

LA EXPLOTACION DE LOS HIPER-EMBALSES

Por ENRIQUE BECERRIL
Ingeniero de Caminos.

Presenta el autor en este artículo una interesante aplicación de su método original (expuesto en su obra "La regulación de los ríos", Premio Alfonso X el Sabio, Consejo Superior de Investigaciones Científicas 1946) al caso de la regulación del río Tago, agua abajo de su confluencia con el Guadiela. El lector podrá juzgar el extraordinario interés de dicho método, a través del cual se logra, por un procedimiento rigurosamente matemático, la resolución de tan complejo problema.

El nombre de *hiper-embalse* (hiper, υπερ, sobre, más allá), utilizado por D. Manuel Lorenzo Pardo para el pantano del Ebro y generalizado para los de función análoga, designa a aquellos embalses cuyo

cional para obtener caudales regulares frente a una geografía particularmente desfavorable.
Dentro de cada año hidrológico, la forma de la curva de caudales de un río es sensiblemente previsi-

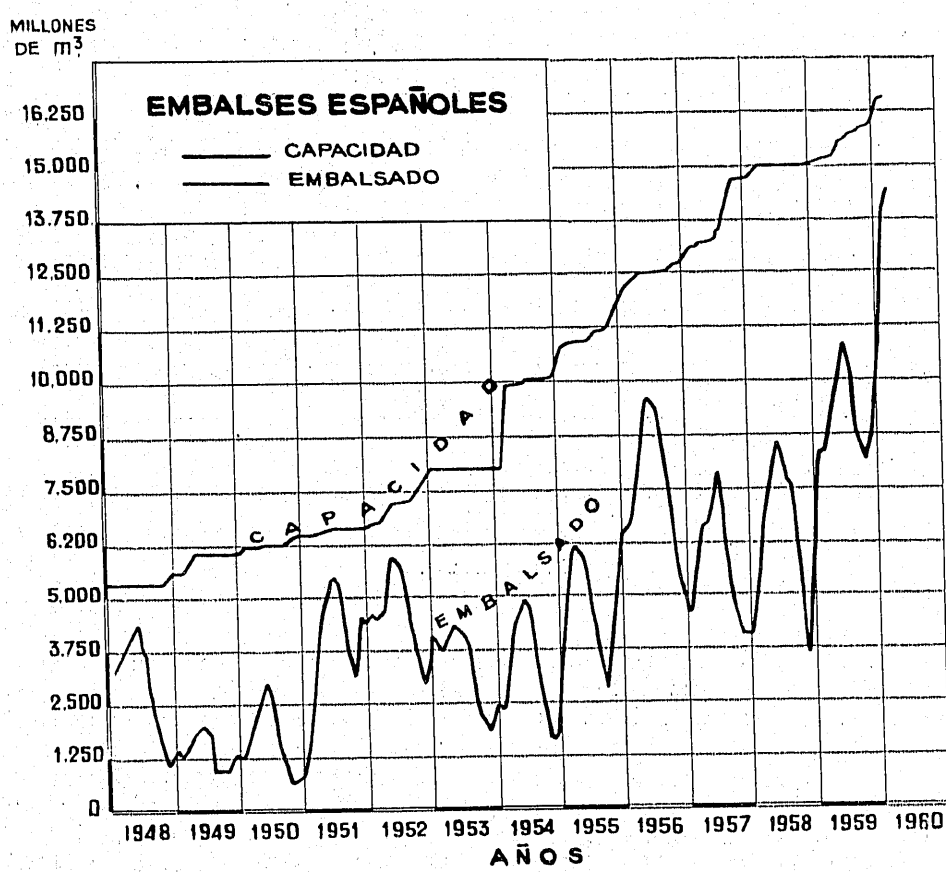


Gráfico núm. 1.

ciclo es superior al anual. La idea del ilustre Ingeniero español precisa un concepto y da raigambre y expresión a una fórmula genuina de nuestra técnica.
Es lógico que así sea, pues los hiper-embalses, menos frecuentes en climas de irregularidad fluvial moderada, representan la necesidad de un esfuerzo adi-

ble y la acomodación al uso (régimen) exige un traslado estacional (*regulación anual*). En cambio, la irregularidad *interanual*, que se manifiesta por los desiguales valores de la aportación de cada año, no se somete, en general, a ley conocida. No obstan los interesantes estudios que se vienen llevando a cabo, tanto en mies-

tro país como en otros, acerca de la periodicidad de la aportación anual, y que encuentran su mayor dificultad en la necesidad de datos, directos o indirectos, de muy largo período, sin los cuales es imposible obtener resultados de validez científica.

Por eso, cuando se trata de regulación interanual, como corresponde a los hiper-embalses, preferimos utilizar métodos estrictamente estadísticos, como el expuesto en reciente publicación (*).

Ahora bien, la garantía de una reserva se integra por dos elementos: el recipiente para contenerla y el volumen efectivo contenido. De aquí la diferencia del valor en uso entre un embalse vacío, condicionado a la eventualidad de su llenado, y el de un embalse lleno.

Las aportaciones hidráulicas de los últimos años no habían bastado para llenar los nuevos embalses claves de nuestra regulación interanual, los de Entrepeñas-Buendía, Alarcón y Cijara, que con los de Rei-

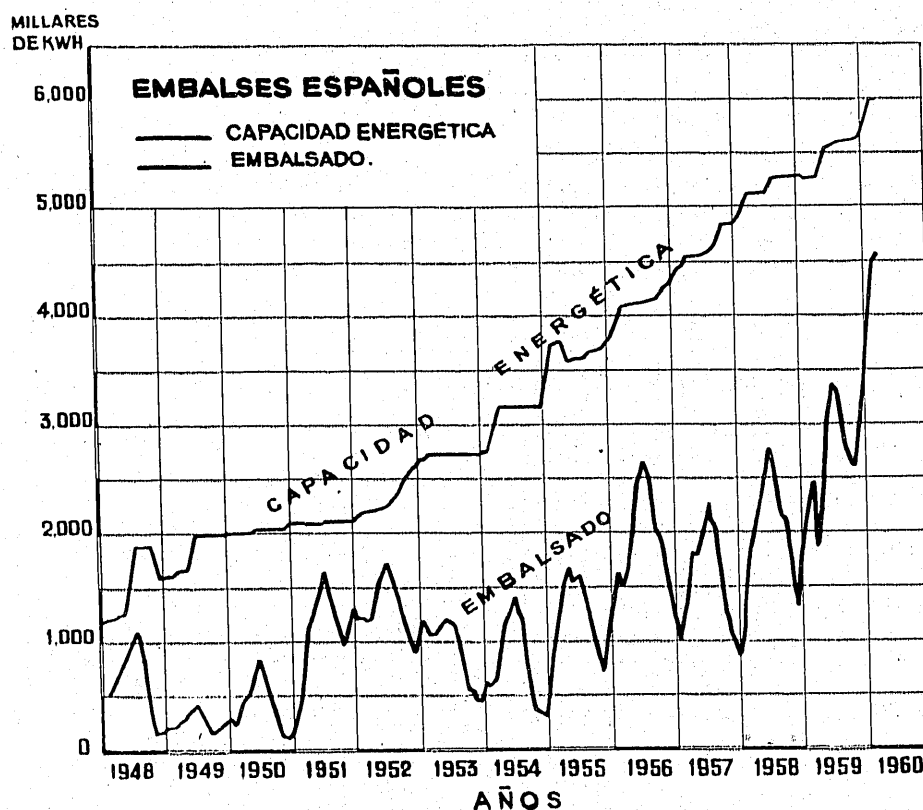


Gráfico núm. 2.

Este artículo va a tener por objeto señalar algunas conclusiones de carácter práctico fundamental en relación con el actual momento crítico en la historia de nuestras obras hidráulicas.

En efecto, la aspiración de mejorar aquellas condiciones geográficas a que antes aludíamos, fué el impulso promotor de las obras de embalse que el Ministerio de Obras Públicas ha llevado a cabo y al que la iniciativa y el capital privado han colaborado dignamente. La capacidad hidráulica y energética de tales embalses ha crecido, como muestran los gráficos 1 y 2, en los que se anota también la variación de su almacenamiento.

(*) *La regulación de los ríos*, por E. Becerril. Premio "Alfonso el Sabio" 1946, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

nosa y el Tranco, completan el conjunto destinado a aquel objeto, justificando la afirmación de que "la regularidad de nuestro sistema hidroeléctrico no será un hecho, en efecto, sino a partir del día en que contemos con suficiente capital de agua acumulada para llegar a una explotación racional y completa (*).

Pues bien, en este momento los embalses de Entrepeñas y Buendía alcanzan acumulación próxima a los 2 Km.³, y no parece aventurado suponer que esta cifra será rebasada en cuanto lo permita el estado de las obras complementarias de aliviadero y restauración de comunicaciones.

La figura 4.^a representa la ley estadística del río Tajo + Guadiela, referida a la confluencia (Bolarque). Está construida con los datos de aforo, octubre

(*) Banco Urquijo, Informe Anual, 1958.

1913-septiembre 1956, o sea cuarenta y tres años hidrológicos. La interpolación estadística por medio de una función de Goodrich, que es una euleriana disimétrica, demuestra una excelente exactitud (gráfico 3, b).

La aportación media es $A_m = 1396 \text{ Hm}^3$ por año, de los cuales $A_c = 300 \text{ Hm}^3$ son la porción que llamamos *aportación mínima o constante*, es decir, la que tiene naturalmente garantía igual a la unidad.

La aportación *variable* será, por tanto, el exceso

garantía de régimen del sistema Tajo + Entrepeñas + Buendía.

Para ello partamos de la evaluación del volumen regulador de la siguiente forma:

Embalse máximo	2,3 Km. ³
Volumen no útil (reserva inferior).	0,3 »
Embalse útil	2,0 »

En cuanto a la fracción reservada a la regulación

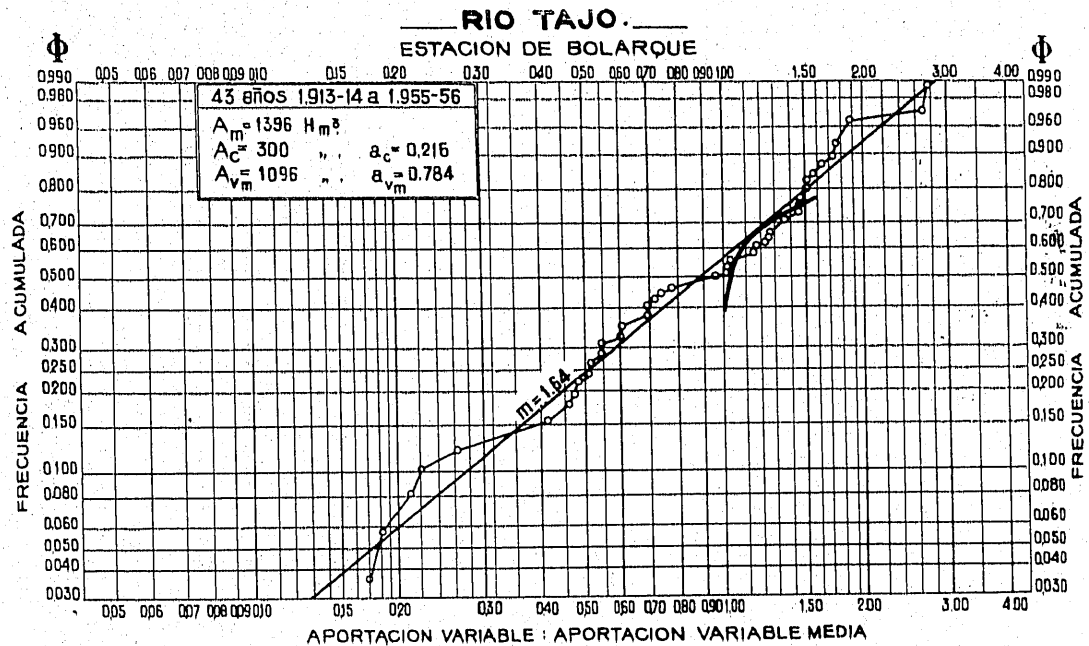


Gráfico núm. 3, a.

sobre esta cifra y, en definitiva, la ecuación de probabilidad del río es:

$$\phi = 1 - e^{-\left[\frac{A - 300}{1096 \times 1.117}\right]^{1.64}}$$

siendo ϕ la probabilidad de *falta* del volumen anual A , medido en Hm^3 .

El *exponente fluvial* $m = 1.64$ define la curva y es el coeficiente angular de la transformada lineal de la parte variable (gráfico 3, a); corresponde a una desviación típica (*standard*) $\sigma = 0.633$.

$\lambda = 1.117$ es el parámetro de cierre de la curva de frecuencia. La *mediana* del río (aportación de probabilidad 1/2) vale 1260 Hm^3 , o sea el 0.92 de la media.

La desviación típica del río es:

$$\sigma' = \frac{1096}{1396} \times 0.633 = 0.496.$$

Vamos a estudiar ahora el efecto regulador y la

anual, depende de la cuantía y modalidad del régimen, es decir, de la configuración de la curva de demanda. Admitamos, sin embargo, que pueda considerarse constante en primera aproximación, fijándolo en 500 Hm^3 , suficiente para una moderada inversión, sensiblemente adaptada a las condiciones de la demanda previsible en los años próximos.

Con eso, sería de 1500 Hm^3 la base reguladora interanual. Puesto que la fracción variable de la aportación es de 1096 Hm^3 , el índice de regulación efectivo es:

$$\frac{\text{Embalse interanual efectivo}}{\text{Aportación media variable}} = \frac{1.500}{1.096} = 1.37.$$

Tenemos con esto todos los datos necesarios para resolver el problema; veamos ahora en qué consiste el diagrama $n\Delta$ de una función de probabilidad.

Si imaginamos un fenómeno de azar (un juego de ruleta, una serie de pruebas deportivas, la aportación fluvial en un período) cuyos resultados individuales son acumulables, podemos representar sobre un eje

horizontal el número de pruebas y en verticales la desviación acumulada respecto de un supuesto medio (*). En tal diagrama (gráfico 4) una línea $p = \text{cte.}$ representa el lugar geométrico de las desviaciones que serán alcanzadas o excedidas con probabilidad p ; $q = 1 - p$, será la probabilidad de que tal valor no sea alcanzado.

Por tanto, el riesgo de una desviación acumulada

de ordenada comprendido entre las líneas r y p ; su máximo valor es, por definición, el del embalse, que dará garantía $G = 1 - p$ al régimen r , ya que la existencia de una reserva inicial igual a Δ , reduce al valor p , como máximo, el riesgo de falta del volumen de régimen r ; tal riesgo máximo corresponde al año n_c , que es lo que llamaremos semiperíodo crítico.

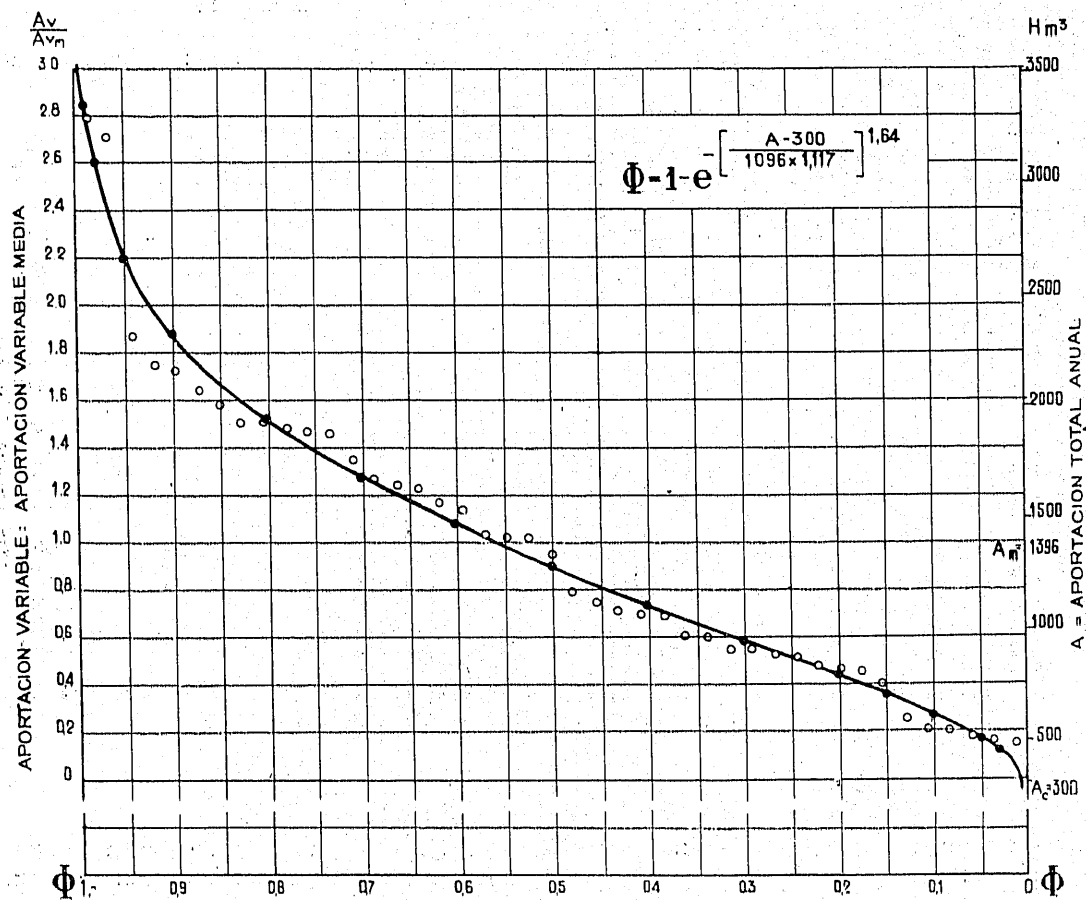


Gráfico núm. 3, b.

Δ , al cabo de n pruebas, podrá leerse directamente en el diagrama así construido. En general, las curvas $p = \text{cte.}$ tienen forma parabólica, con ordenadas continuamente crecientes; si el fenómeno es simétrico, también lo será el diagrama; es claro que el diagrama fluvial es, de ordinario, disimétrico.

En el mismo diagrama, un cierto régimen de desembalse anual $r = A_m (1 - \alpha)$ estará representado por una recta de inclinación $-\alpha$ respecto al eje representativo de la aportación media A_m .

La desviación acumulada para probabilidad p respecto al régimen r , vendrá dada por el segmento

(*) Por ejemplo, si un equipo de fútbol, después de 10 partidos, tiene siete puntos, su desviación (deficiencia) acumulada es $\Delta = 7 - 10 = -3$.

Se comprende que el diagrama $n \Delta$ de una función pueda ser construido analíticamente o gráficamente, y es demostrable que el diagrama es general si se toma como unidad de escala el valor de σ^2 , tanto en horizontales (n/σ^2) como en verticales ($\frac{\Delta}{\sigma^2}$).

Preferimos aquí, sin embargo, dar el diagrama particularizado para el río Tajo, en su porción variable, a fin de permitir a nuestros lectores la más fácil y directa discusión del problema (gráfico 5).

Llevamos para ello, sobre el eje vertical, la distancia representativa del embalse, 1500 Hm.³ (o sea, 1.37 de la aportación variable), y desde el punto así obtenido, tracemos tangentes a las parábolas de igual probabilidad, $q = 0.80, 0.85, 0.90 \dots$, obteniendo las rectas de régimen correspondientes, cuyos coeficien-

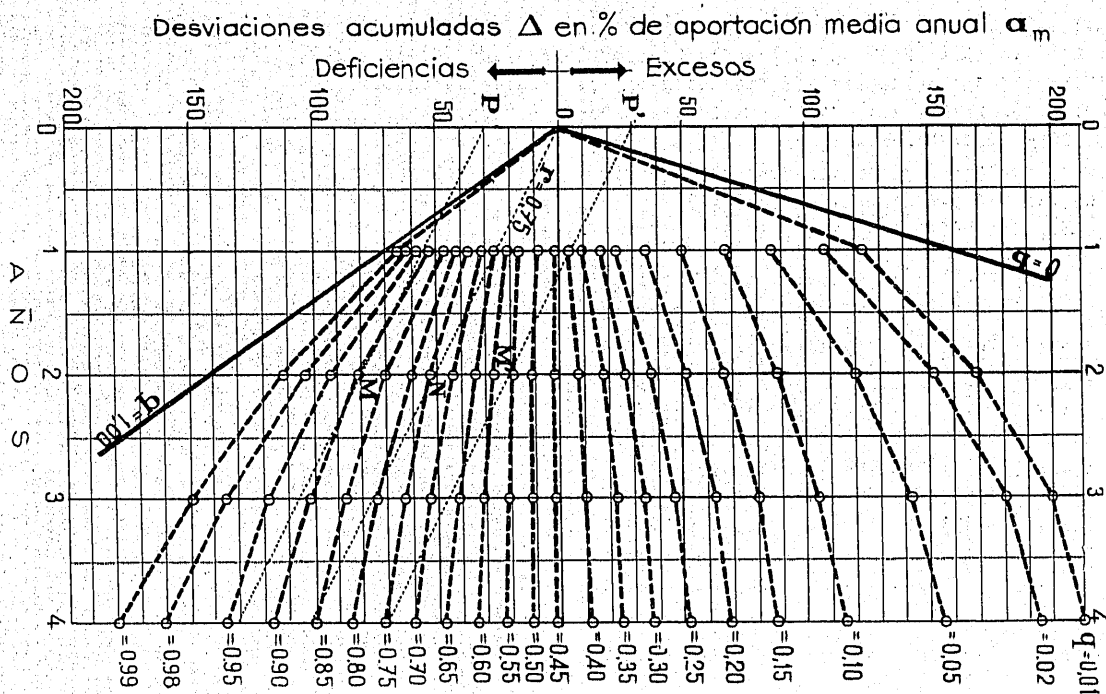


Gráfico núm. 4.

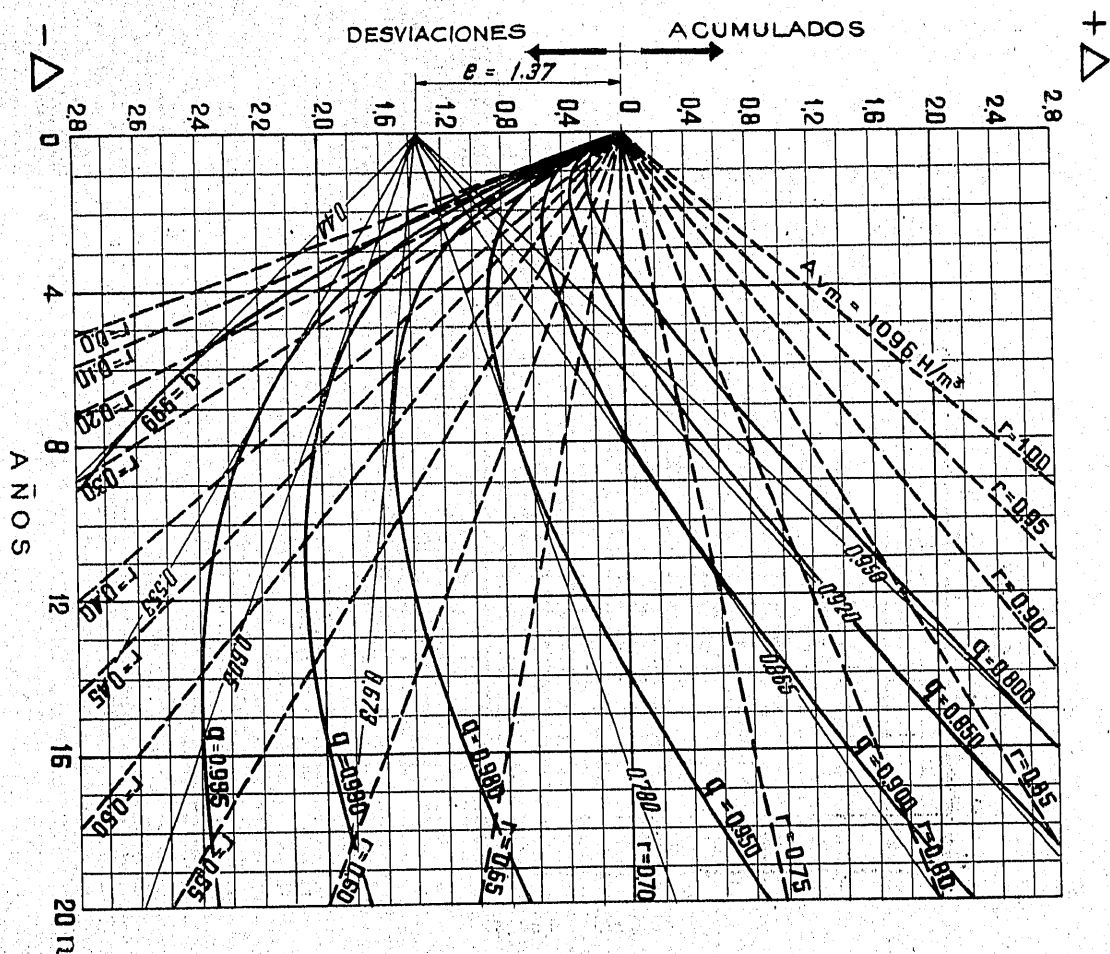


Gráfico núm. 5.

tes angulares pueden medirse directamente dando la fracción de la aportación variable que se regula con la respectiva garantía. Sumando a este volumen la aportación permanente (300 Hm.³), obtenemos el siguiente cuadro de resultados:

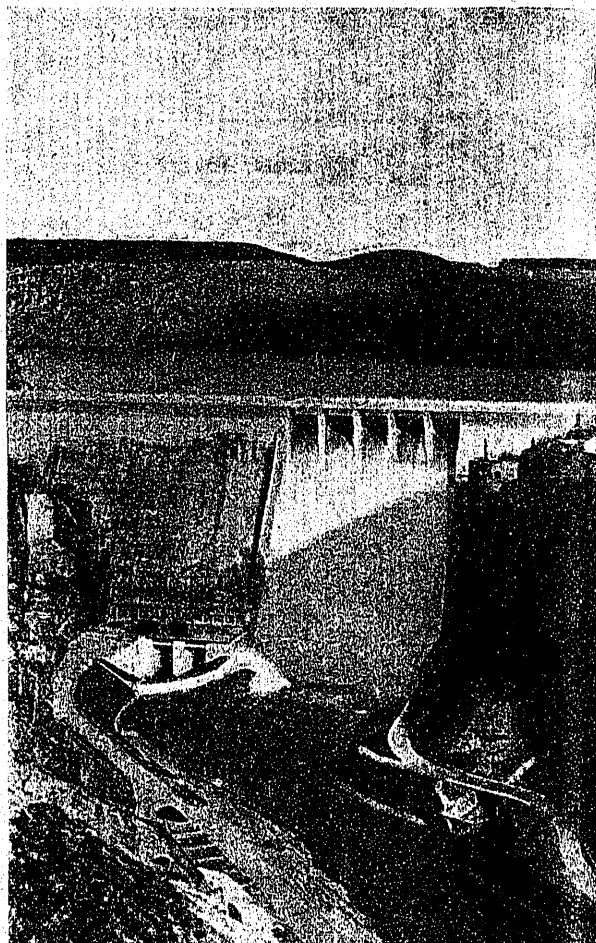
Probabilidad q	Régimen unitario (parte variable) r	Régimen (parte variable) R	Régimen total $R' = R + A_c$	Dotación unitaria total $r' = R/A_m$	Índice de regulación $I = G r'$
0,80	0,950	1 040	1 340	0,96	0,77
0,85	0,920	1 010	1 310	0,94	0,80
0,90	0,865	947	1 247	0,89	0,80
0,95	0,780	855	1 155	0,83	0,79
0,98	0,679	744	1 044	0,75	0,74
0,99	0,605	663	963	0,69	0,68
0,995	0,553	605	905	0,65	0,65
0,999	0,440	482	782	0,56	0,56

en cuya última columna figura el *Índice de Regulación* $I = G r'$.

Cuanto ha sido expuesto tiene una inexorable exactitud matemática, que se traduce a los términos del gráfico 6, que es, en definitiva, la representación de la función unívoca existente y definida para todo sistema río + embalse

$$F(r' G) = 0.$$

Pero aún le queda a quien proyectó el embalse la elección del parámetro decisivo: la *garantía*. Aquí, los criterios decisivos, por la multiplicidad



Embalse de Entrepeñas, vertiendo, y central semisubterránea de pie de presa de U. E. M.

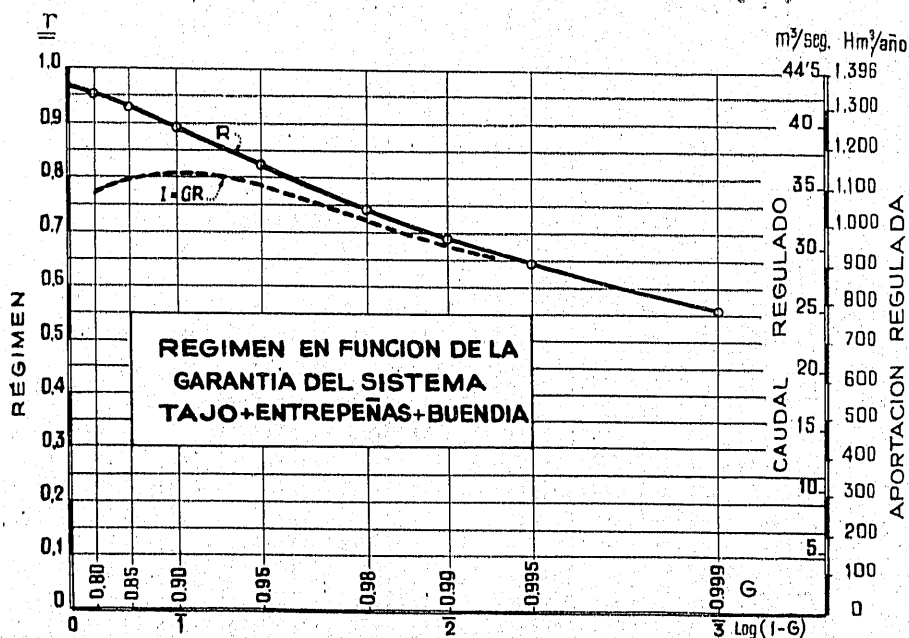


Gráfico núm. 6.

de acciones y consecuencias, van a rebasar el estricto campo de lo científico para enlazarse a consideraciones económicas, sociales, políticas..., humanas, en fin.

¿Qué elección debe hacerse? ¿Convendría utilizar toda el agua posible, aun a costa de la perfección de la regulación? O, por el contrario, ¿es la garantía la que debe ser elevada, aun con detrimento del caudal regulado?

Consideramos muy expresivo el índice de regulación $I = G r$, que, de ordinario, pasa por un máximo muy tendido en la zona de los valores habituales, siendo, por tanto, medida característica de la eficacia reguladora del embalse. Ese valor, en nuestro caso, es de 0,80 y parece justificar atención especial a los dos supuestos siguientes:

1.º Régimen, 1 247 Hm.³ (promedio, 39,7 m.³/segundo); garantía, 0,90.

2.º Régimen, 1 155 Hm.³ (promedio, 36,7 m.³/segundo); garantía, 0,95.

La elección entre estas consignas no es banal; mas si consideramos que la función del hiper-embalse debe ir en este caso asociada a una alta garantía, por tratarse de los que constituyen piedras angulares de la economía hidráulica española, parece que no debe correrse el riesgo de someterlos con frecuencia a trances de fallo; más concretamente, un vaciado total no debe producirse en promedio antes de veinte años, lo que supone una *garantía* del orden de 95 por 100, concordante con lo que indica la segunda de las hipótesis apuntadas, bien entendido que el coeficiente de utilización podrá mejorarse, sin disminución de la garantía efectiva, por una acertada adaptación a las circunstancias y por la conjugación con otros sistemas de embalses.

En todo caso, el simple planteamiento de esta cuestión, que está sometida a criterios superiores, da medida de la importancia de unas obras que son honra de la ingeniería nacional.