

LOS MODELOS DE SIMULACION INTEGRAL DE CUENCA Y SU UTILIZACION EN ESTUDIOS DE RECURSOS HIDRICOS

TEODORO ESTRELA MONREAL (*)

RESUMEN. Los modelos de simulación integral de la cuenca son una de las herramientas más útiles de que dispone el hidrólogo para llevar a cabo un estudio de recursos hídricos. La finalidad de estos modelos es la estimación de series de aportaciones a partir de datos meteorológicos, fundamentalmente precipitaciones y evapotranspiraciones potenciales y para ello reproducen aquellos procesos esenciales que tienen lugar en las diferentes fases del «ciclo hidrológico». En este artículo se describe uno de estos modelos y su utilización en un Estudio de recursos hídricos en la vertiente peruana del Titicaca. Este trabajo fue realizado en 1988 por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y forma parte de un Convenio de Cooperación Internacional entre España y Perú.

ABSTRACT. *Basin models are one of the most useful tools which a hydrologist has to carry out water resources studies. The purpose of these models is the estimation of flows from meteorological data, mainly precipitation and potential evapotranspiration. They reproduce those processes which are part of The Hydrological Cycle. In this article one of these models is described and its use in a water resources study in the peruvian watersheds of Titicaca Lake. This work has been developed in 1988 by the Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX as part of a international cooperative agreement between Spain and Perú.*

1. INTRODUCCION

El proceso de transformación precipitación-aportación ha sido frecuentemente objeto de modelización. Dentro del campo de los modelos determinísticos existen dos formas de enfoque, mediante los modelos de simulación integral o continua de la cuenca, o bien con los de sucesos hidrológicos. Los primeros simulan el ciclo hidrológico completo de forma continuada en el tiempo y se utilizan preferentemente en estudios de recursos hídricos. Los segundos estudian sucesos discretos para los cuales es suficiente con simular de forma parcial los procesos que constituyen el ciclo hidrológico. Un ejemplo de utilización sería el estudio de una crecida.

Los modelos de simulación integral establecen balances de agua entre los distintos procesos que tienen lugar desde el momento que se produce la precipitación hasta que el agua escurre por el río. Son modelos conceptuales ya que las ecuaciones que plantean tienen sentido físico, no lineales, dado que consideran el movimiento del agua en el suelo (fenómeno altamente no lineal) y generalmente son agregados, pues no contemplan la distribución espacial de variables y parámetros, al trabajar únicamente con valores medios de los mismos.

Las principales aplicaciones de este tipo de modelos pueden resumirse en las tres siguientes:

1. La predicción de aportaciones a partir de una predicción de precipitaciones.
2. El completado o la extensión de series históricas de aportaciones a partir de otras más largas de registros pluviométricos. Para ello deben calibrarse previamente los parámetros del modelo con datos comunes.
3. La simulación de series de aportaciones cuando se carece en absoluto de datos foronómicos. En este caso se estiman los parámetros del modelo en función de las características de la cuenca o a partir de un estudio previo de regionalización de los mismos.

El número de parámetros que utilizan estos modelos está estrechamente relacionado con el número de procesos considerados, que a su vez va a ser función generalmente de la escala temporal de trabajo adoptada. En el campo de su aplicación práctica se observan dos tendencias, utilizar pocos parámetros (entre 4 y 6) como los modelos de THORNTHWAITE (1955), PALMER (1965), TEMEZ (1977), o situarse en el extremo contrario donde se requiere una gran cantidad de ellos (entre 15 y 20), como el conocido modelo Stanford IV (CRAWFORD, 1966).

En el presente artículo se describe un modelo de este tipo (Modelo Témez) y su aplicación en un estudio de recursos hídricos en la vertiente peruana del Titicaca,

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. División de Hidrología. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (MOPU).

trabajo desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (1988), dentro de un convenio de cooperación con el Instituto Nacional para la Ampliación de la Frontera Agrícola del Perú.

2. EL MODELO DE PRECIPITACION-APORTACION DE J. R. TEMEZ

Este conocido modelo reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico (fig. 1). El proceso está presidido por el principio de continuidad o conservación de la masa y regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance.

Considera el terreno dividido en dos zonas:

- La superior no saturada, o de humedad del suelo, en cuyos poros coexisten el agua y el aire.
- La inferior o acuífero, que está saturada de agua y funciona como un embalse subterráneo con desagüe a la red superficial de drenaje.

Según se representa en la figura 1 una parte T del agua precipitada P , acaba siendo drenada y sale por el río, mientras el resto, después de almacenarse en la zona de humedad del suelo, alimenta la evapotranspiración en fechas posteriores.

El excedente T se descompone en una parte que discurre en superficie (E) y otra que infiltra hasta el acuífero (I). La primera evacua por el cauce dentro del período de tiempo presente mientras que el agua infiltrada se incorpora al acuífero, desaguando parte en el presente intervalo y permaneciendo el resto en el embalse subterráneo para salir en fechas posteriores.

FORMULACION TEORICA

Cálculo del excedente

La Ley de excedentes se plantea según la figura 2a, adoptando al excedente la siguiente expresión:

$$T_i = 0 \quad \text{si} \quad P_i \leq P_o$$

$$T_i = \frac{(P_i - P_o)^2}{P_i + \delta - 2P_o} \quad \text{si} \quad P_i > P_o$$

siendo:

$$\delta = H_{\max} - H_{i-1} + EP_i$$

$$P_o = C \times (H_{\max} - H_{i-1})$$

donde:

- P_i Precipitación en el período comprendido desde el instante $i-1$ al instante i (mm)
- T_i Excedente en el período comprendido desde el instante $i-1$ al instante i (mm)
- $H_{\max}$ Capacidad máxima de humedad en el suelo (mm)
- H_{i-1} Humedad en el suelo en el instante $i-1$ (mm)
- EP_i Evapotranspiración potencial desde el instante $i-1$ al instante i (mm)
- C Es un parámetro del modelo

Esta Ley es asintótica a la que propuso Thornthwaite para valores altos de precipitaciones, pero es mucho más realista en la parte baja de la misma.

En el método Thornthwaite, cuya descripción se ha omitido por figurar en todos los tratados clásicos de

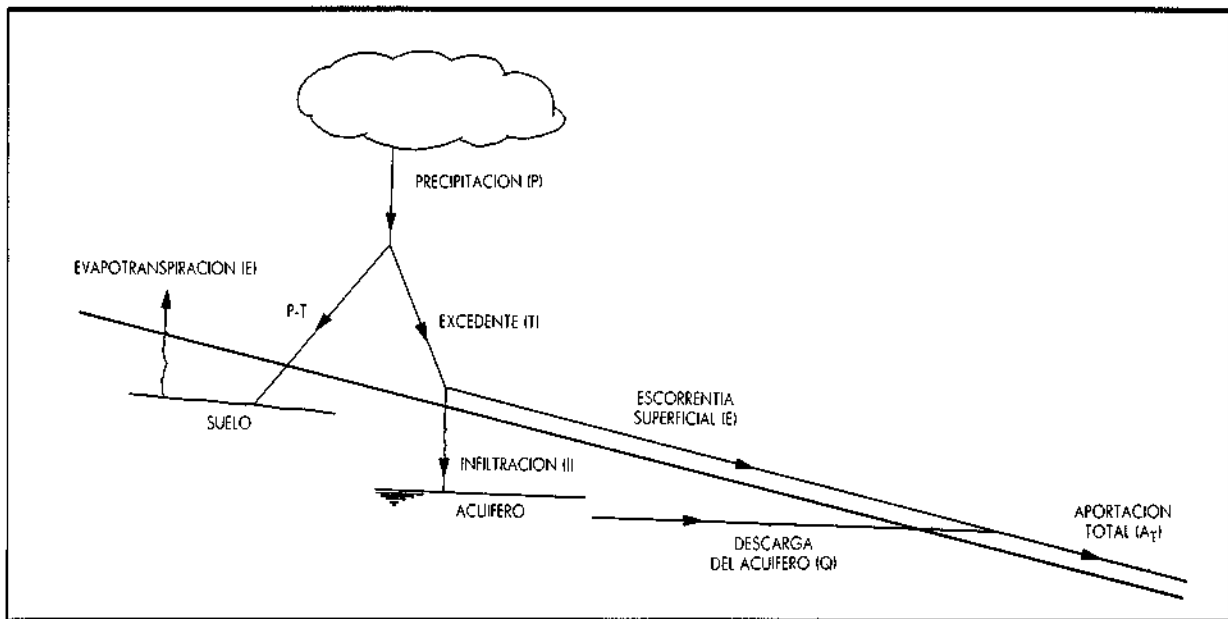


FIGURA 1. Representación simplificada del ciclo hidrológico.

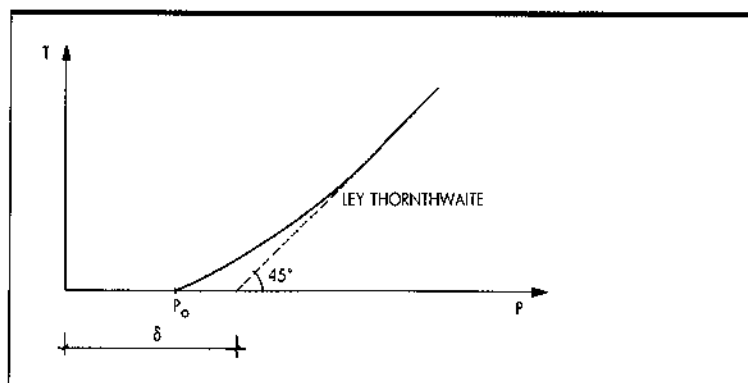


FIGURA 2a. Ley de excedentes.

hidrología, la ley del excedente se simplifica excesivamente, con serio detrimento de los resultados, y se reduce a $T=0$ para $P \leq \delta$ y $T = P - \delta$, para $P > \delta$, lo que equivale a sustituir la curva de la figura 2a por su asíntota.

Humedad en el suelo y evapotranspiración

Una vez estimado el excedente, la humedad en el suelo al final del período resultará:

$$H_i = \max(0, H_{i-1} + P_i - T_i - EP_i)$$

habiéndose producido una evapotranspiración real igual a:

$$E_i = \min(H_{i-1} + P_i - T_i, EP_i)$$

Esta última expresión indica que se puede evapotranspirar toda el agua disponible con el límite superior de la evapotranspiración potencial.

Infiltración

El modelo adopta una ley de infiltración al acuífero (I) función del excedente (T) y del parámetro de infiltración máxima ($I_{\max}$).

La forma de la Ley viene reflejada en la figura 2b y tiene por expresión matemática:

$$I_i = I_{\max} \frac{T_i}{T_i + I_{\max}}$$

La infiltración aumenta con el excedente, siendo

asintótica para valores altos del mismo al valor límite $I_{\max}$.

Esta infiltración I se admite que se convierte en recarga al acuífero (R), en tanto que el resto del excedente ($T - I$) será drenado por el cauce. Para ello se ha supuesto que el tiempo de paso por la zona no saturada es inferior al intervalo de tiempo de simulación.

Aportación subterránea

Las hipótesis que se realizan sobre el funcionamiento del acuífero son las siguientes:

— Ley de descarga del acuífero exponencial

$$Q_i = Q_{i-1} e^{-\alpha t}$$

donde:

Q_i Caudal de descarga en el instante i ($\text{hm}^3/\text{período}$)

α Coeficiente de la rama de descarga del acuífero (días^{-1})

t Intervalo de tiempo entre los instantes $i-1$ e i (días)

La relación entre el caudal de descarga y el volumen almacenado en el acuífero es igual a:

$$Q_i = \alpha D V_i$$

donde:

D Período de tiempo de simulación (días/período)

V_i Volumen del acuífero en el instante i (hm^3)

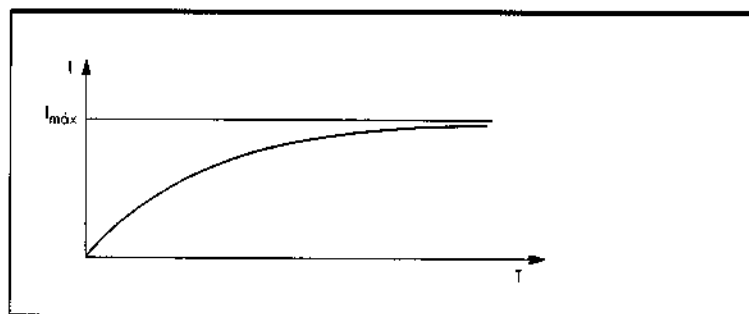


FIGURA 2b. Ley de infiltración.

— La recarga por infiltración se supone concentrada en la mitad del período (figura 2c) con lo cual la ley de los caudales subterráneos resulta:

$$Q_i = Q_{i-1} e^{-\alpha D} + \alpha R_i D e^{-\alpha D/2}$$

siendo:

R_i Recarga al acuífero en el período $i-1$, i ($\text{hm}^3/\text{período}$). Coincide con la infiltración I_i .

La aportación subterránea a lo largo del período, A_{SUBi} , resulta:

$$A_{SUBi} = V_{i-1} - V_i + R_i = Q_{i-1} (1 - e^{-\alpha D}) / (\alpha D) + R_i (1 - e^{-\alpha D/2})$$

Aportación total

Esta aportación será la suma de la escorrentía superficial (excedente menos infiltración) y la aportación subterránea

$$A_i = T_i - I_i + A_{SUBi}$$

Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo son cuatro:

$H_{\text{máx}}$ Capacidad máxima de humedad del suelo
 C Parámetro de excedente
 $I_{\text{máx}}$ Capacidad máxima de infiltración
 α Coeficiente de la rama de descarga

VARIANTES INTRODUCIDAS EN EL MODELO

Como consecuencia de la aplicación del modelo en las cuencas del Titicaca se introdujo una variante en el mismo, que respondía a un intento de reproducir de forma más real el proceso precipitación-aportación en cuencas donde los acuíferos presentan más de una ley de descarga. Este hecho afecta únicamente al cálculo de la aportación subterránea.

Aportación subterránea

Las hipótesis que se realizan sobre el funcionamiento del acuífero son las siguientes:

— Se han supuesto dos leyes de descarga exponenciales (ESTRELA, T., y SAHUQUILLO, A. 1985):

$$Q_i^1 = Q_{i-1}^1 e^{-\alpha_1 t}$$

$$Q_i^2 = Q_{i-1}^2 e^{-\alpha_2 t}$$

donde:

Q_i^1 ; Q_i^2 Caudales de descarga en las celdas virtuales 1 y 2 (correspondientes a ambas ramas de descarga) en el instante i ($\text{hm}^3/\text{período}$)

α_1 ; α_2 Coeficientes de las ramas de descarga del acuífero (días^{-1})

t Intervalo de tiempo entre los instantes $i-1$ e i (días)

siendo la relación entre caudales de descarga y volúmenes almacenados en cada una de las celdas virtuales consideradas igual a:

$$Q_i^1 = \alpha_1 D V_i^1$$

$$Q_i^2 = \alpha_2 D V_i^2$$

donde:

D Período de tiempo de simulación expresado en días.

V_i^1 ; V_i^2 Volúmenes en las celdas virtuales 1 y 2 en el instante i (hm^3).

— La recarga por infiltración se supone concentrada en la mitad del período, con lo cual las leyes de caudales subterráneos resultan:

$$Q_i^1 = Q_{i-1}^1 e^{-\alpha_1 D} + \alpha_1 b_1 R_i D e^{-\alpha_1 D/2}$$

$$Q_i^2 = Q_{i-1}^2 e^{-\alpha_2 D} + \alpha_2 b_2 R_i D e^{-\alpha_2 D/2}$$

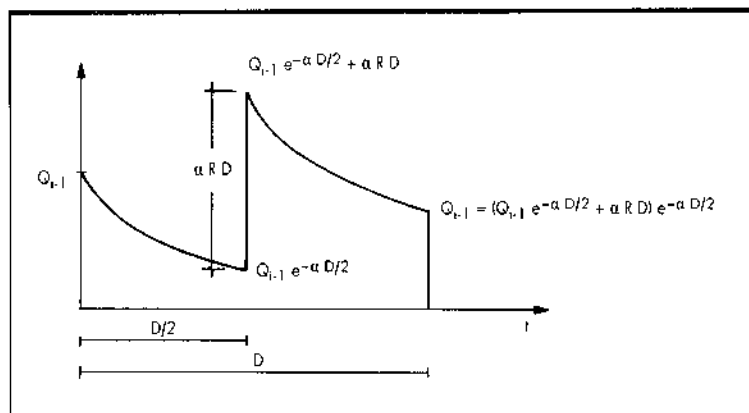


FIGURA 2c. Ley de descarga del acuífero.

siendo:

R_i Recarga al acuífero en el período $i-1$, i (hm³/período). Coincide con la infiltración I_i .

b_1, b_2 Coeficientes de reparto de la recarga entre cada una de las celdas virtuales.

Los coeficientes de reparto deben de satisfacer:

$$b_1 + b_2 = 1$$

El caudal de descarga total se obtiene sumando los caudales de descarga de cada una de las celdas virtuales consideradas, con lo que:

$$Q_i = Q_i^1 + Q_i^2$$

La aportación subterránea a lo largo del período, A_{SUBi} , resulta:

$$A_{SUBi} = A_{SUBi}^1 + A_{SUBi}^2$$

donde:

$$A_{SUBi}^1 = V_{i-1}^1 - V_i^1 + b_1 R_i = Q_{i-1}^1 (1 - e^{-\alpha_1 D}) / (\alpha_1 D) + b_1 R_i (1 - e^{-\alpha_1 D/2})$$

$$A_{SUBi}^2 = V_{i-1}^2 - V_i^2 + (1 - b_1) R_i = Q_{i-1}^2 (1 - e^{-\alpha_2 D}) / (\alpha_2 D) + (1 - b_1) R_i (1 - e^{-\alpha_2 D/2})$$

Aportación total

Esta aportación será la suma de la escorrentía superficial (excedente menos infiltración) y la aportación subterránea

$$A_i = T_i - I_i + A_{SUBi}$$

Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo son seis:

- $H_{\max}$ Capacidad máxima de humedad del suelo.
- C Parámetro de excedente.
- $I_{\max}$ Capacidad máxima de infiltración.
- α_1 Coeficiente de la primera rama de descarga.
- α_2 Coeficiente de la segunda rama de descarga.
- b_1 Coeficiente de reparto de la recarga. Fracción de la recarga que va a la celda virtual correspondiente a la primera rama de descarga.

Consideraciones sobre esta variante

El hecho de considerar dos ramas de descarga permite reproducir mejor la componente subterránea de la aportación; por contra se produce un aumento en el número de parámetros del modelo, lo que obliga a que su utilización venga justificada por una mejora sensible en los resultados.

Como regla general se observa que al reducir la es-

cala temporal de simulación se detectan más ramas de descarga. En estudios a escala mensual no es usual identificar más de dos ramas y en la mayoría de los casos es detectada solamente una.

Es conveniente tener presente que un aumento del número de parámetros conlleva una mayor dificultad para controlar los procesos de transferencia de agua, así como un incremento importante en el tiempo dedicado a la fase de calibración del modelo. En algunos casos este hecho propicia la utilización de técnicas de estimación automática de los parámetros.

3. EVALUACION DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN LAS CUENCAS DE LA VERTIENTE PERUANA DEL TITICACA

CARACTERISTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en la región suroriental del país y está constituida por una alta cuenca interandina cuyas aguas drenan al lago Titicaca, del cual toma su nombre (fig. 3).

La superficie de las cuencas estudiadas es del orden de 36.000 km², que se reparte de la forma siguiente:

Cuenca	Superficie (km ²)
HUANCANE	3.500
RAMIS	15.600
COATA	4.700
ILLPA	1.300
ILAVE	7.600
MAURE	1.600
ZAPATILLA	500
CALLACCAME	1.100
TOTAL	36.000

Principales rasgos del clima

La lluvia media anual sobre las cuencas del Titicaca es del orden de 700 mm. Su reparto es desigual, oscilando desde los 400 mm en la cuenca del río Maure, hasta los 1.200 mm en algunas zonas de la cuenca del río Coata.

La distribución dentro del año de las precipitaciones es muy irregular, concentrándose las mismas en los meses de diciembre a marzo, donde se produce el 75 % de la precipitación total anual. Esa distribución porcentual se mantiene en líneas generales en las diferentes cuencas objeto del estudio, y viene reflejada en la figura 4.

La evapotranspiración potencial media es del orden de 850 mm anuales, con pequeñas oscilaciones respecto a este valor según las cuencas estudiadas. La distribución dentro del año es bastante regular, y muy similar en todas las cuencas.

Recursos medios anuales

Los recursos totales de las cuencas estudiadas del Titicaca son de unos 6.500 hm³/año, siendo su desglose:

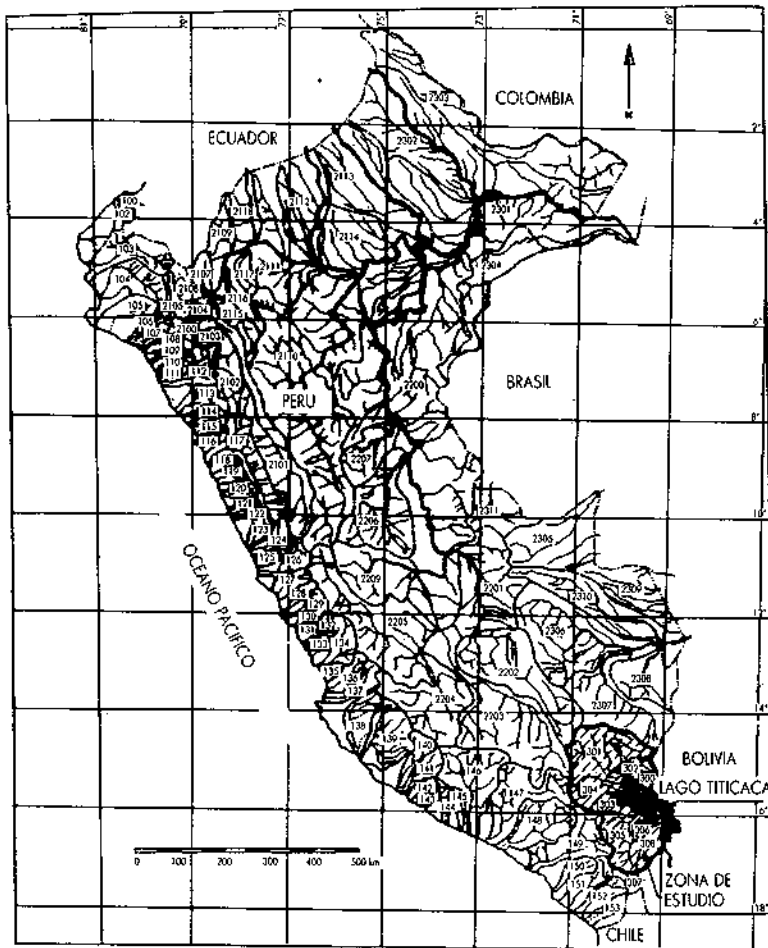


FIGURA 3. Localización zona de estudio.

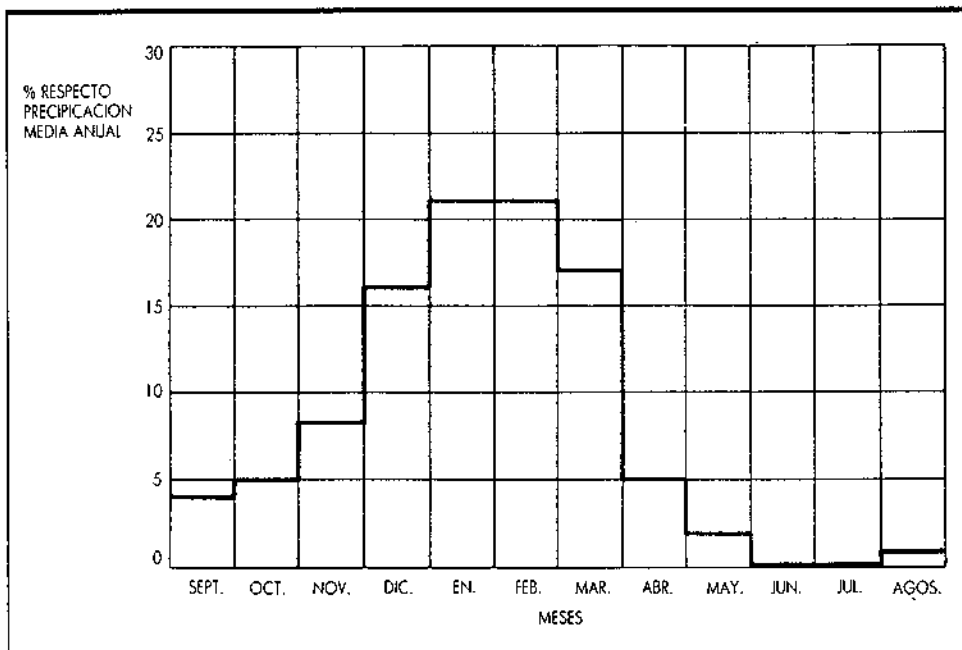


FIGURA 4. Régimen de precipitaciones en la zona del Titicaca.

Cuenca	hm ³ /año
HUANCANE	647
RAMIS	2.390
COATA	1.422
ILLPA	243
ILAVE	1.217
MAURE	205
ZAPATILLA	98
CALLACCAME	246
TOTAL	6.468

Régimen de caudales

En la vertiente del Titicaca existen dos regímenes de caudales diferenciados, el correspondiente a la cuenca del río Maure, con un importante acuífero y como consecuencia una acusada regularidad anual, y el correspondiente al resto de las cuencas estudiadas, muy similar para todas ellas, con acuíferos menos importantes y de una gran irregularidad anual.

En la figura 5 figuran las distribuciones mensuales de los caudales para cada uno de los dos regímenes citados. En este gráfico se observa que existe una temporada de aguas altas con caudales superiores al medio, y que se extiende desde enero hasta abril, y otra de aguas bajas el resto del año. En la cuenca del Maure las variaciones estacionales son mucho menos acusadas.

DESARROLLO DEL ESTUDIO

Las partes básicas del estudio (fig. 6), así como la metodología seguida en cada una de ellas fueron las siguientes:

1. Informatización de los datos en DBASE III (precipitaciones, evapotranspiraciones y aportaciones mensuales).
2. Estudio de los datos de precipitaciones y caudales. Se realizó un análisis crítico de los datos basándose en el método de dobles acumulaciones.
3. Estudio de datos de evapotranspiraciones. Se estimaron evapotranspiraciones potenciales a partir de datos puntuales de evaporaciones en tanque.
4. Completado de datos de precipitaciones. Tras la elección del período básico de registros (1963-64 a 1985-86) a adoptar en el estudio se procedió al completado de los datos de precipitaciones a nivel mensual. Para ello se elaboró, tras un proceso de investigación, una metodología basada en técnicas estocásticas de correlación doble con estacionarización previa de las series de precipitaciones.
5. Contraste precipitaciones-aportaciones específicas. Se contrastaron en un gráfico precipitación areal-aportación específica, los valores medios anuales (con período de datos comunes) correspondientes a las cuencas objeto del estudio. Esta técnica puso punto final al análisis crítico de los datos facilitando el proceso de selección de las estaciones hidrométricas.

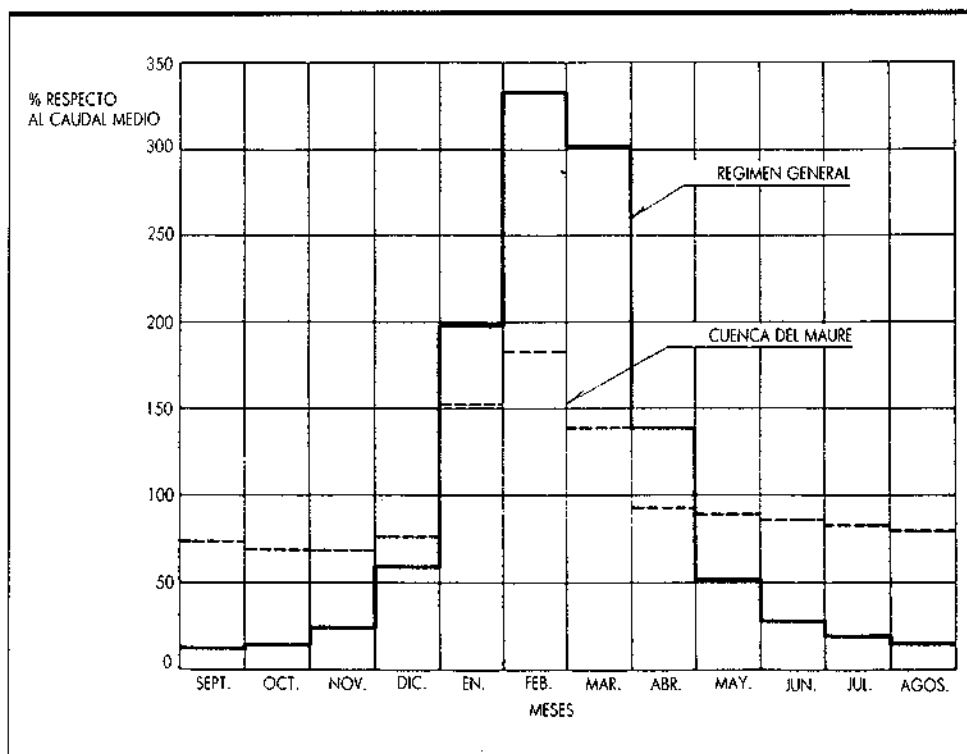


FIGURA 5. Régimen de caudales en la vertiente del Titicaca.

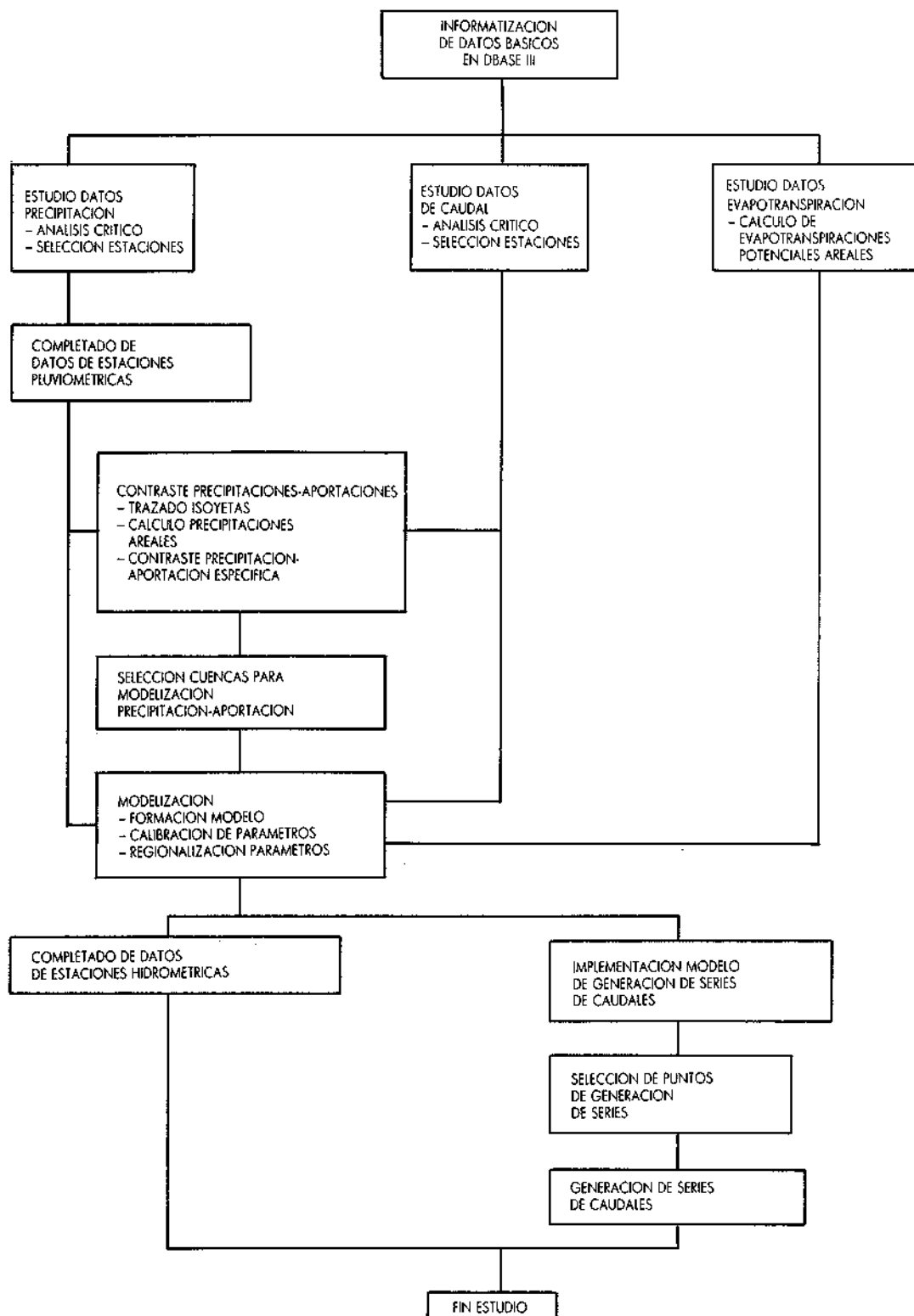


FIGURA 6. Organigrama simplificado de desarrollo del estudio.

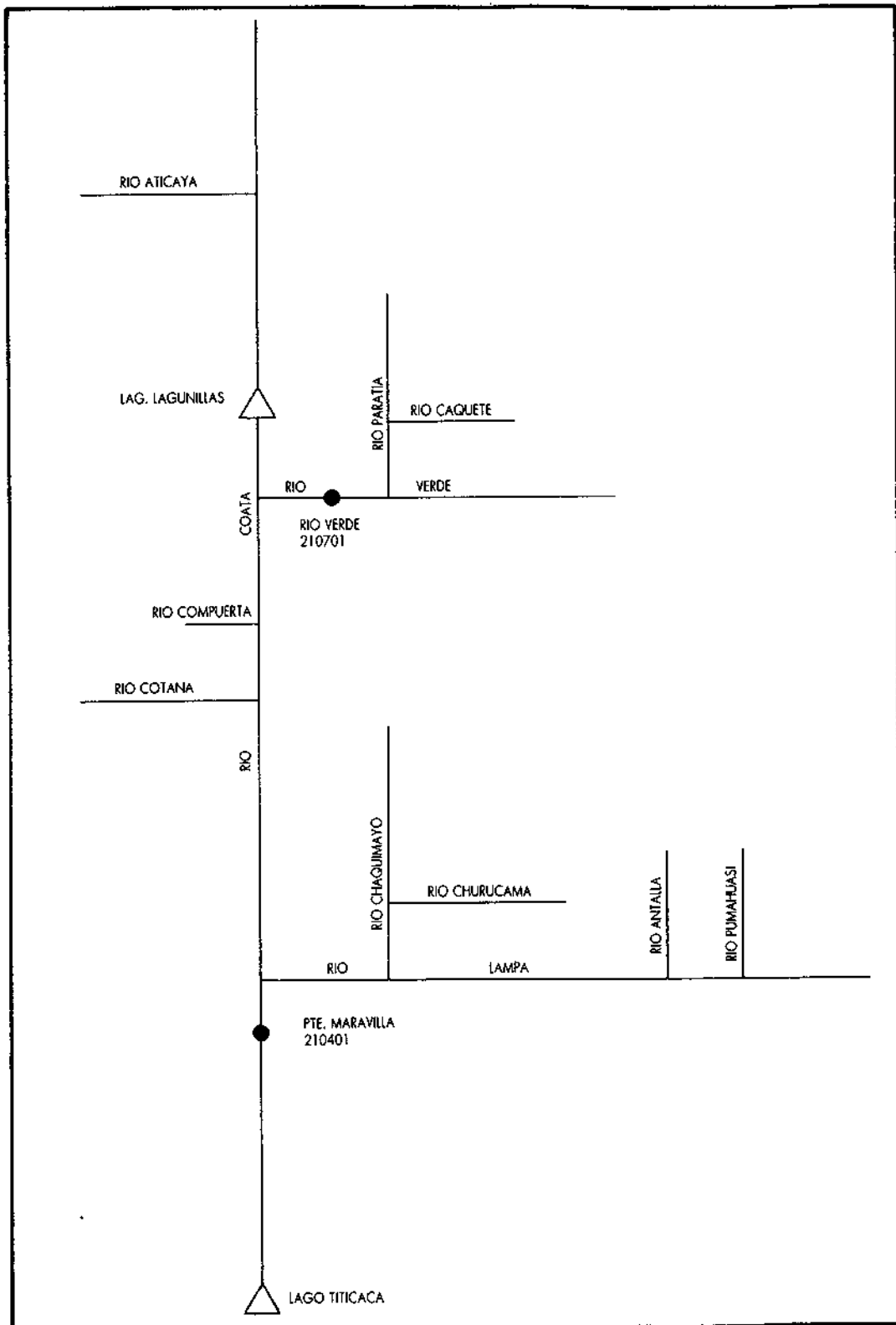


FIGURA 7. Diagrama fluvial. Coata (304).

6. Selección de cuencas para la modelización del proceso precipitación-aportación. El completado de las series de caudales es dificultoso mediante técnicas estocásticas de correlación dada la escasez de datos en algunas estaciones y la acusada variabilidad temporal del régimen de precipitaciones. Se optó, por tanto, por realizar el completado de los datos mediante la modelización del proceso precipitación-aportación. Para ello, previamente se seleccionaron aquellas subcuencas en las que, tras el análisis de los datos de caudales y el contraste con las precipitaciones, se estimó que sus datos eran suficientemente fiables.

7. Modelización del proceso precipitación-aportación. Se aplicó el modelo matemático de transformación precipitación-aportación desarrollado por J. R. Témez, con la variante ya comentada. Los parámetros se calibraron a partir de los datos de las estaciones de aforos de los ríos. Para ello se utilizaron técnicas de estimación automática de los mismos basadas en el algoritmo de Rosenbruck. Posteriormente se procedió a su regionalización para toda la zona de estudio.

8. Completado de datos de estaciones hidrométricas. El modelo precipitación-aportación, calibrado en cada una de las cuencas seleccionadas, sirvió para completar las series de caudales para el período de registro adoptado en el estudio (1963-1985).

9. Implementación de un modelo de generación de series de caudales. Se implementó un modelo distribuido de precipitación-aportación con los mismos fundamentos teóricos que el citado en párrafos anteriores. Este modelo permite subdividir una cuenca en subcuencas para agregar posteriormente los resultados, con lo que se pueden variar espacialmente tanto las acciones exteriores (precipitación, fundamentalmente) como las ca-

racterísticas de la cuenca (parámetros). Tiene en cuenta, además, la información que proporcionan los registros de las estaciones hidrométricas existentes en la cuenca.

10. Generación de series de caudales en los puntos seleccionados. Los criterios de selección seguidos fueron por una parte la división de las cuencas en subcuencas con una superficie aproximada entre 500 y 1.500 km², y por otra las necesidades de información que se tenían en puntos concretos de la red hidrográfica.

A continuación se desarrolla, a modo de ejemplo, el proceso de calibración del modelo en una de las cuencas objeto de estudio. Este proceso es generalmente la etapa más importante, y también la más laboriosa, en la implementación de un modelo de simulación integral de cuenca.

EJEMPLO DE APLICACION PRACTICA DEL MODELO EN UNA DE LAS CUENCAS ESTUDIADAS (RIO COATA)

La cuenca del río Coata presenta una extensión de unos 4.700 km². La estación de aforos con una mayor área de captación es la 210401 (4.583 km²) y está situada cerca de la desembocadura del río al lago Titicaca. En la figura 7 se representa el diagrama fluvial de dicha cuenca.

Datos de precipitaciones y caudales

En la figura 8 se representan los valores medios mensuales de los datos de precipitaciones y aportaciones, apreciándose el efecto del acuífero en el desfase entre los respectivos valores punta. En la tabla 1 se muestran las series completas de datos.

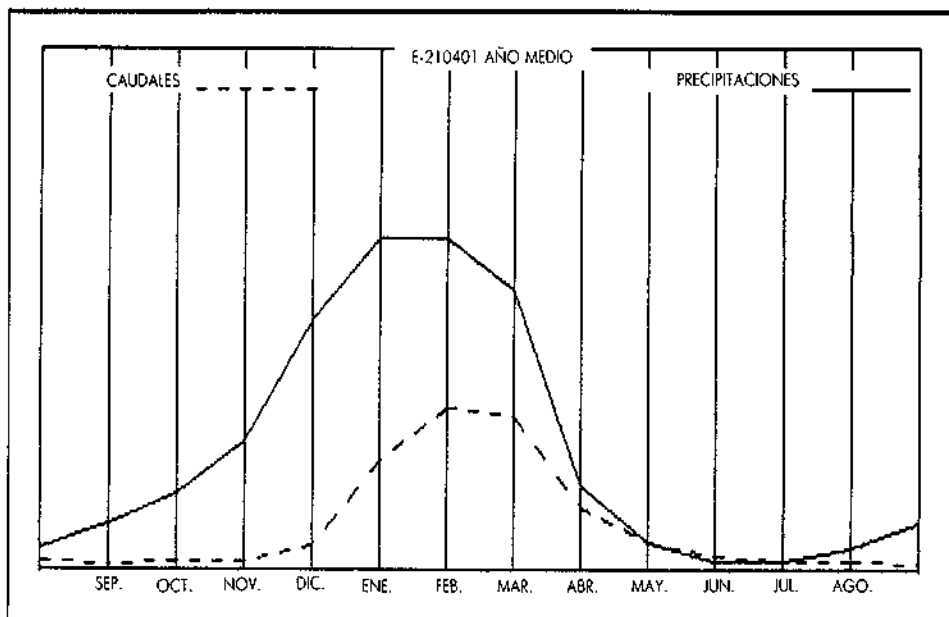


FIGURA 8. Contraste precipitaciones-caudales a nivel medio.

HIDRAULICA E HIDROLOGIA

PRECIPITACIONES HISTORICAS (mm) A: 210401LM

AÑO	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	TOT.L
1963/64	30,29	57,14	62,85	184,91	89,38	150,42	176,03	51,14	24,60	0,25	0,52	5,57	833,1
1964/65	15,51	15,57	52,35	97,51	148,24	172,19	136,23	52,05	7,64	3,62	2,91	3,46	707,3
1965/66	30,99	21,08	62,18	219,83	129,56	173,28	103,14	10,01	41,53	0,02	0,37	2,48	794,5
1966/67	8,83	59,29	89,87	118,33	112,05	154,37	225,22	28,24	16,22	1,69	9,39	14,53	838,0
1967/68	46,44	48,75	18,07	145,60	202,20	227,04	134,66	35,66	11,35	6,18	8,44	5,34	889,7
1968/69	25,11	48,89	148,44	99,23	195,24	109,03	78,82	49,12	0,19	1,25	5,61	1,39	762,3
1969/70	18,06	33,93	60,93	116,29	205,97	150,81	181,55	38,74	21,92	1,08	0,55	2,64	832,5
1970/71	18,29	31,32	11,38	213,00	141,95	258,64	94,29	28,29	6,43	3,88	0,69	3,64	811,8
1971/72	2,60	19,64	54,21	178,33	255,09	132,72	169,99	30,11	4,56	0,55	1,62	3,12	852,5
1972/73	28,32	38,21	62,90	114,23	247,45	201,46	163,37	110,43	25,33	0,84	9,07	12,27	1.013,9
1973/74	46,31	39,47	61,73	114,73	261,45	270,67	108,49	47,93	3,55	13,65	2,44	49,27	1.019,7
1974/75	18,09	23,37	25,27	116,97	227,91	249,44	157,86	41,13	30,43	2,69	0,38	1,98	895,5
1975/76	11,30	38,62	50,75	182,40	195,65	150,46	188,05	21,95	24,39	12,22	5,25	19,09	900,1
1976/77	67,28	6,84	19,04	108,58	112,22	222,75	186,63	14,29	6,88	0,87	2,46	0,15	748,0
1977/78	25,33	42,78	118,84	98,96	287,01	131,99	111,54	73,23	5,56	1,75	1,48	3,84	902,3
MEDIO	26,18	34,99	59,92	140,59	187,42	183,68	147,72	42,15	15,37	3,37	3,41	8,58	853,4

EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL (mm) A: 210401EC

	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	TOTAL
	75,7	86,3	84,9	74,9	61,5	57,8	57,3	59,4	61,5	55,9	59,8	68,4	803,4

CAUDALES HISTORICOS (m³/seg) A: 210401CN

AÑO	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	TOTAL
1963/64	9,2	17,6	14,7	60,0	30,6	60,2	71,3	35,5	19,7	12,4	8,3	6,6	28,8
1964/65	2,8	2,4	4,1	7,7	22,2	60,5	86,0	32,5	14,6	6,4	4,1	2,8	20,5
1965/66	1,7	1,8	1,7	19,0	26,5	37,3	53,0	17,9	7,0	4,8	3,1	2,1	14,7
1966/67	1,4	2,1	6,1	18,0	9,9	30,0	150,9	29,8	10,0	5,6	4,0	2,4	22,5
1967/68	2,6	5,0	2,0	14,3	46,1	161,2	91,3	30,8	13,2	7,3	4,2	2,5	31,7
1968/69	1,7	1,8	17,9	22,2	58,8	80,3	26,4	23,7	7,6	4,1	2,5	1,2	20,7
1969/70	0,8	1,7	1,7	11,4	54,5	222,5	159,3	61,5	21,5	8,2	4,4	3,1	45,9
1970/71	2,0	1,6	1,5	18,8	64,7	384,1	165,1	38,6	16,3	8,1	4,1	2,8	59,0
1971/72	1,8	1,4	1,7	18,3	175,1	80,5	99,2	85,2	23,4	15,2	3,4	2,7	42,3
1972/73	1,6	1,2	4,5	38,1	132,3	213,6	178,4	81,8	34,9	14,1	9,0	3,0	59,4
1973/74	3,7	5,5	2,7	15,6	176,9	306,5	138,0	70,3	33,4	17,5	12,0	12,7	66,2
1974/75	12,4	6,1	5,4	5,2	123,9	307,0	218,6	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
1975/76	-1,0	-1,0	-1,0	52,3	200,0	162,7	187,7	84,0	27,3	19,8	9,3	5,7	-1,0
1976/77	-1,0	16,4	4,5	2,9	44,1	69,8	253,6	93,6	25,2	10,2	5,0	2,3	-1,0
1977/78	2,0	1,5	4,4	7,1	251,9	167,7	147,5	108,4	46,8	21,7	6,6	2,6	64,0
MEDIO	3,4	4,7	5,2	20,7	94,5	156,3	135,1	56,7	21,5	11,1	5,7	3,7	43,2

CAUDALES SIMULADOS (m³/seg) A: 210401CS

AÑO	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	TOTAL
1963/64	2,6	1,7	1,1	31,0	9,6	78,3	174,7	34,0	12,5	8,4	5,8	4,0	30,3
1964/65	2,8	2,0	1,4	1,0	15,3	90,7	106,0	27,4	10,0	6,7	4,6	3,2	22,6
1965/66	2,3	1,6	1,1	60,6	48,0	149,0	85,6	16,2	10,4	7,1	5,0	3,5	32,5
1966/67	2,4	1,7	1,2	1,1	5,1	63,8	253,5	23,1	12,2	8,3	5,8	4,0	31,9
1967/68	2,8	2,0	1,4	7,0	98,1	252,5	146,7	29,9	15,4	10,5	7,3	5,1	48,2
1968/69	3,6	2,5	8,6	4,1	103,2	64,5	43,4	18,0	7,6	5,1	3,6	2,5	22,2
1969/70	1,7	1,2	0,8	0,6	79,9	102,0	201,1	30,2	14,0	9,5	6,6	4,6	37,7
1970/71	3,2	2,2	1,6	54,1	58,9	320,5	91,3	22,6	13,6	9,4	6,5	4,6	49,0
1971/72	3,2	2,2	1,5	24,9	208,9	116,5	198,3	29,2	15,9	10,9	7,6	5,3	52,0
1972/73	3,7	2,6	1,8	1,3	135,7	202,4	191,8	115,0	25,0	15,5	10,7	7,4	59,4
1973/74	5,2	3,6	2,5	1,8	158,6	351,9	115,6	38,0	17,2	11,7	8,1	5,7	60,0
1974/75	3,9	2,8	1,9	1,4	110,0	291,2	190,2	37,9	18,1	12,2	8,5	5,9	57,0
1975/76	4,1	2,9	2,0	28,1	113,6	127,9	230,1	26,6	15,6	10,7	7,4	5,2	47,9
1976/77	3,6	2,5	1,8	1,2	2,8	148,4	199,1	20,5	12,4	8,5	5,9	4,1	34,2
1977/78	2,9	2,0	1,5	1,0	225,8	108,7	97,1	52,1	15,1	10,0	6,9	4,8	44,0
MEDIO	3,2	2,2	2,0	14,6	91,6	164,6	155,0	34,7	14,3	9,6	6,7	4,7	41,9

TABLA 1. Entradas y salidas del modelo.

Calibración de los parámetros del modelo

La calibración es la etapa del proceso de modelización en la que se consigue que el modelo reproduzca el funcionamiento del sistema observado. Se utiliza para dar valores numéricos a aquellos parámetros sobre los que se dispone de pocos o ningún dato directo. El grado de ajuste entre los valores simulados por el modelo y los observados en la realidad se mide mediante la utilización de una función o criterio objetivo.

El proceso de calibración puede hacerse manual o automáticamente. En el primer caso, la función o criterio objetivo puede ser el dibujo de gráficos (valores simulados y observados) en los que el modelador pueda ver cómo repercuten en el ajuste modificaciones en los parámetros. Dado que el número de parámetros del modelo (6) hacía, en este caso, muy laborioso el ajuste, se optó por utilizar técnicas de calibración automática de los parámetros (algoritmo de Rusenbruck). La función objetivo se expresó en forma de funciones matemáticas que pudieran ser tratadas mediante técnicas de optimización.

Se utilizaron funciones objetivo de tipo cuadrático, encontrándose en la aplicación del algoritmo el conocido problema de abundancia de mínimos locales. Esto se solucionó realizando diferentes optimizaciones en las que se partía de diferentes conjuntos iniciales de los parámetros.

Las soluciones con menores valores de la función objetivo se simularon con el modelo y se visualizaron los ajustes gráficos año por año y en valores medios. Se eligió el conjunto de parámetros cuyos ajustes presentaban un mejor aspecto y eran compatibles con las que se estaban obteniendo en cuencas cercanas, fase que se denominó prerregionalización de los parámetros.

En la cuenca del Coata vertiente a la estación número 210401 los valores de los parámetros elegidos fueron los siguientes:

$$\begin{aligned} C &= 0,55 \\ H_{\max} &= 210 \text{ mm} \\ I_{\max} &= 430 \text{ mm} \\ \alpha_1 &= 0,012 \text{ días}^{-1} \\ \alpha_2 &= 0,080 \text{ días}^{-1} \\ b_1 &= 0,4 \end{aligned}$$

Los valores iniciales del caudal y de la humedad en el suelo no se obtuvieron en el propio proceso de optimización, sino que fueron estimados previamente al ser su influencia en los resultados prácticamente despreciable. Los valores adoptados fueron los siguientes:

$$\begin{aligned} Q_{01} &= 4 \text{ m}^3/\text{seg} \\ Q_{02} &= 7 \text{ m}^3/\text{seg} \\ H_0 &= 100 \text{ mm} \end{aligned}$$

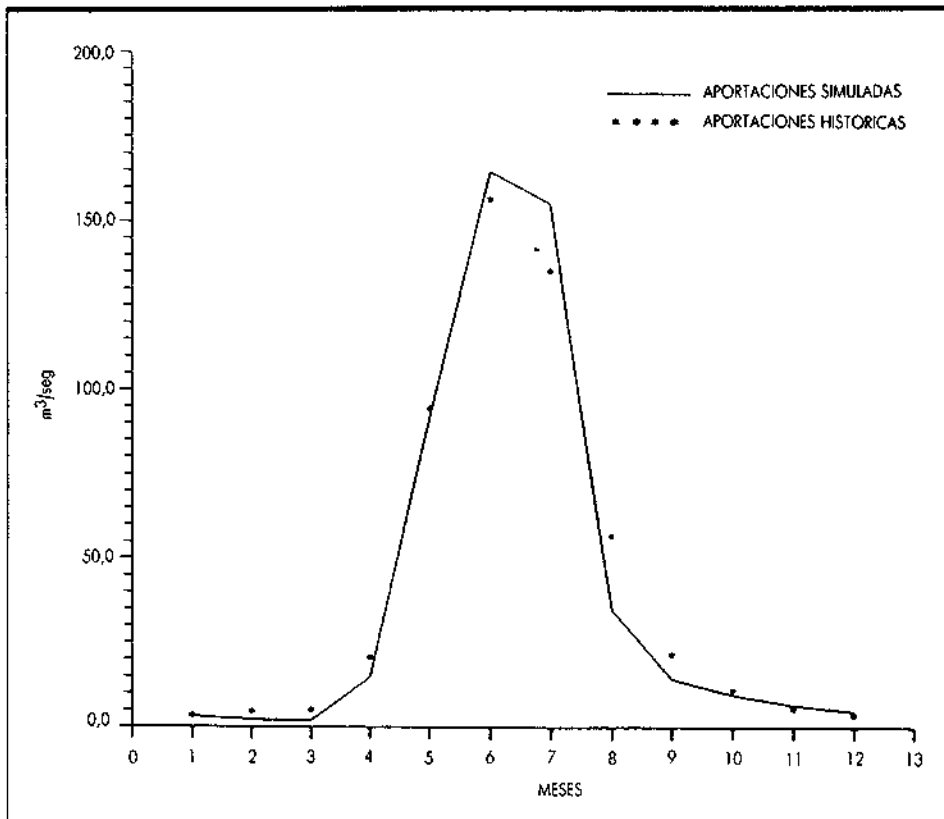


FIGURA 9. Calibración del modelo.

En la tabla 1 se representan las series de entradas y salidas del modelo:

- Precipitaciones mensuales areales sobre la cuenca (mm).
- Evapotranspiraciones mensuales areales (mm) (valores medios).
- Caudales mensuales registrados en la estación de aforos 210401 (m^3/seg).
- Caudales simulados por el modelo en la estación de aforos 210401 (m^3/seg).

En la figura 9 se refleja el ajuste conseguido para los valores de los parámetros citados. (Valores medios observados y simulados.)

4. CONCLUSIONES

Los modelos de simulación integral de la cuenca son una herramienta muy valiosa para la realización de estudios de recursos hídricos. Hay ocasiones en que son prácticamente imprescindibles, como en aquellos casos en que se desea completar series de caudales con muchas lagunas y se dispone de series largas de precipitaciones, o también cuando se precisa generar series de caudales en puntos de la red hidrográfica en que no existen estaciones hidrométricas. Uno de los puntos clave cuando se aborda un estudio de recursos es la elección del modelo. Un factor decisivo es la escala temporal

de simulación. Si ésta es del orden del mes, es aconsejable recurrir a modelos sencillos con pocos parámetros, que proporcionan una mayor operatividad y control de los procesos analizados y que además reproducen, con prácticamente la misma precisión que modelos más complejos, el proceso de transformación precipitación-aportación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CEDEX (1988). «Estudio de los recursos hídricos del Perú. Zona Titicaca». Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Julio.
- CRAWFORD, N., y LINSLEY, R. (1966). «Digital simulation in Hydrology; Stanford watershed model IV». Stanford University.
- ESTRELA, T., y SAHUQUILLO, A. (1985). «Modeling the response hydrograph of subsurface flow». Multivariate Analysis of Hydrologic Processes, Proceedings of Fourth International Hydrology Symposium. July 15-17, 1987. Colorado State University. Fort Collins. USA.
- PALMER, W. C. (1965). «Meteorologic drought». Res Pap. U.S. Weather Bur. 45, 58 pp.
- TEMEZ, J. R. (1977). «Modelo matemático de transformación precipitación-aportación». ASINEL, octubre.
- THORNTHWAITE, C. W., y MATHER, J. R. (1955). «The water balance». Publ. Climatol. Lab. Climatol. Drexel. Technol. 8 (1) 1-104.

CONSTRUCCION'89



IV FERIA SIMBOLO DE LA CONSOLIDACION DE UN CERTAMEN

CONSTRUCCION'89 se ha convertido en un Certamen consolidado en el que las empresas privadas de toda España y grandes firmas de países de la Comunidad Económica Europea presentan sus novedades y proyectos, partiendo de la base de encontrarse en una zona de influencia donde la demanda de sus productos y servicios puede superar su propia oferta. Por tanto Sevilla se convierte en eje de un sector en alza en Andalucía y lugar de encuentro para los profesionales del ámbito nacional y países próximos.

Del 8 al 11 de Noviembre de 1988, se celebró en el Palacio de Exposiciones y Congresos de Sevilla, la IV Edición de **CONSTRUCCION'89** Feria Nacional de Edificación, Obras Públicas y Equipamientos Urbanos.

El 8 de Noviembre, D. Miguel Ángel Pino, Presidente de la Diputación Provincial de Sevilla y del Consejo de Administración de la Institución Ferial y D. Manuel Otero, Presidente de la Cámara de Comercio y de la Asamblea de la Institución, procedieron a la inauguración oficial de **CONSTRUCCION'89**.

Estuvieron acompañados en este acto por D. Francisco Moreno, Primer Teniente de Alcalde del Ayuntamiento de Sevilla, D. Isidoro Benéfoso, Concejale Delegado de Urbanismos, D. Ramón Contreras, Vicepresidente de la Cámara de Comercio y de la Institución Ferial y otras autoridades.

Convergen en la presente muestra los siguientes

sectores:

- Maquinaria Ligera y equipos de protección y seguridad en obras.
- Elementos de elevación y transportes.
- Prefabricación y construcción industrializada.
- Aparatos de medida y precisión.
- Electricidad e iluminación.
- Carpintería de madera, metálica y plástica.
- Cerrajería y metalistería en construcción.
- Aislamiento, impermeabilización y pintura.
- Pavimentos y revestimientos.
- Climatización en la vivienda y alternativas energéticas.
- Aparatos sanitarios, grifería y accesorios.
- Cocina integral.
- Informática aplicada a la construcción y servicios.
- Equipamiento urbano, mobiliario, jardinería y piscina.

CONSTRUCCION'89 ha contado con la presen-

cia de 243 stands de Empresas expositoras, con un total de 1.522 firmas representadas, y extendiéndose en 33.700 metros cuadrados de ocupación, distribuidos en tres pabellones cubiertos y dos zonas exteriores.

Este certamen, organizado por la Institución Ferial de Muestras Iberoamericana, contó con la colaboración de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía y el Ayuntamiento de Sevilla. Es de destacar la presencia de las principales firmas nacionales del sector y empresas de Portugal, Italia, Alemania y Francia. El MOPU, Consejería de O.P. y Transportes de la Junta de Andalucía y la Gerencia de Urbanismo, participan con su propio stand.

En **CONSTRUCCION'89** se presentaron un nuevo modelo de compresores de mayor capacidad y un revolucionario tipo de pavimentación, basado en la aplicación de la cerámica para el revestimiento de paredes.

El sector de equipamiento eléctrico formó parte por primera vez de los expositores que convergen en la muestra.

EL CONTROL DE LA CALIDAD, EJE DE LAS JORNADAS ELECTRICAS EN LA FERIA DE LA CONSTRUCCION DE SEVILLA.

Una mayor calidad no supone, a medio plazo, un mayor coste para el consumidor, según se puso de manifiesto en la primera de las dos mesas redondas que sobre electricidad y construcción ha organizado Sevillana de Electricidad dentro de las actividades de la IV Feria Nacional de la Construcción.

Los participantes en la jornada resaltaron que es necesario profundizar en la mejora de proyectos de las instalaciones en general. Expusieron que la sociedad demanda cada vez más unos mayores niveles de calidad, lo que comporta mayor confort y mejor nivel de vida.

Se hizo hincapié en las exigencias que supondrá la incorporación plena de España a la C.E.E., demandando de los colectivos afectados un mayor perfeccionamiento en todo lo referente a la calidad, lo que obliga a cumplir los estándares de calidad y homologación de materiales y equipos.

La mesa redonda contó con la participación de las Consejerías de Fomento y Obras Públicas y Transportes, la Federación Andaluza de Empresarios de la Construcción, el Instituto Nacional para la Calidad en la Construcción, el Colegio Oficial de Arquitectos de Andalucía Occidental, la Asociación de Empresarios Eléctricos de Andalucía, Escuelas de Ingenieros Industriales y de Arquitectura, así como profesionales del ramo de instalaciones en la construcción.

Por último señalar que con respecto a la anterior edición, se ha experimentado un incremento del 33% en cuanto a número de expositores, y el número de visitantes ha alcanzado la cifra de 40.644.

NOTA: La próxima edición, **CONSTRUCCION'90** tendrá lugar del 8 al 11 de Noviembre de 1990.

Ampliamos nuestros horizontes



La conducción de fluidos plantea cada día mayores exigencias de calidad y variedad de productos. Nuestra experiencia en este campo nos ha llevado a crear una infraestructura capaz de dar respuesta a las necesidades del Mercado, tanto presentes como futuras.

Con nuestra tecnología y nuestros productos de fibrocemento, de PVC y de polietileno hemos estado siempre en primera línea. Ahora, además, ofrecemos nuestras tuberías de **HORMIGON REFORZADO CON CAMISA DE CHAPA**, con la tecnología más avanzada y reconocida de **TUBOS BONNA**.

Cuando de conducir fluidos se trate, cuente con verdaderos especialistas, cuente con **FIBROTUBO**.

FIBROTUBO



AUXILIAR DE CANALIZACIONES, S.A. A.C.S.A.



- CANALIZACIONES AGUA POTABLE
- SANEAMIENTOS
- ESTACIONES DEPURADORAS
- DEPOSITOS
- EMISARIOS SUBMARINOS
- REMODELACION ESPACIOS URBANOS
- CANALIZACIONES DE GAS
- CRUCES ESPECIALES
- CONTRATAS I SERVICIOS
- JARDINERIA



Central : Mas Casanovas, s/n - 08026 BARCELONA Teléfono (93) 236.87.00 Telefax (93) 347.10.85

Delegaciones y Oficinas :

Marqués de la Ensenada, 14
Teléfono (91) 410.15.50
28004 MADRID

Berruguete, 54
Teléfono (91) 270.10.29
28039 MADRID

Av. del Aeropuerto, 14
Teléfono (957) 23.97.26
14004 CORDOBA

Cno. de Purchil, s/n
Teléfono (958) 25.75.62
18004 GRANADA

Guillem Galmes, 2
Teléfono (971) 29.25.24
07004 PALMA DE MALLORCA

Brasil, 19
Teléfono (96) 370.52.16
46018 VALENCIA