

UN CRITERIO PARA LA ESTIMACION DE CAUDALES MAXIMOS DE LOS AFLUENTES DE LA MARGEN DERECHA DEL EBRO. ENTRE SU NACIMIENTO Y EL JALON(*)

Por CESAR GOMEZ CAFFARENA

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

El autor no es partidario de las fórmulas empíricas para justificar el cálculo de caudales máximos, pero encuentra muchas motivaciones negativas para trabajar con otros métodos en los que impera lo subjetivo. Analiza estas motivaciones y considera más positivo, desde un punto de vista práctico, confiar en la validez y seguridad de las obras hidráulicas realizadas por otros compañeros y en ellas se basa para adoptar un criterio flexible, encuadrado en tales realizaciones.

Publica este criterio con un doble ánimo: solicitar la crítica de quienes puedan estar más informados y facilitar una posible ayuda a los que "naveguen", en circunstancias parecidas, en la confusa hidrología actual.

Finalmente el autor quisiera decir que no es el autor, sino el redactor del criterio o, más bien, el rapsoda o uniformador de los criterios que han seguido esos otros compañeros y que han expresado materialmente en sus obras.

1. MOTIVACIONES NEGATIVAS

Es evidente que el cálculo de las avenidas máximas previsibles de un río es, en el mejor de los casos, una estimación más o menos acertada.

En primer lugar, es una estimación aleatoria, lo que equivale a decir una predicción (**) del futuro, y, en este caso, de un futuro que por muchos investigadores se considera puede ser sometido a grandes cambios cuando se analizan períodos muy remotos.

En segundo lugar, la Humanidad cada vez está interviniendo más en la modificación de este futuro, y precisamente tratando de aminorar las consecuencias del fenómeno por medio de grandes embalses reguladores, repoblaciones forestales, suavización de tormentas, etc.

Por otro lado, es evidente que los medios y datos que se señalan como útiles para el cálculo son muy rudimentarios.

Comentaremos algunos:

- Las fórmulas empíricas son muy divergentes, y se refieren a zonas o regiones muy distintas.
- Los métodos pluviométricos no relacionan inequívocamente las lluvias máximas con las crecidas máximas. En efecto, tratan de relacionarlas por medio de:

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 30 de abril de 1976.

(**) Predecir: anunciar algo que ha de suceder.

1. El coeficiente de escorrentia, entelequia que surge de otro concepto: el déficit de escorrentia. Indudablemente el tal coeficiente de escorrentia puede variar desde más de la unidad hasta cero. No parece necesario poner ejemplos.

Para estimar el coeficiente de escorrentia hay que recurrir a cualificar —no cuantificar—, entre otras, las siguientes propiedades del terreno:

- Pendiente.
- Vegetación.
- Permeabilidad.
- Capacidad de almacenaje.

La primera de éstas es la única que se puede considerar fija, la segunda es variable con el tiempo y la tercera y cuarta con el propio fenómeno de la lluvia.

2. *El llamado tiempo de concentración.* También es otra entelequia que no se puede extrapolar a zonas grandes. Es cierto que se cumple una cierta correlación entre la duración de las lluvias y sus intensidades, y que estas últimas están más ligadas a los caudales máximos instantáneos, pero aún no se puede determinar sistemáticamente:

- La extensión de la zona afectada por el aguacero de la misma intensidad.
- El movimiento del aguacero, que, por supuesto, no es estático. Si un aguacero se mueve en la dirección de la corriente (curso, río) no producirá el mismo efecto que si se mueve en sentido contrario.

3. *Sistemas de hidrogramas.* Estos sistemas son siempre complicados e hipotéticos. La búsqueda de la correlación lluvia-caudal se hace aún más compleja, ya que se desconoce primordialmente la probabilidad, respecto al tiempo, de cada hipótesis y mucho más la probabilidad de coincidencia de las hipótesis.

Con todo ello se acaba desembocando en el empirismo que se utiliza sin discriminación.

Ahora bien, siempre parece más racional el empleo de fórmulas empíricas en función de las intensidades de las lluvias y de las características del terreno que las que no tienen en cuenta estos datos orientativos, que son factores importantes.

El problema es más complejo y plantea una mayor desconfianza cuanto mayores sean las cuencas. Para éstas, entonces, parece más racional recurrir a las extrapolaciones de las series de caudales máximos registrados en períodos de tiempo más cortos o más largos.

Pero aquí también tropezamos con dificultades importantes. En efecto, las leyes de probabilidades propuestas deben considerarse más o menos válidas, según el grado en que se confirmen. Naturalmente, la confirmación sólo la pueden dar series muy largas.

Aclaremos lo que acabamos de decir con un ejemplo:

G. Remenieras, en su "Tratado de hidrología aplicada", utiliza la serie de caudales máximos del Rhin en Rheinfelden. Se trata de una serie de ochenta y seis años, comprendidos entre 1869 y 1954.

Ajustada esta serie por las leyes de Gumbel y de Galton resulta (caudales en metros cúbicos por segundo):

	Gumbel	Galton
Caudal máximo para $T = 10$ años	3.450	3.600
Caudal máximo para $T = 100$ años	4.700	4.900
Caudal máximo para $T = 1.000$ años	6.000	5.900

El mismo autor señala que las "cifras son del mismo orden".

Sin embargo, el gráfico que acompaña a la ley de Gumbel *no convence*, ya que los cuatro valores máximos de la serie se *escapan hacia arriba*.

Pero el mismo Remenieras cita la ley de Fréchet y, aunque lo hace con "letra pequeña", presenta un gráfico (página 503 de la edición española de 1971) que, enfrentado al de Gumbel, "convence" mucho más.

Ahora bien, el resultado de la comparación es el siguiente:

	Caudales máx., en m ³ /seg.	
	Gumbel	Fréchet
Para $T = 10$ años	3.467,6	3.418,65
Para $T = 100$ años	4.713,9	5.345,45
Para $T = 1.000$ años	5.937,6	8.283,33

Como puede verse ya existe aquí una sensible diferencia, diferencia que, si no es muy acusada para $T = 100$ años, resulta muy importante para $T = 1.000$ años.

De este ejemplo —y tenemos conciencia de que se podrían poner más— se induce que la ley de Gumbel puede pecar por defecto en muchos casos y, lo que es peor, no parece factible llegar a una comprobación de que la ley de Fréchet se adapte más a la realidad que la de Gumbel, toda vez que las diferencias más apreciables entre ambas suceden para valores de T mayores de cien años.

Pero peor aún que lo antedicho es saber que casi todas las estaciones de aforos de los afluentes por la margen derecha del Ebro no tienen un historial confiable a efectos de caudales máximos. Podríamos clarificar esto con muchos ejemplos, que nos han llevado a la decisión de abandonar los procesos estadísticos, que únicamente presentaremos como contraste con otras estimaciones de más peso.

Otro procedimiento es el que nos proporciona el doctor ingeniero de Caminos don Modesto Batlle Girona, expuesto en su artículo "Estimación de avenidas mediante sus arrastres", publicado en el mes de enero de 1975 en la REVISTA DE OBRAS PUBLICAS.

Promete ser muy fecundo, pero deba considerarse aún en vías de experimentación y creemos que tiene los siguientes inconvenientes:

- No goza aún de popularidad por falta de estudios de terceros en su apoyo, probablemente por no haber transcurrido el tiempo necesario para ello. No obstante, y por lo mismo, no conocemos detractores.

— No siempre es aplicable.

— La metodología es aún algo confusa para nosotros.

Como resumen de tantas motivaciones negativas expuestas diremos simplemente que no encontramos métodos ni medios de suficiente confianza para la determinación de los caudales máximos. Dicho de otro modo: con la aplicación de los métodos expuestos no nos quedamos tranquilos.

2. MOTIVACIONES POSITIVAS

Si evidente es que el cálculo de las máximas avenidas es una estimación más o menos acertada, no es menos evidente que es un asunto que, por ser de la máxima importancia para las obras hidráulicas, ha dado mucho que pensar a muchos ingenieros que han tenido que tomar decisiones importantes.

Entre tales obras hidráulicas podemos considerar los viaductos y los aliviaderos de las presas. Pero en los viaductos no siempre se deciden las capacidades de desagüe por razones hidrológicas ni son piezas que originen grandes catástrofes al ser sobrepasados por las aguas.

Por el contrario, los aliviaderos de las presas son proyectados con la seguridad conveniente, dentro de las limitaciones económicas exigibles e, indudablemente, los proyectistas dedican a ellos una gran atención, especialmente en lo que a su capacidad de desagüe se refiere.

Bajo esta consideración, y aun bajo el supuesto de la disparidad de criterios y de circunstancias, consideramos que no sólo no debemos despreciar o eludir la aportación materializada de tales estudios y decisiones, sino que esta aportación es esencial para valorar, ponderar y adoptar nuestro propio criterio.

3. OBJETO

De acuerdo con lo dicho, nuestro objeto es determinar un criterio que, basado en las capacidades de desagüe que tienen los aliviaderos de las presas construidas en la zona, nos sirva para contrastar, ponderar y establecer o modificar en su caso el valor o valores adoptados, a través de otros cálculos —que tantas dudas nos plantean, según lo criticado—, como caudales máximos para los afluentes de la margen derecha del curso del Ebro comprendido entre su nacimiento y el Jalón (excluido éste).

4. BASES DEL CRITERIO

4.1. *Simplicidad.*

Buscamos unas fórmulas muy simples: que nos ligen únicamente el caudal máximo con la superficie de la cuenca aportadora.

4.2. *Amplitud.*

No buscamos una sola fórmula o panacea, sino un "campo" en que movernos según las razones que en más o en menos tengamos, ponderando cualitativamente los factores no incluidos y que hemos citado: pluviometría, escorrentía, laminación, datos históricos, arrastres sólidos, etc.

4.3. *Uniformidad de criterio de seguridad.*

Para no incurrir en diferenciaciones que pudieran desembocar en lo subjetivo, supondremos que los aliviaderos se han dimensionado con uniformidad de criterio de seguridad y que tal seguridad corresponde al caudal de período de retorno $T = 500$ años.

4.4. *Uniformidad hidrográfica.*

Consideramos como unidad hidrográfica la mitad norte de la cordillera Ibérica tanto en su vertiente al Ebro como en la del Duero. Más concretamente: la divisoria Duero-Ebro, desde su extremo norte (pico Tres Mares) hasta el Moncayo. Las alturas mayores de la Ibérica (Urbión, Ceboñera y Moncayo) se encuentran en esta parte de ella.

5. DATOS DE PARTIDA

Tomamos los datos del "Inventario de presas españolas 1973". Las presas consideradas figuran en el cuadro 1. Las superficies de las cuencas han sido facilitadas por Vigilancia de Presas. Las capacidades de los aliviaderos son las que figuran en el "Inventario", con las siguientes excepciones:

493. Los Rábanos: 600 m³/seg. con nivel normal; 1.100 m³/seg. con sobreelevación.

C-46. Retuerta: 480 m³/seg. con nivel normal; 1.644 m³/seg. con sobreelevación.

Interpretando debidamente el concepto *capacidad del aliviadero*, tomamos los valores de los caudales con sobreelevación.

La situación de las presas puede verse en la figura 1.

6. ANALISIS

6.1. Superficies de las cuencas.

Están comprendidas entre 40 y 1.480 Km². No necesitamos más, ya que la mayor de las cuencas que vamos a someter a este criterio es la del río Tirón, de unos 1.200 Km².

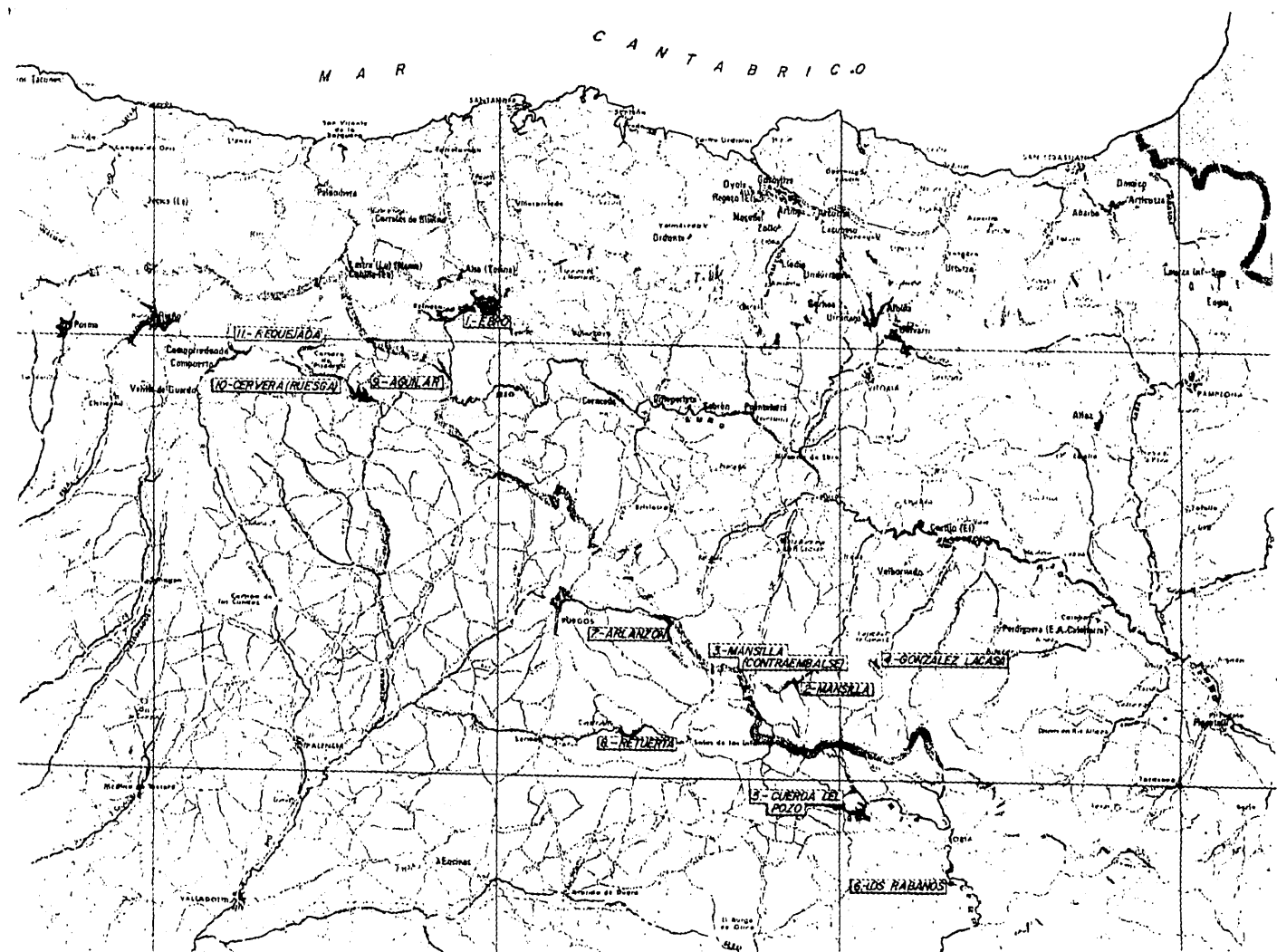


Figura 1.

CUADRO 1

N.º de orden	Cuenca	Rio	Presa		Superficie de la cuenca (Km²)	Capacidad aliviadero (m³/seg.)	Superficie del embalse (Ha)	Año de terminación
			N.º	Nombre				
1	Ebro	Ebro	220	Ebro	500	560	6.253	1945
2	Ebro	Najerilla	426	Mansilla	290	500	246	1960
3	Ebro	Najerilla	427	Id. contraemb.	300	761	10	1960
4	Ebro	Albercos	464	Gonz. Lacasa	40	140	152	1962
5	Duero	Duero	200	C. del Pozo	550	1.100	1.701	1941
6	Duero	Duero	493	Los Rábanos	1.480	1.100	98	1963
7	Duero	Arlanzón	169	Arlanzón	120	140	120	1933
8	Duero	Arlanza	C-46	Retuerta	1.200	1.644	1.130	C
9	Duero	Pisuerga	474	Aguilar	546	750	1.646	1963
10	Duero	Ribera	123	Cervera	54	100	97	1923
11	Duero	Pisuerga	197	Requejada	247	450	333	1940

6.2. Situación de las presas.

Cuatro de las presas pertenecen a la cuenca del Ebro. Las otras siete a la del Duero. Es todo lo que puede encontrarse de acuerdo con la base 4.4.

Pueden considerarse agrupadas en dos zonas: la Sur, en el triángulo Burgos-Logroño-Soria, y la Norte, en la cabecera del Ebro.

Esta cabecera no sólo forma parte de la Ibérica, sino también de la cordillera Cantábrica.

En el gráfico se puede ver y juzgar —tras la lectura completa de este estudio— la no variación del criterio por la eliminación de las presas 1, 9, 10 y 11 de la zona Norte.

6.3. Efecto laminador de los embalses.

El efecto laminador de un embalse es siempre muy digno de tener en cuenta. Pero la experiencia de muchos años nos dice que casi nunca se ha tenido en cuenta para el proyecto del aliviadero. No es un asunto suficientemente razonable, pero así es. El proyectista siempre teme que el embalse esté a su cota máxima en el momento de la avenida y, entonces, no hay laminación.

El establecimiento de normas y los sistemas de vigilancia son demasiado recientes para que en las presas consideradas se note su efecto.

Así, por orden inverso de antigüedad, las cuatro presas más recientes son:

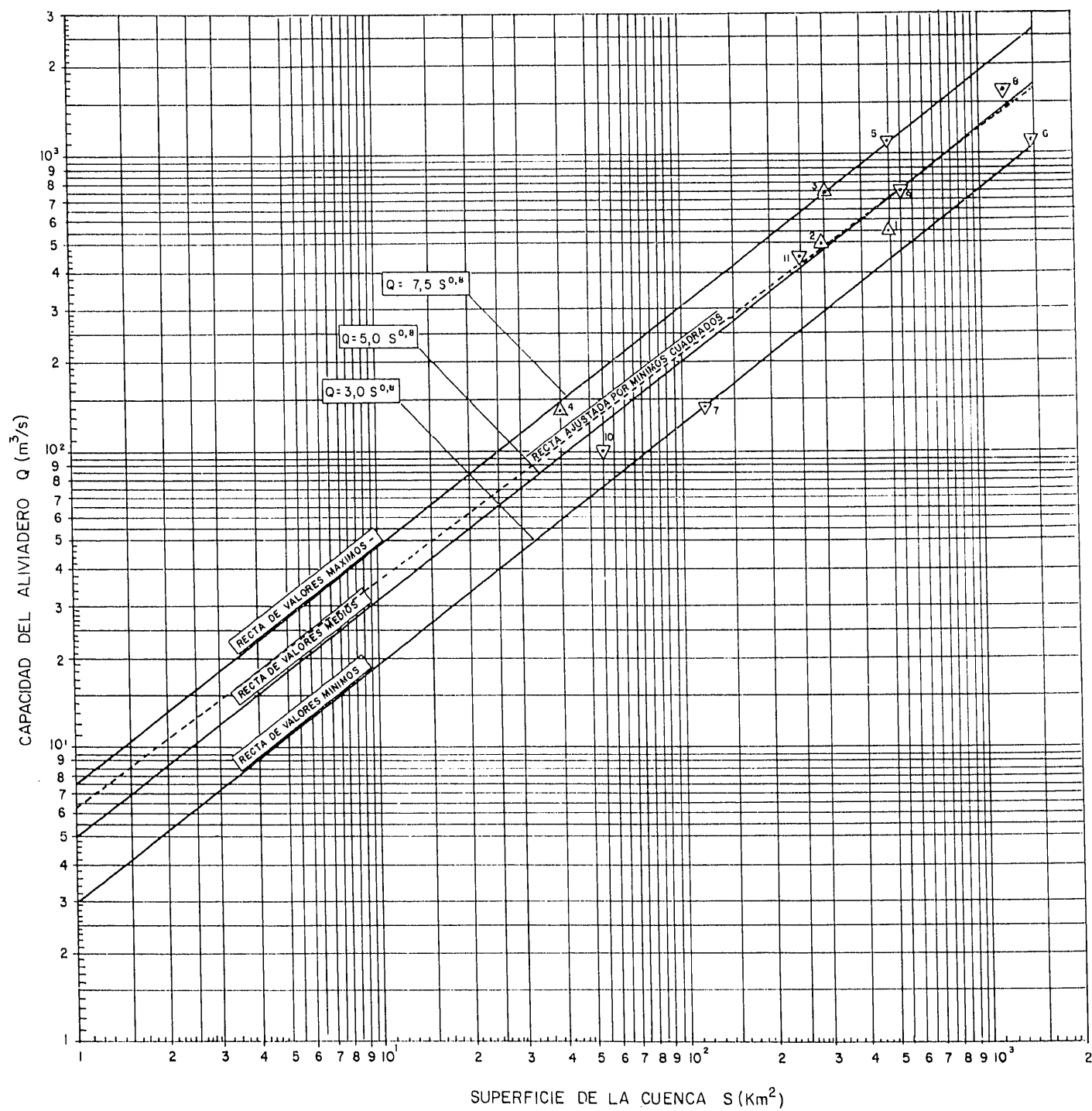
N.º	Presa	Año de terminación
8	Retuerta	En construcción
6	Los Rábanos	1963
9	Aguilar	1963
4	González Lacasa	1962

Examinadas estas presas en el gráfico, vemos que sólo en la 6 puede haber influido el criterio de tener en cuenta la laminación, y, en este caso, no la del propio embalse —de pequeña superficie—, sino la del de cabecera, 5, Cuerda del Pozo.

Por lo dicho, tampoco parece influir la superficie del embalse. Ordenados en este sentido, los cuatro embalses mayores son:

N.º	Presa	Superficie (Ha)
1	Ebro	6.253
5	Cuerda del Pozo	1.701
9	Aguilar	1.646
8	Retuerta	1.130

Visto el gráfico, llegamos a la misma conclusión: el efecto laminador del embalse no ha influido sensiblemente en el dimensionamiento del aliviadero.



6.4. Análisis del gráfico.

Utilizando papel logarítmico y de acuerdo con la base 4.1, hemos representado en abscisas las superficies de las cuencas (S) y en ordenadas las capacidades de los aliviaderos (Q).

Según la base 4.2, encuadramos la *nube* de puntos entre dos rectas, cuyas ecuaciones son:

$$\text{Recta superior} \dots\dots\dots Q = 7,5 S^{0,8}$$

$$\text{Recta inferior} \dots\dots\dots Q = 3,0 S^{0,8}$$

Encajando una recta media por mínimos cuadrados resulta:

$$\text{Recta media ajustada} \dots\dots\dots Q = 6,19 S^{0,763}$$

Modificando ligeramente esta recta para que resulte paralela a las dos anteriores, queda:

$$\text{Recta media adoptada} \dots\dots\dots Q = 5,0 S^{0,8}$$

7. CONCLUSIONES

El criterio buscado y obtenido es el siguiente:

$$\text{Valores máximos} \dots\dots\dots Q = 7,5 S^{0,8}$$

$$\text{Valores medios} \dots\dots\dots Q = 5,0 S^{0,8}$$

$$\text{Valores mínimos} \dots\dots\dots Q = 3,0 S^{0,8}$$

siendo:

Q = caudal correspondiente a $T = 500$ años en $\text{m}^3/\text{seg.}$

S = superficie de la cuenca en Km^2 .

Para $T = 100$ años los valores de Q obtenidos deben multiplicarse por 0,8.

8. COMENTARIOS FINALES

8.1. Comparación con otras fórmulas.

Este criterio (o estas fórmulas) están en línea con algunos otros. De las fórmulas empíricas que recoge Rafael Heras en sus "Métodos prácticos de estimación de máximas crecidas" (*), existen dos muy próximas en cuanto a estructura y proximidad:

$$9. \text{ Fanning} \dots\dots\dots Q = 2,5 S^{5/6}$$

$$10. \text{ Dickens} \dots\dots\dots Q = 6,9 S^{3/4}$$

(*) Centro de Estudios Hidrográficos, abril 1970.

También existe la siguiente, que, con estructura diferente, coincide bastante en sus resultados:

$$6. \text{ Ganguillet } Q = \frac{25 S}{5 + \sqrt{S}}$$

Finalmente, y como el autor ha expuesto en otro lugar, las fórmulas preconizadas en la vigente "Instrucción de Carreteras", conducen a expresiones que pueden asimilarse a:

$$\begin{aligned} \text{Método racional } Q &= a S^{0.788} \\ \text{Bürkli-Ziegler } Q &= b S^{0.75} \end{aligned}$$

siendo a y b parámetros relacionados con la pluviometría y las características de las cuencas.

8.2. Igualdad de criterios.

Con independencia de la mayor o menor coincidencia con otras fórmulas, lo que más importa es destacar que el criterio que hemos establecido corresponde, dentro de su amplitud en la que caben las consiguientes matizaciones, al criterio general de 11 presas construidas en la zona.

En esencia, a las hipotéticas preguntas que nos hemos hecho:

- ¿Existe igualdad de criterios entre los proyectistas de las presas de la zona?
- ¿Se puede expresar esa igualdad sencillamente?

La respuesta es:

- Existe una igualdad, no absolutamente estricta, que se puede expresar en unas sencillas fórmulas.

9. LIMITACIONES

Damos por sentado que se entiende, a través de lo expuesto, que el criterio establecido se limita a la zona de la Ibérica, comprendida entre el pico Tres Mares y el Moncayo, como se ha indicado en el apartado 4.4.