible que exista un año en Barcelona (se entiende en el pasado, aunque con el pasado estemos prediciendo el futuro) en que no haya llovido, durante 5 minutos, con una intensidad menor de:

$$I = 1.826387 \text{ mm/min.}$$

Con esto llego a una conclusión que no necesita epígrafe aparte:

NO CONSIDERO VALIDA, PARA ESTE ESTUDIO, LA LEY DE GALTON.

6.7. Estrapolación de la Ley de Montana

Toda extrapolación es discutible. Como mucho sólo será un aproximación. Considero que el método mejor es el polinomio de Lagrange, que es aquel que satura todos los puntos y, por consiguiente, al «pasar» por todos ellos tiene grado $(N-1)$, si el número de puntos es N .

Debido a que he utilizado un ordenador de

bolsillo de no demasiada capacidad, he podido comprobar que un programa para deducir el polinomio de Lagrange, me da que el polinomio obtenido pasa por todos los puntos, con exactitud al menos igual que la de los valores que figuran en (1), pero, en la extrapolación resultan cosas extrañas y cómicas, de las que no quiero mostrar ejemplos para no alargarme.

Por ello he preferido utilizar extrapolaciones más sencillas, de las que mostraré el grado de aproximación obtenido. Para esto último en algún caso daré el coeficiente de correlación y en la mayoría espero que baste al lector con el error máximo (E, Max.) y el error medio cuadrático (E.M.C.).

Para estrapolar la ley de Montana he utilizado:

Para el parámetro «a»:

$$a = A + B \ln T$$

Con esta recta se obtiene:

$$a = 5.356 + 1.212 \ln T$$

T (años)	Y = a	YC	E
2	6.199	6.197	0.002
5	7.299	7.308	- 0.009
10	8.166	8.149	0.017
15	8.632	8.640	- 0.008

E. Máx = 0,017.

Coeficiente de correlación: $r = 0.99993$.

Para el parámetro «b»:

$$b = \frac{-A}{B + \ln T}$$

$$b = \frac{-6.96452}{11.34572 + \ln T}$$

T (años)	Y = B	YC	E
2	- 0.584	0.57850	0.00549
5	- 0.526	0.53758	- 0.01158
10	- 0.510	- 0.51028	- 0.00028
15	- 0.502	0.49556	- 0.00643

E. Máx = 0.01158.

E.M.C. = 0.00717.

Con dichas extrapolaciones de «a» y «b» se obtienen los valores que figuran en la tabla 4. Esta tabla queda representada en el gráfico 4.

6.8 Extrapolación de la Ley de Talbot

Para extrapolar la ley de Talbot, a partir de los valores determinados por los autores de (1), expuestos en la tabla II y reproducidos en el apartado 6.2 de este artículo, procedo, en primer lugar a representar gráficamente, tanto «f» como «g» como ordenadas de $X = 1 \ln T$. Dicha representación aparece en el gráfico 5.

Procediendo, primeramente, a una regresión

TABLA 4

EXTRAPOLACION DE LA LEY DE MONTANA

Período de retorno T (años)	Parámetros		Intensidades, I (mm/min.), para t (minutos)					
	a	b	t = 0	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4	t = 5
2	6.197	- 0.579	∞	6.197	4.150	3.282	2.779	2.442
5	7.308	- 0.538	∞	7.308	5.035	4.049	3.468	3.076
10	8.149	- 0.510	∞	8.149	5.721	4.652	4.017	3.584
15	8.641	- 0.496	∞	8.641	6.129	5.013	4.347	3.892
25	9.260	- 0.478	∞	9.260	6.648	5.476	4.772	4.289
50	10.101	- 0.456	∞	10.101	7.361	6.118	5.365	4.845
100	10.942	- 0.437	∞	10.942	8.085	6.773	5.970	5.416
500	12.894	- 0.397	∞	12.894	9.795	8.340	7.441	6.810

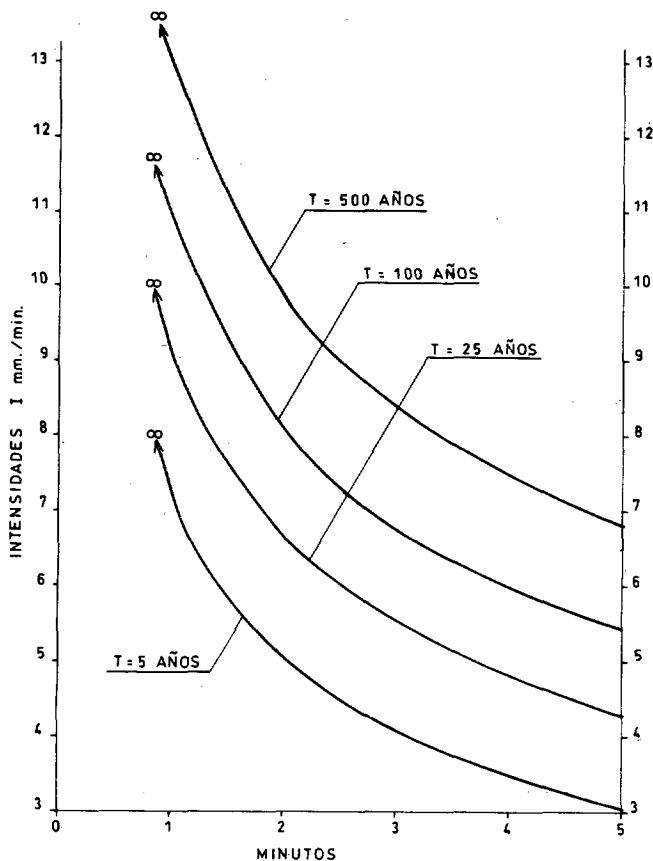


Gráfico 4.—Intensidades máximas probables correspondientes a «t» (min.) de duración según la fórmula de Montana extrapolada (Tabla 4).

lineal se obtiene:

$$f = 33.9126 + 17.8499 \ln T.$$

$$\text{Correlación } r = 0.99866668$$

$$g = 14.9470 + 1.7746 \ln T.$$

$$\text{Correlación } r = 0.99999951$$

Parece que la 1.^a correlación da un coeficiente peor que la 2.^a por lo que parece preferible determinar el parámetro «f» mediante el «Ajuste de un polinomio de grado M a N puntos» (programa para ordenador de bolsillo «APMN»).

Mediante este programa obtengo:

$$\text{Para } M = 1: f = 33.9126 + 17.8499 \ln T, \text{ E. Máx.} = 0.958$$

$$\text{E.M.C.} = 0.705.$$

$$\text{Para } M = 2: f = 37.535 + 12.368 \ln T + 1.639 (\ln T)^2,$$

$$\text{E. Máx.} = 0.0032, \text{ E.M.C.} = 0.021$$

$$\text{Para } M = 3: f = 37.136 + 13.301 \ln T + 1.0215 (\ln T)^2 + 0.11834 (\ln T)^3, \text{ E. Máx.} = 0.000003, \text{ E.M.C.} = 0.000002$$

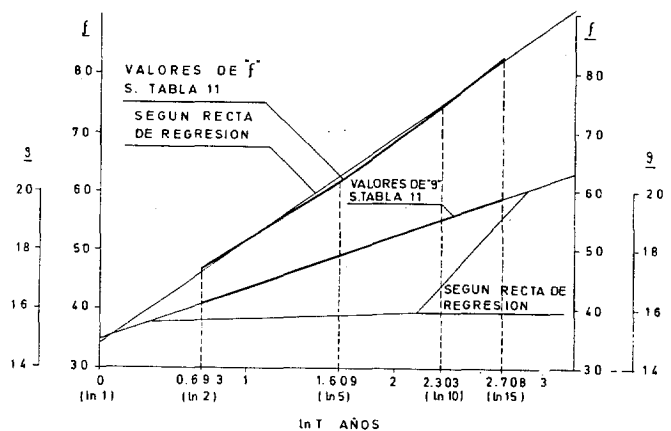


Gráfico 5.—Extrapolación de los parámetros «f» y «g» por medio de rectas de regresión.

Con tan máxima precisión, que represento en el gráfico 5, es imposible diferenciar la curva de valores del gráfico 4 de los de la función expresada para $M = 3$.

Por consiguiente, mediante las funciones:

$$f = 37.136 + 13.301 \ln T + 1.0215 (\ln T)^2 + 0.11834 (\ln T)^3$$

$$g = 14.9470 + 1.7746 \ln T$$

Paso a confeccionar la tabla 5. Esta tabla queda representada en la gráfica 7.

6.9. Extrapolación de la ley de ¿Fuller?

Naturalmente, la ley de ¿Elías? no se puede extrapolar mientras sus parámetros «a», «b» y «c» no hayan sido ajustados a los 54 años, que los autores de (1) han utilizado. Desgraciadamente, Elías, en (8), ha deducido estos parámetros para los años 1941 a 1970, como ya he indicado en el apartado 6.4.

Para extrapolar la ley de ¿Fuller? he procedido igual que para determinar el parámetro «f» de la ley de Talbot, pero sin poder llegar a una aproximación similar.

Tanto el parámetro «m» representado en el gráfico 8, como el «n» representado en el gráfico 9, tienen «aire» de hipérbolas. Sin embargo y disponiendo del ya citado programa «APMN»,

TABLA 5

INTENSIDADES (mm/mín.) CORRESPONDIENTES A TIEMPOS DE DURACION (t = mín.) SEGUN LA FORMULA DE TALBOT EXTRAPOLADA

Período de ret. T (años)	f (mm)	g (mín.)	Intensidades máximas probables I (mm/mín.) para t (mín.) de duración						
			t = 0	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4	t = 5	t = 6
2	46.886	16.177	2.898	2.730	2.579	2.445	2.324	2.214	2.114
5	61.683	17.803	3.465	3.280	3.115	2.965	2.829	2.705	2.591
10	74.624	19.033	3.921	3.725	3.548	3.387	3.240	3.105	2.981
15	82.998	19.753	4.202	3.999	3.815	3.648	3.494	3.353	3.223
25	94.482	20.659	4.573	4.362	4.170	3.993	3.832	3.682	3.544
50	111.889	21.889	5.112	4.888	4.684	4.496	4.322	4.161	4.012
100	131.612	23.119	5.693	5.457	5.240	5.039	4.853	4.681	4.507
500	187.652	25.975	7.224	6.957	6.708	6.476	6.260	6.058	5.869

he preferido utilizarlo, puesto que al fin y al cabo en ambos casos llego a una aproximación aceptable, al menos para mí.

Expongo dichos grados de aproximación a continuación de los citados gráficos.

¿A qué es debido que a partir de M = 6 la

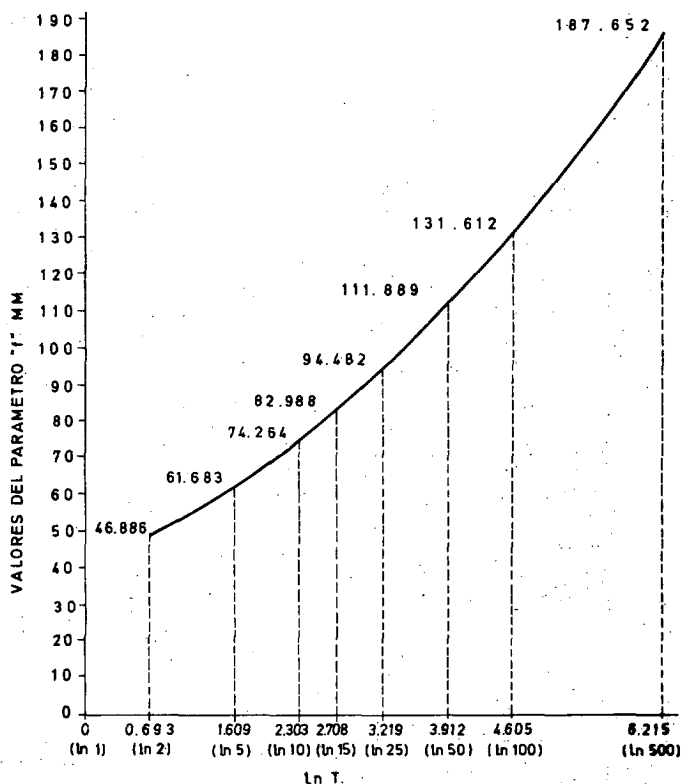


Gráfico 6.—Extrapolación del parámetro «f» mediante el polinomio de tercer grado: $f = 37.136 + 13.3013 (\ln T) + 1.0215 (\ln T)^2 + 0.11834 (\ln T)^3$

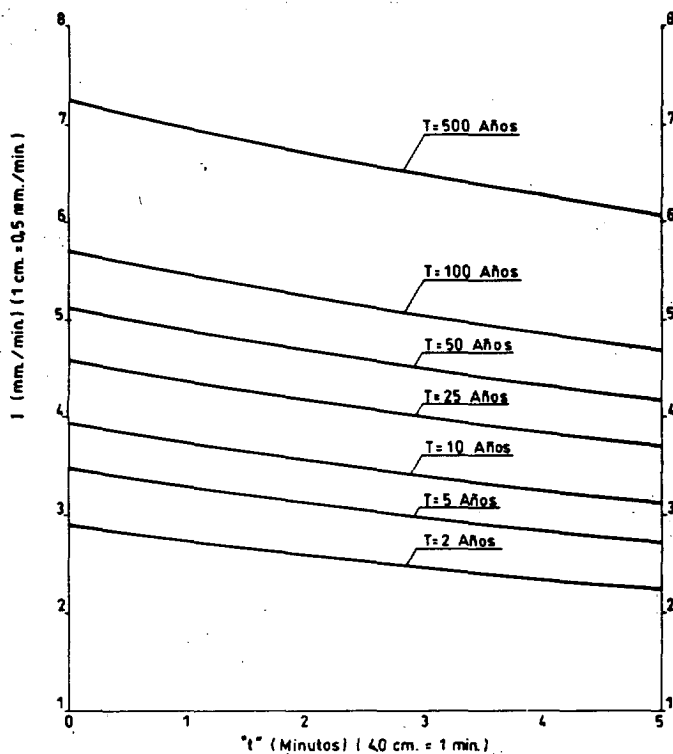


Gráfico 7.—Intensidades máximas probables correspondientes a «t» (mín.) de duración según la fórmula de Talbot extrapolada (Tabla 5).

aproximación empiece a disminuir? ¿Existe algo que podría explicar la Matemática? A mí me basta con concluir que la capacidad de mi ordenador de bolsillo no alcanza más.

Pero también me basta con la aproximación conseguida para el grado M = 6: 0.002 de error máximo y 0.001 de error medio cuadrático. Con

TABLA 6

RELACION DE MAXIMOS ERRORES Y ERRORES MEDIOS CUADRATICOS OBTENIDOS EN EL AJUSTE DE PARAMETRO «m» MEDIANTE UN POLINOMIO DE GRADO «M» A LOS 12 VALORES DE LA TABLA III DEL ARTICULO (1)

M	E. Máx.	E.M.C.
2	0.092	0.046
3	0.024	0.015
4	0.009	0.00459
5	0.00241	0.00143
6	0.002231	0.001070

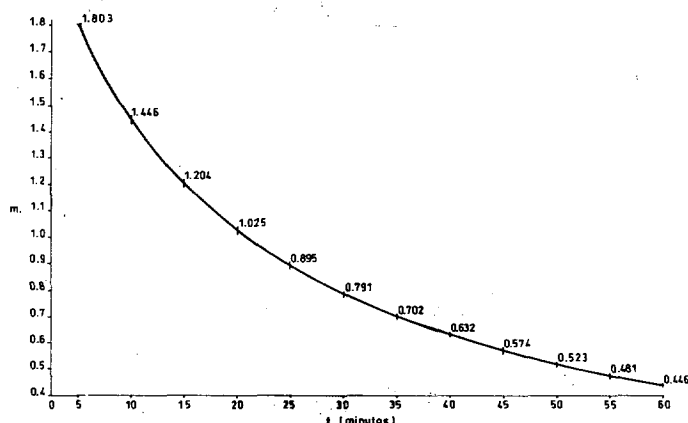


Gráfico 8.—Parámetro «m» en la expresión $I = m + n \ln T$, Según la tabla III.

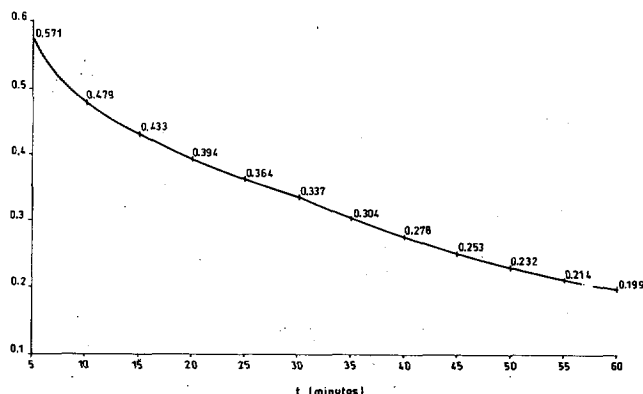


Gráfico 9.—Parámetro «n» en la expresión $I = m + n \ln T$, según la tabla III.

M	E. Máx.	E.M.C.
7	0.00239	0.001136
8	0.00226	0.001084
9	0.02869	0.013265
10	0.00296	0.001298
11	0.00259	0.00144

ello se llega a la siguiente expresión:

$$m = 2.3395856... - 0.1313363...t + 0.0055223...t^2 - 0.0001568...t^3 + 0.0000027...t^4 - 0.0000000...t^5 + 0.0000000...t^6$$

Con esta ecuación se obtiene:

t	m (calc.)	Error
0	2.3395856	?
1	2.2136174	?
2	2.0977904	?
3	1.9912580	?
4	1.8932331	?
5	1.8029851	- 0.0000149
10	1.446425	+ 0.000425
15	1.202369	+ 0.001631
20	1.027231	+ 0.002231
25	0.894541	- 0.000459
30	0.789274	- 0.001726

t	m (calc.)	Error
35	0.703356	+ 0.001356
40	0.632326	+ 0.000326
45	0.573178	- 0.000822
50	0.523360	- 0.000360
55	0.480952	- 0.000048
60	0.445998	- 0.000002

Procedo ahora a interpolar «n» de la misma manera.

TABLA 7

RELACION DE MAXIMOS ERRORES Y ERRORES MEDIOS CUADRATICOS OBTENIDOS EN EL AJUSTE DEL PARAMETRO «n» MEDIANTE UN POLINOMIO DE GRADO «M» A LOS 12 VALORES DE LA TABLA II DEL ARTICULO (1)

M	E. Máx.	E.M.C.
2	0.024	0.011
3	0.015	0.007
4	0.008	0.004
5	0.0033	0.0016
6	0.0027	0.00129
7	0.0032	0.001442
8	0.002691	0.00127

En este caso los mínimos error máximo y medio cuadrático no se alcanzan hasta $M = 8$ y son del mismo orden de magnitud que en el ca-

so anterior (ligeramente superiores), por lo que me bastan.

Con ello se llega a la siguiente expresión:

$$n = 0.7632357... - 0.0545448... t + 0.0039798... t^2 - 0.0001709... t^3 + 0.0000038... t^4 - 0.0000000... t^5 - 0.0000000... t^6 - 0.0000000... t^7 - 0.0000000... t^8$$

Con cuya ecuación se obtiene:

t	n (calc.)	Error
0	0.763235	?
1	0.712503	?
2	0.668757	?
3	0.631106	?
4	0.598739	?
5	0.570929	- 0.000071
10	0.479715	+ 0.000715
15	0.430921	- 0.002079
20	0.396091	+ 0.002091
25	0.364623	+ 0.000623
30	0.334309	- 0.002691
35	0.305420	+ 0.001420
40	0.278235	+ 0.000235
45	0.253090	+ 0.000090
50	0.231298	- 0.000702
55	0.214454	+ 0.000454
60	0.198908	- 0.000092

Con las extrapolaciones obtenidas para «m» y «n», se tiene el gráfico 10, así como la tabla 8.

6.10. Extrapolación de la Ley de Gumbel

La expuesta ley de Gumbel, que puede expresarse según [9] como indica el anterior apar-

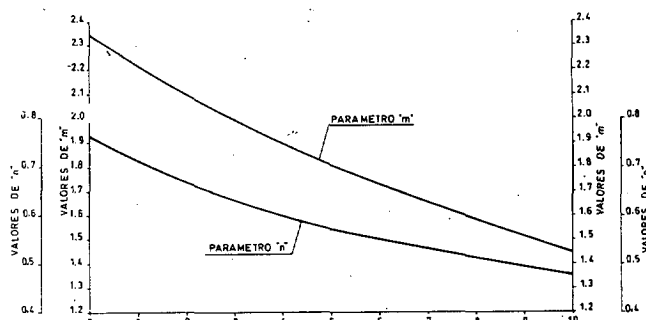


Gráfico 10.—Extrapolación de los parámetros «m» y «n» por medio de polinomios de grado M. ajustados.

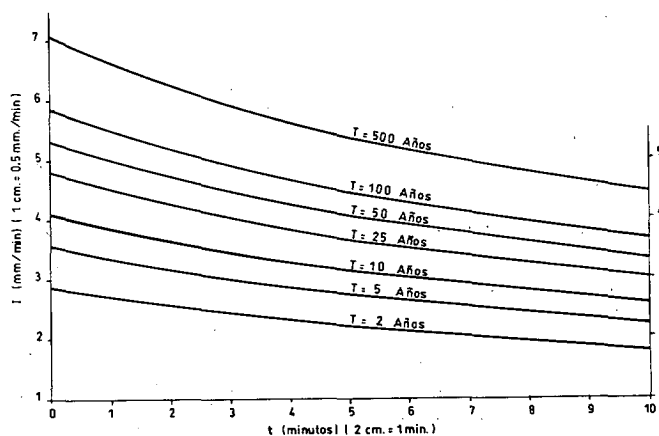


Gráfico 11.—Intensidades máximas probables correspondientes a «t» (mín.) de duración según la fórmula de ¿Fuller? extrapolada (Tabla 8).

TABLA 8

INTENSIDADES MAXIMAS PROBABLES, «I» (mm/mín.), PARA TIEMPOS DE DURACION «t» (mín.) ENTRE 0 Y 10 MIN. SEGUN EXTRAPOLACIONES MEDIANTE POLINOMIOS DE GRADO M AJUSTADOS A LOS 12 PUNTOS DE LA TABLA III DE (1) DEDUCIDOS PARA LA LEY $I = m + n \ln T$, DE ¿FULLER?

Período de retorno T (años)	Intensidades máximas probables «I» (mm/mín.) para «t» (minutos)						
	t = 0	t = 1	t = 2	t = 3	t = 4	t = 5	t = 10
	m = 2.3396 n = 0.7632	m = 2.2136 n = 0.7125	m = 2.0978 n = 0.6688	m = 1.9913 n = 0.6311	m = 1.8932 n = 0.5987	m = 1.8030 n = 0.5709	m = 1.4464 n = 0.4796
2	2.869	2.707	2.561	2.429	2.308	2.199	1.779
5	3.568	3.360	3.174	3.007	2.857	2.722	2.218
10	4.097	3.854	3.638	3.444	3.272	3.118	2.551
15	4.406	4.143	3.909	3.700	3.515	3.349	2.745
25	4.796	4.507	4.251	4.023	3.820	3.641	2.990
50	5.325	5.001	4.714	4.460	4.235	4.036	3.323
100	5.854	5.495	5.178	4.898	4.650	4.432	3.656
500	7.083	6.642	6.254	5.913	5.614	5.351	4.428

Esta tabla queda representada en el gráfico 11.

tado 6.6. tiene dos parámetros «A» (alfa, según los autores de (1)) y «U» que han sido expuestos para cada valor de «t» en la tabla IV.

Los he representado gráficamente en el gráfico 12.

Procediendo de análoga manera que para la ley de ¿Fuller?, apartado 6.9., he analizado en primer lugar la extrapolación de «A», con el siguiente resultado.

M	E. Máx.	E.M.C.
2	0.258	0.123
3	0.158	0.106
4	0.053	0.032
5	0.019381	0.009686
6	0.0195	0.0097
7	0.0197	0.0097
8	0.019313	0.009696

No es mucha la aproximación obtenida, sin duda debido a la extraña forma de «A(t)» que muestra el gráfico 12. Por consiguiente, me conforme con lo obtenido para $M = 5$, ya que no he podido obtener mayor aproximación (para $M = 8$ el resultado es muy similar, pero con mayor E.M.C.).

Queda pues:

$$A = 0.51786... + 0.34269... t - 0.02120... t^2 + 0.00064... t^3 - 0.00001... t^4 + 0.0000... t^5.$$

Con la que se obtiene:

T	A (calc.)	Error
0	0.5179	?
1	0.8400	?
2	1.1235	?
3	1.3718	?
4	1.5885	?
5	1.7766	+ 0.0006
10	2.3880	- 0.0050
15	2.6640	+ 0.0140
20	2.8207	- 0.0153
25	2.9934	- 0.0016
30	3.2524	+ 0.0194
35	3.6174	- 0.0166
40	4.0735	+ 0.0035
45	4.5862	+ 0.0012
50	5.1166	+ 0.0006
55	5.6369	- 0.0011
60	6.1453	+ 0.0003

Pasando a la extrapolación de U, he obtenido:

M	E. Máx.	E.M.C.
2	0.090	0.04418
3	0.026	0.01578
4	0.0101	0.00567
5	0.00347	0.001948
6	0.00370	0.001548
7	0.00325	0.001414
8	0.00338	0.001412
9	0.016896	0.007388

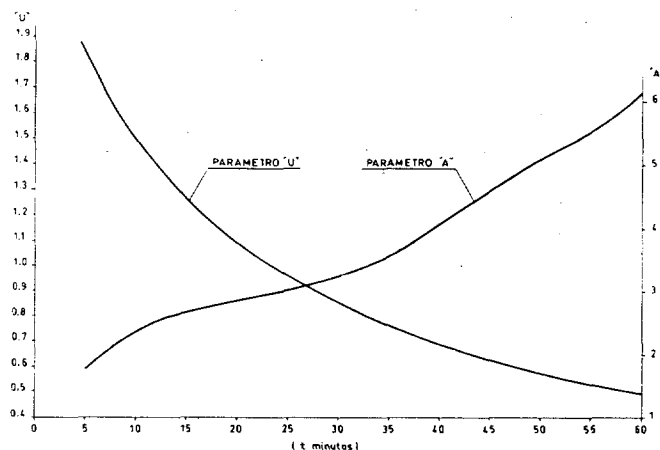


Gráfico 12.—Parámetros «A» y «U» en la Ley de Gumbel, según la tabla IV.

La aproximación obtenida para $M = 8$ es suficiente, especialmente si se compara con la obtenida para «A».

De ella resulta la expresión:

$$U = 2.36527... - 0.12499... t + 0.00467... t^2 - 0.00009... t^3 - 0.0000... t^4 + 0.00000... t^5 - 0.00000... t^7 + 0.00000... t^8.$$

Con la que se obtiene:

t	U (calc.)	Error
0	2.36527	?
1	2.24486	?
2	2.13326	?
3	2.02992	?
4	1.93434	?
5	1.845976	- 0.000023
10	1.495456	+ 0.000456
15	1.257096	- 0.001903
20	1.087380	+ 0.003380
25	0.957363	- 0.002636
30	0.851143	+ 0.000143
35	0.762142	+ 0.001148
40	0.688377	- 0.000622
45	0.628006	+ 0.000006
50	0.577041	+ 0.000041
55	0.531018	+ 0.000018
60	0.492990	0.000009

TABLA 9

INTENSIDADES MAXIMAS PROBABLES «I», (mm/mín.), PARA TIEMPOS DE DURACION «t» (mín.), ENTRE 0 Y 5 MINUTOS, SEGUN LA LEY DE GUMBEL EXTRAPOLADA $I = U - \frac{1}{A} \ln \ln \frac{T}{T-1}$

Período de retorno T (años)	Intensidades máximas probables «I» (mm/mín.) para «t» (minutos)					
	t = 0 A = 0.5179 u = 2.3653	t = 1 A = 0.8400 u = 2.2449	t = 2 A = 1.1235 u = 2.1333	t = 3 A = 1.3718 u = 2.0299	t = 4 A = 1.5885 u = 1.9343	t = 5 A = 1.7766 u = 1.8460
2	3.073	2.681	2.460	2.297	2.165	2.052
5	5.261	4.031	3.468	3.123	2.879	2.690
10	6.710	4.924	4.136	3.670	3.351	3.113
15	7.528	5.428	4.513	3.979	3.617	3.351
25	8.541	6.053	4.980	4.362	3.948	3.646
50	9.899	6.890	5.606	4.874	4.391	4.042
100	11.248	7.721	6.228	5.383	4.830	4.435
500	14.363	9.642	7.664	6.559	5.846	5.343

Con estas extrapolaciones de los parámetros «A» y «U» se obtiene la tabla 9, la cual no he dispuesto en forma gráfica, para no alargarme demasiado.

6.11. Resumen de los métodos de extrapolación efectuados

A modo de autocritica y con la única justificación de haber procedido de una manera cómoda y no rigurosa, me considero en la conveniencia de hacer un resumen de mis sistemas de extrapolación.

Ley de Montana: $I = a + t^b$

Los parámetros «a» y «b» se han ligado a la variable «T» (de probabilidad o frecuencia) mediante las expresiones:

$$a = 5.356 + 1.213 \ln T$$

$$b = \frac{-6.96452}{11.34572 + \ln T}$$

Extrapolaciones muy simples, debidas, sin duda, al convencimiento de la incredibilidad en que esta ley sea válida para valores de «t» muy pequeños.

Ley de Talbot: $I = \frac{g}{g+t}$

Los parámetros «f» y «g» se han unido a la

variable «T» por medio de:

$$f = 37.136 + 13.301 \ln T + 1.0215 (1 \ln T)^2 + 0.11834 (1 \ln T)^3$$

$$g = 14.9470 + 1.7746 \ln T$$

Extrapolaciones muy exactas, al considerar que esta ley, aunque simple, ha sido muy aceptada.

Ley de ¿Fuller?: $I = m + n \ln T$

Esta ley parece adaptarse muy bien a Barcelona, pero sólo para valores de «T» pequeños, hasta T = 15 años. ¿Se hubiera adaptado igualmente bien para valores mayores del período de retorno? Y ¿según qué ley de distribución: la de Galton o la de Gumbel? Pienso que la tabla III de los autores de (1) se ha deducido a partir de la distribución de Galton.

En cualquier caso, he sometido a los parámetros «m» y «n» a una extrapolación muy rigurosa que ha arrojado:

$$m = 2.3395... - 0.1313... t + 0.0055... t^2 - 0.0001... t^3 + 0.0000... t^4 - 0.0000... t^5 + 0.0000... t^6$$

$$n = 0.763... - 0.054... t + 0.003... t^2 - 0.00... t^3 - 0.000... t^4 - 0.000... t^5 - 0.000... t^6 + 0.000... t^7 - 0.000... t^8$$

Ley de Gumbel: $I = U - \frac{1}{A} \ln \ln \frac{T}{T-1}$

TABLA 10

COMPARACION DE RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE LAS EXTRAPOLACIONES DE LAS FORMULAS DE MONTANA, TALBOT, ¿FULLER? Y GUMBEL, A LO LARGO DE ESTE ESTUDIO

I_M = según Montana, I_T = según Talbot, I_F = según ¿Fuller?, I_G = según Gumbel, todas ellas en mm/mín.

PARA T = 500 AÑOS

t (mín.)	I_M	I_T	I_F	I_G
0	∞	7.224	7.083	14.363
1	12.894	6.957	6.642	9.642
2	9.795	6.708	6.254	7.664
3	8.340	6.476	5.913	6.559
4	7.441	6.260	5.614	5.846
5	6.810	6.058	5.351	5.343

PARA T = 100 AÑOS

t (mín.)	I_M	I_T	I_F	I_G
0	∞	5.693	5.854	11.248
1	10.942	5.457	5.495	7.721
2	8.085	5.240	5.178	6.228
3	6.773	5.039	4.898	5.383
4	5.970	4.853	4.650	4.830
5	5.416	4.681	4.432	4.435

PARA T = 50 AÑOS

t (mín.)	I_M	I_T	I_F	I_G
0	∞	5.112	5.325	9.899
1	10.101	4.888	5.001	6.890
2	7.361	4.684	4.714	5.606
3	6.118	4.496	4.460	4.874
4	5.365	4.322	4.235	4.391
5	4.845	4.161	4.036	4.042

PARA T = 25 AÑOS

t (mín.)	I_M	I_T	I_F	I_G
0	∞	4.573	4.796	8.541
1	9.260	4.362	4.507	6.053
2	6.648	4.170	4.251	4.980
3	5.476	3.993	4.023	4.362
4	4.772	3.832	3.820	3.948
5	4.289	3.682	3.641	3.646

He partido de los parámetros de la tabla IV de los autores de (1), quienes no han mostrando el grado de bondad de su obtención (como

tampoco han hecho con los parámetros obtenidos con el ajuste a la ley de Galton, tabla I).

Yo he «dado de lado» a la ley de Galton y he sometido a los parámetros «A» y «U» de Gumbel, a otra rigurosa extrapolación, que ha dado:

$$A = 0.517... + 0.342... t - 0.021... t^2 + 0.000... t^3 - 0.000... t^4 + 0.000... t^5.$$

$$U = 2.365... - 0.125... t + 0.0004... t^2 - 0.000... t^3 - 0.000... t^4 + 0.000... t^5 - 0.000... t^6 - 0.000... t^7 + 0.000... t^8.$$

En resumen, he sido más riguroso en la extrapolación de las leyes de ¿Fuller? y con la de Gumbel, pero esto creo que no tiene importancia ya que no trato de demostrar más que una cosa: que se pueden llegar a determinar las curvas I.D.F. hasta $t = 0$. Los métodos ya se afinarán, aunque, a mi juicio yo ya los he afinado bastante.

7. COMPARACION ENTRE LAS LEYES DE MONTANA, TALBOT, ¿FULLER? Y GUMBEL, EXTRAPOLADAS

Lamentando no poder introducir en esta comparación las leyes de ¿Elías?

$$I = a (t + c)^{-b} \quad [7]$$

Que es una ampliación de la de Montana (un parámetro más), ni la de Galton-Gibrat-Guitart (11), citada en el apartado 5.3., pero reservándome poderlo hacer, si obtengo los datos completos de intensidad-duración de Barcelona-Fabra, paso a continuación a comparar las leyes epigrafiadas por medio de la tabla 10.

A continuación paso a representar estos resultados comparativos en el gráfico 13 y en el 14. En el 1.º dibujo los resultados para $T = 500$ años y en el 2.º para $T = 25$ años, prescindiendo de los intermedios, $T = 100$ años y $T = 50$ años, para no cansar con un exceso de gráficos.

8. MI OPINION ANTICIPADA

Mi opinión anticipada es algo así como una apuesta. Yo no estoy nada impuesto en cuanto a las posibilidades actuales de medir la in-

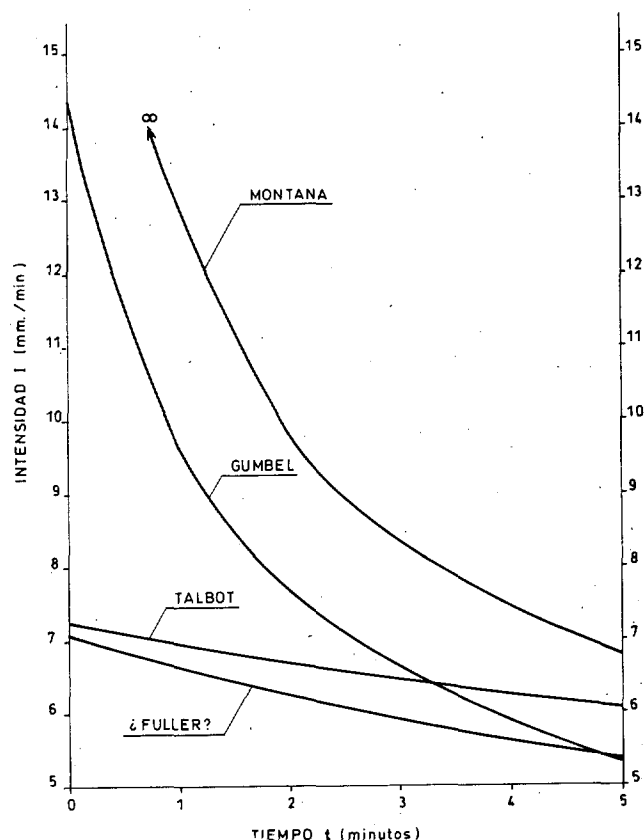


Gráfico 13.— Comparación de los resultados obtenidos mediante las extrapolaciones de las Leyes de Montana, Talbot, ¿Fuller? y Gumbel. Para T = 500.

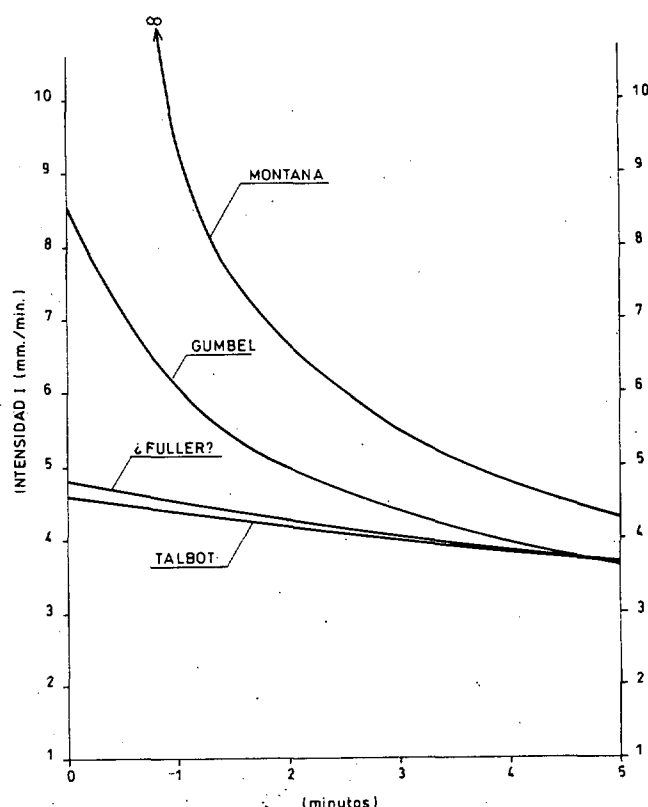


Gráfico 14.— Comparación de los resultados obtenidos mediante las extrapolaciones de las Leyes de Montana, Talbot, ¿Fuller? y Gumbel. Para T = 25 años.

tensidad máxima absoluta (representativa, no la máxima velocidad de caída de una gota de agua o de una bola de granizo, como ya he dicho). Sin embargo, recientemente he recibido datos de las publicaciones del Ayuntamiento de Sabadell (Archivo Meteorológico Municipal del Observatorio de la S.A. Marcet), que dan las siguientes intensidades máximas absolutas:

Fecha	Momento	I (mm/h.)	I (mm/min.)
25-9-62	21 h. 41 m. 24 s.	257,4	4,29
25-9-62	21 h. 51 m. 57 s.	361,2	6,02
23-9-71	11 h. 59 m.	376,8	6,28

Esto me da la esperanza de que el doctor Elías pueda proceder a su 3.^a edición de sus «Precipitaciones Máximas en España», con intensidades máximas absolutas, es decir, para una duración $t = 0$:

En cualquier caso, creo y apuesto por la ley.

$$I = a(t + c)^{-b} \quad [7]$$

En lugar de las leyes de Montana y Talbot.

Tampoco creo en la ley de ¿Fuller? (muy simple) y aunque la ley de Gumbel me da bastante confianza, he comprobado que es mejor la de Galton-Gibrat-Guitart, citada en los apartados 5.3. y 7.

Así pues de lo aquí escrito, me limito a recomendar la extrapolación de la ley de Gumbel.

9. PROMESA DE CONTINUACION

Una vez metido en un asunto, no es fácil dejarlo. La Hidrología y la «Pluviología» están en un desarrollo primario. Al parecer, en España, existe un solo pluviógrafo que haya cumplido 60 años de vida continua.

Espero el envío o publicación de las series completas de intensidades máximas, para cada duración, de Barcelona, Fabra.

Mi único problema es disponer de muy poco tiempo. Pido perdón si se lo he quitado a

quienes hayan leído todo esto sin estar interesados.

10. CONCLUSION, RESUMEN Y AGRADECIMIENTOS

Como conclusión, me gustaría que este estudio fuera un acicate para la mejora del futuro capítulo dedicado a la Hidrología en la próxima «Instrucción de Carreteras», que sé que se está redactando. Sin duda lo será muy acertadamente, no por este pequeño trabajo mío, sino por lo mucho que han cooperado a una Hidrología más y mejor fundada tantos compañeros en los últimos años.

Como resumen, animar y apoyar a todos los pluviólogos a que publiquen todo lo que pueda servir a la Ingeniería y al Urbanismo de España, para proyectar los drenajes y desagües más recomendables, desde el punto de vista económico.

Como agradecimientos, el más sincero a los autores del artículo «Curvas IDF. Barcelona. Fabra», del que este estudio mío no es más que una ampliación.

También a mi gran amigo, compañero y guía José Luis Guitart y de Gregorio, quien me ha elaborado todos los programas que he utilizado.

Y, finalmente, a todos los queridos compañeros de las direcciones generales de Obras Hidráulicas y de Carreteras, especialmente para aquéllos que, «por alusiones», hayan tenido que soportar con santa paciencia mi, a veces, desagradable ironía con la que he salpicado (manchado), sin ninguna malicia, pero con poca diplomacia, alguna de las críticas de este estudio o artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. VAZQUEZ, R.; REDAÑO, A. y LORENTE, J.: «Curvas IDF. Barcelona-Fabra». Revista de Obras Públicas, núm. 3255, febrero 1987.
2. INSTRUCCION DE CARRETERAS 5.1.—IC (21-6-65): Drenaje. 4. Hidrología. Pág. 2 a 5.

3. B.O.E. núm002 de 2-1-1986: Real Decreto 27-12-1985, núm. 02473. Tabla de Vigencias. Disposición 00006.
4. B.O.E. núm. 256 de 25-10-75, pág. 22439/40.
5. M.O.P.U., D.G.O.H.; 3-6-83. Circular a todos los servicios.
6. REMENIERAS, G.: «Tratado de Hidrología aplicada». E.T.A.S.A. Barcelona, 1971.
7. ELIAS, F.: «Precipitaciones máximas en España. Régimen de intensidades y frecuencias». M. de Agricultura. D.G. de Agricultura. Servicio de Conservación de Suelos. Madrid, 1963.
8. ELIAS, F. y RUIZ BELTRAN, L.: «Precipitaciones máximas en España. Estimaciones basadas en métodos estadísticos». M. de Agricultura ICONA. Monografías. 21. Madrid, 1979.
9. CHOW, V. T.: «Handbook of applied Hydrology». Mc Graw-Hill Book Company. 1964.
10. JENNINGS, A. H.: «World greatest observed point rain fall». Monthly Weather Rev., vol 78, pág. 4/5, 1950.
11. GUITART, J. L. y GOMEZ CAFFARENA, C.: «Determination of floods by statistical methods» ICOLD 16. San Francisco, 1988, Vol. Q. 63 (R.64).
12. HERSHFIELD, D. M.: «Rainfall frequency atlas of the United States, for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 2 to 100 years». U.S. Weather Bur. Tech. Rept. 40, mayo 1961.
13. «Hammond's Ambassador World Atlas», U.S.A., feb. 1958.

César García Caffarena



Es Doctor Ingeniero de Caminos de la promoción de 1955. Toda su vida profesional la ha dedicado a tratar de domar al agua, transformando su fuerza en kWh., al hacerla descender, y mejorando la calidad de los kWh., al hacerla ascender, destinándola a abastecimientos y regadíos, limpiándola cuando estaba sucia, etc. Ultimamente, su mayor preocupación es que

haga el menor daños posible si trata de encauzar el gran poder destructivo que tiene.

Ha trabajado en el INI, en el Canal de Isabel II, en Auxini, en EDES, en ITEA y finalmente, los últimos 12 años, en IBERINSA, en su Departamento de Presas e Hidrología.