

ESTUDIO DE REGULACION COORDINADA PARA ENERGIA, RIEGOS Y ABASTECIMIENTO A POBLACIONES DE UN SISTEMA DE EMBALSES (*)

Por JOSE RAMON TORAL
HIPOLITO FAJARDO
JOSE MIGUEL SAN MIGUEL

Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Este artículo es una comunicación presentada por los autores al Simposio internacional sobre "aprovechamiento de cuencas fluviales con fines múltiples", celebrado en Madrid en octubre de 1969. Creemos de interés difundirla en esta Revista por la novedad que puede representar para los ingenieros españoles el aprovechamiento hidráulico de los Andes. El trabajo reseñado forma parte de un estudio de desarrollo eléctrico de la rica y extensa región de Cuyo (314 000 Km.²), en el oeste de Argentina. Se trata de aprovechar los grandes recursos hidroeléctricos de sus ríos, teniendo en cuenta la regulación requerida por los importantísimos regadíos de la región y el abastecimiento de agua a las ciudades de Mendoza y San Juan. Se estudia la regulación para fines múltiples de ríos alimentados por fusión de nieves, llegando a la consecuencia de que hay concordancia para todos los fines en la regulación interanual y contradicción en la anual. Para resolver ésta se propone un sistema de embalses, especializándolos en sus funciones: regulación interanual y anual energética en los embalses de cabecera; regulación anual de riego en el embalse inferior. Como hipótesis fundamentales se adoptan la de uniformizar al máximo los caudales en la regulación hidroeléctrica y la de limitar el déficit anual de agua en la regulación de riego. Ha sido preciso analizar gran número de casos: cinco cuencas distintas con varios embalses cada una y diversos valores del volumen útil de embalses y de la capacidad de conducciones. Por ello se ha realizado el estudio mediante un modelo matemático que simula el funcionamiento del sistema de embalses. Los cálculos se han efectuado con los ordenadores electrónicos IBM 360/40 y Siemens 4004; como se repiten unos pocos procesos de optimización, se ha concebido la programación creando varias subrutinas fundamentales.

1. INTRODUCCION

Agua y Energía Eléctrica, empresa estatal argentina, encargó un estudio de desarrollo eléctrico de la región de Cuyo a Edes y Auxini, empresas del Instituto Nacional de Industria. El estudio de regulación que aquí reseñamos forma parte de dicho trabajo, que fue dirigido por D. Eugenio Vallarino, catedrático de Obras Hidráulicas de la Escuela de Ingenieros de Caminos.

La región de Cuyo integrada por las provincias de Mendoza, San Juan y San Luis, se ubica en el oeste de la República Argentina, junto a la vertiente oriental de los Andes. Es una de las zonas más ricas y prometedoras del país, debido a su floreciente agricultura, a su industria en desarrollo y al brillante porvenir que le brindan sus abundantes recursos energéticos y reservas minerales. Su demanda de energía eléctrica crece fuertemente y en los últimos años ha habido restricciones en el suministro. De ahí el interés de aprovechar los grandes recursos hidroeléctricos de sus ríos, que tienen un potencial neto de más de 13 000 GWh. y aún están muy poco explotados (200 MW. en servicio).

La región es muy árida (precipitación media de 180 mm. anuales) y basa su potente agricultura en los regadíos, que forman verdaderos oasis fluviales con una superficie total de unas 500 000 Ha. Pero las cosechas sufren grandes perjuicios en los años secos, ya que los ríos de Cuyo, salvo el Atuel, carecen de embalses; por ello es urgente dotarlos de regulación interanual.

Finalmente es preciso asegurar el abastecimiento de agua potable e industrial a

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de octubre de 1970.

varias poblaciones de la zona, principalmente a las ciudades de Mendoza (500 000 habitantes) y San Juan (125 000).

En la figura 1 puede verse un mapa general de la región de Cuyo, indicando especialmente su red hidrográfica.

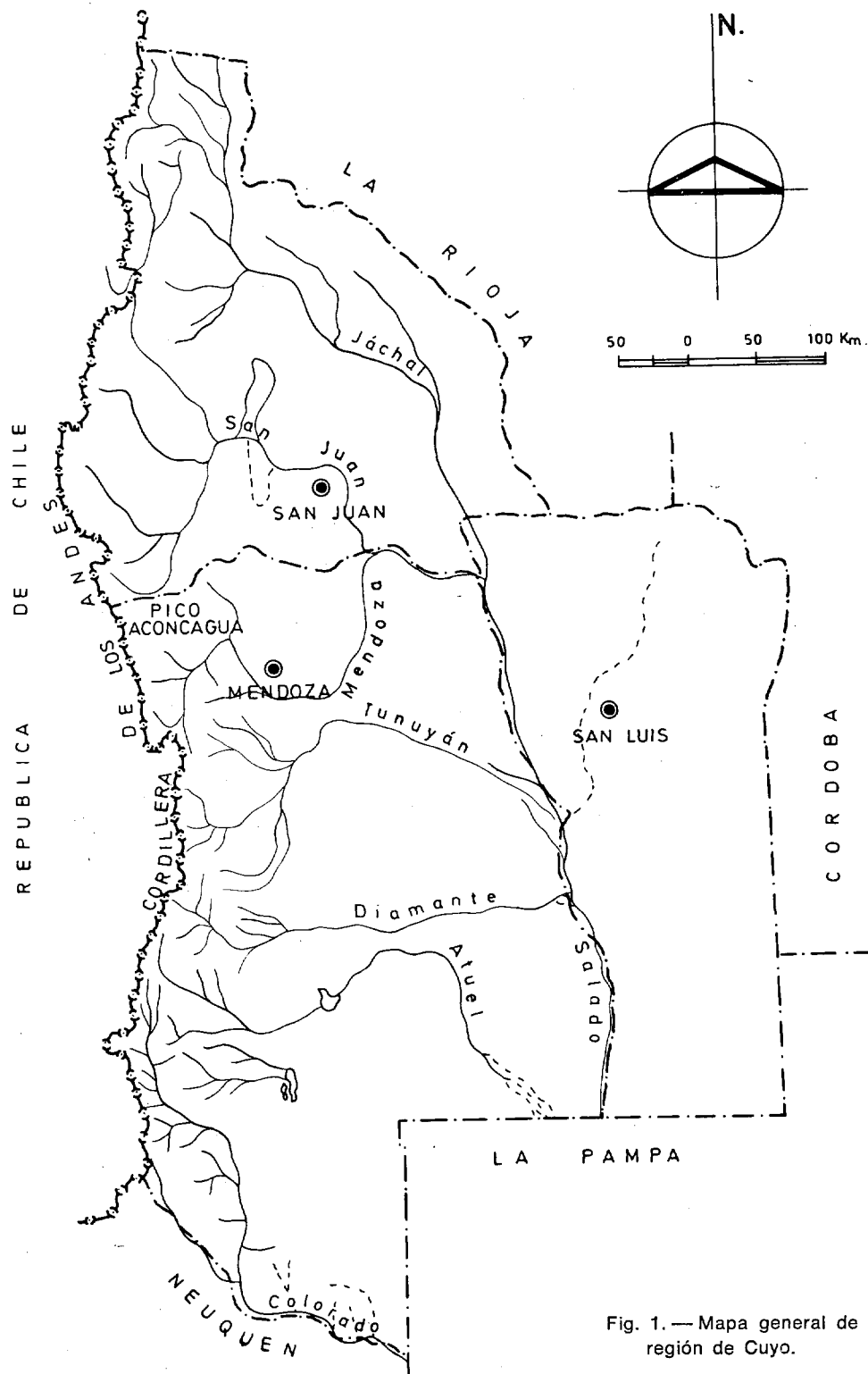


Fig. 1. — Mapa general de la región de Cuyo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE REGULACION

De un modo general, la regulación para fines múltiples de ríos con régimen nival, como los de Cuyo, tiene los siguientes condicionantes:

a) Las necesidades hidroeléctricas requieren la mayor uniformización posible del caudal natural, que tiene un mínimo en invierno y un máximo en el deshielo de verano (regulación anual). También interesa la regulación interanual, que permite reservar aportación de los años húmedos para los secos.

b) Las necesidades de los regadíos se centran, fundamentalmente, en la regulación interanual, para eliminar o atenuar el déficit de agua en años secos. En cambio, la regulación anual es relativamente secundaria, pues el diagrama de necesidades de agua de los cultivos coincide, en líneas generales, con el de los caudales naturales, ya que en ambos el máximo se presenta en verano; sólo se necesita una pequeña regulación anual para cubrir el posible retraso del comienzo del deshielo en relación con el del ciclo vegetativo.

c) Las necesidades del abastecimiento a poblaciones e industrias, sensiblemente constantes a lo largo del año, requieren uniformidad anual e interanual de los caudales suministrados.

Así, pues, las tres finalidades anunciadas concuerdan en que las favorece la regulación interanual. Pero hay contradicción en lo referente a sus exigencias de regulación anual, ya que los usos energéticos y de abastecimiento requieren uniformidad en los caudales medios diarios desaguados, en tanto que los regadíos tienen consumo casi nulo en invierno y máximo en verano.

Esta contradicción se puede salvar de modo lógico mediante un sistema de embalses, pues, en general, el aprovechamiento hidroeléctrico se limita a los tramos alto y medio de los ríos, montañosos y de fuerte pendiente, situándose los regadíos en el tramo bajo, llano y de escasa pendiente. Por ello se dividen las funciones de regulación entre los diversos embalses: los de cabecera realizan la regulación interanual para todos los usos y la anual energética; el embalse inferior, ubicado al final del tramo hidroeléctrico, remodula el desagüe anual de tipo uniforme de los de cabecera, adaptándolo a la demanda variable de los riegos.

3. HIPOTESIS FUNDAMENTALES

En el caso concreto de los ríos de Cuyo se ha considerado el esquema general de regulación de la figura 2. Consta de tres embalses: dos superiores de regulación hidroeléctrica y uno inferior para la regulación de riegos. El de cabecera admite dos posibles trasvases de afluentes del río principal; el intermedio se ha considerado por existir ya en algunos de los ríos estudiados un embalse en el tramo medio del río. También entra en el esquema un posible trasvase de otra cuenca distinta al embalse intermedio.

Hemos partido de las siguientes hipótesis básicas:

a) Regulación hidroeléctrica.

En la regulación anual e interanual se ha adoptado el criterio de uniformizar al máximo los caudales desaguados de los embalses; con ello aumentamos la energía y potencia garantizadas, fundamentales para una central hidráulica, tanto en el aspecto económico como el funcional.

Definimos el caudal permanente como el que tiene una duración del 95 por 100 de los meses al considerar la explotación en una serie de años suficientemente larga.

Aclaremos que al hablar de caudales aquí nos referimos a los medios diarios, pues la concentración en horas de punta no influye en la determinación de las aportaciones anuales turbinadas.

Dados un lugar de un río, una serie de años y un volumen útil de embalse, está determinado el caudal permanente que puede darse. El criterio básico supuesto para la regulación es que, si la conducción tiene una capacidad superior al caudal

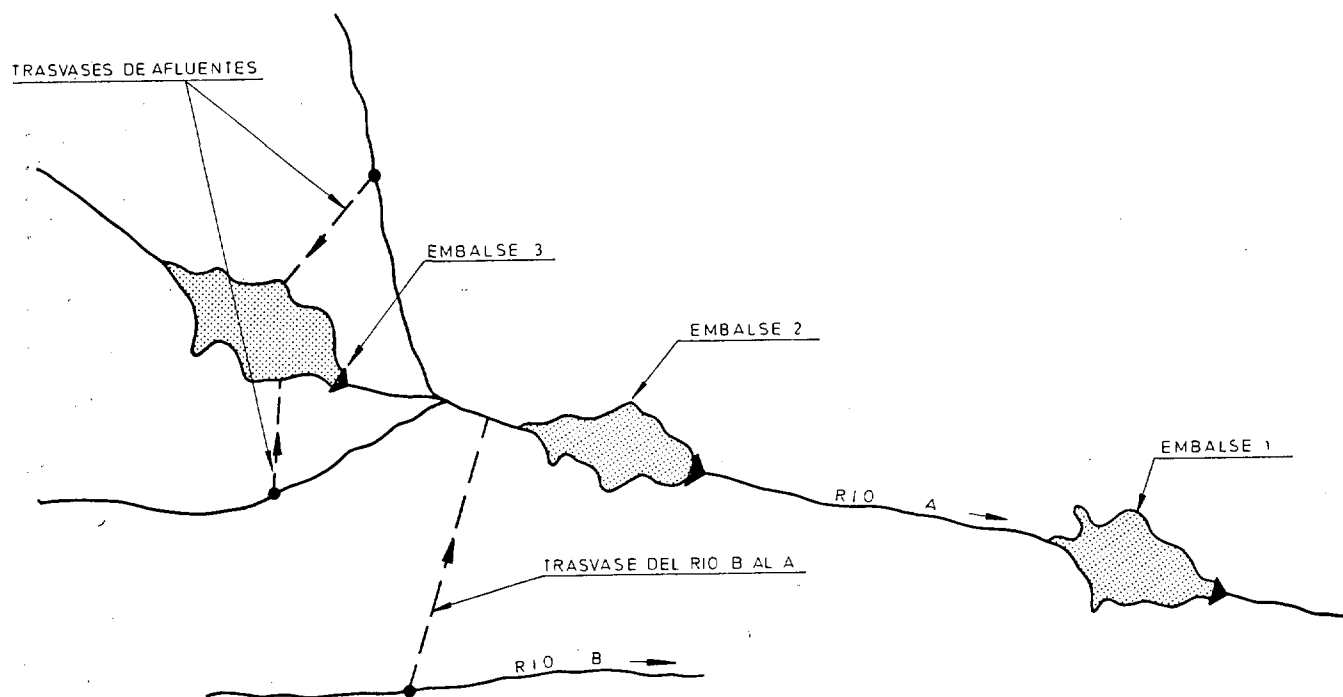


Fig. 2. — Esquema general de regulación.

permanente, la explotación del embalse debe hacerse de modo que los caudales desembalsados no bajen nunca de los que se obtendrían operando con un caudal máximo igual al permanente; así, pues, la conducción se llena solamente en los años en los que habría caudales vertidos por el aliviadero al explotar con el caudal permanente.

b) Regulación para riego.

La demanda para riegos ha de suministrarse con la distribución mensual requerida por los cultivos. Dentro de la demanda total para riegos distinguidos la permanente, es decir, aquella que da lugar a superficie de riego permanente (cultivos con plantas de vida larga). La diferencia entre la demanda total y la permanente será la demanda eventual, que servirá la superficie de riego eventual (cultivos anuales).

La demanda permanente se ha establecido con el criterio de limitar el déficit anual en el suministro de agua requerido por el desarrollo normal de los cultivos, considerando una serie de años suficientemente larga. Conviene que tal limitación sea doble; una en el déficit anual máximo, para evitar la muerte de las plantas por marchitamiento, y otra en la media del déficit anual, para reducir a un mínimo razo-

nable los perjuicios en las cosechas. Creemos que tal criterio es lógico, pues permite individualizar en los estudios económicos la parte de beneficios por cosechas que tiene una elevada probabilidad y eso de modo uniforme para las diferentes alternativas.

Definimos la demanda permanente de riegos como aquella que cumple simultáneamente las dos condiciones siguientes:

- El valor medio del déficit anual no supera el 3 por 100 de dicha demanda.
- En ningún año el déficit es superior a la mitad de la demanda permanente.

Suponiendo un lugar del río, una serie de años y un volumen útil de embalse está completamente determinada la demanda permanente de riegos que puede satisfacerse. El criterio fundamental supuesto para la regulación es que, si se desea atender una demanda de riego superior a la permanente, la explotación del embalse debe hacerse de modo que los volúmenes entregados a los riegos no sean inferiores en ningún año a las que se obtendrían si sólo se deseara atender la demanda permanente; de esta forma, los canales de riego se llenarán solamente en los meses de consumo máximo de años en los que habría caudales vertidos por el aliviadero con la explotación de demanda permanente.

La regulación de riegos está ligada a la hidroeléctrica, pues el embalse inferior no recibe los caudales naturales, sino los modificados por los embalses superiores.

Por otra parte, la regulación de riegos ha de respetar el suministro del caudal requerido por el abastecimiento a poblaciones, que se ha supuesto constante a lo largo del año.

4. METODO UTILIZADO

En el estudio se ha partido de los datos siguientes:

- Funciones de distribución de la probabilidad de la aportación anual en las ubicaciones de las presas de embalse y las derivaciones de los trasvases. Se han obtenido a partir de las series históricas de caudales en diversas estaciones de aforo mediante un estudio hidrológico previo.
- Tablas de distribución mensual de la aportación anual. En el caso de los ríos de Cuyo, el estudio hidrológico ha demostrado que, dentro de una aproximación suficiente, se puede admitir que tal distribución depende sólo del índice hidráulico del año (relación entre su aportación y la media).
- Distribución anual de las necesidades de agua para riegos, obtenida a partir de datos facilitados por Agua y Energía. El consumo de cada mes se expresa en porcentaje del consumo anual, variando entre un 0,3 por 100 para junio y un 17,1 por 100 para enero.
- Caudal constante requerido por el abastecimiento a poblaciones e industrias (caso de los ríos Mendoza y San Juan).
- Volumen útil de los embalses. Se han considerado diferentes valores para estudiar la influencia de su variación en la aportación aprovechable para energía o riegos.
- Caudal máximo de las conducciones hidroeléctricas. También se han considerado diversos valores.
- Caudal máximo de las conducciones de trasvase, que se ha tomado igual al módulo del río que se trasvasa.

Ha sido preciso estudiar un gran número de casos: cinco cuencas distintas (San Juan, Mendoza, Tunuyán, Diamante y Atuel), con dos o tres embalses cada una y diversos valores del volumen de los embalses y la capacidad de conducciones. Además se han considerado series artificiales de mil años, generadas por sorteo (método de Montecarlo) a partir de las funciones de distribución de las aportaciones anuales.

Por ello se ha realizado el estudio mediante un modelo matemático que simula el funcionamiento del sistema de embalses. Los numerosos casos particulares se han calculado mediante ordenador electrónico, de la forma que explicamos en el apartado 5.

El modelo matemático se desarrolla en dos etapas:

a) Funcionamiento de los embalses de cabecera.

Partiendo de un volumen inicial cualquiera y con un determinado caudal de extracción, se puede seguir la evolución de la explotación de un embalse, de capacidad máxima dada E_u , cuando se entrega el citado caudal siempre que el conjunto de circunstancias de aportaciones fluyentes del río y volumen de embalse disponible lo permitan. Considerando una serie de años suficientemente larga, queda eliminada la influencia del volumen de embalse inicial y se puede admitir que el porcentaje de meses en que ha podido darse el caudal deseado es independiente de la serie con que se ha trabajado. Efectuando varios tanteos con diversos valores del caudal, puede determinarse aquel para el que la permanencia sea del 95 por 100 de los meses. Queda así fijado el caudal permanente Q_p , y puede además obtenerse el volumen anual medio V_p , que se obtiene con este sistema de explotación y que hemos llamado aportación útil permanente.

Consideramos ahora la posibilidad de dar caudales Q_c mayores que Q_p , siempre con la condición de no disminuir la permanencia del 95 por 100 de los meses para Q_p . Es necesario efectuar un estudio particular de cada año y dar Q_c únicamente cuando no influya sobre el desagüe de Q_p ; esto se puede hacer en el caso de los ríos de Cuyo, ya que Agua y Energía Eléctrica tiene un servicio de predicción de caudales basado en medidas sistemáticas de la cantidad de nieve depositada en la cabecera de los ríos. De esta forma se obtiene una serie de aportaciones útiles anuales V_c , que una vez clasificados permiten dibujar su función de distribución y calcular el valor medio y los de diferentes garantías (probabilidades de igualar o superar un valor dado).

b) Funcionamiento del embalse de riegos.

Se procede de modo análogo a la etapa anterior, pero teniendo en cuenta la modificación que introducen los embalses superiores en el régimen natural del río y la condición de descontar de las erogaciones de riegos el caudal requerido por el abastecimiento a poblaciones.

Para diversas hipótesis de volúmenes de embalses se determina por tanteos la demanda permanente de riegos, buscando el mayor valor que cumplen las dos condiciones mencionadas en el apartado 3.

5. CALCULO CON ORDENADOR ELECTRONICO

Se han empleado dos modelos de potencia y capacidad semejantes, un IBM 360/40 y un Siemens 4004, dotados de diversos periféricos, entre los que necesariamente se han contado una unidad de discos, una lectora de tarjetas, una impresora, tres cintas magnéticas de trabajo y otra cinta para soportar las subrutinas.

El lenguaje utilizado ha sido el Fortran IV básico; es conveniente subrayar que la característica científica del trabajo ha sido determinante en esta elección de lenguaje, aunque el estudio ha exigido un empleo masivo de sentencias 1/0 al registrarse los resultados parciales en cintas magnéticas; el carácter totalmente secuencial del proceso ha permitido minimizar este tiempo de 1/0 sin necesidad de recurrir a memorias auxiliares con sistemas de acceso más veloces.

Desde el punto de vista de la programación, la más destacada característica de este estudio es la diversidad de esquemas, pues su representación común (figura 2) es útil sólo para la lógica de concepción humana, pero no para la lógica de programación. La razón es obvia si se considera la segunda característica fundamental del estudio: la repetición de ciertos procedimientos en cada embalse siempre actuando sobre una serie de aportaciones anuales para fijar, a partir de unos parámetros muy simples, unos resultados que son, o bien un óptimo de caudal permanente, o bien, conocido éste, un óptimo de funcionamiento que se traduce en una serie de salida del embalse.

Con este planteamiento la programación se ha concebido creando unas subrutinas que responden a estos procedimientos de optimización, las cuales son llamadas desde el programa principal, uno para cada esquema real de embalses, con una fase inicial común a todos ellos, en la que se leen todos los datos de la región aunque sólo se necesiten algunos de ellos en cada caso.

Las subrutinas utilizadas son cuatro:

- RANDU, de la biblioteca de programas IBM, que da una serie de números aleatorios, comprobados posteriormente con la décima X^2 de Pearson, necesarios para la generación por el método de Montecarlo de las series artificiales de mil años hidrológicos.
- CAUPER, que da el caudal permanente con fines hidroeléctricos. Parte de la serie de aportaciones de mil años y ensaya con un caudal constante; cuando se alcanza un período deficitario total de seiscientos meses, o sea, el 5 por 100, ya sean meses con déficit total o parcial, se supone excesiva la hipótesis y se reduce tal caudal; cuando se sobrepasan los mil años sin alcanzar este déficit, se supone subestimado el valor del caudal permanente y se aumenta; este método iterativo conduce, al cabo de unos ocho ensayos, a un valor aproximado en una centésima que se da como definitivo.
- CAUMES, que da los caudales mensuales de salida del embalse considerando, respetando el caudal permanente anteriormente obtenido, pero aumentando los volúmenes turbinados para absorber los vertidos con la limitación del máximo caudal turbinable y el criterio adicional de obtener la máxima cota de embalse compatible con el mayor aumento de la aportación útil.
- RIEPER, que da la demanda permanente de riegos con el doble criterio de déficit enunciado en el apartado 3.

La ejecución ha sido muy simple, porque el cálculo tenía los mismos datos, a excepción de tres o cuatro tarjetas, las cintas eran sólo elementos auxiliares y los resultados, muy pocos, se obtenían identificados ampliamente por la enumeración de los parámetros utilizados.

El cálculo completo ha supuesto unas cien horas de tiempo efectivo de proceso.

En la figura 3 se incluye el organigrama del cálculo con ordenador.

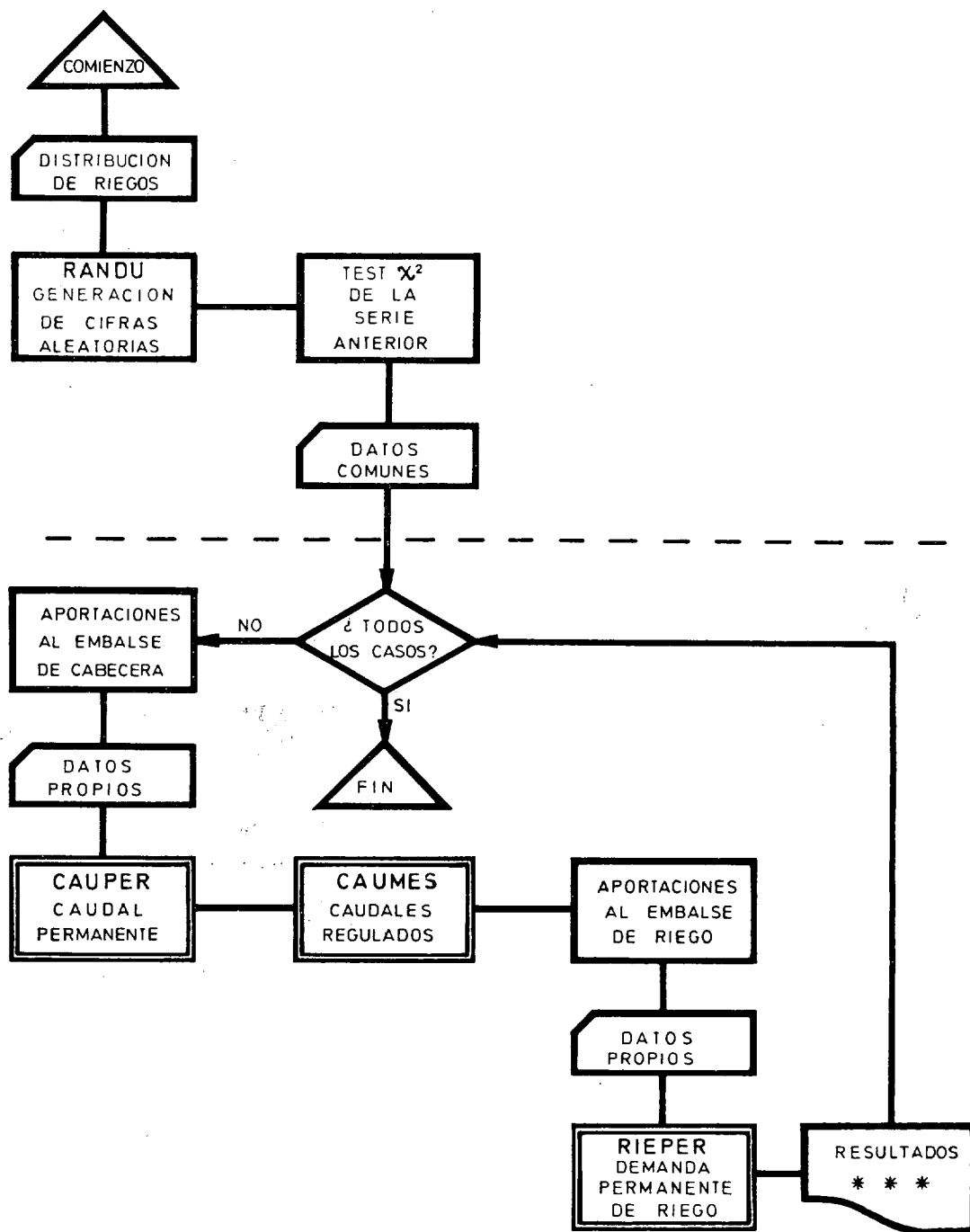


Fig. 3. — Organigrama de cálculo para ordenador electrónico.

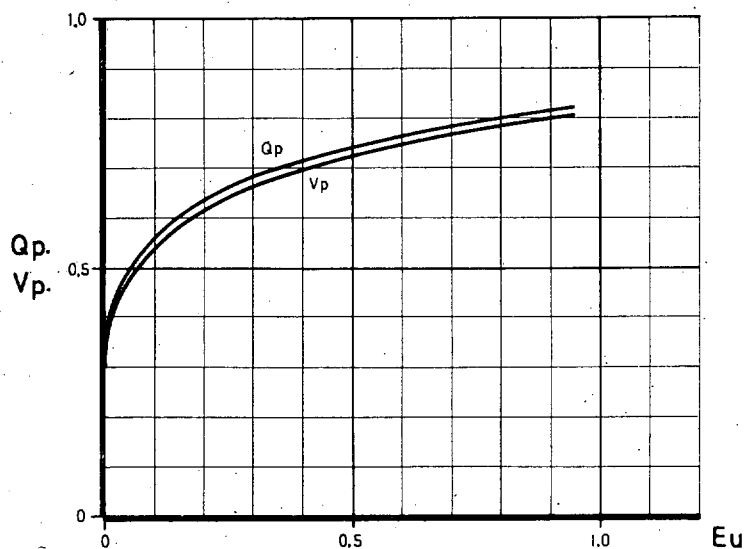
6. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE REGULACION

En el embalse de cabecera los cálculos se han hecho para volumen útil de embalse (E_u), variando entre 0 y 0,8 veces la aportación anual media (con intervalos de 0,2) y caudal de conducción (Q_c), oscilando entre el permanente y 1,25 veces el módulo (intervalos de 0,25). En todos los casos se han obtenido el caudal

permanente (Q_p), la aportación útil permanente (V_p) y las aportaciones turbinables anuales (V_c) correspondientes al valor medio y a las garantías del 10, 25, 50, 75, 90 y 95 por 100. Los resultados se presentan en forma de gráficos adimensionales, expresando las magnitudes de volumen (E_u , V_p y V_c) con la unidad aportación media anual del río en la ubicación del embalse y las de caudal (Q_c y Q_p) con la unidad módulo del río. La ventaja de esta representación adimensional es que los resultados pueden aplicarse a las diferentes ubicaciones de embalse factibles en el tramo superior del río considerado. A título de ejemplo incluimos los gráficos de la figura 4, que se refieren a la cabecera del río San Juan.

REGULACION EN CABECERA DEL RIO SAN JUAN

a) CAUDALES Y APORTACIONES PERMANENTES



b) APORTACIONES TURBINABLES Y SUS GARANTIAS

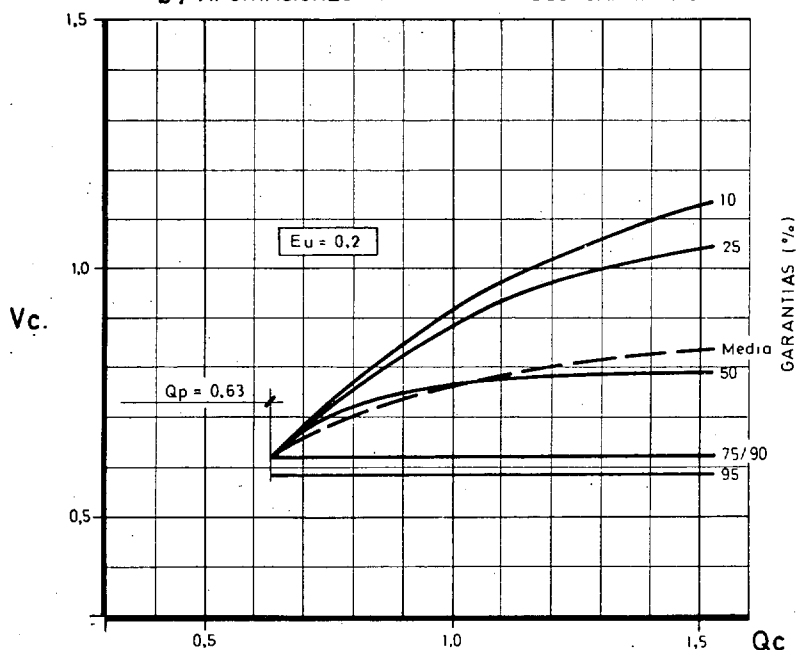


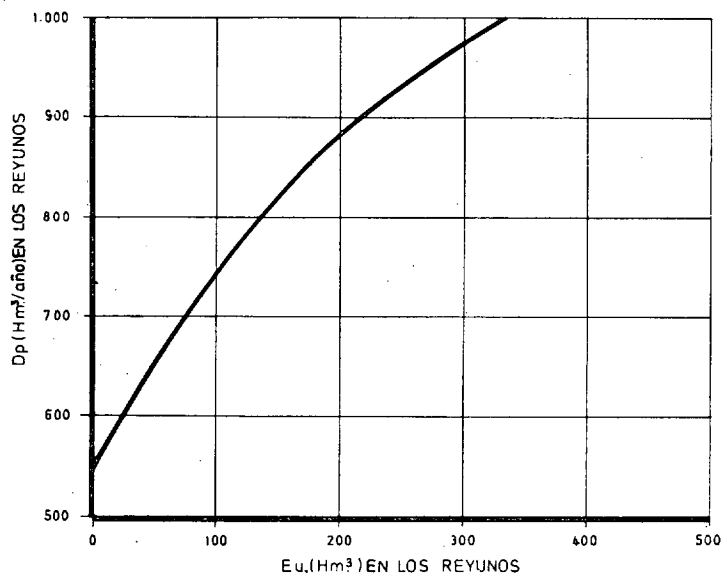
Figura 4.

En lo referente a riegos, se ha calculado la demanda permanente que puede satisfacerse con diferentes valores combinados de los volúmenes útiles del embalse de cabecera y el de riegos. Como ejemplo damos los gráficos de la figura 5, que corresponden al río Diamante con cuatro embalses: La Carpa y El Desfiladero en cabecera, que actúan como uno solo por no existir cuenca intermedia entre ellos; Agua del Toro en el tramo medio, con volumen fijo por estar en construcción su presa, y Los Reyunos, al final del tramo hidroeléctrico.

DIAMANTE
DEMANDA PERMANENTE
DE RIEGO

a)

COMPOSICION	Eu.Hm ³	Qc.m ³ /s
1 LOS REYUNOS	VARIABLE	—
2 AGUA DEL TORO	314	35,5
3 LA CARPA Y EL DESFILADERO	200	31,0



b)

COMPOSICION	Eu.Hm ³	Qc.m ³ /s
1 LOS REYUNOS	195	—
2 AGUA DEL TORO	314	35,5
3 LA CARPA Y EL DESFILADERO	VARIABLE	31,0

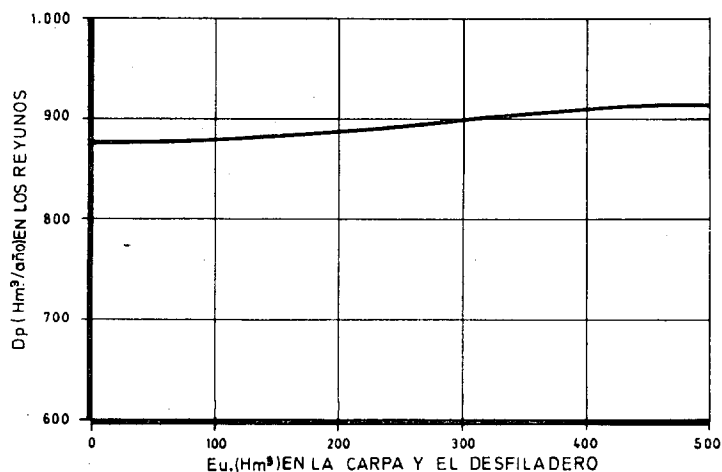


Figura 5.