

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA  
XI CONGRESO CHILENO**

**MODELO DE GENERACION SINTETICA DE CAUDALES  
EN UNA CUENCA DE REGIMEN NIVAL (\*)**

MARIA LUISA CORDOVA M. (1)  
EDUARDO VARAS C. (2)

**RESUMEN**

Se describe un modelo de simulación de caudales a nivel mensual aplicable a cuencas nivales. El modelo representa cada cuenca por un conjunto de sub-cuencas o bandas con alturas relativamente poco variables y establece en cada una de ellas un balance de aguas en tres capas o estratos, que representan el manto de nieve, el suelo y el acuífero subterráneo.

Cada una de estas bandas o sub-áreas tiene condiciones meteorológicas propias y por consiguiente, cuenta con valores diferentes de precipitación, evaporación, derratimiento y escurrimiento. El acuífero subterráneo es común a todas las sub-áreas de la cuenca y configura un elemento integrador del escurrimiento que se produce.

El caudal y las demás variables hidrológicas consideradas se registran en forma mensual, de manera que la simulación se efectúa con igual intervalo de tiempo.

Las aplicaciones realizadas en las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo muestran que el modelo representa adecuadamente los caudales observados y que su utilización es relativamente simple. Constituye pues una herramienta recomendable para evaluar recursos en zonas nivales exigiendo una información meteorológica razonable.

- (1) Ingeniero Civil, Depto Hidráulica CADE-IDEPE.
- (2) Ingeniero Civil, Ph.D., Profesor Depto. Ing.Hidráulica y Ambiental, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

---

(\*) El modelo expuesto en este artículo forma parte de la Etapa III del estudio "Plan Maestro de Aguas Concentrador" desarrollado por CADE-IDEPE para la División Andina de CODELCO Chile bajo el contrato N° C11-136-92, y por lo tanto la propiedad intelectual del trabajo es de División Andina. En consideración a lo anterior, los autores agradecen a División Andina de CODELCO Chile la autorización dada para la publicación de este artículo.

## 1 INTRODUCCION

El modelo de generación sintética de caudales desarrollado, simula el comportamiento hidrológico de una cuenca de régimen nival. La simulación se realiza a nivel mensual obteniéndose como resultado una serie de caudales medios mensuales para un período determinado.

El modelo que se describe en este artículo fué aplicado con buenos resultados en la generación de series de caudales medios mensuales en cuencas sin control fluviométrico, ubicadas en la parte alta de la hoya de los ríos Aconcagua y Maipo. Su concepción global sigue el esquema de un modelo desarrollado por CICA Consultores (1979).

## 2 DESCRIPCION DEL MODELO

### 2.1 Bases de la modelación

En la modelación la cuenca queda representada por cuatro bandas o sub-áreas ubicadas a diferentes alturas. En la aplicación realizada la cuenca se dividió en bandas bajo los 2.000 m.s.n.m, entre los 2.000 y 3.500, entre los 3.500 y 4.500 y sobre los 4.500 m.s.n.m. (Figura N° 1(a)). La simulación establece para cada banda un balance de aguas en tres capas o estratos, correspondientes al manto de nieve, el suelo y el acuífero subterráneo (Figura N° 1(b)).

La simulación hidrológica está hecha sobre la base del tipo de precipitación que cae sobre el suelo. Se considera que para cada mes de la simulación, la precipitación sobre cada banda de la cuenca puede ser de tipo sólido (nieve), de tipo líquido (lluvia) o no existir.

En cada situación se simula el comportamiento del manto de nieve (si existe), del suelo y del subsuelo, de modo de obtener la cantidad de agua que escurre superficialmente, que se evapora, que se infiltra aumentando la humedad del suelo y aquella que es drenada como escorrentía subsuperficial y percolación profunda.

El acuífero subterráneo es común para todas las bandas de la cuenca y representa un elemento integrador de la misma. Así el escurrimiento total de la cuenca queda dado por la suma del escurrimiento superficial de cada banda y el escurrimiento subterráneo producto de la totalidad de la cuenca.

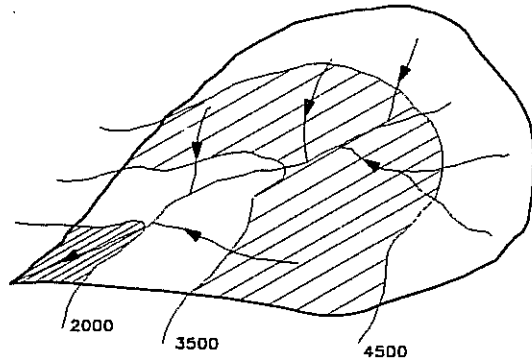


FIGURA No 1 (a) : REPRESENTACION DE LA CUENCA POR BANDAS

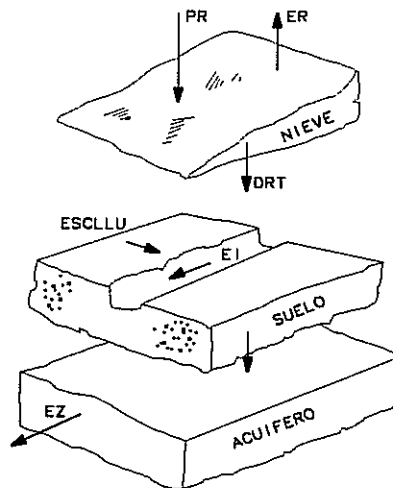


FIGURA No 1 (b) : ESTRATOS DE CADA BANDA

Cada banda representa un sector de la cuenca de determinada altura media. Por lo tanto, cada banda cuenta con valores diferentes de temperatura, humedad relativa, precipitación, evaporación, derretimiento y escorrentía. Adicionalmente, es necesario estimar para cada banda la evapostulimación de la nieve, la evapotranspiración desde agua y el derretimiento de la nieve. Para esto se requiere contar con estimaciones o mediciones de otras variables meteorológicas, tales como, temperatura media del aire, precipitación, humedad relativa, N° medio de horas de sol al mes, N° de días de lluvia, velocidad del viento y nubosidad.

Todas estas variables meteorológicas son requeridas por el modelo como datos observados a nivel mensual, en una o más estaciones base, para todo el período de simulación. A partir de los datos medidos se evalúa además la temperatura del punto de rocío, la cota y temperatura de las nubes, la temperatura de la nieve, el albedo, la declinación solar y la radiación solar.

## 2.2 Evaluación de cada uno de los procesos

### 2.2.1 Evapostulimación desde la nieve

La expresión utilizada para estimar la evapostulimación de la nieve en [mm/día] fue (Linsley et al.,1975) :

$$EVS_N = (0,18 + 0,098 V) * (e_0 - e_2) \quad (1)$$

donde:

V = velocidad del viento en (m/s)

e<sub>0</sub> = presión de vapor de la nieve en (mb)

e<sub>2</sub> = (HR/100) \* e<sub>s</sub>

HR = humedad relativa en %

La presión de vapor saturado (e<sub>s</sub>), se evalúa en función de la temperatura del aire (T, °C) como (Linsley et al.,1975) :

$$e_s = 6,11 * \exp\{(17,27 T)/(T+237,3)\} \quad (2)$$

### 2.2.2 Evapotranspiración desde agua

La evapotranspiración potencial (ETP) se calculó con la expresión propuesta por Blaney-Criddle, en función de la temperatura (T, °C), el porcentaje de horas de sol (p) y un

coeficiente de ajuste (C), el cual es función de la humedad, el N° de horas de sol y el recorrido del viento (Doorenbos y Pruitt, 1977):

$$ETP = C * p * (0,46T + 8) \text{ mm/día} \quad (3)$$

### 2.2.3 Derretimiento de la nieve

Para el cálculo del derretimiento potencial se utilizó una adaptación de la fórmula empírica propuesta por el Corps of Engineers (1956):

$$DR = K*(3,871*FKP*HINS*(1-ALB)+(1-NUB)*(29,078*(TA-TN)-640,08) + NUB*39,78*(TC-TN) + 7,16*FK*V*(0,22*(TA-TN)+0,78*(TR-TN)) + PR*(TA/80)) \div DRMIN \quad (4)$$

donde:

DR	=	Derretimiento potencial (mm/mes)
FKP	=	Factor paramétrico de exposición a la radiación (Parámetro)
HINS	=	Radiación solar total (Ly/mes)
ALB	=	Albedo de la nieve
NUB	=	Fracción de cielo cubierto de nubes (0/1)
TA	=	Temperatura del aire (°C)
TN	=	Temperatura de la nieve (°C)
TC	=	Temperatura de las nubes (°C)
FK	=	Factor de exposición al viento (Parámetro)
V	=	Velocidad del viento (Km/hr)
TR	=	Temperatura del punto de rocío (°C)
PR	=	Precipitación mensual (mm)
K,DRMIN	=	Parámetros del modelo

Para el cálculo de la radiación solar se utilizó la siguiente expresión, propuesta por Espildora y Stowhas (1968):

$$HINS = 1211,7 * \cos Z * PL * e \frac{-(0,0173 * e^2 + CLOUDK * NUB)}{\cos Z_0} \quad (5)$$

donde:

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + (2/\pi) \cos \varphi \cos \delta \quad (6)$$

Z	= ángulo zenital medio del sol
$\varphi$	= latitud del lugar en °
$\delta$	= declinación solar
CLOUDK	= coeficiente del tipo de nubes (Parámetro)
Zo	= ángulo zenital al medio día
PL	= promedio mensual de horas diarias de sol/12
NUB	= fracción del cielo cubierto de nubes

La temperatura del punto de rocío se define como la temperatura a la cual el aire se satura al ser enfriado a presión constante y contenido de humedad constante. Su estimación se realizó en base a la siguiente expresión (Bras,1990):

$$TR = \{(HR/100)^{1/6} * (112 + 0,9*T)\} - 112 + 0,1*T \quad (7)$$

La temperatura de las nubes sobre cada banda se estimó en función de la cota de las nubes y un gradiente de temperatura, parámetro del modelo. Para la estimación de la cota de las nubes se consideró los datos de humedad relativa y temperatura de la estación base, suponiendo que la presión de vapor en ese punto corresponde a la presión de vapor saturada.

La temperatura de la nieve se estimó igual a la del aire para temperatura bajo cero, e igual a 0°C cuando el aire tiene temperaturas positivas.

## 2.3 Balance de Agua en cada Banda.

### 2.3.1 Manto de Nieve.

Para establecer la ecuación de balance en el manto de nieve, se distinguen dos períodos estacionales: El primero corresponde al período invernal, en el cual la precipitación cae en forma de nieve, no produce escurrimiento inmediato y la evapotranspiración potencial corresponde a la evaposublimación desde la nieve. En este período, la evaporación se satisface con el manto de nieve existente y con la precipitación. El segundo período estacional corresponde al período estival que se caracteriza porque la precipitación cae en forma líquida y parte de ella escurre en forma inmediata. En este período la evapotranspiración potencial corresponde a la evaporación que sufre el agua en estado líquido y las fuentes están constituidas por la precipitación y la humedad del suelo.

El modelo supone que la precipitación cae en forma de nieve cuando la temperatura es menor que  $-2^{\circ}\text{C}$  y la altura menor o igual a 2.500 m. Para alturas superiores, basta con que la temperatura sea menor de  $5^{\circ}\text{C}$  para que nieve.

Consecuentemente a lo anterior, existen dos formas de establecer el balance hídrico en el manto de nieve. En el período invernal el manto de nieve se incrementa con la precipitación y se disminuye con la evaporación y el derretimiento. Por consiguiente, el equivalente de agua de cada banda al final del mes (HNF) es igual al valor inicial del período (HNI) más la precipitación (PR) menos la evaporación real (ER) y el derretimiento (DRT). La ecuación de balance es:

$$\text{HNF} = \text{HNI} + \text{PR} - \text{ER} - \text{DRT} \quad (8)$$

La evaporación real es el mínimo valor entre la nieve disponible y la evaporesublimación potencial del período. El derretimiento real del período corresponde al mínimo entre el derretimiento potencial del mes y la cantidad de nieve disponible. Del agua derretida una parte se convierte en escurrimiento inmediato (EI) y el resto se incorpora a la humedad del suelo. La fracción que escurre se calcula mediante un parámetro del modelo (CEN) como :

$$\text{EI} = \text{DRT} * \text{CEN} \quad (9)$$

Durante el período estival se supone que la precipitación cae en forma de lluvia y la evaporación afecta al agua líquida. En consecuencia, el manto de nieve sólo sufre ablación debido al derretimiento y el balance hídrico queda representado por:

$$\text{HNF} = \text{HNI} - \text{DRT} \quad (10)$$

Una fracción de la precipitación escurre en forma inmediata (ESCLLU) y esta proporción se calcula en función de dos parámetros del modelo (CEP, ENE).

$$\text{ESCLLU} = \text{CEP} * \text{PR}^{\text{ENE}} \quad (11)$$

El resto de la precipitación queda disponible para la evaporación. Una vez satisfecha la evaporación puede quedar agua sobrante disponible para incrementar la humedad del suelo.

Finalmente, la escorrentía superficial del período estival, es igual a la suma del escurrimiento proveniente de la lluvia y del derretimiento:

$$EI = ESCLLU + DRT * CEN \quad (12)$$

### 2.3.2 Balance de humedad en el suelo.

En cada banda, el suelo no saturado es capaz de retener agua hasta un valor máximo de humedad (HMAX), el cual es un parámetro del modelo. Si el total de humedad que se incorpora al suelo excede de este valor, el exceso constituye escurrimiento sub-superficial y además incrementa el acuífero subterráneo.

El contenido de humedad final del suelo (HSF) se calcula como la suma del contenido inicial (HSI), más los aportes del período y menos las extracciones. Para el período invernal(13) y estival(14) las ecuaciones son:

$$HSF = HSI + DRT (1 - CEN) \quad (13)$$

$$HSF = HSI + PR - ESCLLU - ER + DRT (1 - CEN) \quad (14)$$

El agua sobrante AS, o exceso sobre HMAX, produce escurrimiento sub-superficial (CESS) o percolación (PERC) de acuerdo con el valor que tome el parámetro CESS del modelo.

$$ESS = AS * CESS \quad (15)$$

$$PERC = AS * (1 - CESS) \quad (16)$$

### 2.3.3 Balance del acuífero subterráneo

El balance del acuífero subterráneo se modela para la cuenca en su conjunto, suponiendo que cumple la relación de un embalse lineal.

La escorrentía subterránea (EZ) se evalúa en función de la percolación total (PERCT), del caudal subterráneo inicial (QZ0) y de un parámetro del modelo (CK), como :

$$EZ = PERCT + CK (QZ0 - PERCT) (1 - EXP (-1/CK)) \quad (17)$$



El caudal subterráneo inicial corresponde al obtenido al final del mes anterior, siendo el valor inicial de la simulación un parámetro del modelo. La percolación total de la cuenca (PERCT) es la suma ponderada de la percolación producida en cada sub-área o banda.

Finalmente el escurrimiento total (ETOT) de la cuenca, en el período, expresado por unidad de área, es la suma de los volúmenes escurridos subterráneamente, subsuperficialmente y superficialmente.

$$ETOT = EZ + \sum \text{área } (i) (ES(i) + ESS (i)) / \text{área total} \quad (18)$$

El modelo descrito tiene 15 parámetros que deben ser calibrados para representar cada situación particular.

### 3. APLICACIONES Y RESULTADOS

El modelo desarrollado fue calibrado a partir de la estadística disponible en Aconcagua en Río Blanco para el período Mayo 1976-Abril 1989. Esta cuenca tiene un área de 862,41 Km<sup>2</sup>, estando su cota de salida a los 1420 m.s.n.m. y su cota máxima en los 5900 m.s.n.m., en el sector alto del río Blanco.

Para la calibración se utilizó la información de precipitación total mensual, temperatura media mensual, humedad relativa, número de horas de sol y número de días de lluvia registrados en la estación meteorológica de Lagunitas, controlada por la División Andina de CODELCO. Los datos de velocidad del viento se obtuvieron de la estación Vilcuya, controlada por la D.G.A.

El resultado de la calibración se muestra en la Figura N° 2. El coeficiente de correlación de los caudales generados con respecto a los originales alcanza en este caso a 0,852. Se puede observar que existe una buena concordancia entre los valores observados y simulados.

Para la validación del modelo se utilizó la estadística disponible, para el mismo período anterior, en la estación Blanco en Río Blanco. Esta cuenca tiene una superficie de 378 Km<sup>2</sup>. La cota de salida de la cuenca se ubica a los 1420 m.s.n.m. en tanto que la cota máxima alcanza los 5900 m.s.n.m. El resultado de la validación se muestran en la Figura N° 3. El coeficiente de correlación de los caudales generados con respecto a los originales alcanza en este caso a 0,814.

Adicionalmente el modelo fué calibrado para Juncal en Juncal y Colorado en Colorado, también de la hoya del Aconcagua y para Olivares antes Colorado de la hoya del Maipo. En la totalidad de los casos se utilizó el mismo conjunto de datos considerado en la calibración de Aconcagua en Río Blanco, salvo en el caso de Colorado en Colorado en que se utilizó la información de precipitación y N° de días de lluvia registrados en Rieciños. En las Figuras N° 4 y 5 se entregan los resultados obtenidos en cada caso . Se ha incluido en cada figura los estadígrafos indicadores de la bondad del ajuste .

En síntesis las aplicaciones realizadas en las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo muestran que el modelo representa adecuadamente los caudales observados y que su utilización es relativamente simple. Constituye pues una herramienta recomendable para evaluar recursos en zonas nivales exigiendo una información meteorológica razonable.

#### 4. REFERENCIAS

- Bras, R. (1990) . Hydrology. An Introduction to Hydrologic Science. Addison-Wesley Pub.Co.
- CICA Consultores - Comisión Nacional de Riego. (1979). Estudio Integral de riego de los Valles Aconcagua, Putaendo, Ligua y Petorca.
- Corps of Engineers, U.S. ARMY .(1956) .Snow Hydrology. Portland, Oregon.
- Doorenbos J. y Pruitt W.O.(1977) Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage.Paper N° 24, Naciones Unidas, Roma.
- Espíldora B. y Stowhas L.(1968). Instalación y operación de un Laboratorio de Hidrología de Nieves; U. de Chile.
- Linsley, Kohler y Paulhus (1975) Hydrology for Engineers 2a ed. Mc Graw Hill. Nueva York.
- Morrison Knudsen - M. Nenadovich Ingenieros.(1982). Estudios Preliminares de Desarrollo a Largo Plazo División Andina. Estudio Hidrológico Informe N° 1.

MODELO DE GENERACION SINTETICA  
 ACONCAGUA EN RIO BLANCO  
 MAYO 1976 - ABRIL 1989

Estadisticas indicadoras de la bondad del ajuste

Error Medio Cuadratico	=	107,730
Error Relativo Medio	=	33,588 %
Error Maximo Absoluto	=	30,139m <sup>3</sup> /s
Varianza Caudales Originales	=	392,422
Medio de Caudales Originales	=	24,969m <sup>3</sup> /s
Medio de Caudales Simulados	=	24,534m <sup>3</sup> /s
Coefficiente de Correlacion	=	0,952

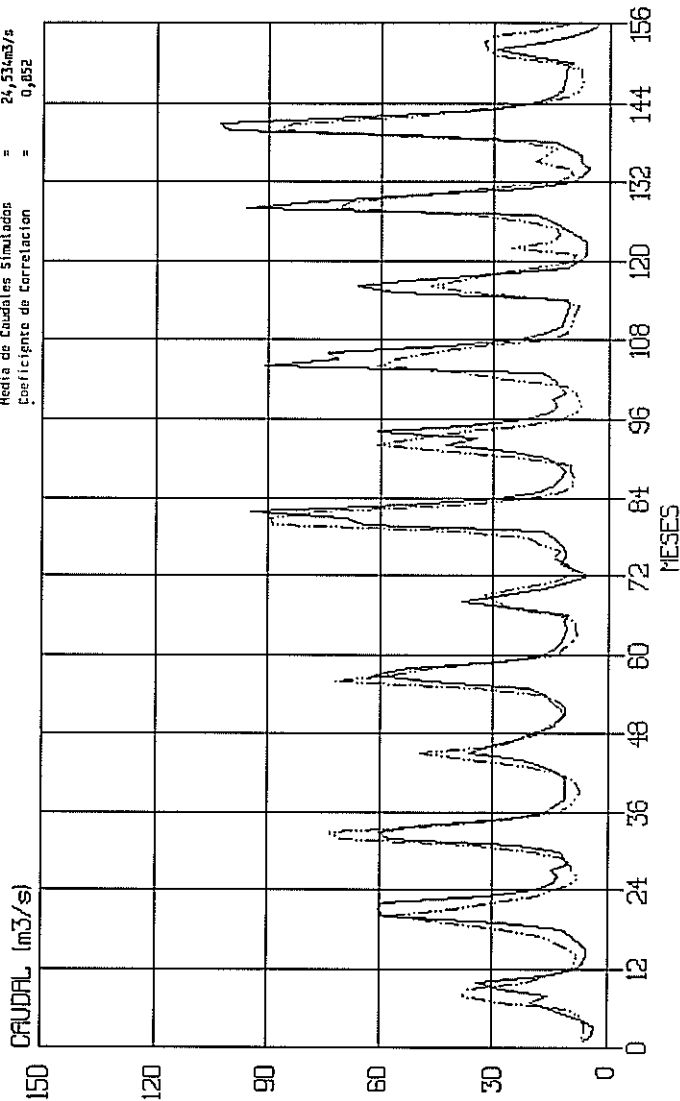
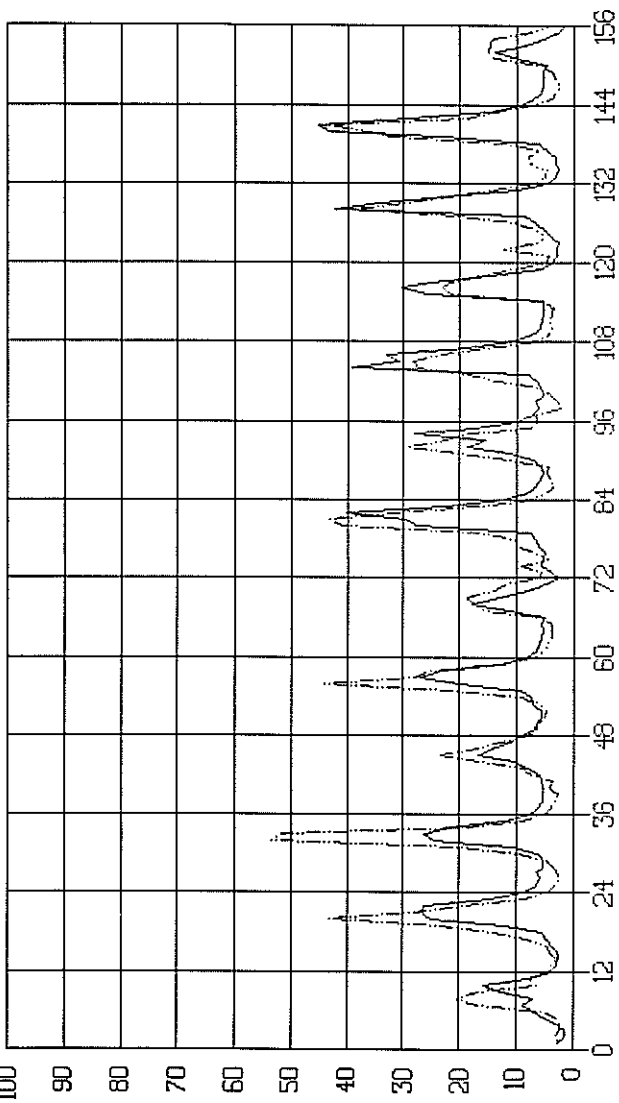


FIGURA 2

MODELO DE GENERACION SINTETICA  
 BLANCO EN RIO BLANCO  
 MAYO 1976 - ABRIL 1989

CAUDAL (m<sup>3</sup>/s)



MESES

--- Caudal Medido  
 — Caudal Generado

FIGURA 3

Estadísticos indicadores de la bondad del ajuste

Error Medio Cuadrático	=	40,764
Error Relativo Medio	=	39,873 %
Error Máximo Absoluto	=	24,530m <sup>3</sup> /s
Varianza Caudales Originales	=	120,809
Media de Caudales Originales	=	12,282m <sup>3</sup> /s
Media de Caudales Simulados	=	10,740m <sup>3</sup> /s
Coefficiente de Correlación	=	0,814

# MODELO DE GENERACION SINTETICA COLORADO EN COLORADO MAYO 1976 - ABRIL 1989

Estadísticos indicadores de la bondad del ajuste

Error Medio Cuadrático	=	101,156
Error Relativo Medio	=	196,685 %
Error Máximo Absoluto	=	42,205m <sup>3</sup> /s
Varianza Caudales Originales	=	270,993
Medida de Caudales Originales	=	11,175m <sup>3</sup> /s
Medida de Caudales Simulados	=	13,810m <sup>3</sup> /s
Coefficiente de Correlación	=	0,792

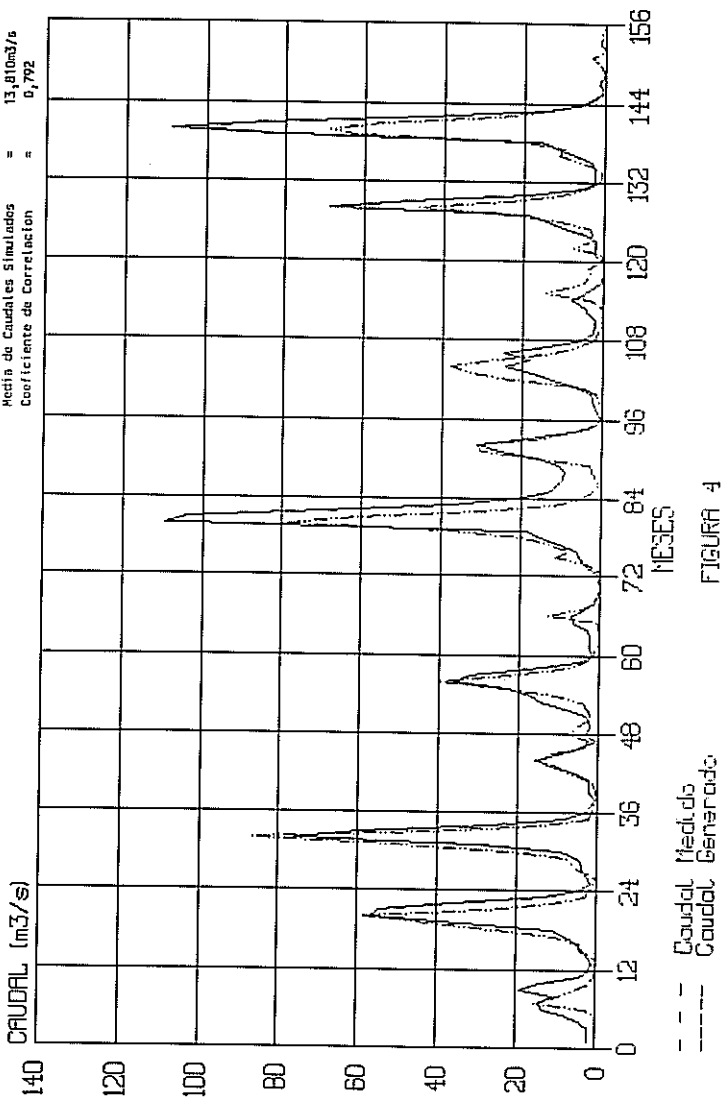
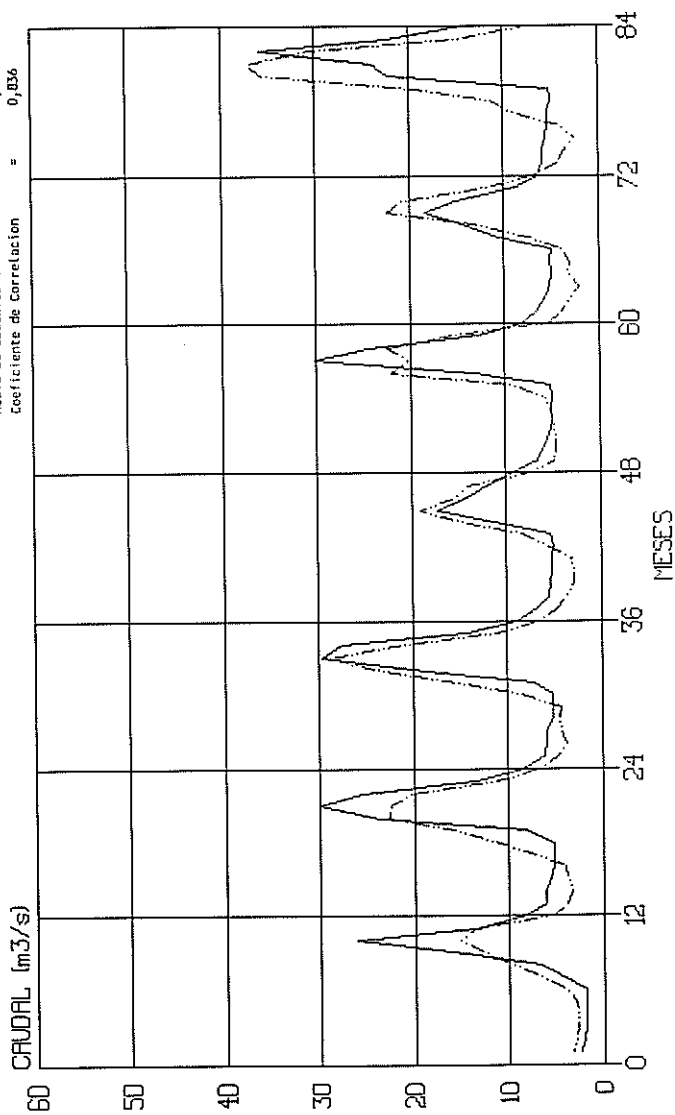


FIGURA 4

MODELO DE GENERACION SINTETICA  
 OLIVARES ANTES COLORADO  
 MAYO 1976 - ABRIL 1983

Estadigrafos indicadores de la bondad del ajuste

-----	=	19,803
Error Medio Cuadratico	=	39,100 %
Error Relativo Medio	=	14,300m <sup>3</sup> /s
Error Maximo Absoluto	=	65,967
Varianza Caudales Originales	=	10,196m <sup>3</sup> /s
Media de Caudales Originales	=	10,265m <sup>3</sup> /s
Media de Caudales Simulados	=	0,036
Coefficiente de Correlacion	=	



----- Caudal Medido  
 \_\_\_\_\_ Caudal Generado

FIGURA 5