

# CALCULO DE RESGUARDOS EN UN SISTEMA DE EMBALSES PARA LAMINACION DE AVENIDAS(\*)

Por JUAN SAURA MARTINEZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

*Uno de los muchos problemas con que se encuentra el ingeniero encargado de la explotación de un sistema de embalse es la determinación de los volúmenes de embalse vacío necesarios en los meses de invierno para hacer frente a la laminación de las posibles avenidas que puedan presentarse.*

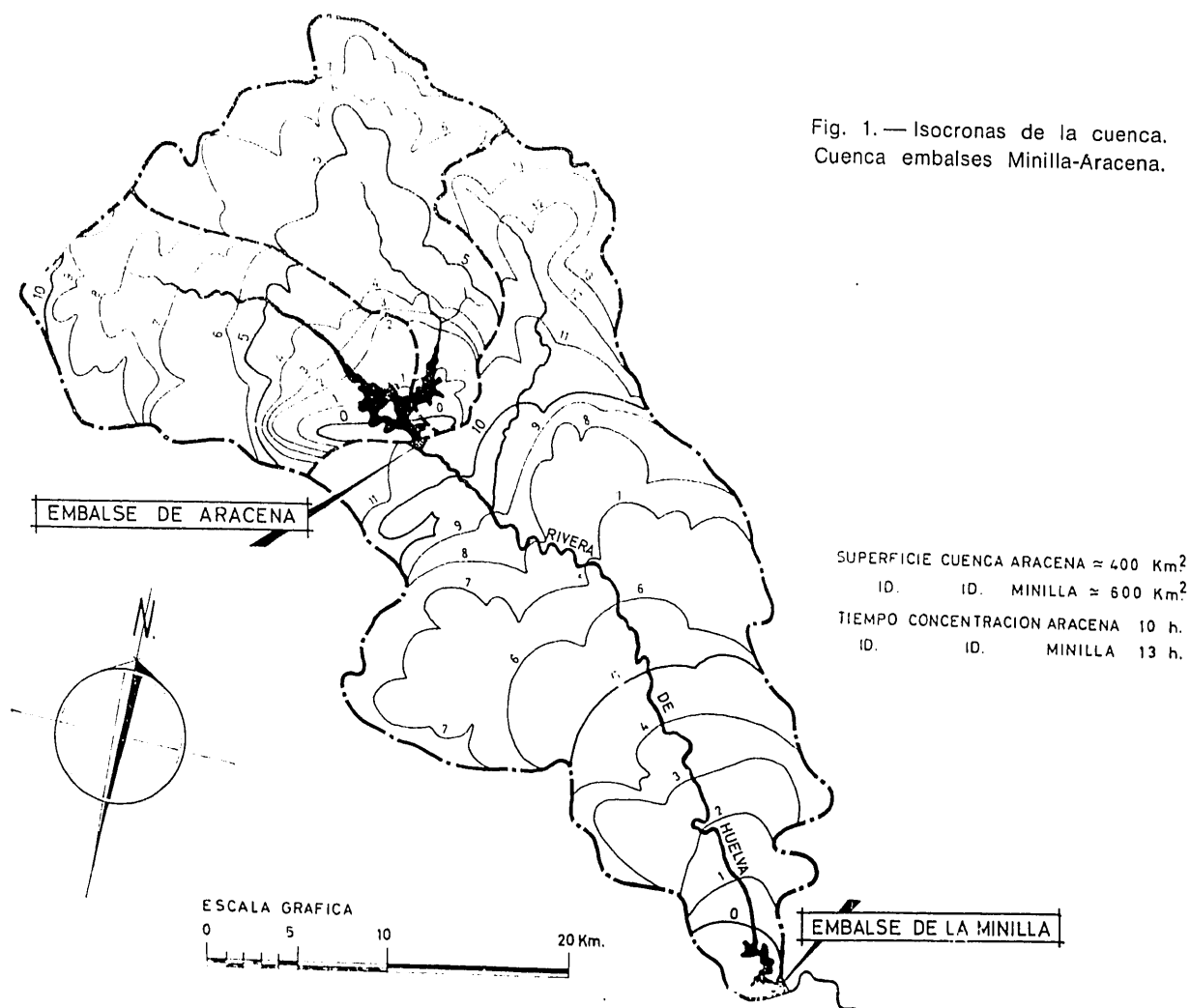
*El autor expone los resultados obtenidos en la aplicación de un sencillo modelo matemático de simulación de avenidas aplicado a la cuenca del río Rivera, de Huelva.*

## 1. Introducción.

El río Rivera, de Huelva, es afluente del Guadalquivir por la margen derecha, uniéndose a este último en las proximidades de Sevilla.

En él se encuentran actualmente construidos dos embalses: Aracena (capacidad, 115 Hm<sup>3</sup>) y Minilla (60 Hm<sup>3</sup>), situados el uno aguas abajo del otro, tal como indica la figura 1. Estos embalses tienen como misión la regulación del

Fig. 1.— Isocronas de la cuenca.  
Cuenca embalses Minilla-Aracena.



(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de octubre de 1974.

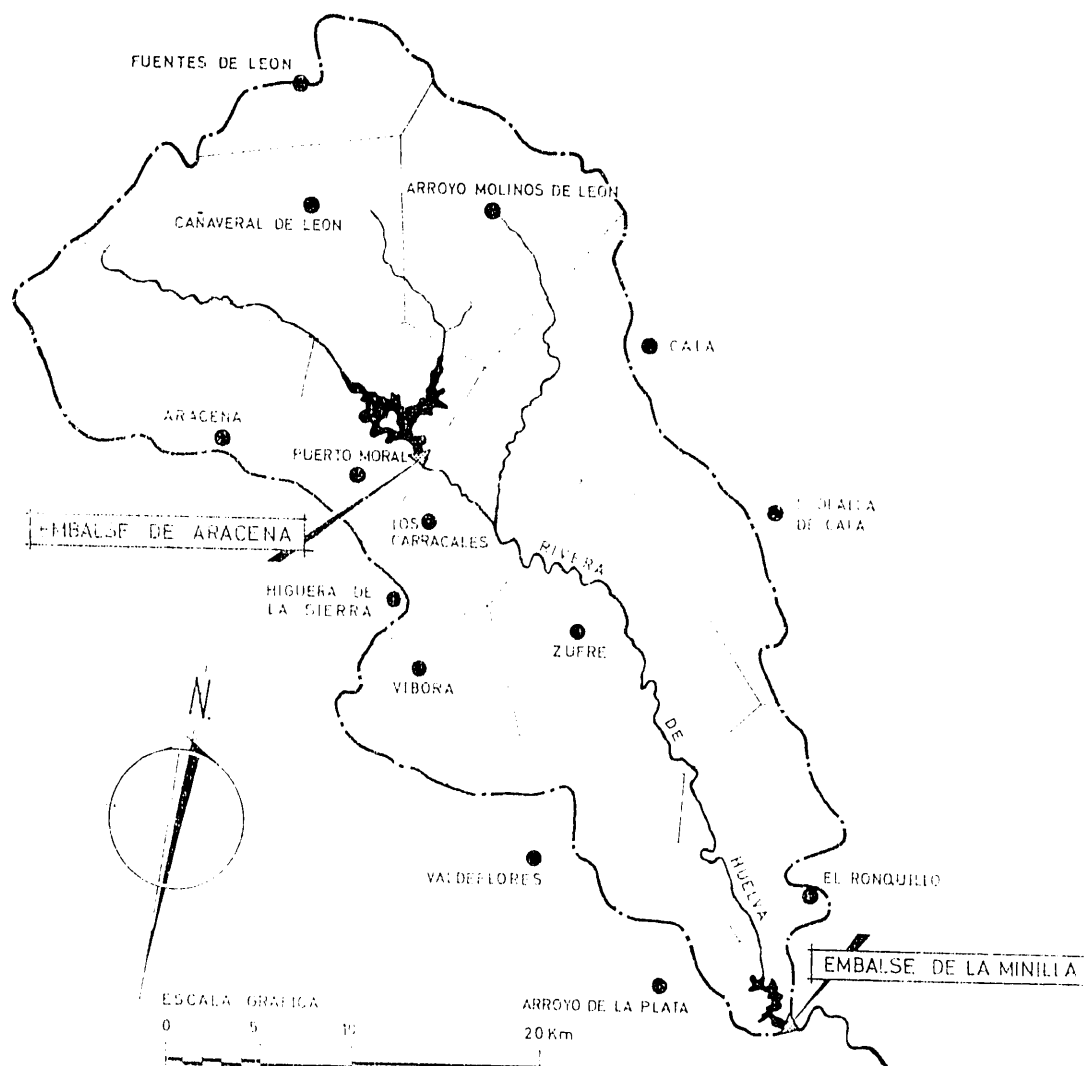


Fig. 1 bis.—Poligonación Thiessen de la cuenca. Cuenca embalses Minilla-Aracena.

río para el abastecimiento de aguas a Sevilla y para la defensa contra las inundaciones de las tierras ribereñas situadas aguas abajo del embalse de la Minilla. De la torrencialidad del mencionado río dan idea los caudales aforados en 21 de octubre de 1939 ( $2.780 \text{ m}^3/\text{seg.}$ ) y 2 de enero de 1940 ( $2.230 \text{ m}^3/\text{seg.}$ ) en la central de la Cía. Sevillana, situada a poca distancia (7 Km) aguas abajo de este último embalse. Empieza a causar daños un caudal vertido en Minilla de  $500 \text{ m}^3/\text{seg.}$ ; de ahí el interés de determinar los volúmenes de embalse vacío necesarios en los meses de invierno (que llamaremos resguardos), para hacer frente a la posible presencia de una avenida.

## 2. Descripción del modelo.

El modelo simula la presencia de una avenida simultáneamente en las cuencas parciales de ambos embalses, así como el proceso de laminación de los mismos, obteniendo el caudal punta aguas abajo de Minilla en función de los volúmenes iniciales almacenados en ambos embalses, de las consignas supuestas para la maniobra de compuertas y de la avenida, cuya presencia hemos supuesto. Vamos a intentar aclarar a continuación cada uno de los pasos efectuados en el modelo.

## 2-a. Simulación de la avenida.

El primer paso del modelo es determinar para cada uno de los meses de invierno las avenidas para las cuales se va a simular el proceso de laminación. Estas avenidas vienen definidas por sus hidrogramas, admitiendo el programa de cálculo la introducción como dato de unos determinados hidrogramas (históricos o probabilísticos) o bien de las precipitaciones máximas en veinticuatro horas observadas durante varios años en una serie de pluviómetros repartidos por toda la cuenca que se estudia, determinándose a continuación unos hidrogramas probabilísticos correspondientes a esas precipitaciones de la siguiente forma: Se realiza en primer lugar el ajuste de una ley de Gumbel a las precipitaciones históricas, determinándose

ción a partir de la intensidad media probable horaria en veinticuatro horas por la fórmula aproximada de Yarnell y Hathaway.

$$I_t = I_{24} \left( \frac{24}{t} \right)^{0.55}$$

$I_t$  = intensidad media probable horaria de un aguacero de duración  $t$  horas.

$I_{24}$  = intensidad media probable horaria de un aguacero de duración 24 h.

$t$  = tiempo de concentración de la cuenca (= 20 h.).

En la figura 1 aparece la red de pluviómetros utilizados, así como las isocronas de la cuenca de hora en hora. Conocidas las intensidades de lluvia probables para cada pluvió-

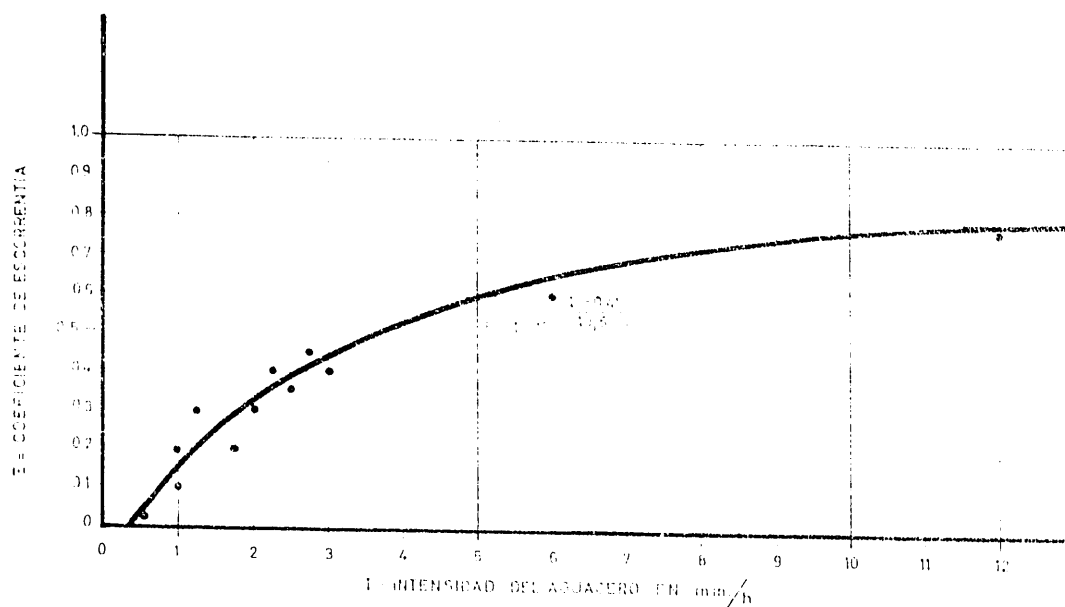


Figura 2.

las precipitaciones probables en veinticuatro horas, con periodos de diez, veinte, cincuenta, cien y mil años. A partir de estos datos y para cada uno de los periodos anteriores se simula la presencia en toda la cuenca de una precipitación de duración igual al tiempo de concentración de la misma (del orden de las veinte horas en nuestro ejemplo), obteniéndose la intensidad horaria de la precipitación de cada pluviómetro correspondiente al aguacero de esta dura-

metro se obtiene por el método de las isocronas el hidrograma correspondiente a esa precipitación, para lo cual es necesario el conocimiento del coeficiente de escorrentía. Para ello, y partiendo de varias avenidas históricas presentadas, se ha ajustado una curva de tipo exponencial a los puntos observados, tal como indica la figura 2.

De esta forma se obtiene para cada mes y para cada embalse cinco hidrogramas probables

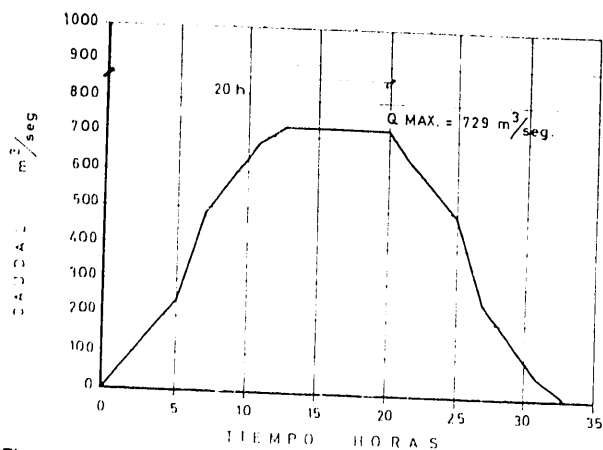


Fig. 3. — Hidrograma teórico de la avenida de cincuenta años en la cuenca parcial del Minilla en enero.

correspondientes a los cinco períodos antes mencionados. A título de ejemplo, en la figura 3 aparecen los dos hidrogramas correspondientes al mes de enero y período de cincuenta años.

## 2-b. Simulación del período de laminación.

Para cada uno de los hidrogramas obtenidos el caudal punta aguas abajo del sistema de embalses depende de la situación inicial en ambos y de las maniobras de compuertas que se realicen en los mismos.

El fenómeno físico de la laminación en un embalse viene representado por la ecuación diferencial:

$$(Q A(t) - Q T(t) - Q V(t)) dt = S(h) \cdot dh \quad (1)$$

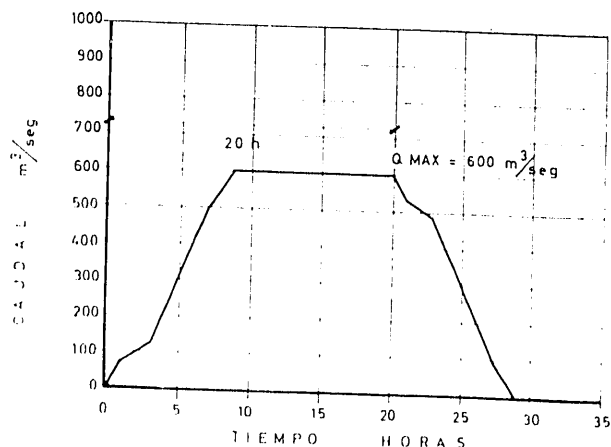


Fig. 3 bis. — Hidrograma teórico de la avenida de cincuenta años en la cuenca parcial de Aracena en enero.

en donde:

$Q A(t)$  = caudal de avenida en el instante  $t$ .

$Q V(t)$  = caudal vertido en el instante  $t$ .

$Q T(t)$  = caudal desaguado por otros elementos en ese instante.

$S(h)$  = superficie del vaso correspondiente a la cota  $h$ .

$dh$  = sobre elevación diferencial del nivel en un tiempo  $dt$ .

Partiendo de los valores iniciales de las variables que intervienen en la ecuación (1) por diferencias finitas es bastante sencillo el seguir paso a paso la marcha de los niveles en ambos embalses, así como el caudal desembalsado por los mismos tal como indica el cuadro siguiente:

Tiempo $t$ .....	$t_0$	$t_0 + \Delta t$	$t_0 + 2 \Delta t$
Cota inicial $h$ .....	$h_0$	$h_1$	$h_2$
Abertura compuertas $a(t)$ .....	$a_0$	$a_1 = a_0 + \Delta a_0$	$a_2 = a_1 + \Delta a_1$
Caudal avenida $Q A(t)$ .....	$Q A_0$	$Q A_1$	$Q A_2$
Caudal vertido $Q V(t)$ .....	$Q V_0$	$Q V_1$	$Q V_2$
Caudal desaguado por otros elementos $Q T(t)$ .....	$Q T_0$	$Q T_1$	$Q T_2$
Variación de nivel $\Delta h$ .....	$1/S_0 (Q_0 - Q V_0 - Q T_0)$	$1/S_1 (Q_1 - Q V_1 - Q T_1)$	$1/S_2 (Q_2 - Q V_2 - Q T_2)$
Cota final $h = h + \Delta h$ .....	$h_1 = h_0 + \Delta h_0$	$h_2 = h_1 + \Delta h_1$	$h_3 = h_2 + \Delta h_2$
Maniobra compuertas $\Delta a(1)$ ...	$\Delta a_0$	$\Delta a_1$	$\Delta a_2$

(1)  $\Delta a$  viene perfectamente definido en cada momento de acuerdo con la situación del embalse y el valor  $\Delta h$  experimentado en ese instante de la siguiente manera:

Caso a). *Embalse subiendo* ( $\Delta h > 0$ ).

Se consideran tres intervalos de niveles (definidos por los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$ ) entre el borde del aliviadero y el nivel máximo normal del embalse tal como se indica en la figura 4,

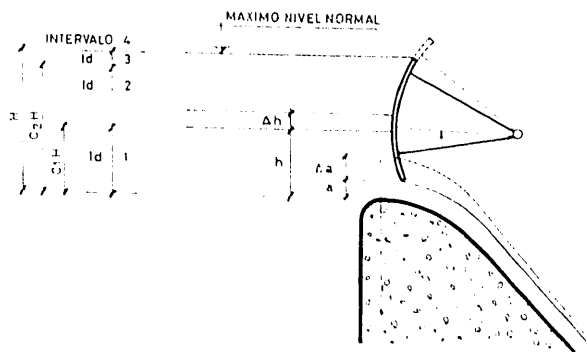


Fig. 4. — Definición de intervalos de nivel.

y para cada uno de ellos se definen dos coeficientes,  $t_i$  y  $P_i$ , con el siguiente significado:

Si el agua embalsada se encuentra dentro del intervalo  $i$  la lectura de niveles se hará de  $t_i$  en  $t_i$  horas ( $\Delta t = t_i$ ), y la maniobra de compuertas ( $\Delta a$ ) será tal que el incremento del caudal vertido como consecuencia de la misma sea un determinado porcentaje  $P_i$  del caudal almacenado (diferencia entre aportación y desembalse) en ese instante, o sea:

$$QV(t + t_i) - QV(t) = P_i \cdot \frac{S \cdot \Delta h}{t_i}$$

Se verifica  $P_1 + P_2 + P_3 = 1$ .

Si con esta maniobra se superara el caudal peligroso aguas abajo ( $QV(t + t_i) > QMAX$ ) no se aumentará la abertura de compuertas, sino que se mantendrá el caudal vertido por debajo de ese  $QMAX$ , a no ser que ya el agua embalsada alcance el intervalo  $i = 3$ , en cuyo caso la maniobra se realiza de acuerdo con la ecuación (2), no teniéndose en cuenta esta restricción.

Si la cota del agua embalsada superara el máximo nivel normal del embalse se toma  $P_i = 1$ .

Caso b). *Embalse bajando* ( $\Delta h < 0$ ).

En este caso se intenta estabilizar el embalse en la cota a la que se encuentre en el momento en que se produce el descenso de nivel.

Estas maniobras son perfectamente traducibles a nivel de vigilante de presa, y así en la figura 5 aparece una de las páginas del libro de instrucciones que dicho vigilante posee, correspondiendo a la situación del embalse subiendo.

NIVEL DEL EMBALSE ENTRE LAS COTAS 159 y 159,25	
LECTURAS DE LA ESCALA CADA 5 MINUTOS EMBALSE SUBIENDO	
SI EN 5 MINUTOS EL NIVEL DEL EMBALSE HA SUBIDO	SE AUMENTARÁ LA ABERTURA TOTAL DE LAS COMPUERTAS EN
1 cm	1.00 m
2 cm	2.00 m
3 cm	3.00 m
4 cm	4.00 m
5 cm	5.50 m

Fig. 5. — Instrucciones para vigilante.

El modelo permite tantear varios valores para los parámetros  $t$ ,  $c$  y  $p$ , determinándose para un hidrograma dado los valores más convenientes de los mismos.

En nuestro caso hemos adoptado como valores para dichos parámetros los que figuran en el siguiente cuadro:

Intervalo $i$	Coefficiente de definición del intervalo $C_i$	Período de maniobra de compuertas $t_i$ minutos	Coefficiente de desagüe $P_i$
1	0,5	30	0
2	0,9	15	0,30
3	1,0	10	0,60
4 (*)	—	5	1

(\*) Por encima de la cota máxima normal del embalse.

## Resultados.

Los resultados obtenidos reflejan para cada mes y para cada período o coeficiente de seguridad los caudales máximos aguas abajo de Minilla, en función de la situación inicial en ambos

embalses. En la figura 6 aparece en forma de gráfico los resultados correspondientes al mes de enero y a la avenida de los cincuenta años.

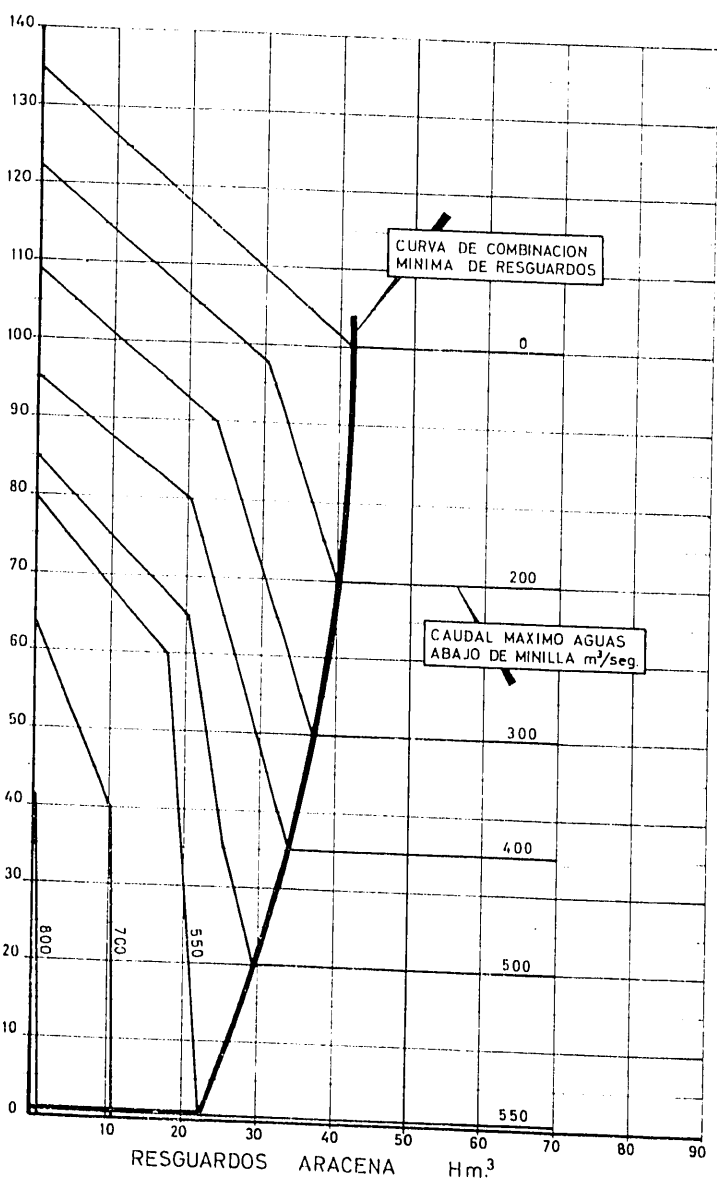
En el eje horizontal representamos los resguardos en Aracena, y los de Minilla, en el vertical. Cualquier situación inicial en el sistema de embalses viene representada por un punto cuyas coordenadas son los resguardos existentes en los mismos. Las líneas de trazo fino son isolíneas respecto al caudal máximo aguas abajo de Minilla. Cualquier punto situado en una de ellas ofrece la misma seguridad respecto a la laminación de avenidas, ya que produce la misma punta. Aparece definida claramente una

línea (trazo grueso) definida por aquellos puntos que para un caudal punta determinado tienen mínima la suma de sus coordenadas (resguardos).

La hemos llamado curva de combinación mínima de resguardos, ya que nos da para cada mes la combinación de suma mínima de volúmenes en ambos embalses necesaria para que el caudal aguas abajo del sistema sea con una determinada probabilidad (del 98 por 100 en este caso por corresponder a la avenida de cincuenta años) inferior a uno dado ( $Q M A X$ ). Así, adoptando  $Q M A X = 500 \text{ m}^3/\text{seg.}$  el resguardo en Aracena sería de  $30 \text{ Hm}^3$  y de  $20 \text{ Hm}^3$  en Minilla.

Concluyendo, diremos que el modelo permite saber la combinación mínima de resguardos para conseguir una determinada seguridad, o bien el riesgo que se tiene con una situación inicial determinada permitiendo al ingeniero encargado de la explotación del sistema coordinar los dos objetivos: satisfacción de demandas y seguridad ante las avenidas de una forma más adecuada. También en este caso particular hemos podido observar la importancia que para la laminación de avenidas supone el tener un resguardo en el embalse de aguas arriba (Aracena), ya que disminuye considerablemente la punta de la avenida resultante sobre el embalse de aguas abajo (Minilla). No obstante, a partir de un determinado valor ( $40\text{-}50 \text{ Hm}^3$  en este caso) el resguardo de Aracena empieza a perder efectividad, siendo necesario el contar con un resguardo en Minilla, que para los valores fijados para  $Q M A X$  ( $500 \text{ m}^3/\text{seg.}$ ) debe ser de  $20 \text{ Hm}^3$  como mínimo, llegando a valores superiores a la propia capacidad del embalse para las avenidas centenarias o milenarias dada la gran cuenca afluente ( $600 \text{ Km}^2$ ) y la escasa capacidad de laminación del embalse con una superficie media a nivel de aliviadero bastante pequeña (unos  $3 \text{ Km}^2$ ).

El modelo se ha puesto a punto en un ordenador IBM 1130 de 8 K, y es un punto de partida para la confección de un modelo más riguroso, que basándose en la futura existencia en la cuenca de este río de una red de pluviómetros automáticos con transmisión instantánea de datos permita un conocimiento de las ondas de avenida con la antelación suficiente para tomar las medidas oportunas.



6. — Curvas de resguardos. Mes: enero. Período: Cincuenta años.