

MASHWIN
MODELO DE ANÁLISIS DE SERIES HIDROLÓGICAS

MANUAL DE USUARIO

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA HIDRAULICA Y MEDIO AMBIENTE
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

MODELO DE ANÁLISIS DE SERIES HIDROLÓGICAS : MASHWIN

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MODELO.	2
3. INTERFACE GRÁFICA.	26
3.1. <i>Contenido de las pantallas en los distintos niveles.</i>	26
3.2. <i>Generalización.</i>	37
2.3. <i>Gráficos.</i>	38
4. MÓDULOS DE CÁLCULO	40
4.1. <i>NIVEL 1: MÓDULO DE ANÁLISIS MENSUAL Y ANUAL</i>	40
4.2. <i>NIVEL 2(a): MÓDULO DE NORMALIZACIÓN MENSUAL</i>	41
4.3. <i>NIVEL 2(b): MÓDULO DE NORMALIZACIÓN ANUAL</i>	43
4.4. <i>NIVEL 3(a): MÓDULO DE TIPIFICACIÓN MENSUAL</i>	44
4.5. <i>NIVEL 3(b): MÓDULO DE TIPIFICACIÓN ANUAL</i>	45
4.6. <i>NIVEL 4: MÓDULO DE CALIBRACIÓN MENSUAL Y ANUAL DE MODELOS</i>	46
4.7. <i>NIVEL 5: MÓDULO DE GENERACIÓN MENSUAL Y ANUAL DE SERIES SINTÉTICAS</i>	49

MODELO DE ANÁLISIS DE SERIES HIDROLÓGICAS : MASHWIN

1. INTRODUCCIÓN.

El modelo de análisis de series hidrológicas es un modelo de análisis estocástico de tipo mensual, destinado al estudio de series temporales de aportaciones pertenecientes a un sistema hidráulico. Su utilidad consiste en ser una potente herramienta de cálculo y análisis para la definición de la estructura estocástica que mejor se ajusta a un conjunto de series temporales de aportaciones. Lo cual ayuda a conocer mejor el sistema hidráulico analizado y es un resultado previo para la generación de series sintéticas condicionadas, que se realizará más adelante con otros modelos, aunque también puede realizarse con este.

El modelo MASWIN combina; para la realización del análisis de las series temporales de aportaciones correspondientes a un sistema hidráulico; una modelación periódica estocástica mensual mediante una modelación autoregresiva y de media móvil (ARMA) multivariada, con una desagregación espacial mensual por el modelo condensado de Lane. Además el modelo realiza una gran variedad de tests de ajuste para todas las fases del análisis.

El modelo ha sido fraccionado en un conjunto de aplicaciones que permiten realizar un análisis detallado paso a paso de un conjunto de series hidrológicas. Y que a su vez es coordinado en todos los pasos parciales por una interface de usuario que permite acceder automáticamente a todas las fases del análisis.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A continuación se explican los fundamentos teóricos de cada uno de los procesos y análisis considerados en el modelo de análisis de series hidrológicas.

2.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El modelo calcula tres grupos de estadísticos: a) *estadísticos básicos*, conformados por las medias, las desviaciones típicas y los coeficientes de sesgo de las series de caudales propiamente dichas, b) *estadísticos de sequía*, conformados por las medias, máximos y desviaciones típicas de la duración, la intensidad y la magnitud de las sequías para distintos umbrales; y c) *estadísticos de almacenamiento*, que consisten en las capacidades de embalse de las series de caudales para diferentes umbrales, así como el rango ajustado, el rango ajustado reescalado y el coeficiente de Hurst para cada serie de caudales.

2.1.1. Estadísticos básicos

Cuando se trata de series mensuales, se calculan las medias, las desviaciones típicas y los coeficientes de sesgo para cada uno de los 12 meses del año, de acuerdo con las Ecs. (1).

$$\bar{Q}_\tau = \frac{\sum_{v=1}^N Q_{v,\tau}}{N} \quad s_\tau = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^N (Q_{v,\tau} - \bar{Q}_\tau)^2}{N-1}} \quad g_\tau = \frac{N \sum_{v=1}^N (Q_{v,\tau} - \bar{Q}_\tau)^3}{(N-1)(N-2)s_\tau^3} \quad (1)$$

Donde: \bar{Q}_τ : Media mensual de los caudales del mes τ .

$Q_{v,\tau}$: Caudal del mes τ del año v ($v=1, \dots, N$).

N : Número total de años.

s_τ : Desviación típica mensual del mes τ .

g_τ : Coeficiente de sesgo mensual del mes τ .

Si la modelación se hace sobre series anuales, dichos estadísticos se calculan según las Ecs. (2), y de cada uno de ellos habrá un solo valor para cada serie de caudales.

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{v=1}^N Q_v}{N} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^N (Q_v - \bar{Q})^2}{N - 1}} \quad g = \frac{\sum_{v=1}^N (Q_v - \bar{Q})^3}{(N - 1)(N - 2)s^3} \quad (2)$$

Donde: \bar{Q} : Media anual de la serie de caudales.

Q_v : Caudal del año v ($v=1, \dots, N$).

N : Número total de años.

s : Desviación típica anual de la serie de caudales.

g : Coeficiente de sesgo anual de la serie de caudales.

2.1.2. Estadísticos de sequía

Para describir los estadísticos correspondientes a esta categoría, conviene definir previamente algunos conceptos que se emplean en la determinación de dichos estadísticos.

- **UMBRAL**: Fracción del caudal medio de toda la serie de caudales históricos, que se emplea para determinar una situación de *sequía* o para determinar el volumen de un embalse en el cual almacenar una cierta cantidad de agua. Un umbral se puede asimilar a una línea horizontal superpuesta sobre el hidrograma de toda la serie de caudales a una altura igual a esa fracción del caudal medio antes mencionada.
- **DÉFICIT**: Caudal menor que el umbral.
- **SEQUÍA**: Sucesión de períodos (años o meses) consecutivos en estado de déficit. Está caracterizada básicamente por tres elementos: *duración*, *intensidad* y *magnitud*, que son propiamente los estadísticos que se calculan dentro de esta categoría.

Ahora bien, los estadísticos de sequía propiamente dichos son los que se definen a continuación.

- **DURACIÓN**: Número de períodos consecutivos en estado de déficit.

- INTENSIDAD: Máximo déficit de todos los que conforman la sequía.
- MAGNITUD: Volumen total de los déficits de la sequía.

El programa forma la serie de sequías que corresponde a la serie de caudales de cada estación para cada umbral, y le calcula las medias, máximos y desviaciones típicas de duración, intensidad y magnitud, Ecs. (2a).

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i, \quad \gamma_{\max} = \text{Máx}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n), \quad s_{\gamma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \bar{\gamma})^2}{n-1}} \quad (2a)$$

con

$$\gamma = \begin{cases} \text{Duración} \\ \text{Intensidad} \\ \text{Magnitud} \end{cases}$$

Donde n es el número de sequías para una estación y un umbral dados.

2.1.3. Estadísticos de almacenamiento

Dentro de este grupo se calcula la *capacidad de embalse* correspondiente a un umbral dado (o varios), necesaria para almacenar el volumen de agua requerido para abastecer cien por cien una demanda constante equivalente al valor del umbral. Esto se hace mediante el algoritmo de los *Picos Secuenciales*, según el cual, la capacidad de embalse es el máximo de los valores calculados con la Ec. (3).

$$S_t = \begin{cases} U_t - Q_t + S_{t-1}, & \text{si } S_t > 0 \\ 0, & \text{si } S_t < 0 \end{cases} \quad \text{para } t = 1, 2, 3, \dots, 2N \quad (3)$$

Donde: S_t : Volumen de embalse en el período t ($S_0=0$).

U_t : Umbral en el período t. Es constante, y no puede superar el valor del caudal medio de toda la serie.

Q_t : Caudal en el período t . De $N+1$ a $2N$ la serie se repite, con el fin de tener en cuenta aquellos casos en los que la secuencia de caudales críticos (menores que el umbral) están al final de la serie.

N : Número de períodos (meses o años) de la serie.

Además de la capacidad de embalse, se calculan el rango ajustado, el rango ajustado reescalado y el coeficiente de Hurst, de acuerdo con las ecuaciones. (4) a (6).

$$R^* = \text{Máx}(S_0, S_1, \dots, S_N) - \text{Mín}(S_0, S_1, \dots, S_N) \quad (4)$$

con

$$S_t = S_{t-1} + (Q_t - Q_m), \quad t = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$R^{**} = R^*/s_N, \quad \text{siendo} \quad s_N = \sqrt{\sum_{t=1}^N (Q_t - Q_m)^2 / N} \quad (5)$$

$$K = \frac{\ln(R^{**})}{\ln(N/2)} \quad (6)$$

Donde: Q_m : Caudal medio de toda la serie.

R^* : Rango ajustado.

R^{**} : Rango ajustado reescalado.

s_N : Desviación típica de toda la serie.

K : Coeficiente de Hurst.

2.2. NORMALIZACIÓN DE LAS SERIES

Esta fase consiste en transformar las series de caudales originales ($Q_{v,\tau}$ o Q_v , según sean las series mensuales o anuales) mediante los distintos tipos de funciones indicadas en (7), con el fin de que se conviertan en series normalizadas originales ($x_{v,\tau}$ o x_v , según sean las series mensuales o anuales), es decir, que adopten una distribución de probabilidad normal.

$$\begin{aligned}
 x_{v,\tau} &= \sqrt{Q_{v,\tau}} & x_{v,\tau} &= \ln(Q_{v,\tau} + 1) & x_{v,\tau} &= \ln[\ln(Q_{v,\tau} + 1) + 1] & x_{v,\tau} &= (Q_{v,\tau} - a)^b \\
 x_v &= \sqrt{Q_v} & x_v &= \ln(Q_v + 1) & x_v &= \ln[\ln(Q_v + 1) + 1] & x_v &= (Q_v - a)^b
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Los unos en las funciones logarítmicas evitan la aparición de resultados negativos en las series normalizadas y las indeterminaciones matemáticas.

Cuando las series son mensuales se tiene la posibilidad de aplicar funciones normalizadoras diferentes a los distintos meses. La sola aplicación de estas funciones no garantiza la normalidad de las series transformadas. Para verificar tal condición, el programa calcula el coeficiente de sesgo de las series normalizadas y, mediante la expresión (8), evalúa el intervalo de normalidad del sesgo (Snedecor y Cochran, 1967. Citados por Salas et al., 1980).

$$\begin{aligned}
 & \left[-3.9601N^{-0.4598}, +3.9601N^{-0.4598} \right] \quad \text{para} \quad N < 150 \\
 & \left[-1.96\sqrt{\frac{6}{N}}, 1.96\sqrt{\frac{6}{N}} \right] \quad \text{para} \quad N \geq 150
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Donde N es el número de años de la serie (aun cuando ésta sea mensual).

Se considera estadísticamente que si el valor del coeficiente de sesgo de la serie de caudales está dentro del intervalo (8), la serie está distribuida normalmente.

Para aplicar la normalización potencial (última de las cuatro indicadas en (7)) se deben calibrar previamente los parámetros *a* y *b* de dicha función, cuidando que *a* no vaya a tomar valores superiores al mínimo de los caudales de la serie. También existe la opción de hacer esa calibración de parámetros mediante el programa en forma iterativa, dándole valores a *a* y *b* y observando en los archivos de resultados el valor del sesgo y el de los límites del intervalo de normalidad.

2.3. AJUSTE EN SERIES DE FOURIER (SERIES MENSUALES)

Cuando se analizan series mensuales de caudales, es normal encontrar que la variación de sus medias y desviaciones típicas mensuales a lo largo del año presenta periodicidades; es decir, su representación gráfica puede asemejarse de

algún modo a funciones del tipo sinusoidal. Esta propiedad hace posible que dichos estadísticos puedan ser representados por funciones aproximadas mediante el desarrollo en series de Fourier, con el objetivo de reducir el número global de parámetros del modelo estocástico. No hay que perder de vista que los estadísticos que se emplean para tipificar las series de caudales constituyen parámetros de la modelación: por cada serie (mensual) existen 12 medias y 12 desviaciones típicas, es decir 24 parámetros. Con el ajuste de Fourier, esos parámetros se pueden reducir incluso hasta una sexta parte.

Con la aplicación de esta técnica se busca pues, respetar hasta donde sea razonable el principio de parsimonia estadística, al cual debe prestársele especial atención sobre todo cuando se trata de un modelo multivariado con un número importante de estaciones.

El procedimiento en el programa consiste en calcular mediante las Ecs. (9) a (11) los coeficientes A_j y B_j de Fourier para todos los armónicos, que en este caso, por ser series mensuales, es igual a $\omega/2=12/2=6$ armónicos.

$$A_j = \frac{2}{\omega} \sum_{\tau=1}^{\omega} u_{\tau} \cos\left(\frac{2\pi j\tau}{\omega}\right) \quad j = 1, \dots, h-1 \quad (9)$$

$$A_j = \frac{1}{\omega} \sum_{\tau=1}^{\omega} u_{\tau} \cos\left(\frac{2\pi j\tau}{\omega}\right) \quad j = h \quad (10)$$

$$B_j = \frac{2}{\omega} \sum_{\tau=1}^{\omega} u_{\tau} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi j\tau}{\omega}\right) \quad j = 1, \dots, h \quad (11)$$

con

$$u_{\tau} = \begin{cases} x_{\tau} \\ s_{x_{\tau}} \end{cases}$$

Donde: ω : Número de períodos del año (12, por ser series mensuales).

τ : Orden del mes en el año.

u_τ : Media (o desviación típica) mensual de la serie normalizada para el mes τ .

j : Orden del armónico.

h : Número total de armónicos. Es $\omega/2$, ya que ω es par.

Posteriormente se calcula la representación en series de Fourier de los valores de la media y desviación típica mensual de la serie normalizada, mediante la Ec. (12) en la cual se consideran todos los armónicos.

$$v_\tau = \bar{u} + \sum_{j=1}^h [A_j \cos(2\pi j\tau / \omega) + B_j \text{sen}(2\pi j\tau / \omega)] \quad \tau = 1, \dots, \omega \quad (12)$$

con

$$\bar{u} = \frac{1}{\omega} \sum_{\tau=1}^{\omega} u_\tau$$

Donde: v_τ : Media (o desviación típica) mensual de la serie normalizada ajustada por Fourier para el mes τ .

\bar{u} : Valor medio de las medias (o desviaciones típicas) mensuales de la serie normalizada.

Con los coeficientes de Fourier se calcula la varianza explicada por cada armónico (Ec. (13)), con el fin de construir el *periodograma acumulado* (gráfico en el que se representa el porcentaje acumulado de varianza explicada en función del número de armónicos) y decidir, a partir de éste, el número de *armónicos significativos* (los que contribuyen al porcentaje acumulado de varianza explicada) para la media y la desviación típica mensual de la serie normalizada.

$$C_j^2 = A_j^2 + B_j^2 \quad (13)$$

Donde $C_j^2/2$ es la varianza explicada por el armónico j .

Con la varianza explicada y la varianza total se obtiene el porcentaje de la varianza explicada por cada uno de los armónicos, tal como se indica en la Ec. (14).

$$\%V_{\text{exp}} = \frac{C_j^2}{2s_u^2} \quad (14)$$

con

$$s_u^2 = \frac{\sum_{\tau=1}^{\omega} (u_{\tau} - \bar{u})^2}{\omega}$$

Donde: $\%V_{\text{exp}}$: Porcentaje de la varianza total explicada de las medias (o desviaciones típicas) mensuales de la serie normalizada antes del ajuste por Fourier.

s_u^2 : Varianza de las medias (o desviaciones típicas) mensuales de las series normalizadas.

Una vez definido el porcentaje acumulado de varianza que se acepta sea explicada por los estadísticos ajustados mediante Fourier, se entra en el periodograma acumulado de la media, se selecciona el número de armónicos significativos y se calcula la media ajustada en función de dichos armónicos, tal como lo indica la Ec. (15). Se hace exactamente lo mismo con la desviación típica.

$$\hat{v}_{\tau} = \bar{u} + \sum_{j=1}^{h_s} \left[A_j \cos\left(\frac{2\pi j\tau}{\omega}\right) + B_j \text{sen}\left(\frac{2\pi j\tau}{\omega}\right) \right], \quad j = h_1, \dots, h_s \quad (15)$$

con

$$\hat{v}_{\tau} = \begin{cases} \hat{x}_{\tau} \\ \hat{s}_{x_{\tau}} \end{cases}$$

Donde: \hat{x}_{τ} : Media mensual del mes τ de la serie normalizada.

\hat{s}_{x_τ} : Desviación típica mensual del mes τ de la serie normalizada.

h_1 : Primer armónico significativo.

h_s : Último armónico significativo.

Para ver la calidad del ajuste de los estadísticos hecho mediante el análisis de Fourier, es recomendable representar en la misma gráfica las medias antes y después de ser ajustadas, al igual que las desviaciones típicas, y juzgar a partir de dicho gráfico si merece la pena o no utilizar los estadísticos ajustados. Se debe ser muy cuidadoso a la hora de tomar esta decisión, ya que las diferencias entre unos y otros estadísticos pueden conducir a distorsiones importantes en los valores de los caudales sintéticos, y por tanto, ir en detrimento de los cálculos durante la aplicación del modelo.

2.4. TIPIFICACIÓN DE LAS SERIES Y CORRELACIONES

Después de tener las series de caudales normalizadas se procede a tipificarlas mediante la Ec. (16), con el fin de eliminar las periodicidades –en las series mensuales– y llevarlas a una misma “escala”, ya que así resultan más evidentes y explicables las diferencias entre ellas. De esta manera entonces, se pueden evaluar las correlaciones entre las distintas series, las cuales sirven esencialmente para establecer el tipo de modelación, a partir de las matrices de correlación cruzada y de las funciones de autocorrelación.

$$\text{S. mensuales: } z_{v,\tau} = \frac{x_{v,\tau} - \hat{x}_\tau}{\hat{s}_{x_\tau}} \qquad \text{S. anuales: } z_v = \frac{x_v - \hat{x}}{\hat{s}_x} \qquad (16)$$

2.4.1. Funciones de autocorrelación

A continuación, el programa calcula las funciones de autocorrelación de las series tipificadas (funciones de autocorrelación muestrales) y los límites del intervalo de independencia temporal (Anderson, 1941. Citado por Salas et al., 1980), mediante las Ecs. (17) y (18) respectivamente. Estas funciones sirven para conocer mejor la estructura de dependencia temporal de las series, lo cual da una idea del orden o tamaño del modelo que se les debe ajustar. Esto se hace cotejando las funciones de autocorrelación teóricas de los modelos con las muestrales para saber, según la similitud entre unas y otras, cuál de ellos resulta más apto.

$$r_k(z) = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (z_{t+k} - \bar{z})(z_t - \bar{z})}{\sum_{t=1}^N (z_t - \bar{z})^2} \quad (17)$$

$$\left[\frac{-1 - 1.96\sqrt{N-k-1}}{N-k}, \frac{-1 + 1.96\sqrt{N-k-1}}{N-k} \right] \quad (18)$$

- Donde: $r_k(z)$: Coeficiente de autocorrelación para un desfase temporal k .
 z_t : Caudal normalizado y tipificado en el período (mes o año) t . En las series mensuales equivale a $z_{v,\tau}$ con $t=12(v-1)+\tau$. (v : año, $v=1, \dots, N$); en las series anuales es z_v .
 \bar{z} : Media de toda la serie tipificada.
 N : Número total de caudales. Es el mismo para todas las series.

2.4.2. Matrices de correlación cruzada

A continuación, el programa calcula (19) las matrices de correlación cruzada \mathbf{M}_k para los distintos intervalos de desfase temporal, k , especificados por el modelador.

$$\mathbf{M}_k(z) = \begin{bmatrix} r_k^{1,1}(z) & \dots & r_k^{1,n}(z) \\ \vdots & & \vdots \\ r_k^{n,1}(z) & \dots & r_k^{n,n}(z) \end{bmatrix} \quad r_k^{ij}(z) = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (z_{t+k}^{(i)} - \bar{z}^{(i)})(z_t^{(j)} - \bar{z}^{(j)})}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (z_t^{(i)} - \bar{z}^{(i)})^2 \sum_{t=1}^N (z_t^{(j)} - \bar{z}^{(j)})^2}} \quad (19)$$

- Donde: $r_k^{ij}(z)$: Coeficiente de correlación cruzada entre las series i y j para un desfase temporal k .
 $z_t^{(i)}$: Caudal normalizado y tipificado de la serie i en el período (mes o año) t .
 n : Número de estaciones de la modelación multivariada.

El cálculo de las matrices de correlación cruzada se hace con el fin de a) conocer la interdependencia que pueda existir entre las series y decidir si la modelación debe ser o no multivariada; b) seleccionar los grupos de estaciones en un esquema de desagregación espacial; c) calcular las matrices de parámetros de los

modelos estocásticos. Las evaluaciones correspondientes a a) y b) se hacen sobre la matriz de $k=0$, y los cálculos de c) se realizan sobre las matrices de $k=0, 1, 2$.

2.5. MODELOS ESTOCÁSTICOS MULTIVARIADOS

el programa dispone de tres tipos de modelos estocásticos para la generación de series sintéticas: a) tipo ARMA; b) de DESAGREGACIÓN ESPACIAL; y c) de DESAGREGACIÓN TEMPORAL.

2.5.1. Modelos tipo ARMA

El programa tiene tres modelos que pertenecen al grupo de los modelos Auto-Regresivos de Media Móvil de orden (p, q) , es decir con p parámetros autorregresivos y q parámetros de media móvil: ARMA(p, q). Estos modelos tienden a conservar los estadísticos de primer orden de las series muestrales: media y desviación típica y las primeras p autocorrelaciones. Debido a estas características resultan bastante útiles cuando se trata de generar series de caudales futuras equiprobables a la serie histórica.

El programa emplea modelos ARMA de parámetros constantes cuya formulación general está dada por la Ec. (20). Cuando las series son mensuales, los modelos de parámetros constantes, en oposición a los de parámetros periódicos, resultan más consecuentes con el principio de parsimonia estadística (menos parámetros) y en la mayoría de los casos resultan suficientemente adecuados para la modelación de dichas series.

$$\{Z\}_t = [\Phi]_1 \{Z\}_{t-1} + [\Phi]_2 \{Z\}_{t-2} + \dots + [\Phi]_p \{Z\}_{t-p} + [\Theta]_0 \{\varepsilon\}_t - [\Theta]_1 \{\varepsilon\}_{t-1} - \dots - [\Theta]_q \{\varepsilon\}_{t-q} \quad (20)$$

Donde: $\{Z\}_t$: Vector de caudales del período (mes o año) t .

$[\Phi]_p$: Matriz de parámetros autorregresivos.

$[\Theta]_q$: Matriz de parámetros de media móvil.

$\{\varepsilon\}_t$: Vector de residuos del período t (valores aleatorios independientes entre sí y normalmente distribuidos con media cero y varianza unitaria).

Modelo AR(1)

Es el modelo autorregresivo puro más simple, Ec. (21). Representa el caudal del intervalo de tiempo t como una función del caudal del período precedente $t-1$ y una variable aleatoria independiente y normalmente distribuida de media cero y varianza unitaria, ε .

$$\{Z\}_t = [\Phi]_1 \{Z\}_{t-1} + [\Theta]_0 \{\varepsilon\}_t \quad (21)$$

el programa calcula las matrices de parámetros $[\Phi]_1$ y $[\Theta]_0$ mediante un procedimiento de estimación basado en el método de los momentos (Matalas, 1967. Citado por Salas et al., 1980); dichas matrices están dadas por las Ecs. (22) y (23), siendo necesario resolver esta última para $[\Theta]_0$ por medio del algoritmo de descomposición de Cholesky.

$$[\Phi]_1 = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_0^{-1} \quad (22)$$

$$[\Theta]_0 [\Theta]_0^T = \mathbf{M}_0 - [\Phi]_1 \mathbf{M}_1^T \quad (23)$$

Las componentes de la matriz $[\Theta]_0$ son calculadas pues, de acuerdo con el siguiente procedimiento.

Se hace

$$[\Theta]_0 [\Theta]_0^T = \mathbf{D}$$

Esta ecuación tiene un número infinito de soluciones para $[\Theta]_0$, pero si se asume que dicha matriz es triangular inferior, y si \mathbf{D} es una matriz definida positiva o semidefinida positiva, los elementos de $[\Theta]_0$ pueden hallarse (Lane, 1979. Citado por Salas et al., 1980) mediante el algoritmo dado por las Ecs. (24).

$$\theta_{ki} = 0 \quad \forall k < i$$

$$\theta_{ki} = 0 \quad \forall k \geq i, \quad \text{cuando} \quad d_{ii} - \sum_{j < i} (\theta_{ij})^2 \leq 0 \quad (24)$$

$$\theta_{ki} = \frac{d_{ki} - \sum_{j<i} \theta_{ij} \theta_{kj}}{\left[d_{ii} - \sum_{j<i} (\theta_{ij})^2 \right]^{1/2}} \quad \forall k \geq i \quad \text{cuando} \quad d_{ii} - \sum_{j<i} (\theta_{ij})^2 > 0$$

Modelo AR(2)

En este modelo, Ec. (25), el caudal de un período t es función de los caudales de los dos períodos anteriores t-1 y t-2, y de una variable aleatoria, ε , normalmente distribuida con media cero, varianza unitaria y no correlacionada.

$$\{Z\}_t = [\Phi]_1 \{Z\}_{t-1} + [\Phi]_2 \{Z\}_{t-2} + [\Theta]_0 \{\varepsilon\}_t \quad (25)$$

El modelo queda calibrado una vez se resuelven las ecuaciones matriciales (26) a (28) (Salas y Pegram, 1978. Citado por Salas et al., 1980), que dan como resultado las matrices de parámetros $[\Phi]_1$, $[\Phi]_2$ y $[\Theta]_0$.

$$[\Phi]_1 = [M_1 - M_2 M_0^{-1} M_1^T] [M_0 - M_1 M_0^{-1} M_1^T]^{-1} \quad (26)$$

$$[\Phi]_2 = [M_2 - M_1 M_0^{-1} M_1] [M_0 - M_1^T M_0^{-1} M_1]^{-1} \quad (27)$$

$$[\Theta]_0 [\Theta]_0^T = M_0 - ([\Phi]_1 M_1^T + [\Phi]_2 M_2^T) \quad (28)$$

el programa evalúa las componentes de la matriz $[\Theta]_0$ de la misma manera que en el modelo AR(1).

Modelo ARMA(1,1)

A diferencia de los dos anteriores, este modelo, Ec. (29), incluye una componente de media móvil.

$$\{Z\}_t = [\Phi]_1 \{Z\}_{t-1} + [\Theta]_0 \{\varepsilon\}_t - [\Theta]_1 \{\varepsilon\}_{t-1} \quad (29)$$

Para el cálculo de sus matrices de parámetros, el programa lleva a cabo el siguiente proceso (O'Connell, 1974. Citado por Bras y Rodríguez-Iturbe, 1985).

Inicialmente se calcula la matriz $[\Phi]_1$, según lo indica la Ec. (30).

$$[\Phi]_1 = \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1^{-1} \quad (30)$$

Luego, por medio de una descomposición de Cholesky, se le da un valor inicial a la matriz $[\Theta]_0$, y se halla después la solución de la Ec. (31) en forma iterativa a partir de dicho valor inicial.

$$([\Theta]_0 [\Theta]_0^T)_j = \mathbf{F} - \mathbf{G}([\Theta]_0 [\Theta]_0^T)_{j-1}^{-1} \mathbf{G}^T \quad (31)$$

con

$$\mathbf{F} = \mathbf{M}_0 - [\Phi]_1 \mathbf{M}_1^T + \mathbf{G} [\Phi]_1^T$$

y

$$\mathbf{G} = [\Phi]_1 \mathbf{M}_0 - \mathbf{M}_1$$

Después de hallar la matriz $[\Theta]_0$, el programa calcula la matriz $[\Theta]_1$ mediante la Ec. (32).

$$[\Theta]_1 = \mathbf{G}([\Theta]_0^T)^{-1} \quad (32)$$

Funciones de autocorrelación teóricas

el programa calcula las funciones de autocorrelación teóricas multivariadas (FACT) correspondientes a los modelos multivariados AR(1) y AR(2), con el fin de que el modelador las emplee para cotejarlas con las funciones de autocorrelación muestrales (FACM), y así tener un elemento más de juicio a la hora de seleccionar el modelo ARMA más adecuado. De dos modelos dados, tiende a explicar mejor el comportamiento de las series muestrales aquél cuya FACT es más parecida a la FACM.

Para este cálculo, el programa evalúa las matrices teóricas de correlación cruzada (33) de cada modelo para tantos intervalos de desfase temporal k como el modelador especifique, y luego extrae los elementos de sus diagonales para conformar los correlogramas teóricos multivariados (FACT).

$$\mathbf{M}_k(z) = \begin{bmatrix} r_k^{1,1}(z) & r_k^{1,2}(z) & r_k^{1,3}(z) & \cdots & r_k^{1,n}(z) \\ r_k^{2,1}(z) & r_k^{2,2}(z) & r_k^{2,3}(z) & \cdots & r_k^{2,n}(z) \\ r_k^{3,1}(z) & r_k^{3,2}(z) & r_k^{3,3}(z) & \cdots & r_k^{3,n}(z) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_k^{n,1}(z) & r_k^{n,2}(z) & r_k^{n,3}(z) & \cdots & r_k^{n,n}(z) \end{bmatrix} \quad (33)$$

- Modelo AR(1)

$$\mathbf{M}_k = \{\Phi\}_{j_1} \mathbf{M}_{k-1} \quad \text{para } k > 0 \quad (34)$$

- Modelo AR(2)

$$\mathbf{M}_k = \{\Phi\}_{j_1} \mathbf{M}_{k-1} + \{\Phi\}_{j_2} \mathbf{M}_{k-2} \quad \text{para } k > 0 \quad (35)$$

En ambos casos, el cálculo se inicia a partir de la matriz muestral de correlación cruzada de orden cero, \mathbf{M}_0 . Cuando se evalúa la matriz \mathbf{M}_1 en el modelo AR(2) debe tenerse en cuenta que

$$\mathbf{M}_{-k} = \mathbf{M}_k^T$$

Las Ecs. (34) y (35) son la extensión al campo multivariado de las ecuaciones de Yule-Walker.

Modelación de las series residuales

Debido a que la selección del mejor modelo para generación se basa parcialmente en un conjunto de pruebas de bondad de ajuste sobre las series residuales, el programa obtiene dichas series a partir de los modelos previamente calibrados y les calcula los estadísticos que se requieren para esas pruebas, con el fin de que el modelador disponga de toda esta información para tomar su decisión.

Las series residuales se obtienen de las ecuaciones matriciales correspondientes a los modelos, tal como lo indican las Ecs. (36) a (38).

- Modelo AR(1)

$$\{\varepsilon\}_t = [\Theta]_0^{-1} (\{Z\}_t - [\Phi]_1 \{Z\}_{t-1}) \quad (36)$$

- Modelo AR(2)

$$\{\varepsilon\}_t = [\Theta]_0^{-1} (\{Z\}_t - [\Phi]_1 \{Z\}_{t-1} - [\Phi]_2 \{Z\}_{t-2}) \quad (37)$$

- Modelo ARMA(1,1)

$$\{\varepsilon\}_t = [\Theta]_0^{-1} (\{Z\}_t - [\Phi]_1 \{Z\}_{t-1} + [\Theta]_1 \{\varepsilon\}_{t-1}) \quad (38)$$

Después de tener calculadas las series residuales, el programa les evalúa a cada una de ellas su media, desviación típica y coeficiente de sesgo, Ecs. (39), y el intervalo de normalidad de éste, (expresión 8).

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{t=1}^N \varepsilon_t}{N} \quad s_\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (\varepsilon_t - \bar{\varepsilon})^2}{N-1}} \quad g_\varepsilon = \frac{N \sum_{t=1}^N (\varepsilon_t - \bar{\varepsilon})^3}{(N-1)(N-2)s_\varepsilon^3} \quad (39)$$

Donde: $\bar{\varepsilon}$: Media de la serie de residuos.

ε_t : Residuo del período t.

N: Número total de residuos de la serie.

s_ε : Desviación típica de la serie residual.

g_ε : Coeficiente de sesgo de la serie residual.

Posteriormente, el programa calcula las funciones de autocorrelación y los límites del intervalo de independencia temporal de las series residuales, de acuerdo con las expresiones (40) y (18) respectivamente.

$$r_k(\varepsilon) = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (\varepsilon_{t+k} - \bar{\varepsilon})(\varepsilon_t - \bar{\varepsilon})}{\sum_{t=1}^N (\varepsilon_t - \bar{\varepsilon})^2} \quad (40)$$

Donde $r_k(\varepsilon)$ es el coeficiente de autocorrelación para un desfase temporal k de la serie residual.

Finalmente, el programa calcula las matrices de correlación cruzada de las series residuales (41) para el mismo número de intervalos de desfase temporal empleado en el cálculo de las funciones de autocorrelación.

$$\mathbf{M}_k(\varepsilon) = \begin{bmatrix} r_k^{1,1}(\varepsilon) & \cdots & r_k^{1,n}(\varepsilon) \\ \vdots & & \vdots \\ r_k^{n,1}(\varepsilon) & \cdots & r_k^{n,n}(\varepsilon) \end{bmatrix} \quad r_k^{ij}(\varepsilon) = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (\varepsilon_{t+k}^{(i)} - \bar{\varepsilon}^{(i)}) (\varepsilon_t^{(j)} - \bar{\varepsilon}^{(j)})}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (\varepsilon_t^{(i)} - \bar{\varepsilon}^{(i)})^2 \sum_{t=1}^N (\varepsilon_t^{(j)} - \bar{\varepsilon}^{(j)})^2}} \quad (41)$$

Estos estadísticos, Ecs. (39) a (41), se requieren para realizar las pruebas de bondad de ajuste del modelo estocástico. el programa presenta en sus archivos de resultados la mayor parte de la información que se requiere para que el modelador revise cada una de esas pruebas, tal como se describe a continuación.

- IGUALDAD DE LA MEDIA A CERO. Las medias de las series residuales deben ser estadísticamente iguales a cero. Para verificar esta prueba, el modelador debe calcular los respectivos límites del intervalo de confianza de la prueba de hipótesis que se refiere a la igualdad de la media a un valor dado (en este caso cero). Para un nivel de confianza del 95%, los límites de dicho intervalo son los dados por la expresión (42).

$$\left[-1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right] \quad (42)$$

Donde: σ : Desviación típica de la serie residual.

N: Número de residuos. Es el mismo para todas las series.

- IGUALDAD DE LA DESVIACIÓN TÍPICA A UNO. Las desviaciones típicas de las series residuales deben ser estadísticamente iguales a uno. Para verificar esta prueba, el modelador debe calcular los respectivos límites del intervalo de confianza de la prueba de hipótesis que se refiere a la igualdad de la desviación típica a un valor dado (en este caso uno), por ejemplo la prueba Chi-cuadrado.

- **NORMALIDAD DE LAS SERIES RESIDUALES.** La distribución de probabilidad de las series residuales debe ser normal. Para revisar esta condición, el programa calcula los límites del intervalo de confianza del 95% de probabilidad, Ec. (8), dentro del cual debe estar el coeficiente de sesgo para que se pueda considerar estadísticamente que la serie tiene una distribución normal.
- **INDEPENDENCIA TEMPORAL DE LAS SERIES RESIDUALES.** Las series residuales deben ser no correlacionadas en el tiempo. Para realizar esta prueba (Prueba de Anderson), se emplean los resultados de las expresiones (40) y (18). Si los residuos de la serie están dentro del intervalo de Anderson, se considera que dicha serie es independiente en el tiempo.
- **INDEPENDENCIA ESPACIAL DE LAS SERIES RESIDUALES.** Las series residuales deben ser no correlacionadas en el espacio. Para superar esta prueba, el modelador debe verificar que los elementos de la matriz de correlación cruzada de orden cero estén dentro de los límites del intervalo de confianza de independencia espacial para un nivel de probabilidad dado, $(1-\alpha)$, de acuerdo con (43) (Jenkins y Watts, 1969. Citados por Salas et al., 1980).

$$\left[-u_{1-\alpha/2}/\sqrt{N}, u_{1-\alpha/2}/\sqrt{N} \right] \quad (43)$$

Donde: $u_{1-\alpha/2}$: Cuantil de la distribución normal tipificada.

N: Número de residuos.

Una vez realizadas las pruebas, el modelador es quien tiene que decidir cuál de los tres modelos estocásticos calibrados es el que adopta finalmente para la posterior generación de series de caudales sintéticos.

2.5.2. Modelo de desagregación espacial

Otro de los modelos disponibles en el programa es el modelo de DESAGREGACIÓN ESPACIAL DE LANE (Lane, 1979. Citado por Salas et al., 1980) que está basado en el modelo de desagregación de Valencia y Schaake (1973. Citados por Salas et al., 1980).

Este modelo es especialmente idóneo para problemas multivariados con un gran número de estaciones, es decir, casos en los cuales se tendría un alto número de parámetros si fuesen abordados sólo con una modelación multivariada tipo ARMA.

Formulación del modelo

Éste es un modelo lineal que da como resultado series de caudales, Y , en un conjunto de *estaciones secundarias*, a partir de un conjunto de caudales, X , provenientes de unas cuantas *estaciones principales*. Para la calibración del modelo se requieren series históricas de caudal con el mismo número de datos en todas las estaciones, y correspondientes a un mismo período. La Ec. (44) muestra la forma del modelo de Lane.

$$\{Y\}_t = [A]\{X\}_t + [B]\{\varepsilon\}_t + [C]\{Y\}_{t-1} \quad (44)$$

- Donde:
- Y: Vector de los caudales de las estaciones secundarias.
 - X: Vector de los caudales de las estaciones principales.
 - ε : Vector de valores aleatorios distribuidos normalmente con media cero, desviación típica unitaria e independientes en el tiempo.
 - A**, **B** y **C**: Matrices de parámetros.

El modelo puede trabajar a escala mensual o anual.

El modelo de desagregación espacial de Lane está diseñado para preservar las medias y las varianzas de las series históricas en las series generadas, así como las correlaciones de orden cero entre estas últimas.

Estimación de parámetros

Los parámetros de los modelos de desagregación tradicionalmente han sido estimados usando el *método de los momentos*, que es una técnica más simple de aplicar y más directa que otras (*máxima verosimilitud*, por ejemplo), pues no recurre a procedimientos iterativos ni da soluciones implícitas, como las que sí se encuentran con otros algoritmos. Esta característica los hace fuertemente atractivos a la hora de seleccionar un método para la estimación de parámetros, aunque sea un método que no dé como resultado los mejores estimadores. Existen técnicas más sofisticadas que pueden producir mejores resultados en este sentido, pero su aplicación práctica a los modelos de desagregación aún no está completamente probada. De cualquier manera, es un hecho que el método de los momentos, que es el que está implementado en el programa, resulta

suficientemente preciso para propósitos de desagregación, dado que gran parte de la naturaleza estocástica de las series a ser generadas ya se ha preservado de manera automática en la generación previa de las series de las estaciones principales (Salas et al., 1980). Ésta, en el programa, se hace con modelos ARMA.

Las matrices de parámetros del modelo están dadas en función de las matrices de covarianza de las series muestrales, tal como lo indica el conjunto de Ecs. (45).

$$\mathbf{A} = [\mathbf{S}_{YX} - \mathbf{S}_{YY}(1)\mathbf{S}_{YY}^{-1}\mathbf{S}_{XY}^T(1)] [\mathbf{S}_{XX} - \mathbf{S}_{XY}(1)\mathbf{S}_{YY}^{-1}\mathbf{S}_{XY}^T(1)]^{-1}$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{S}_{YY}(1) - \mathbf{A}\mathbf{S}_{XY}(1)] \mathbf{S}_{YY}^{-1} \quad (45)$$

$$\mathbf{B}\mathbf{B}^T = \mathbf{S}_{YY} - \mathbf{A}\mathbf{S}_{XY} - \mathbf{C}\mathbf{S}_{YY}^T(1)$$

Donde $\mathbf{S}_{UW}(1)$ (las letras U y W son sólo para propósitos de ilustración) es la matriz de covarianza entre la serie U y la serie W, estando esta última retrasada un intervalo de tiempo con respecto a la primera. Cuando no existe tal desfase entre dichas series ($k=0$), la matriz de covarianza se denota simplemente como \mathbf{S}_{UW} .

El elemento de la i-ésima fila y j-ésima columna de las matrices de covarianza se calcula tal como lo indica la Ec. (46).

$$S_{U_t W_{t-k}}(i, j) = \text{Cov}(U_t^{(i)}, W_{t-k}^{(j)}) = \frac{1}{N-1-k} \sum_{t=1+k}^N (U_t^{(i)} - U_t^{(i)})(W_{t-k}^{(j)} - W_{t-k}^{(j)}) \quad (46)$$

con

$$U_t^{(i)} = \frac{1}{N-k} \sum_{t=1+k}^N U_t^{(i)} \quad \text{y} \quad W_{t-k}^{(j)} = \frac{1}{N-k} \sum_{t=1+k}^N W_{t-k}^{(j)}$$

Donde: $U_t^{(i)}$: Caudal normalizado y tipificado de la estación i y del período (mes o año) t.

$W_{t-k}^{(j)}$: Caudal normalizado y tipificado de la estación j y del período (mes o año) t.

N: Número total de caudales de las series.

Hay que anotar que al igual que en los modelos ARMA, en este modelo, el programa trabaja con los caudales normalizados y tipificados.

Así mismo, las series residuales tienen una modelación igual a la de los modelos ARMA: ellas se calculan según la Ec. (47).

$$\{\varepsilon\}_t = [\mathbf{B}]^{-1} (\{Y\}_t - [\mathbf{A}]\{X\}_t - [\mathbf{C}]\{Y\}_{t-1}) \quad (47)$$

A estas series, el programa les calcula sus medias, desviaciones típicas, coeficientes de sesgo, límites de Snedecor y Cochran (para evaluar la normalidad de las series residuales), funciones de autocorrelación y límites de Anderson (para la prueba de independencia temporal). Esto, con el fin de que se realicen las mismas pruebas de bondad de ajuste que se le hacen a los modelos tipo ARMA, en caso de que el modelador las considere importantes. Salas et al. (1980) señala que para los modelos de desagregación, este tipo de pruebas son “débiles y de bajo valor”.

2.5.3. Modelo condensado de desagregación temporal

el programa dispone también de un modelo para desagregar series de caudales anuales en sus respectivas series de caudales mensuales, es decir, de un modelo de *desagregación temporal*. En particular, el programa trabaja con el MODELO CONDENSADO DE DESAGREGACIÓN TEMPORAL DE LANE (Lane, 1979. Citado por Salas et al., 1980), que se basa igualmente en el modelo de Valencia y Schaake (Citados por Salas et al., 1980), y es básicamente una versión resumida de éste, con una drástica reducción de parámetros.

Formulación del modelo

Éste también es un modelo lineal en el que el caudal de un mes, Y_τ , es función del caudal del mes anterior, $Y_{\tau-1}$, del caudal del año t , X_t y de una componente aleatoria ε_τ .

$$\{Y\}_\tau = [\mathbf{A}]_\tau \{X\}_t + [\mathbf{B}]_\tau \{\varepsilon\}_\tau + [\mathbf{C}]_\tau \{Y\}_{\tau-1} \quad (48)$$

El modelo tiene una ecuación como (48) para cada mes τ , es decir, hay un total de 12 ecuaciones o, lo que es igual, hay 12 conjuntos de matrices de parámetros, \mathbf{A}_τ , \mathbf{B}_τ y \mathbf{C}_τ ($\tau=1, 2, \dots, 12$). Como puede verse fácilmente, este modelo, a diferencia de los dos anteriores, tiene una mayor cantidad de parámetros, pero aun así, dentro de los modelos de desagregación es el que menos parámetros requiere; de ahí su denominación de *condensado*.

Para su calibración, el modelo precisa de series de caudales anuales con sus correspondientes valores mensuales.

Este modelo preserva las covarianzas entre los valores anuales y sus respectivos valores mensuales, y las varianzas y covarianzas de desfase 1 (k=1) entre los valores mensuales.

Estimación de parámetros

Al igual que en el modelo de desagregación espacial, en el de desagregación temporal, el programa calcula las matrices de parámetros en función de las matrices de covarianza de las series de caudales normalizados y tipificados. Las Ecs. (49) son resultado de la aplicación del método de los momentos en el proceso de estimación de los parámetros.

$$\mathbf{A}_\tau = \left[\mathbf{S}_{YX}(\tau, \tau) - \mathbf{S}_{YY}(\tau, \tau-1) \mathbf{S}_{YY}^{-1}(\tau-1, \tau-1) \mathbf{S}_{YX}(\tau-1, \tau) \right] \left[\mathbf{S}_{XX} - \mathbf{S}_{XY}(\tau, \tau-1) \mathbf{S}_{YY}^{-1}(\tau-1, \tau-1) \mathbf{S}_{YX}(\tau-1, \tau) \right]^{-1}$$

$$\mathbf{C}_\tau = \left[\mathbf{S}_{YY}(\tau, \tau-1) - \mathbf{A}_\tau \mathbf{S}_{XY}(\tau, \tau-1) \right] \mathbf{S}_{YY}^{-1}(\tau-1, \tau-1) \quad (49)$$

$$\mathbf{B}_\tau \mathbf{B}_\tau^T = \mathbf{S}_{YY}(\tau, \tau) - \mathbf{A}_\tau \mathbf{S}_{XY}(\tau, \tau) - \mathbf{C}_\tau \mathbf{S}_{YY}(\tau-1, \tau)$$

En las Ecs. (50) a (54) se presenta la forma como el programa calcula los elementos de las matrices de covarianza. Los superíndices i y j representan dos estaciones distintas (recuérdese que en el programa la modelación es multivariada). La letra Y siempre corresponderá a las series mensuales y la letra X a las anuales.

$$S_{YX}^{ij}(\tau, \tau) = \text{Cov}(Y_\tau^{(i)}, X^{(j)}) = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (Y_{\tau,t}^{(i)} - Y_\tau^{(i)}) (X_t^{(j)} - X^{(j)}) \quad (50)$$

$$S_{YY}^{ij}(\tau, \tau-1) = \text{Cov}(Y_\tau^{(i)}, Y_{\tau-1}^{(j)}) = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (Y_{\tau,t}^{(i)} - Y_\tau^{(i)}) (Y_{\tau-1,t}^{(j)} - Y_{\tau-1}^{(j)}) \quad (51)$$

$$S_{XY}^{ij}(\tau, \tau-1) = \text{Cov}(X^{(i)}, Y_{\tau-1}^{(j)}) = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (X_t^{(i)} - X^{(i)}) (Y_{\tau-1,t}^{(j)} - Y_{\tau-1}^{(j)}) \quad (52)$$

$$S_{XX}^{ij} = \text{Cov}(X^{(i)}, X^{(j)}) = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (X_t^{(i)} - X^{(i)}) (X_t^{(j)} - X^{(j)}) \quad (53)$$

$$S_{YY}^{ij}(\tau, \tau) = \text{Cov}(Y_{\tau}^{(i)}, Y_{\tau}^{(j)}) = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (Y_{\tau,t}^{(i)} - \bar{Y}_{\tau}^{(i)}) (Y_{\tau,t}^{(j)} - \bar{Y}_{\tau}^{(j)}) \quad (54)$$

el programa calcula las matrices de covarianza restantes en función de las anteriores, tal como se muestra en las Ecs. (55) a (57).

$$S_{YX}(\tau-1, \tau) = [S_{XY}(\tau, \tau-1)]^T \quad (55)$$

$$S_{XY}(\tau, \tau) = [S_{YX}(\tau, \tau)]^T \quad (56)$$

$$S_{YY}(\tau-1, \tau) = [S_{YY}(\tau, \tau-1)]^T \quad (57)$$

En las Ecs. (50) y (54),

$$\bar{Y}_{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N Y_{\tau,t}$$

En la Ec. (51),

$$\bar{Y}_{\tau} = \frac{1}{N-1} \sum_{t=2}^N Y_{\tau,t}$$

En las Ecs. (51) y (52),

$$\bar{Y}_{\tau-1} = \frac{1}{N-1} \sum_{t=2}^N Y_{\tau-1,t-1}$$

En las Ecs. (50) y (53),

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t$$

En la Ec. (52),

$$\bar{X} = \frac{1}{N-1} \sum_{t=2}^N X_t$$

En las ecuaciones anteriores, N es el número de años de las series.

3. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MODELO.

Cada análisis será definido como un proyecto, de manera que el usuario define un proyecto, al que aporta una serie histórica de aportaciones hidrológicas que va

a analizar con el modelo. Para mantener los estándares, esta serie ha de tener el formato de archivo de aportaciones utilizado en el modelo de simulación de la gestión de sistemas de recursos hídricos Simges.

El programa creará un directorio con el nombre del proyecto, y debajo de este se generará todo el trabajo, incluyendo todas las alternativas que se estudian. Para el control de este juego de alternativas, se van a ordenar en forma de árbol de archivos, de manera que en cada nivel de este se encuentre una fase del trabajo con todos los datos parciales de la misma. Este árbol tendrá la estructura por niveles que se describe a continuación, entendiendo por nivel una parte aislada del análisis.

Nivel 0: viene definido por el nombre del proyecto. Un directorio debajo del cual esta todo. En este se situará el archivo con las aportaciones que se van a analizar.

Nivel 1: en este nivel se registra la selección de series para el análisis. Debajo de cada uno de estos subdirectorios estarán todos los análisis que se hagan de un conjunto de estaciones seleccionado del archivo original. En este nivel se realiza el análisis estadístico de las series seleccionadas.

Nivel 2: este nivel representa al método de normalización. Habrá un subdirectorio por cada tipo de normalización que se estudie para el conjunto de series del nivel anterior.

Nivel 3: representa el tratamiento por Fourier, para análisis de series anuales este paso calcula también la serie estandarizada.

Nivel 4: en este nivel se incluyen todas las pruebas de modelos ARMA distribuido y desagregación espacial de Lane analizados para las series estandarizadas en el nivel anterior.

Nivel 5 y último completa el proyecto con el análisis de la generación de series, el modelo generará series sintéticas y evaluará los estadísticos de las mismas.

4. INTERFACE GRÁFICA.

La interface de usuario controla el acceso a todas las pruebas realizadas por medio de un árbol similar al de directorios del explorador de Windows, que situado en el margen izquierdo de la pantalla permita al usuario navegar entre las distintas alternativas del análisis. Cuando el usuario selecciona un elemento del árbol, el programa cargará las opciones de trabajo en el nivel correspondiente, y una pantalla de texto en la que puede verse el informe escrito del proceso correspondiente a la opción seleccionada. Además el usuario tiene acceso a una gran variedad de gráficos relativos al análisis concreto que tiene en pantalla.

4.1. CONTENIDO DE LAS PANTALLAS EN LOS DISTINTOS NIVELES.

4.1.1. Nivel 0.

Cuando el usuario comienza el trabajo debe de definir un "nuevo proyecto" o cargar uno ya creado. Al nuevo proyecto debe aportar un nombre, y un archivo de datos de aportaciones.

Una vez se dispone de estos datos el programa crea un directorio para el proyecto y en este copia la serie de aportaciones a analizar. El nombre del directorio se construye con los 8 primeros dígitos del título del proyecto.

En este directorio se crea un archivo "bdproyecto.mdb", en el que se relacionarán los nombre y dirección de las alternativas de trabajo (un registro 'histórico' o 'índice' del trabajo.) El formato de este archivo es el de una base de datos de Microsoft Access.

En la pantalla se puede visualizar un resumen del archivo de aportaciones seleccionado y la lista de las series de aportaciones incluidas en el archivo. Además se da la opción de visualizar este archivo.

El usuario ha de seleccionar las series con las que se va a trabajar y pulsar el botón de "Analizar" para comenzar el análisis estadístico.

En esta pantalla se puede obtener gráficos de los datos de las series en forma mensual o anual.

Para el árbol de control generará un nombre automático que identifica las series analizadas. Al crear este elemento en el árbol accederá a él, pasando el control al nivel 1.

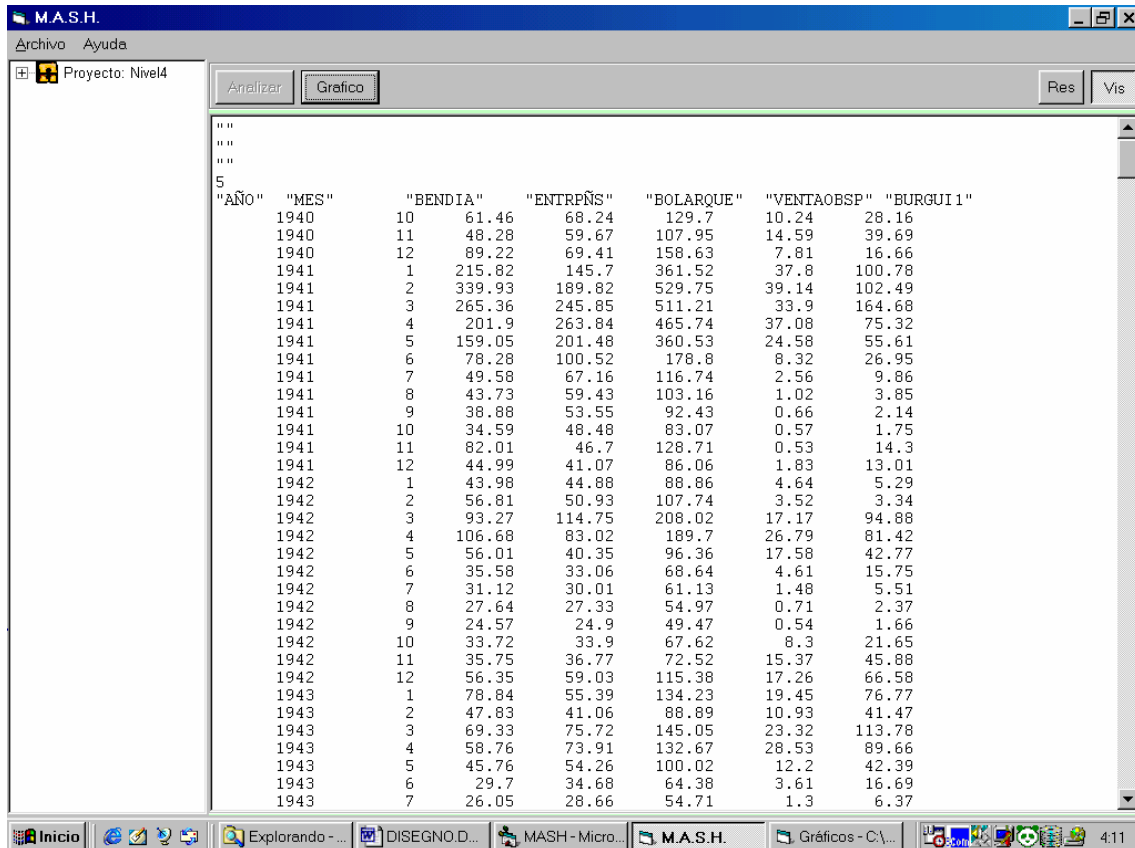


Figura 1: Pantalla del MASHWIN usando la opción de visualizar los datos.

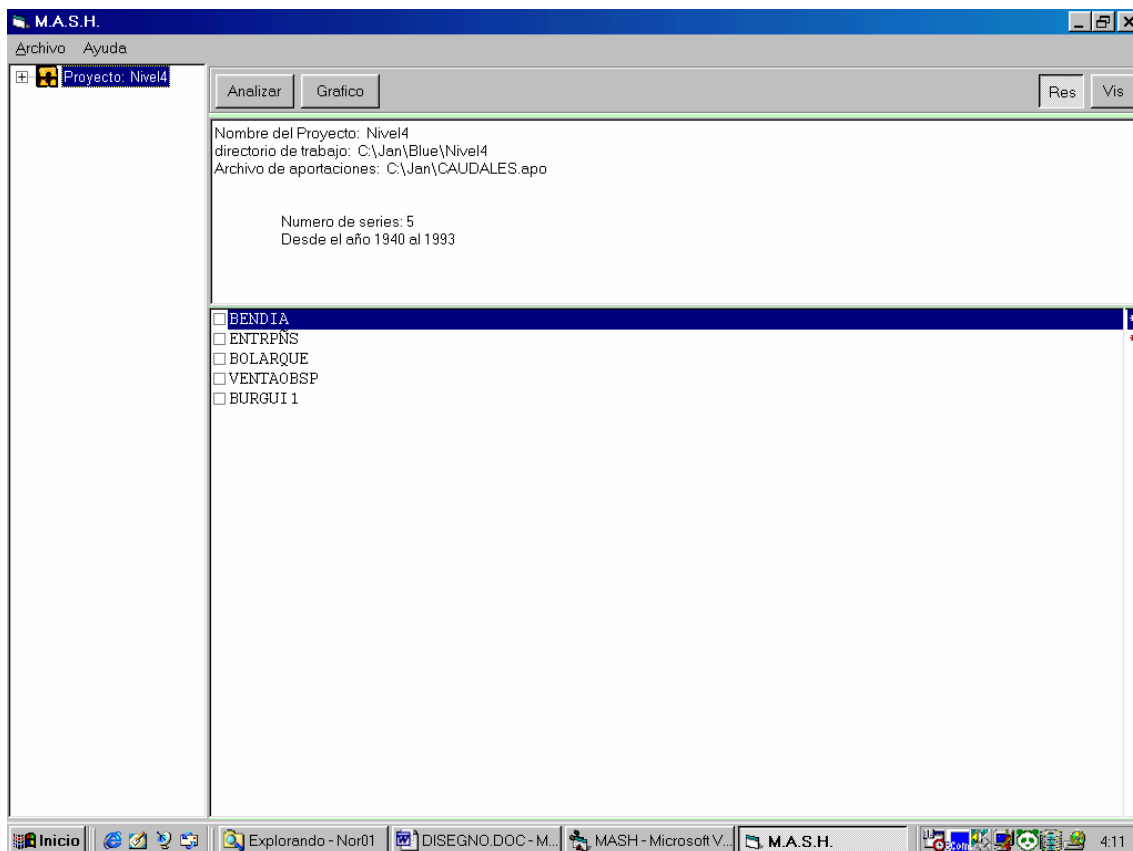


Figura 2: Aspecto de la pantalla del Nivel 0 de MASHWIN. Opción

4.1.2. Nivel 1.

Una vez definido un conjunto de series para el análisis el programa crea un subdirectorio (nivel 1) en el que creará un nuevo archivo de aportaciones que contiene solo las aportaciones que se van a analizar, y llama al módulo de cálculo correspondiente que calcula ya los parámetros de media, varianza, sesgo, ... tanto mensuales, como de los valores anuales. De este análisis emitirá un informe escrito, que se visualizara en pantalla.

La interface permite graficar los resultados de medias, desviación típica y sesgo mensuales, tanto por separado como agrupadas en cualquier combinación. Además, si existen otras hipótesis del mismo nivel da la opción de graficar el mismo resultado de todas ellas simultáneamente.

En esta fase también existe la posibilidad de continuar el análisis con la serie anual. Si aquí se selecciona el trabajo con series anuales, las siguientes fases diferirán con respecto a si se ha seleccionado las series mensuales.

El usuario en este nivel decidirá el tipo de normalización a aplicar en la siguiente fase del trabajo. Cuando se decide una normalización, se generará automáticamente un nivel 2 para esta normalización.

ESTADÍSTICOS DE LAS APORTACIONES ANUALES ORIGINALES Y LÍMITES DE SENEDECOR Y COCHRAN PARA EL TEST DE NORMALIDAD

	BENDIA	ENTRPÑS
MEDIA	604.976	581.104
DV TP	350.122	323.259

ESTADÍSTICOS DE LAS APORTACIONES MENSUALES ORIGINALES Y LÍMITES DE SENEDECOR Y COCHRAN PARA EL TEST DE NORMALIDAD

ESTACIÓN BENDIA

MES	MEDIA	DV. TÍP.	SESGO	LIM. INF.	LIM. SUP.
OCT	25.554	17.245	3.465	-0.638	0.638
NOV	38.607	37.702	1.855	-0.638	0.638
DIC	52.196	44.461	1.987	-0.638	0.638
ENE	67.971	59.880	1.483	-0.638	0.638
FEB	85.933	78.030	1.640	-0.638	0.638
MAR	83.067	69.643	1.324	-0.638	0.638
ABR	74.647	52.094	1.374	-0.638	0.638
MAY	60.635	42.822	1.317	-0.638	0.638
JUN	42.519	28.968	1.510	-0.638	0.638
JUL	27.891	12.164	0.438	-0.638	0.638
AGO	24.124	9.808	0.150	-0.638	0.638
SEP	21.842	8.611	0.167	-0.638	0.638

ESTACIÓN ENTRPÑS

MES	MEDIA	DV. TÍP.	SESGO	LIM. INF.	LIM. SUP.
OCT	28.933	20.159	2.452	-0.638	0.638
NOV	38.423	32.027	1.705	-0.638	0.638
DIC	43.680	27.899	1.363	-0.638	0.638
ENE	56.150	44.516	1.527	-0.638	0.638
FEB	66.924	56.445	1.509	-0.638	0.638
MAR	82.775	61.795	1.222	-0.638	0.638
ABR	80.397	53.339	1.410	-0.638	0.638
MAY	60.053	39.322	1.287	-0.638	0.638
JUN	42.950	29.099	1.676	-0.638	0.638
JUL	29.935	15.632	0.622	-0.638	0.638
AGO	26.410	13.179	0.439	-0.638	0.638
SEP	21.842	8.611	0.167	-0.638	0.638

Figura 3: Aspecto la pantalla de MASHWIN en el Nivel 1.

Normalización

Nombre:

Tipo de Analisis: Anual Mensual

Normalización: X = Q (Sin Normalizació)

Estaciones:

OCT <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza	ABR <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza
NOV <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza	MAY <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza
DIC <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza	JUN <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza
ENE <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza	JUL <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza
FEB <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza	AGO <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza
MAR <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza	SEP <input checked="" type="checkbox"/>	5 X = Q (Sin Normaliza

Aplicar

Aceptar Cancelar

Figura 4: Ventana con los datos a rellenar para aplicar la Normalización.

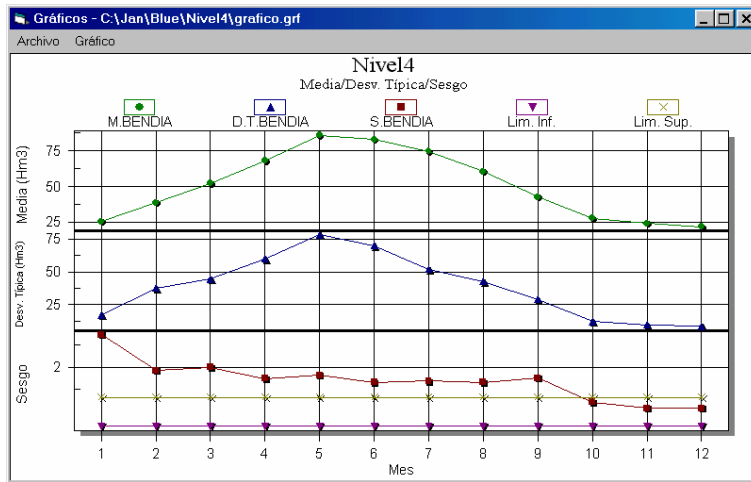


Figura 5: Gráficos de los resultados estadísticos (Media, varianza y sesgo) de una de las series analizadas

4.1.3. Nivel 2.

Se crea un nivel 2 por primera vez cuando en el nivel 1 se decide un nuevo tipo de normalización. Se genera una serie de 'aportaciones normalizadas' que escribe en el mismo. A la vez que llama al módulo de cálculo que calcula de todos los parámetros que ha calculado al acceder al nivel 1, pero con la nueva serie (si el usuario ha decidido no hacer normalización, solo se copiarán los datos del directorio anterior). En el caso de que se trate de un análisis anual, se generará la serie de datos anuales.

La utilidad de gráficos en esta fase será la misma que la de la fase anterior, pero con los datos de este punto.

La siguiente fase será la de realizar análisis de Fourier, que dará acceso al nivel 3, generando un subdirectorio por cada elección de parámetros de Fourier. También lo hará si se decide no hacer en tratamiento de Fourier.

Dentro de este nivel se pueden graficar tanto las series normalizadas como los estadísticos (tanto para la opción mensual como para la anual)

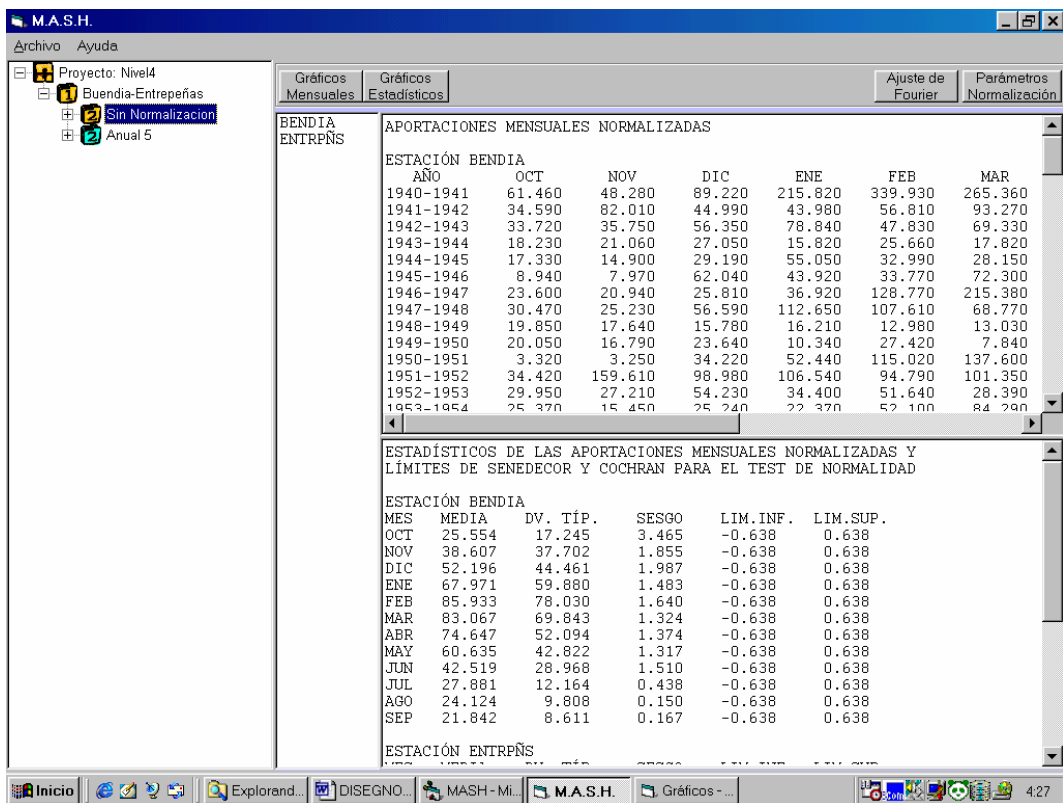


Figura 6: Aspecto de la pantalla del MASHWIN en el Nivel 2. Análisis mensual.

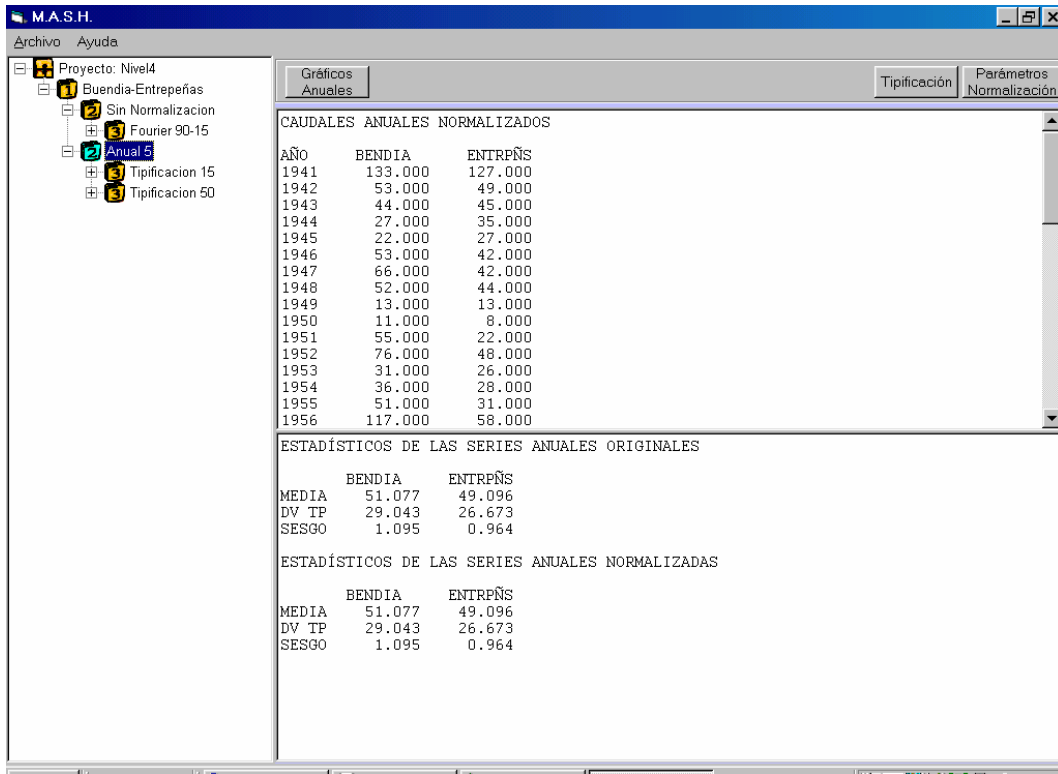


Figura 7: Aspecto de la pantalla del MASHWIN en el Nivel 2. Análisis anual.

4.1.4. Nivel 3.

El acceso al nivel 3 calcula las medias y varianzas de Fourier según se ha seleccionado al acceder a este nivel. Con estos parámetros el modelo genera también la serie de datos estandarizados con el uso de los parámetros de Fourier elegidos. Si no se pide ajuste de fourier, realizará la estandarización con las medias y varianzas muestrales.

A partir de la serie estándar el modelo calculará la totalidad de los parámetro de autocorrelación y correlación cruzada.

La utilidad de gráficos en esta fase será la misma que en el nivel 1, pero con los datos de este punto. Además añadirá las gráficas parámetros de correlación.

Con esta información, el usuario se encuentra en situación de pasar al nivel 4, definiendo los modelos ARMA y Lane a estudiar.

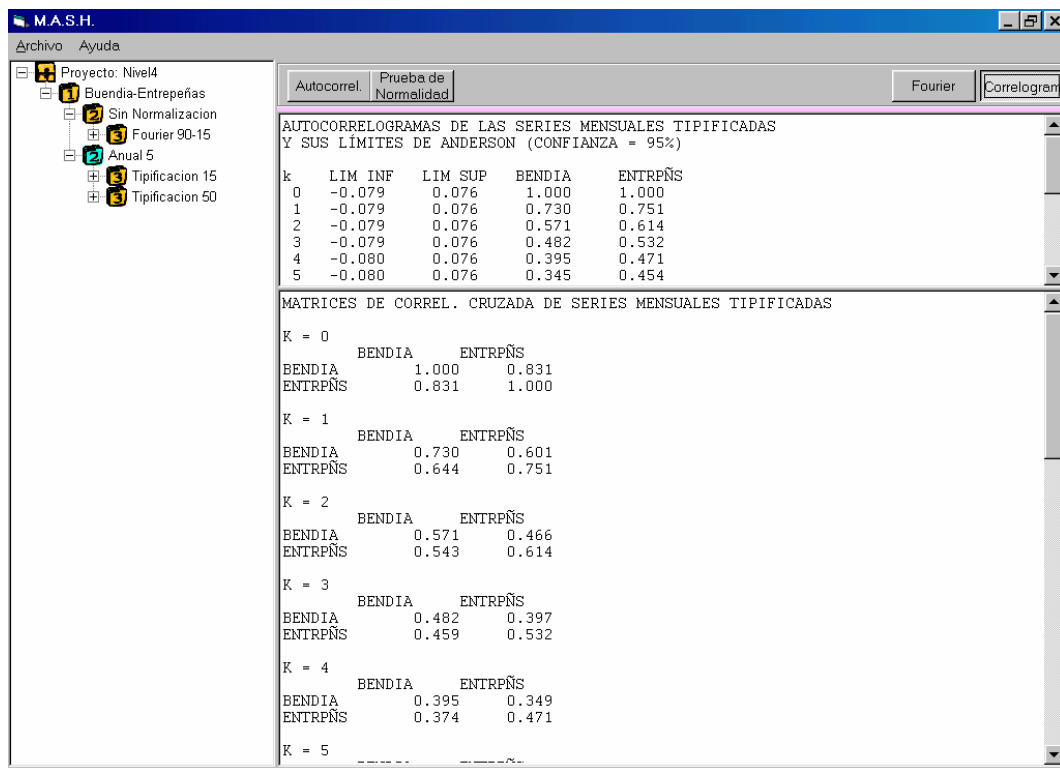


Figura 8: Aspecto de la pantalla del MASHWIN en el Nivel 3. Resultados de correlación.

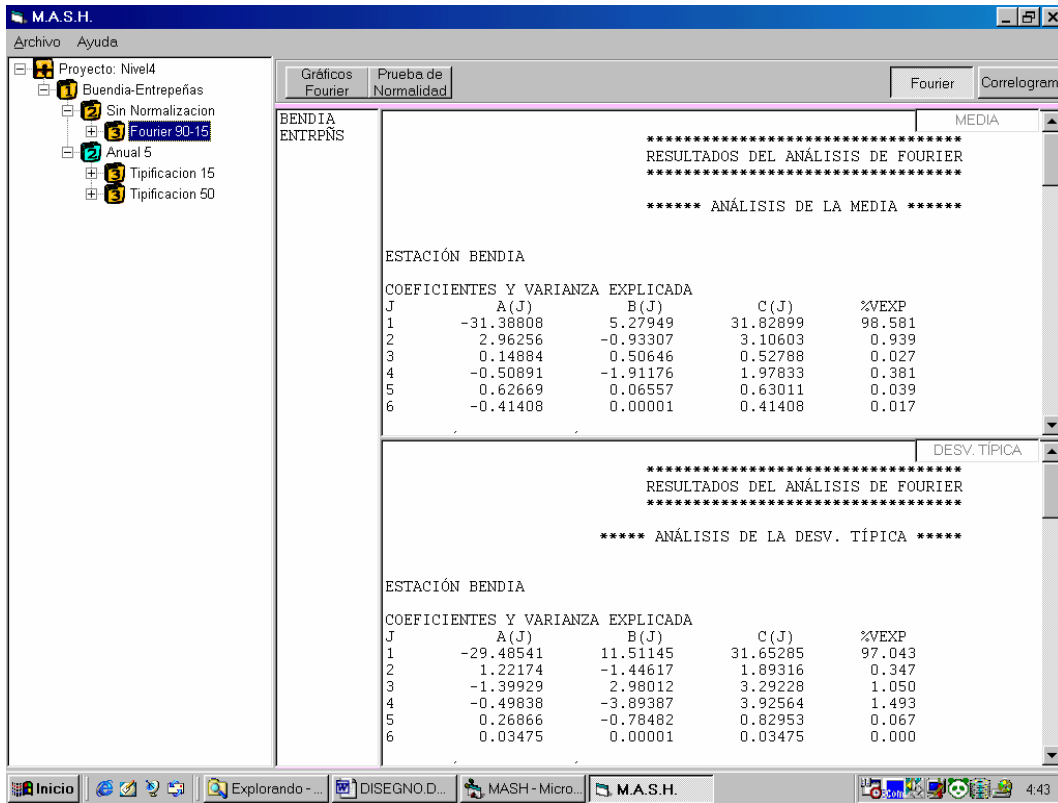


Figura 9: Aspecto de la pantalla del MASHWIN en el Nivel 3. Resultados de Fourier.

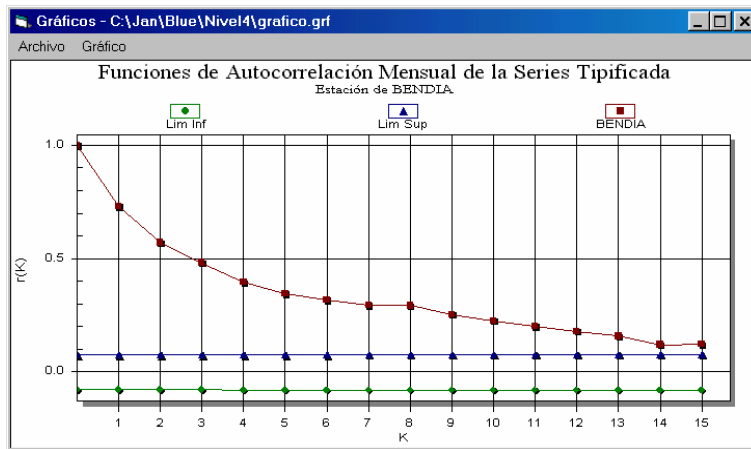


Figura 10: Gráfico de autocorrelación

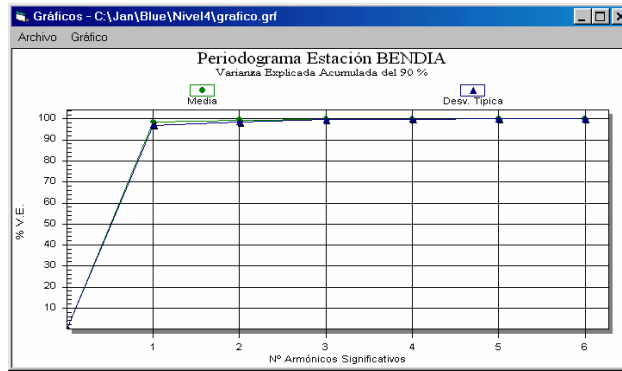


Figura 11: Gráfico de ajuste de Fourier.

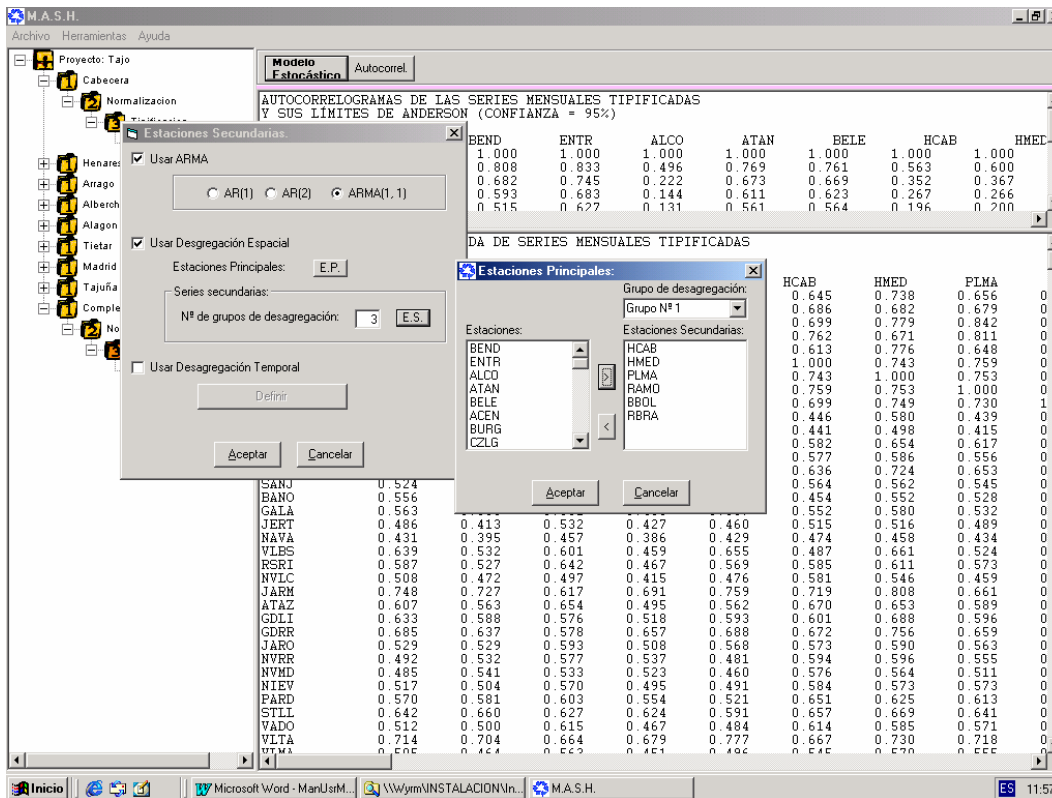


Figura 12: Ventanas para la definición del modelo estocástico.

4.1.5. Nivel 4.

A este nivel se accede introduciendo las dimensiones 'p' y 'q' del modelo ARMA(p,q) a modelar y la identificación de los subconjuntos de estaciones principales (modelo ARMA) y secundarias (modelo LANE) en el caso de que se utilice este último modelo. Una vez definidas, el programa calculará los parámetros del modelo, emitiendo el informe correspondiente.

Con los parámetros del modelo se calcularán los residuos de la serie histórica. De estos residuos se calculan todos los parámetros estadísticos de medias, varianzas, correlaciones, ... ya calculados en los niveles anteriores para la serie original.

La utilidad de gráficos en esta fase será la misma que la de la fase anterior, pero con los datos de la serie residual. La herramienta de gráficos ha de graficar todos los resultados de esta hipótesis, y opcionalmente simultáneos con los de hipótesis paralelas del mismo nivel.

Una vez el usuario ha seleccionado un modelo (o varios) se pasará a la última fase del estudio pasando a la generación de series de contraste, lo que accede al nivel 5.

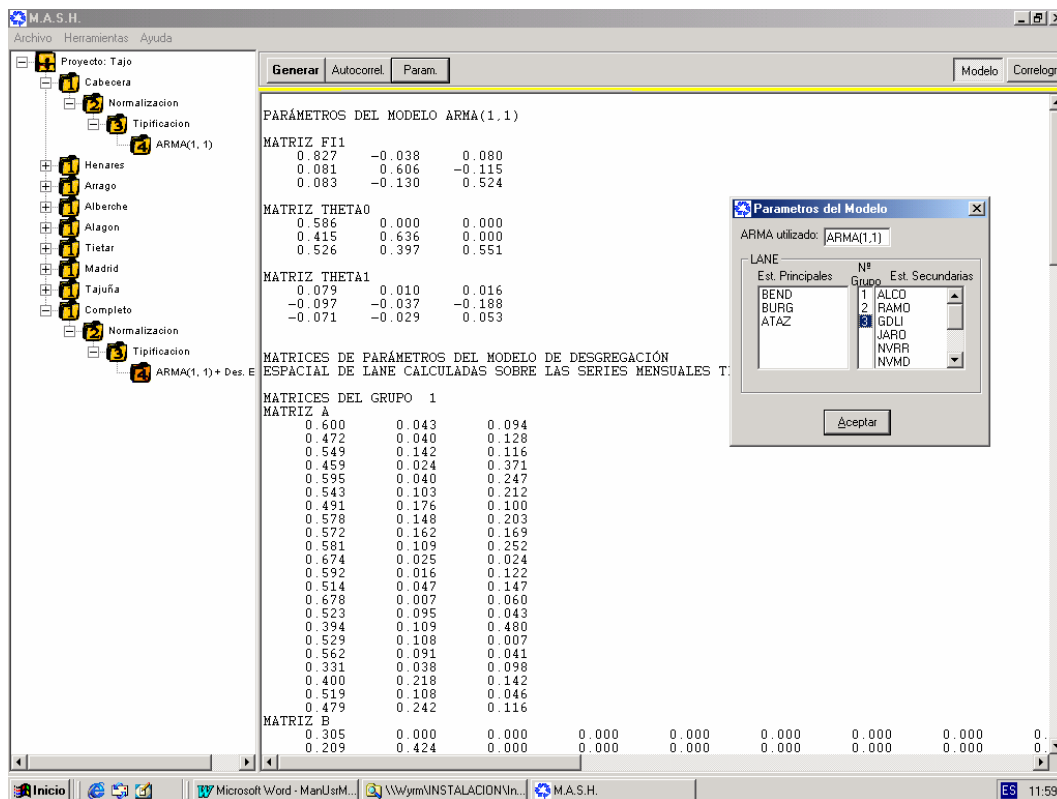


Figura 13: Aspecto de la pantalla del MASHWIN en el Nivel 4 en vista de parámetros del modelo. Y visualización de resumen del modelo.

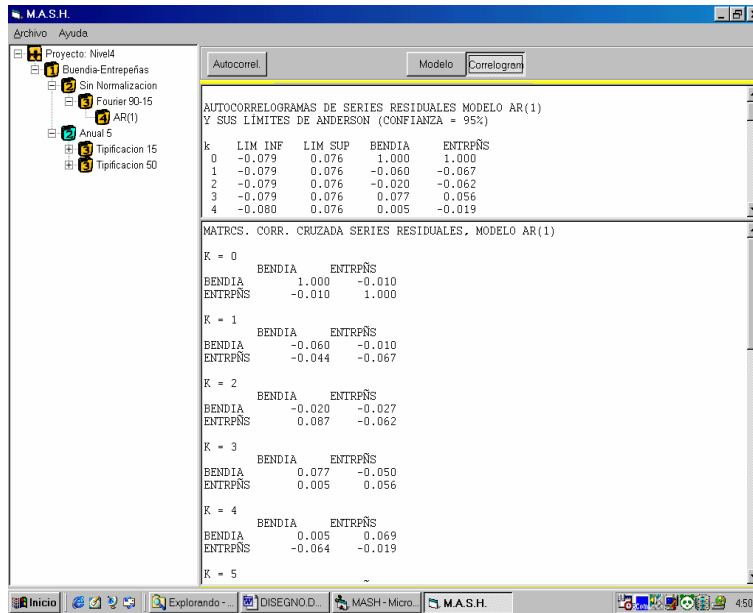


Figura 14: Aspecto de la pantalla del MASHWIN en el Nivel 4 en vista de correlogramas de los residuos.

4.1.6. Nivel 5.

A este nivel se accede introduciendo los datos de longitud de la serie a generar y de número de series que se quiere generar (por defecto la longitud será igual a la de la serie sintética).

La interface llamará al programa de generación de series sintéticas con estos argumentos, y con las series generadas realizará un nuevo análisis estadístico, del que emitirá un informe completo, con la evaluación de todos los parámetros de medias, varianzas, ..., sequías, ..., comparándolos con los de la serie histórica, que ya han sido calculados en el nivel 1.

El contenido de este directorio será similar al del nivel anterior, pero para las series generadas.

4.2. GENERALIZACIÓN.

Lo descrito en los pasos anteriores se generaliza con el uso del árbol director del proyecto, que permite al usuario retornar a una fase anterior o paralela en cualquier momento, para iniciar el estudio de una hipótesis distinta, sin perder la información de los estudios realizados anteriormente.

Otra utilidad de este modelo es la opción de recalibrarse automáticamente todo el proyecto cuando se amplían los datos de hidrología histórica. Para esto ha de estar definido un archivo de datos original en el directorio raíz.

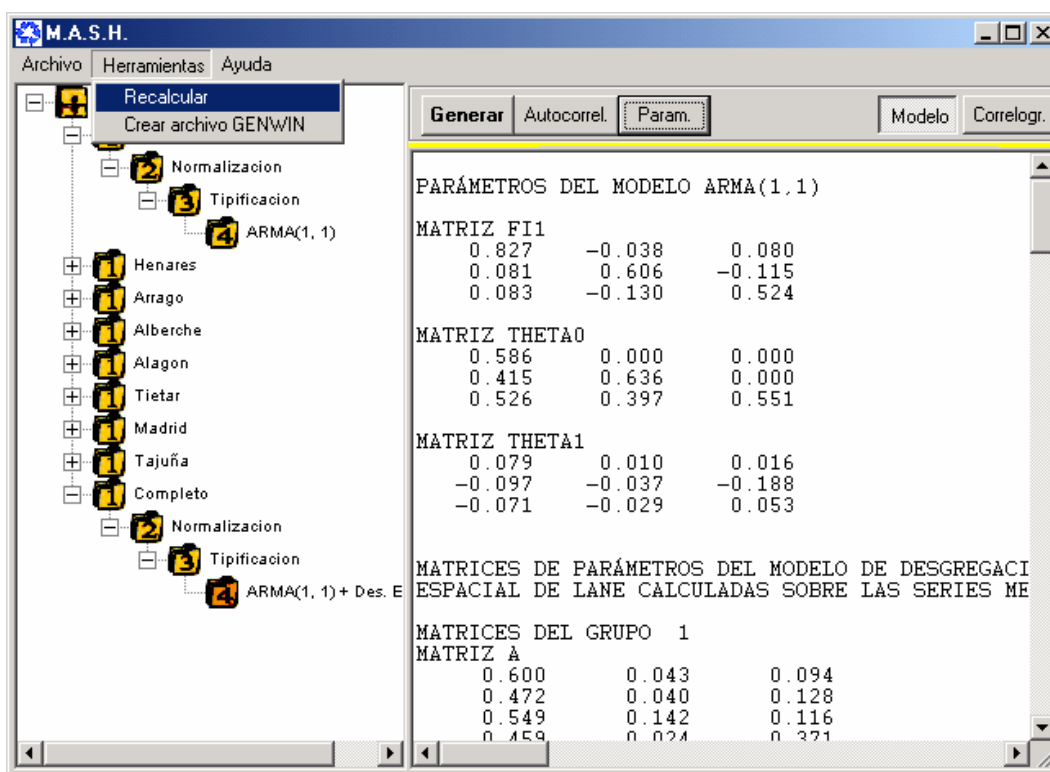


Figura 15: Opción recalcularse en el modelo MASHWIN.

4.3. GRÁFICOS.

Para la generación de gráficos se ha desarrollado una interface independiente que se recibe los datos del gráfico que debe mostrar a través de un archivo de texto. Esta aplicación es capaz de graficar cualquier conjunto de datos con una configuración que se le suministrará en la llamada a la aplicación. Todo el diseño

del gráfico puede ser definido y modificado por el usuario accediendo al archivo de datos para el gráfico.

5. MÓDULOS DE CÁLCULO

El análisis que se describe de manera genérica en el apartado anterior es realizado por medio de distintas aplicaciones desarrollada en lenguaje de programación Fortran, de manera que la interfase solo muestra y pide datos al usuario sin hacer ningún cálculo. Dichos módulos de cálculo han sido generados a partir de un programa global que realiza el análisis completo de un conjunto de series hidrológicas sin intervención del usuario (programa "MODESTE").

A continuación se describen todos los archivos de datos y resultados utilizados por cada uno de los módulos de análisis parcial que se utilizan coordinados con la interface gráfica.

5.1. NIVEL 1: MÓDULO DE ANÁLISIS MENSUAL Y ANUAL

SUBROUTINAS

- MODESAN2: Programa principal.
- PRNQTAB: Imprime los caudales mensuales a un archivo en forma tabular.
- CALEST2: Calcula e imprime estadísticos mensuales.
- ESTADSRA: Calcula estadísticos de las series anuales agregadas a partir de las mensuales.
- PRNESQTA: Imprime estadísticos de las series anuales.
- SEQUIAS: Calcula los estadísticos de sequía para tantos umbrales como el usuario lo desee. Estos umbrales se expresan como porcentaje del caudal medio de la serie de caudales. Dichos estadísticos son: número de sequías, duración media, intensidad media, magnitud media, duración máxima, intensidad máxima y magnitud máxima. Cuando las series son mensuales se calculan los estadísticos a nivel mensual y a nivel anual; cuando son anuales, sólo a nivel anual.
- ALMACNTO: Calcula el rango, el rango reescalado y el coeficiente de Hurst para las series a nivel anual y el volumen de embalse necesario para satisfacer

demandas constantes equivalentes a porcentajes del caudal medio a nivel anual y mensual.

ARCHIVO DE DATOS

- CAUDALEM.DAT: Caudales mensuales.
- UMBRALES.DAT: En éste se especifican el número de umbrales y sus valores, expresados como fracción del caudal medio. Dichos umbrales determinan las sequías y los volúmenes de embalse.

ARCHIVOS DE RESULTADOS

- ANUAL.TXT: Estadísticos de las series anuales.
- MENSUAL.TXT: Estadísticos de las series mensuales.
- SERIES.AP2: Caudales mensuales originales tabulados (incluye los anuales).
- SEQ-MN.RES: Estadísticos de las sequías mensuales.
- SEQ-ANMN.RES: Estadísticos de las sequías anuales obtenidos a partir de las series de caudales mensuales.
- ALM-MN.RES: Estadísticos de almacenamiento de las series mensuales.
- ALM-ANMN.RES: Estadísticos de almacenamiento de las series anuales a partir de las series mensuales.

5.2. NIVEL 2(A): MÓDULO DE NORMALIZACIÓN MENSUAL

SUBROUTINAS

- MODENORM: Programa principal.
- PRNQNTAB: Imprime en forma tabular los caudales normalizados.
- CALEST2: Calcula e imprime los estadísticos de los caudales normalizados.

ARCHIVOS DE DATOS

- ..\CAUDALEM.DAT: Caudales mensuales. (Localizado en el directorio inmediatamente superior al del programa).
- NORMALIM.DAT: Funciones de normalización.

El modelo dispone de cuatro funciones de normalización y también ofrece la opción de no normalizar las series. Las funciones de normalización pueden ser diferentes de un mes a otro.

El archivo contiene la siguiente información.

- Los primeros ocho registros son informativos. De ellos, los siete primeros nunca varían. El octavo registro variará siempre que el mes de inicio del año hidrológico sea diferente a octubre.
- A continuación hay tantos registros como estaciones haya, cada uno de los cuales está formado por trece campos: el primero es el nombre de la estación y los siguientes doce contienen los indicadores del tipo de función a emplear por MODESTE en la normalización, de acuerdo con el listado que se presenta al principio de este archivo (registros 2 al 6).
- Luego vienen tres registros que no varían y un cuarto registro que está formado por los meses del año; éste sólo varía cuando el mes inicial es diferente a octubre.
- Después vienen tantos registros como estaciones haya, cada uno de los cuales tiene 13 campos: el primero es el nombre de la estación y los restantes contienen los valores, para los distintos meses, del parámetro a de la normalización potencial.
- Posteriormente hay un registro que no varía y luego un nuevo registro de meses.
- Luego hay tantos registros como estaciones haya. Cada uno de ellos tiene 13 campos: el primero es el nombre de las estación y los doce restantes contienen los valores del parámetro b de la normalización potencial para cada mes.

Es importante anotar que este archivo siempre debe tener esta estructura, independientemente de que se aplique o no la normalización potencial. Cuando ésta no se aplica, los valores de los parámetros a y b no importan, ya que las variables que almacenan dichos valores sólo se incluyen en los cálculos cuando se emplea dicha normalización.

Otro aspecto de este archivo que hay que tener en cuenta es que el orden en el que aparecen las estaciones en la sección de los indicadores del tipo de normalización y en las secciones donde se especifican los valores de los parámetros a y b de la normalización potencial, debe ser el mismo que aparece en el archivo de caudales.

ARCHIVOS DE RESULTADOS

- QNTAB-MN.RES: Caudales normalizados en forma tabular.
- ESTQN-MN.RES: Estadísticos de los caudales normalizados.
- MDTNORMN.***: Estadísticos de los caudales normalizados. Archivo para uso interno del programa que sirve como archivo de datos al módulo de tipificación mensual.
- QNOR-MN.***: Caudales normalizados en forma tabular. Archivo para uso interno del programa que sirve como archivo de datos al módulo de tipificación mensual. En el segundo registro tiene año inicial, mes inicial, número de estaciones, número de años.

5.3. NIVEL 2(B): MÓDULO DE NORMALIZACIÓN ANUAL

SUBROUTINAS

- MODENORA: Programa principal.
- ESTADSRA: Calcula los estadísticos anuales originales y normalizados.
- PRNSTSRA: Imprime estadísticos de caudales anuales originales y normalizados.

ARCHIVOS DE DATOS

- ..\CAUDALEA.DAT: Caudales mensuales. (Localizado en el directorio inmediatamente superior al del programa).
- NORMALIA.DAT: Funciones de normalización.

Su formato es similar al descrito para el nivel 2(a)

ARCHIVOS DE RESULTADOS

- QANNOR.RES: Caudales normalizados.
- ESTADQAN.RES: Estadísticos de los caudales originales y normalizados.
- MDTNORAN.***: Estadísticos de los caudales normalizados. Archivo para uso interno del programa que sirve como archivo de datos al módulo de tipificación anual.
- QNOR-AN.***: Caudales normalizados en forma tabular. Archivo para uso interno del programa que sirve como archivo de datos al módulo de tipificación anual. En el segundo registro tiene año inicial, número de estaciones y número de caudales.

5.4. NIVEL 3(A): MÓDULO DE TIPIFICACIÓN MENSUAL

SUBROUTINAS

- MODETIPM: Programa principal.
- FOURIER2: Ajuste de los estadísticos mensuales en series de Fourier.
- PRNFOU: Imprime parte de los cálculos de Fourier.
- AUTOCOR2: Calcula las autocorrelaciones.
- CORRCRZ2: Calcula las correlaciones cruzadas.
- PRNAUTC: Imprime correlogramas.
- PRNCOCR: Imprime matrices de correlación cruzada.
- QTABULA2: Imprime en forma tabular los caudales tipificados.

ARCHIVOS DE DATOS

- ..\QNOR-MN.\$\$\$: Caudales normalizados. Lo crea el mismo programa en el nivel 2(a) de normalización mensual.
- ..\MDTNORMN.\$\$\$: Estadísticos de caudales normalizados. Lo crea el mismo programa en el nivel 2(a) de normalización mensual.
- VEX.DAT: Tiene tres registros.

Primero: Porcentaje significativo de varianza explicada.

Segundo: Sí (S) o No (N) tipificar con estadísticos ajustados por Fourier.

Tercero: Número de intervalos de correlación.

ARCHIVOS DE RESULTADOS

- FOURIER.RES: Periodogramas acumulados y estadísticos antes y después de ser ajustados en series de Fourier.
- QTIPTAB.RES: Caudales tipificados en forma tabular.
- AUTCORMN.RES: Correlogramas de las series tipificadas.
- CORCRZMN.RES: Matrices de correlación cruzada.
- QTIPIF.\$\$\$: Caudales tipificados. Archivo para uso interno del programa, que sirve como archivo de datos para el módulo de calibración de modelos.
- MATCOCR.\$\$\$: Matrices de correlación cruzada. Archivo para uso interno del programa, que sirve como archivo de datos para el módulo de calibración de modelos.

5.5. NIVEL 3(B): MÓDULO DE TIIFICACIÓN ANUAL

SUBROUTINAS

- MODETIPA: Programa principal.
- AUTOCOR2: Calcula las autocorrelaciones.
- CORRCRZ2: Calcula las correlaciones cruzadas.
- PRNAUTC: Imprime correlogramas.

- PRNCOCR: Imprime matrices de correlación cruzada.

ARCHIVOS DE DATOS

- ..\QNOR-AN.***: Caudales normalizados. Lo crea el mismo programa en el nivel 2(b) de normalización anual.
- ..\MDTNORAN.***: Estadísticos de caudales normalizados. Lo crea el mismo programa en el nivel 2(b) de normalización anual.
- LAGSUP.DAT: Tiene un solo registro en el que se especifica el número de intervalos de correlación.

ARCHIVOS DE RESULTADOS

- QTIP-AN.RES: Caudales tipificados.
- AUTCORAN.RES: Correlogramas de las series tipificadas.
- CORRCRAN.RES: Matrices de correlación cruzada.
- QTIPIF.***: Caudales tipificados. Archivo para uso interno del programa, que sirve como archivo de datos para el módulo de calibración de modelos.
- MATCOCR.***: Matrices de correlación cruzada. Archivo para uso interno del programa, que sirve como archivo de datos para el módulo de calibración de modelos.

5.6. NIVEL 4: MÓDULO DE CALIBRACIÓN MENSUAL Y ANUAL DE MODELOS

SUBROUTINAS

- MODELOS2: Programa principal. Se calibran los modelos AR(1), AR(2), ARMA(1,1), el modelo de DESAGREGACIÓN ESPACIAL DE LANE y el modelo CONDENSADO DE DESAGREGACIÓN TEMPORAL DE LANE.
- ARARMA2: Ajusta los modelos AR(1), AR(2) y ARMA(1,1).
- SEPARAR2: Separa las series de las estaciones principales de aquellas correspondientes a las estaciones secundarias.

- DESGRSPC: Calibra el modelo de desagregación espacial de Lane.
- CHOLESKY: Resuelve la descomposición de matrices gramianas.
- CORRCRZ2: Calcula las matrices de correlación cruzada.
- ESTADSRA: Calcula los estadísticos de las series residuales. También se usa para calcular los estadísticos de las series anuales.
- INVERSA: Calcula la inversa de una matriz.
- AUTOCOR2: Calcula las funciones de autocorrelación.
- PRNAUTC2: Imprime en archivo las funciones de autocorrelación.
- COVARZA: Calcula las matrices de covarianza.
- PRNCOCR2: Imprime en archivo las matrices de correlación cruzada.
- PRNSTSR2: Imprime en archivo los estadísticos de las series residuales.
- DSGRTMP2: Calibra el modelo de desagregación temporal de Lane.

ARCHIVOS DE DATOS

- MODELOS.DAT: Tiene tres registros.

Primero: Sí (S) o No (N) se calibra modelo del grupo ARMA.

Segundo: Sí (S) o No (N) se calibra el modelo de desagregación espacial.

Tercero: Sí (S) o No (N) se calibra el modelo de desagregación temporal. Este siempre va, aunque la modelación sea anual; en este caso será N.

El programa tiene la capacidad de calibrar en una sola ejecución cualquiera de los siguientes esquemas a nivel mensual:

- Sólo ARMA (AR(1), AR(2) o ARMA(1,1)).
- Sólo DESAGREGACIÓN ESPACIAL DE LANE (DSPC).
- Sólo DESAGREGACIÓN TEMPORAL DE LANE (DTMP).
- ARMA y DSPC.
- ARMA y DTMP.
- DSPC y DTMP.

- ARMA+DSPC+DTMP.

El programa tiene la capacidad de calibrar en una sola ejecución cualquiera de los siguientes esquemas a nivel anual:

- Sólo ARMA (AR(1), AR(2) o ARMA(1,1)).
- Sólo DESAGREGACIÓN ESPACIAL DE LANE (DSPC).
- ARMA y DSPC.

- DATOS.DAT: Tiene tres (o dos) registros.

Primero: Índice del modelo ARMA a calibrar: AR(1) es 1, AR(2) es 2 y ARMA(1,1) es 3. Sólo se requiere cuando se calibran modelos ARMA, es decir, cuando el primer registro de MODELOS.DAT es "s".

Siguiente registro: Número de intervalos de correlación.

Siguiente registro: Modelación mensual (M) o anual (A).

DGLANES.DAT: Datos del esquema de desagregación espacial. Sólo se necesita cuando se modela la desagregación espacial. Tienen el contenido que se detalla a continuación.

- Número de estaciones principales.
 - Orden de las estaciones principales en el archivo de caudales.
 - Cantidad de grupos de desagregación espacial.
 - Y finalmente, tantos registros como grupos de estaciones secundarias haya, indicando en cada uno el número de estaciones secundarias de cada grupo de desagregación espacial y a continuación, en el mismo registro, el orden de cada una de esas estaciones dentro del archivo de caudales.
- ..\QTIPIF.***: Caudales tipificados con dos campos en el segundo registro: Número de estaciones y número de años. Es un archivo producido por el mismo programa en el nivel 3.
 - ..\MATCOCR.***: Matrices de correlación cruzada de orden 0, 1 y 2. Es un archivo producido por el mismo programa en el nivel 3.

Los siguientes archivos de datos sólo son necesarios cuando se calibra el modelo de desagregación temporal.

- ..\..\NORMALIA.DAT: Datos de normalización de las series anuales.
- ..\..\QNOR-MN.***: El programa usa archivo en este nivel solamente para leer el mes inicial y el número de años de las series.
- ..\..\CAUDALEM.DAT: Series de caudales mensuales originales.

ARCHIVOS DE RESULTADOS (XX=MN, si la modelación es mensual. XX=AN, si la modelación es anual).

- ARMA-XX.RES: Matrices de parámetros del modelo ARMA.
- ATCMT-XX.RES: Correlogramas teóricos del modelo ARMA (sólo disponible para AR(1) y AR(2)).
- R-AUTCXX.RES: Correlogramas y estadísticos de las series residuales del modelo ARMA.
- R-COCRXX.RES: Matrices de correlación cruzada de las series residuales del modelo ARMA.
- R-LANES.RES: Correlogramas y estadísticos de las series residuales del modelo de desagregación espacial de Lane.
- DSGESPXX.RES: Matrices de parámetros del modelo de desagregación espacial de Lane.
- DSGTMPAM.RES: Matrices de parámetros del modelo condensado de desagregación temporal de Lane. Son 12, una por mes.

5.7. NIVEL 5: MÓDULO DE GENERACIÓN MENSUAL Y ANUAL DE SERIES SINTÉTICAS

Este módulo tiene la capacidad de generar en una sola ejecución caudales sintéticos mediante cualquiera de los siguientes esquemas:

- Sólo ARMA (AR(1), AR(2) o ARMA(1,1)) a nivel mensual o anual.

- ARMA y DESAGREGACIÓN ESPACIAL DE LANE (DSPC) a nivel mensual o anual.
- ARMA y DESAGREGACIÓN TEMPORAL DE LANE (DTMP) de escala anual a mensual.
- ARMA+DSPC+DTMP de escala anual a mensual.

SUBROUTINAS

- MODGENE3: Programa principal.
- GENMENSU: Gestiona toda la generación de series sintéticas mensuales.
- LECDATO3: Lee los datos generales.
- NRTPQPRV: Normaliza y tipifica los caudales previos.
- SEPARDAT: Separa las series principales de las secundarias y sus respectivos datos.
- GENARMAM: Genera las series sintéticas mensuales con los modelos ARMA.
- GENRESI3: Genera las series de números aleatorios distribuidos normalmente con media cero y desviación típica unitaria y no correlacionados.
- GQSARMA: Genera los caudales tipificados (z) de los modelos ARMA.
- DTDNEIM3: Destipifica y desnormaliza las series sintéticas mensuales, calcula sus estadísticos e imprime éstos y aquéllas en archivos.
- ATCQSINT: Calcula las funciones de autocorrelación medias de las series sintéticas.
- CCRQSINT: Calcula las matrices medias de correlación cruzada de las series sintéticas.
- GNLANSM2: Genera las series sintéticas mensuales mediante el modelo de desagregación espacial de Lane.
- GQSLANES: Genera los caudales tipificados del modelo de desagregación espacial de Lane.

- LECQSTIP: Lee los caudales tipificados que sirven de datos para la generación de series sintéticas cuando ésta se hace exclusivamente mediante el modelo de desagregación espacial de Lane.
- GENANUAL: Gestiona toda la generación de series sintéticas anuales.
- GENARMAA: Genera las series sintéticas anuales con los modelos ARMA.
- GNLANSA2: Genera las series sintéticas anuales mediante el modelo de desagregación espacial de Lane.
- DTDNEIA2: Destipifica y desnormaliza las series sintéticas anuales, calcula sus estadísticos e imprime éstos y aquéllas en archivos.
- GENANAMN: Genera las series sintéticas mensuales a partir de series sintéticas anuales generadas previamente por el mismo programa. Esto lo hace mediante el modelo condensado de desagregación temporal de Lane.
- GQSLANET: Genera los caudales mensuales tipificados del modelo de desagregación temporal de Lane a partir de caudales anuales sintéticos tipificados.
- STADQSAN: Calcula los estadísticos de las series anuales sintéticas.
- MMMSTQAS: Calcula los valores medios, máximos y mínimos de los estadísticos de las series anuales generadas.
- PRNSTQAS: Imprime en archivo los estadísticos de las series anuales generadas con sus respectivos valores medios.
- SEQUIAS: Calcula los valores medios de los estadísticos de sequía para tantos umbrales como el usuario lo desee. Estos umbrales se expresan como porcentaje del caudal medio de la serie de caudales. Dichos estadísticos son: número de sequías, duración media, intensidad media, magnitud media, duración máxima, intensidad máxima y magnitud máxima. Cuando las series son mensuales se calculan los estadísticos a nivel mensual y a nivel anual; cuando son anuales, sólo a nivel anual.
- ALMACNTO: Calcula los valores medios del rango, rango reescalado y coeficiente de Hurst para las series a nivel anual y los valores medios del volumen de embalse necesario para satisfacer demandas constantes equivalentes a porcentajes del caudal medio a nivel anual y mensual.

ARCHIVOS DE DATOS

- DATGEN.DAT: Contiene los datos generales del esquema de generación: tipo de modelo(s) a usar en la generación, orden de las estaciones en el esquema de desagregación espacial, número de años de generación, año inicial de las series sintéticas, mes inicial, matrices de parámetros de los modelos, caudales previos, estadísticos de destipificación, funciones de desnormalización y número máximo de caudales normalizados negativos que se admiten en la generación.
- MOA.DAT: Tiene dos registros.
 Primero: Se indica si se va a usar (S) o no (N) la opción de generación por desagregación temporal.
 Segundo: Se indica si la generación es mensual (M) o anual (A). Cuando el primer registro es S, el segundo no existe.
- UMBRALES.DAT: En éste se especifican el número de umbrales y sus valores, expresados como fracción del caudal medio. Dichos umbrales determinan las sequías y los volúmenes de embalse.
- DATSMEN.DAT: Datos de las series mensuales cuando la generación se hace por desagregación anual a mensual. Contiene: mes inicial, caudales previos, matrices de parámetros (son 12), estadísticos de destipificación, funciones de desnormalización y número máximo de caudales normalizados negativos que se admiten en la generación. Sólo se requiere cuando se usa el modelo de desagregación temporal para generar las series.
- QSTIPCOL.GEN: Caudales sintéticos (anuales o mensuales) tipificados de las estaciones principales. Sólo se requiere cuando se hace la generación exclusivamente mediante el modelo de desagregación espacial de Lane.

ARCHIVOS DE RESULTADOS

Para generación con modelos ARMA únicamente:

Generación mensual:

- QMSNTCOL.RES: Caudales mensuales sintéticos escritos en columnas. Una por cada serie generada.
- QMSNTTAB.RES: Caudales mensuales sintéticos escritos en tablas. Una por cada serie generada.
- QMSNTRSK.RES: Caudales mensuales sintéticos escritos en formato SIMRISK.
- ESTQMSNT.RES: Estadísticos de todas las series mensuales generadas.
- MEDQMSNT.RES: Valores medios de los estadísticos de las series mensuales sintéticas.
- EQASNTSM.RES: Estadísticos de las series anuales agregadas a partir de las series mensuales sintéticas.
- SEQ-MN.RES: Valores medios de los estadísticos de las sequías mensuales.
- SEQ-ANMN.RES: Valores medios de los estadísticos de las sequías anuales obtenidos a partir de las series de caudales mensuales.
- ALM-MN.RES: Valores medios de los estadísticos de almacenamiento de las series mensuales.
- ALM-ANMN.RES: Valores medios de los estadísticos de almacenamiento de las series anuales a partir de las series mensuales.
- ATCQMSNT.RES: Funciones de autocorrelación medias de las series mensuales generadas.
- CCRQMSNT.RES: Matrices medias de correlación cruzada de las series mensuales generadas.

Generación anual:

- QANSINT.RES: Caudales anuales sintéticos.
- QASNTRSK.RES: Caudales anuales sintéticos escritos en formato SIMRISK.
- ESTQASIN.RES: Estadísticos de los caudales anuales sintéticos y sus respectivos valores medios.
- SEQ-AN.RES: Valores medios de los estadísticos de las sequías anuales.
- ALM-AN.RES: Valores medios de los estadísticos de almacenamiento de las series anuales.

- ATCQASIN.RES: Funciones de autocorrelación medias de los caudales anuales sintéticos.
- CCRQASIN.RES: Matrices medias de correlación cruzada de las series anuales generadas.

Para generación con modelos ARMA y LANE ESPACIAL (X=M, si la generación es mensual. X=A, si la generación es anual):

- QXSEPCOL.RES: Caudales (mensuales o anuales) sintéticos de las estaciones principales escritos en columnas. Una por cada serie.
- QXSESCOL.RES: Caudales (mensuales o anuales) sintéticos de las estaciones secundarias escritos en columnas. Una por cada serie.
- QMSEPTAB.RES: Caudales mensuales sintéticos de las estaciones principales escritos en forma tabular.
- QMSESTAB.RES: Caudales mensuales sintéticos de las estaciones secundarias escritos en forma tabular.
- QXSEPSRK.RES: Caudales (mensuales o anuales) sintéticos de las estaciones principales escritos en formato SIMRISK.
- QXSESSRK.RES: Caudales (mensuales o anuales) sintéticos de las estaciones secundarias escritos en formato SIMRISK.
- ESTQXSEP.RES: Estadísticos de las series generadas en las estaciones principales.
- ESTQXSES.RES: Estadísticos de las series generadas en las estaciones secundarias
- MEDQMSEP.RES: Valores medios de los estadísticos de las series mensuales generadas en las estaciones principales.
- MEDQMSES.RES: Valores medios de los estadísticos de las series mensuales generadas en las estaciones secundarias.
- EQASSMEP.RES: Estadísticos (y sus valores medios) de las series anuales agregadas a partir de las series mensuales sintética, en las estaciones principales. Sólo aparece cuando la generación es mensual.

- EQASSMES.RES: Estadísticos (y sus valores medios) de las series anuales agregadas a partir de las series mensuales sintéticas, en las estaciones secundarias. Sólo aparece cuando la generación es mensual.
- ATCQXSEP.RES: Funciones de autocorrelación medias de las series sintéticas de las estaciones principales.
- ATCQXSES.RES: Funciones de autocorrelación medias de las series sintéticas de las estaciones secundarias.
- CCRQXSEP.RES: Matrices medias de correlación cruzada de las series sintéticas de las estaciones principales.
- CCRQXSES.RES: Matrices medias de correlación cruzada de las series sintéticas de las estaciones secundarias.

Para generación con MODELO DE DESAGREGACIÓN TEMPORAL:

- QMSDTCOL.RES: Caudales mensuales generados por desagregación temporal escritos en columnas. Una por cada serie.
- QMSDTTAB.RES: Caudales mensuales generados por desagregación temporal escritos en tablas. Una por cada serie.
- QMSDTSRK.RES: Caudales mensuales generados por desagregación temporal escritos en formato SIMRISK.
- ESTQMSDT.RES: Estadísticos de los caudales mensuales sintéticos.
- MESQMSDT.RES: Valores medios de los estadísticos de las series sintéticas mensuales.
- ATCQMSDT.RES: Funciones de autocorrelación medias de las series mensuales.
- CCRQMSDT.RES: Matrices medias de correlación cruzada de las series mensuales generadas.
- Además, los archivos antes descritos: QANSINT.RES, ESTQASIN.RES, ATCQASIN.RES, CCRQASIN.RES.

BIBLIOGRAFÍA

Bras, Rafael L. and Rodríguez-Iturbe, Ignacio. [1985]. *Random Functions in Hydrology*. Addison-Wesley Publishing Company. Massachusetts.

Haan, Charles T. [1977]. *Statistical Methods in Hydrology*. The Iowa University Press Ames. Iowa.

Helsel, D. R. and Hirsch, R. M. [1992]. *Statistical Methods in Water Resources*. ELSEVIER. Amsterdam

Hipel, K. W. and McLeod, A. I. [1994]. *Time Series Modeling of Water Resources and Environmental Systems*. ELSEVIER. Amsterdam.

Loucks, Daniel P., Stedinger, Jerry R. and Haith, Douglas A. [1981]. *Water Resources System Planning and Analysis*. Prentice Hall. New Jersey.

Mood, Alexander M., Graybill, Franklin A. and Boes, Duane C. [1974]. *Introduction to the Theory of Statistics*. McGraw-Hill. New York.

Salas, Jose D., Delleur, J. W., Yevjevich, V. and Lane, W. L. [1980]. *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado.