



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS
REPÚBLICA ARGENTINA



**PROYECTO “PROTECCIÓN AMBIENTAL DEL RÍO DE LA PLATA
Y SU FRENTE MARÍTIMO: PREVENCIÓN Y CONTROL
DE LA CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE HÁBITATS”**

**PROYECTO PNUD/GEF
RLA/99/G31**



Imagen NOAA-AVHRR 11/03/99 (CONAE- República Argentina)



*Proyecto LHA 216
Informe LHA 01-216-02
Ezeiza, Julio de 2002*

LABORATORIO DE HIDRÁULICA

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE:

Ing. Oscar V. LICO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS:

Dr. Raúl A. LOPARDO

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA:

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL:

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL (LHA)

Ing. Patricia R. JAIME

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Téc. Julio A. TORCHIO

SISTEMA DE INFORMACIÓN Y ALERTA HIDROLÓGICO (SIAH)

Ing. Marcelo URIBURU QUIRNO

Dra. Dora GODNIASKY

Ing. Juan A. BORUS

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Patricia R. JAIME

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Capítulo 1: Ing. Marcelo URIBURU QUIRNO

Capítulo 6: Téc. Julio A. TORCHIO

ANÁLISIS DEL REGIMEN HIDROLÓGICO DE LOS RÍOS PARANÁ Y URUGUAY

Informe

Patricia R. Jaime y Ángel N. Menéndez

RESUMEN

Se efectúa una caracterización de los regímenes hidrológicos de los ríos Paraná y Uruguay en base al análisis de las series temporales de caudales. En ambos ríos se identifica fehacientemente el comienzo de un ciclo húmedo desde alrededor de 1971. Además, para ambos se efectúa una distinción de un ciclo anterior relativamente seco, comenzando en 1943. Además del aumento del caudal medio, en el ciclo húmedo se observa un aumento de la amplitud de variación del caudal en el río Paraná; no así en el río Uruguay. Se verifica una marcada estacionalidad con un pico de creciente y uno de bajante en el río Paraná; para el río Uruguay se observa una bajante definida y dos picos de creciente, uno más definido que el otro. En relación a la variabilidad interanual, se detectan componentes periódicas de alto contenido energético para 14-17 años y 6-8 años en ambos ríos. Estas últimas son más significativas durante el ciclo húmedo en el Paraná y durante el ciclo seco en el Uruguay. Los picos positivos y negativos de caudal se han incentivado en el río Paraná desde el inicio del ciclo húmedo; en el río Uruguay, sólo los negativos.

Descriptores temáticos: Caudales medios mensuales, tendencia, ciclos, estacionalidad, variabilidad interanual, procesamiento digital de señales.

Descriptores geográficos: Río de la Plata, Río Paraná, Río Uruguay, República Argentina.

INTRODUCCIÓN

Los ríos Paraná y Uruguay son los dos principales tributarios del Río de la Plata, con caudales medios de gran significación. Ese aporte de caudal constituye, de hecho, uno de los tres condicionantes del régimen hidrodinámico del Río de la Plata. Los otros dos son la onda de marea oceánica y los vientos.

A partir de disponer de una base de datos de caudales continua y de gran extensión temporal para ambos ríos, en este Informe se presenta un estudio detallado acerca de cómo se ha venido desarrollando el régimen hidrológico de cada uno de ellos. De este estudio surge una caracterización del régimen de cada río que servirá de base, por un lado, para buscar relaciones con el régimen climático que le dio origen y, por el otro, para generar los forzantes de escenarios futuros del Río de la Plata.

Este estudio se desarrolla en el marco del Proyecto PNUD/GEF/RLA/99/G31 "Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats".

ÍNDICE

1	SERIES DE CAUDALES DE LOS RÍOS PARANÁ Y URUGUAY.....	1
1.1	INFORMACIÓN UTILIZADA EN EL PRESENTE ESTUDIO	1
1.2	CAUDALES DEL RÍO PARANÁ.....	2
1.3	CAUDALES DEL RÍO URUGUAY	5
2	IDENTIFICACIÓN DE CICLOS.....	11
2.1	ANTECEDENTES.....	11
2.2	TEST DE MANN-KENDALL PARA TENDENCIAS.....	12
2.2.1	<i>Formulación</i>	12
2.2.2	<i>Aplicación</i>	13
2.3	TEST DE DESVIACIONES ACUMULADAS (Q)	16
2.4	PRUEBA DE MANN-WHITNEY	17
2.4.1	<i>Formulación</i>	17
2.4.2	<i>Aplicación</i>	18
2.5	SELECCIÓN DE CICLOS.....	18
3	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES	20
3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL.....	20
3.2	ESTADÍSTICOS BÁSICOS.....	27
3.3	ANÁLISIS COMPARATIVO DE CAUDALES CARACTERÍSTICOS.....	37
4	DESCOMPOSICIÓN ESTACIONAL	40
4.1	RÍO PARANÁ	41
4.2	RÍO URUGUAY	49
4.3	RÉGIMEN MENSUAL DE LOS RÍOS PARANÁ Y URUGUAY.....	57

5	ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES	63
5.1	EL CICLO ESTACIONAL MEDIO	63
5.2	ANÁLISIS DE MODOS PROPIOS	69
5.2.1	<i>Formulación</i>	69
5.2.2	<i>Aplicación</i>	70
5.2.3	<i>Cálculo de las componentes principales por ciclo</i>	82
5.2.4	<i>Reconstrucción de las series de caudales medios estacionales</i>	100
6	ANÁLISIS DE ONDITAS.....	106
6.1	ANÁLISIS DISCRETO	106
6.2	APLICACIÓN DE ANÁLISIS DISCRETO	111
6.2.1	<i>Río Paraná</i>	111
6.2.2	<i>Río Uruguay</i>	116
6.3	ANÁLISIS CONTINUO.....	119
6.4	APLICACIÓN DE ANÁLISIS CONTINUO	121
6.4.1	<i>Río Paraná</i>	121
6.4.2	<i>Río Uruguay</i>	122
7	ANÁLISIS DE EVENTOS.....	123
7.1	FRECUENCIA DE PERÍODOS DE AGUAS BAJAS Y ALTAS	123
8	CONCLUSIONES	138
	REFERENCIAS	140

FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de Ubicación

Figura 1.2 Aforos y curva de descarga del Río Paraná en la sección Paraná-Santa Fe

Figura 1.3 Curva de permanencia de caudales medios mensuales del Río Paraná en la sección Túnel

Figura 1.4 Curva de permanencia de caudales medios mensuales del Río Uruguay en la sección Concordia

Figura 1.5 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1931-40)

Figura 1.6 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1941-50)

Figura 1.7 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1951-60)

Figura 1.8 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1961-70)

Figura 1.9 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1971-80)

Figura 1.10 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1981-90)

Figura 1.11 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1991-01)

Figura 2.1 Valores progresivos del estadístico $u(t)$ de los caudales medios anuales del río Paraná en la sección Santa Fe-Paraná (1931-2001)

Figura 2.2 Valores progresivos del estadístico $u(t)$ de los caudales medios anuales del río Uruguay en la sección Concordia (1931-2001)

Figura 2.3 Valores progresivos de los estadístico $u(t)$ y $u'(t)$ de los caudales medios anuales del río Paraná en la sección Santa Fe-Paraná (1931-2001)

Figura 2.4 Valores progresivos de los estadísticos $u(t)$ y $u'(t)$ de los caudales medios anuales del río Uruguay en la sección Concordia (1931-2001)

*Figura 2.5 Valores progresivos del estadístico S^{**} de los caudales medios anuales de los ríos Paraná y Uruguay (1931-2001)*

Figura 3.1 Distribución de caudales medios mensuales del río Paraná en el período 1931-2001

Figura 3.2 Distribución de caudales medios mensuales del río Uruguay en el período 1931-2001

Figura 3.3.a Distribución de caudales medios mensuales del río Paraná en el período 1931-43

Figura 3.3.b Distribución de caudales medios mensuales del río Paraná en el período 1944-70

Figura 3.3.c Distribución de caudales medios mensuales del río Paraná en el período 1971-01

Figura 3.4.a Distribución de caudales medios mensuales del río Uruguay en el período 1931-43

Figura 3.4.b Distribución de caudales medios mensuales del río Uruguay en el período 1944-70

Figura 3.4.c Distribución de caudales medios mensuales del río Uruguay en el período 1971-01

Figura 3.5.a Histograma de caudales medios mensuales del río Paraná (1931-2001)

Figura 3.5.b Histograma de caudales medios mensuales del río Uruguay (1931-2001)

Figura 3.6 Diagrama de caja de caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1931-2001)

Figura 3.7.a Histograma de caudales medios mensuales del río Paraná (1931-43)

Figura 3.7.b Histograma de caudales medios mensuales del río Uruguay (1931-43)

Figura 3.8.a Histograma de caudales medios mensuales del río Paraná (1944-70)

Figura 3.8.b Histograma de caudales medios mensuales del río Uruguay (1944-70)

Figura 3.9.a Histograma de caudales medios mensuales del río Paraná (1971-01)
Figura 3.9.b Histograma de caudales medios mensuales del río Uruguay (1971-01)
Figura 3.10 Diagramas de caja de caudales medios mensuales del río Paraná
Figura 3.11 Diagramas de caja de caudales medios mensuales del río Uruguay
Figura 4.1.a Medias móviles de caudal medio mensual (1931-01)
Figura 4.1.b Componente estacional del caudal medio mensual (1931-01)
Figura 4.1.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1931-01)
Figura 4.1.d Componente irregular del caudal medio mensual (1931-01)
Figura 4.2.a Medias móviles de caudal medio mensual (1931-43)
Figura 4.2.b Componente estacional del caudal medio mensual (1931-43)
Figura 4.2.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1931-43)
Figura 4.2.d Componente irregular del caudal medio mensual (1931-43)
Figura 4.3.a Medias móviles de caudal medio mensual (1944-70)
Figura 4.3.b Componente estacional del caudal medio mensual (1944-70)
Figura 4.3.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1944-70)
Figura 4.3.d Componente irregular del caudal medio mensual (1944-70)
Figura 4.4.a Medias móviles de caudal medio mensual (1971-01)
Figura 4.4.b Componente estacional del caudal medio mensual (1971-01)
Figura 4.4.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1971-01)
Figura 4.4.d Componente irregular del caudal medio mensual (1971-01)
Figura 4.5.a Medias móviles de caudal medio mensual (1931-01)
Figura 4.5.b Componente estacional del caudal medio mensual (1931-01)
Figura 4.5.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1931-01)
Figura 4.5.d Componente irregular del caudal medio mensual (1931-01)
Figura 4.6.a Medias móviles de caudal medio mensual (1931-43)
Figura 4.6.b Componente estacional del caudal medio mensual (1931-43)
Figura 4.6.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1931-43)
Figura 4.6.d Componente irregular del caudal medio mensual (1931-43)
Figura 4.7.a Medias móviles de caudal medio mensual (1944-70)
Figura 4.7.b Componente estacional del caudal medio mensual (1944-70)
Figura 4.7.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1944-70)
Figura 4.7.d Componente irregular del caudal medio mensual (1944-70)
Figura 4.8.a Medias móviles de caudal medio mensual (1971-01)
Figura 4.8.b Componente estacional del caudal medio mensual (1971-01)
Figura 4.8.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1971-01)
Figura 4.8.d Componente irregular del caudal medio mensual (1971-01)
Figura 4.9 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Paraná (1931-43)
Figura 4.10 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Paraná (1944-70)
Figura 4.11 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Paraná (1971-01)
Figura 4.12 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Paraná (1931-01)

Figura 4.13 Promedios de caudales medios mensuales en el río Paraná por ciclo

Figura 4.14 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Uruguay (1931-43)

Figura 4.15 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Uruguay (1944-70)

Figura 4.16 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Uruguay (1971-01)

Figura 4.17 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Uruguay (1931-01)

Figura 4.18 Promedios de caudales medios mensuales en el río Uruguay por ciclo

Figura 5.1 Evolución anual del caudal medio estacional del río Paraná (período 1931-2001)

Figura 5.2 Evolución anual del caudal medio estacional del río Uruguay (período 1931-2001)

Figura 5.3 Evolución anual del caudal medio estacional del río Paraná (período 1931-43)

Figura 5.4 Evolución anual del caudal medio estacional del río Paraná (período 1944-70)

Figura 5.5 Evolución anual del caudal medio estacional del río Paraná (período 1971-01)

Figura 5.6 Comparación de caudales medios estacionales del río Paraná

Figura 5.7 Evolución anual del caudal medio estacional del río Uruguay (período 1931-43)

Figura 5.8 Evolución anual del caudal medio estacional del río Uruguay (período 1944-70)

Figura 5.9 Evolución anual del caudal medio estacional del río Uruguay (período 1971-01)

Figura 5.10 Comparación de caudales medios estacionales del río Uruguay

Figura 5.11 Cargas factoriales del caudal estacional del río Paraná (período 1931-2001)

Figura 5.12 Puntuaciones factoriales del caudal estacional del río Paraná (período 1931-2001)

Figura 5.13 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Paraná 1931-2001)

Figura 5.14 Reconstrucción de la serie de puntuaciones factoriales de la primera componente principal (Río Paraná 1931-2001)

Figura 5.15 Reconstrucción de la serie de puntuaciones factoriales de la segunda componente principal (Río Paraná 1931-2001)

Figura 5.16 Cargas factoriales del caudal estacional del río Uruguay (período 1931-2001)

Figura 5.17 Puntuaciones factoriales del caudal medio mensual del río Uruguay (período 1931-2001)

Figura 5.18 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Uruguay 1931-2001)

Figura 5.19 Reconstrucción de la serie de puntuaciones factoriales de la primera componente principal (Río Uruguay 1931-2001)

Figura 5.20 Reconstrucción de la serie de puntuaciones factoriales de la segunda componente principal (Río Uruguay 1931-2001)

Figura 5.21 Cargas factoriales del caudal medio estacional del río Paraná (período 1931-43)

Figura 5.22 Cargas factoriales del caudal medio estacional del río Paraná (período 1943-70)

Figura 5.23 Cargas factoriales del caudal medio estacional del río Paraná (período 1971-01)

Figura 5.24 Comparación de primer modo del caudal medio mensual del río Paraná

Figura 5.25 Comparación de segundo modo del caudal medio mensual del río Paraná

Figura 5.26 Puntuaciones factoriales del caudal medio mensual del río Paraná (período 1931-43)

Figura 5.27 Puntuaciones factoriales del caudal medio mensual del río Paraná (período 1944-70)

Figura 5.28 Puntuaciones factoriales del caudal medio mensual del río Paraná (período 1971-01)

Figura 5.29 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Paraná 1931-43)

Figura 5.30 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Paraná 1944-70)

Figura 5.31 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Paraná 1971-01)

Figura 5.32 Cargas factoriales del caudal estacional del río Uruguay (período 1931-43)

Figura 5.33 Cargas factoriales del caudal estacional del río Paraná (período 1944-70)

Figura 5.34 Cargas factoriales del caudal estacional del río Paraná (período 1971-01)

Figura 5.35 Comparación de primer modo del caudal estacional del río Uruguay

Figura 5.36 Comparación de segundo modo del caudal estacional del río Uruguay

Figura 5.37 Puntuaciones factoriales del caudal estacional del río Uruguay (período 1931-43)

Figura 5.38 Puntuaciones factoriales del caudal estacional del río Uruguay (período 1944-70)

Figura 5.39 Puntuaciones factoriales del caudal estacional del río Uruguay (período 1971-01)

Figura 5.40 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Uruguay 1931-43)

Figura 5.41 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Uruguay 1944-70)

Figura 5.42 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Uruguay 1971-01)

Figura 5.43 Caudales medios estacionales del Río Paraná (1931-43)

Figura 5.44 Caudales medios estacionales del Río Paraná (1944-70)

Figura 5.45 Caudales medios estacionales del Río Paraná (1971-01)

Figura 5.46 Caudales medios estacionales del Río Uruguay (1931-43)

Figura 5.47 Caudales medios estacionales del Río Uruguay (1944-70)

Figura 5.48 Caudales medios estacionales del Río Uruguay (1971-01)

Figura 6.1 Onditas para tres escalas normalizadas a energía 1 e igual parámetro t'

Figura 6.2 Caudales medios mensuales del Río Paraná en el período 1931-2001

Figura 6.3 Espectro de frecuencias de los caudales medios mensuales del Río Paraná en el período 1931-2001

Figura 6.4 Función de escala de la familia Daubechies

Figura 6.5 Descomposición de los caudales medios mensuales del Río Paraná

Figura 6.6 Caudales medios mensuales del Río Uruguay en el período 1931-2001

Figura 6.7 Espectro de frecuencias de los caudales medios mensuales del Río Uruguay en el período 1931-2001

Figura 6.8 Descomposición de los caudales medios mensuales del Río Uruguay

Figura 6.10 Espectro de potencia continuo para el río Paraná

Figura 6.11 Espectro de potencia continuo para el río Uruguay

Figura 7.1 Frecuencia de períodos de aguas altas en el río Paraná

Figura 7.2 Frecuencia de períodos de aguas bajas en el río Paraná

Figura 7.3 Frecuencia de períodos de aguas altas en el río Uruguay

Figura 7.4 Frecuencia de períodos de aguas bajas en el río Uruguay

Figura 7.5 Caudales medios mensuales excedentes del umbral de aguas altas en el río Paraná

Figura 7.6 Caudales medios mensuales inferiores al umbral de aguas bajas en el río Paraná

Figura 7.7 Caudales medios mensuales excedentes del umbral de aguas altas en el río Uruguay

Figura 7.8 Caudales medios mensuales inferiores al umbral de aguas bajas en el río Uruguay

1 SERIES DE CAUDALES DE LOS RÍOS PARANÁ Y URUGUAY

1.1 INFORMACIÓN UTILIZADA EN EL PRESENTE ESTUDIO

Para el presente estudio han sido utilizadas series de caudales medios mensuales correspondientes al río Paraná en la sección del cierre Santa Fe – Paraná y al río Uruguay en la sección Concordia. La ubicación de ambas secciones se presenta en la figura 1.1.

Cada valor de estas series ha sido calculado promediando a lo largo de un dado mes los valores diarios de caudal. A su vez, cada valor diario surge de transformar a caudal una única lectura de escala, mediante una curva de descarga propia de la sección.



Figura 1.1 Mapa de Ubicación

1.2 CAUDALES DEL RÍO PARANÁ

La escala hidrométrica del río Paraná pertenece a la Dirección Nacional de Vías Navegables y es leída por personal de Prefectura Naval Argentina (PNA). El registro disponible de alturas del río Paraná en la escala homónima comienza en el año 1902. Las lecturas son de las 04:00hs. Con el criterio de unificar períodos de observación, se tomó para este estudio un origen en 1931, impuesto por la disponibilidad de datos en el río Uruguay, limitada al período que comienza en dicho año.

Por esta sección del río Paraná, cuyo ancho ronda los 13 km, drena una inmensa cuenca de unos 2.302.000km² (Estadística Hidrológica 1997, SSRH).

La curva de descarga en esta sección consta de tres ramas parabólicas, de segundo grado las extremas y de tercero la central. Las ramas extremas fueron elaboradas por la Gerencia Paraná Medio de Agua y Energía Eléctrica (AyEE) en los años 1986 (parte inferior) y 1992 (parte superior) mientras que el empalme central fue propuesto por el INCyTH (actualmente, INA) en 1996. Tal como consignan Giacosa et al. (2000), para aforar esta estación se debe no sólo contemplar el cauce principal recostado sobre la margen izquierda, sino también complementarse con mediciones del río Colastiné, en once puentes de la Ruta Nacional 168, que atraviesa transversalmente todo el valle de inundación, y con aforos en la Laguna Setúbal, para así completar el cierre. Tal complejidad hace casi imposible reconstruir una serie histórica consistente, dadas las permanentes modificaciones sufridas en la sección.

La curva de descarga en la sección Paraná-Santa Fe utilizada en este estudio tiene la siguiente expresión matemática:

$$Q(h) = 385.00 \cdot h^2 + 1020.00 \cdot h + 7909.00 \quad h < 3.70m$$

$$Q(h) = 199.26 \cdot h^3 + 2218.77 \cdot h^2 - 15277.84 \cdot h + 33014.66 \quad h < 4.30m$$

$$Q(h) = 1829.13 \cdot h^2 - 8242.61 \cdot h + 25810.00 \quad h \geq 4.30m$$

donde h es la lectura de escala en la ciudad de Paraná, expresada en metros y Q es el caudal descargado, en m³/s.

La misma considera todas las vías de escurrimiento mencionadas. Por ejemplo, hacia junio de 1983 se aforó un caudal total de unos 56.800m³/s, discriminado como se observa en la tabla 1.1.

La aplicación de la curva de descarga para una lectura de 6,77 m en la escala de Paraná resulta en un caudal de 53.842m³/s, es decir, un 95% del valor aforado. Esta diferencia es razonable, inferior a la cota de error habitual en este tipo de estimaciones.

Tabla 1.1
 Caudales aforados en el Río Paraná en junio de 1983 (Fuente: EVARSA)

Río	Fecha	Altura [m]	Caudal Aforado [m³/s]
PARANÁ EN TÚNEL	29/06/83	6,77	34730,64
COLASTINÉ (RN 168)	30/06/83	7,02	5706,74
SISTEMA SETÚBAL	30/06/83	7,19	8480,88
ALIVIADOR Nº 1	28/06/83	7,12	422,75
ALIVIADOR Nº 2	28/06/83	7,12	687,68
ALIVIADOR Nº 3	29/06/83	7,14	325,75
ALIVIADOR Nº 4	29/06/83	7,14	758,86
ALIVIADOR Nº 5	29/06/83	7,14	436,9
ALIVIADOR Nº 6	30/06/83	7,19	547,22
ALIVIADOR Nº 7	30/06/83	7,19	307,02
ALIVIADOR Nº 8	28/06/83	7,12	79,59
ALIVIADOR Nº 9	27/06/83	7,09	1972,27
ALIVIADOR Nº 10	27/06/83	7,09	1614,54
ALIVIADOR Nº 11	27/06/83	7,09	727,85
TOTAL			56798,69

En la figura 1.2 se grafica una nube de aforos efectuados entre 1983 y 2001 por AyEE y luego EVARSA. La misma es contrastada con la curva de descarga de la sección. Es notorio como a partir de lecturas de 4,00 m los puntos aforados se ubican muy por debajo de la curva, a igual abscisa. Esto ocurre porque los aforos fueron efectuados exclusivamente sobre el cauce principal, en la sección Túnel, excepto el aforo completo de fines de junio de 1983, tabulado, el cual cubre la sección completa, quedando muy cercano a la curva ajustada, tal como se mencionó.

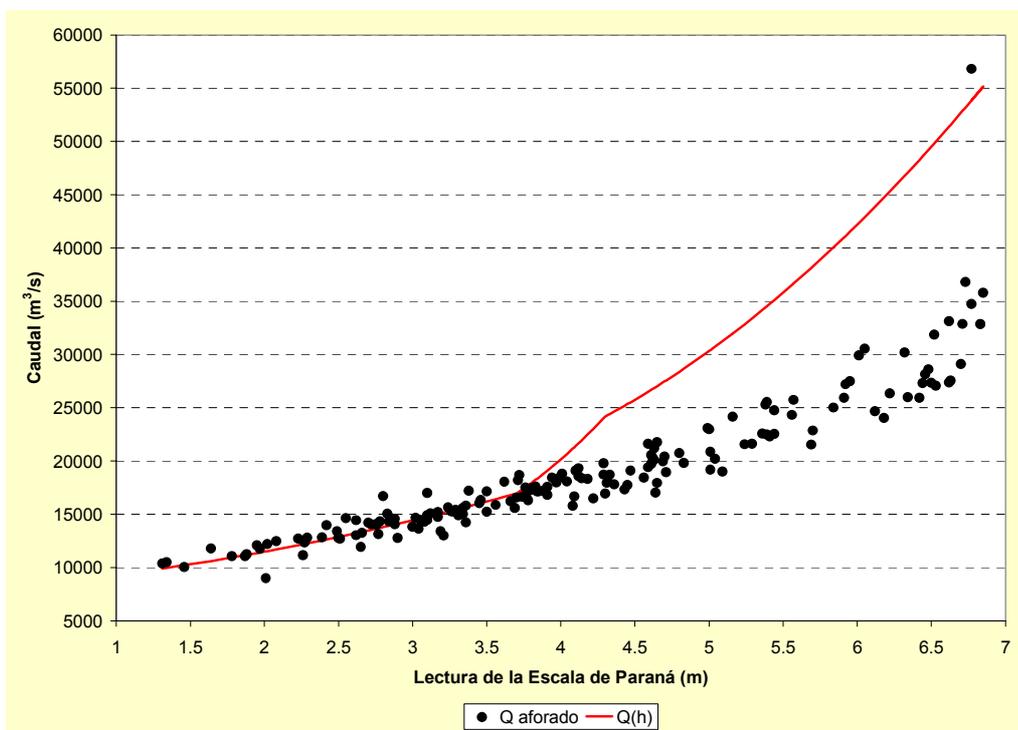


Figura 1.2 Aforos y curva de descarga del Río Paraná en la sección Paraná-Santa Fe

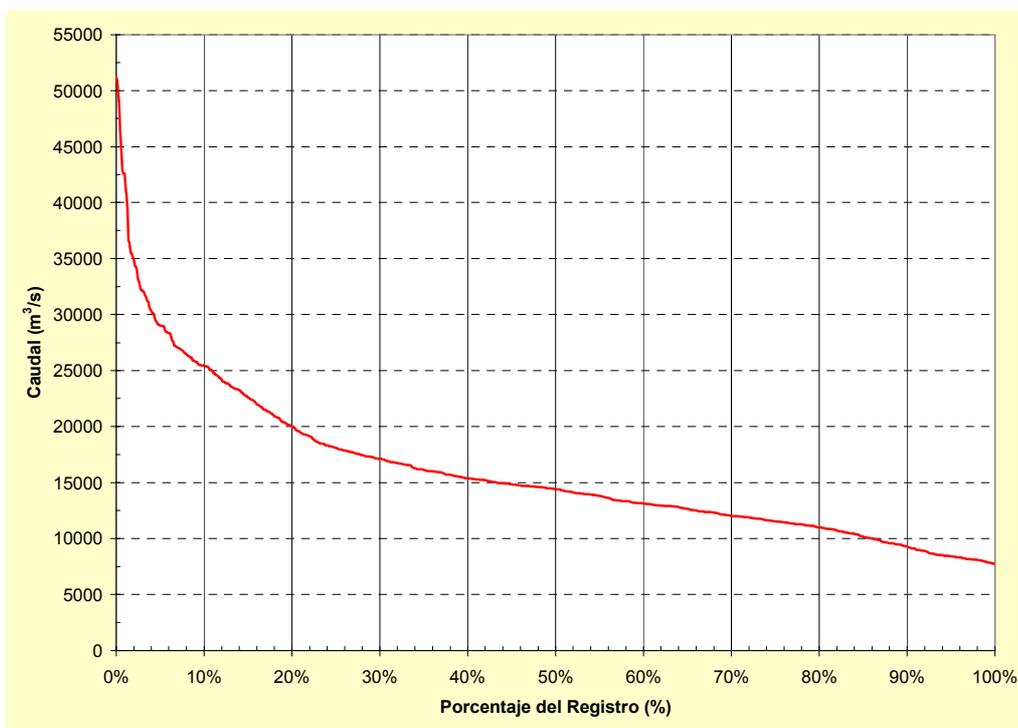


Figura 1.3 Curva de permanencia de caudales medios mensuales del Río Paraná en la sección Túnel

La figura 1.3 muestra la curva de permanencia de caudales medios mensuales en la sección Túnel. El período analizado es el comprendido entre los años 1931 y 2001. De la misma se pueden extraer los caudales característicos mostrados en la tabla 1.2.

Tabla 1.2
 Caudales característicos del Río Paraná en el período 1931-2001

Valor característico	Caudal (m³/s)
Mínimo Absoluto	7752
Mínimo Característico (Q95%)	8394
Semipermanente (Q50%)	14410
Máximo Característico (Q5%)	29007
Máximo Absoluto	51230

1.3 CAUDALES DEL RÍO URUGUAY

La escala hidrométrica de Concordia, en el río Uruguay, tiene un registro diferenciado. A partir del año 1985 los registros corresponden a la red telemétrica de la Comisión Técnica Mixta Salto Grande (CTM). La porción anterior a 1985 proviene de la Dirección Nacional de Vías Navegables, leída por la PNA.

Por esta sección, el río Uruguay drena una cuenca de unos 239.000 km².

El registro de Concordia tiene su origen en el año 1931 y presenta un vacío de una década, la de 1961 a 1970. Dicha fracción faltante fue completada con un registro de caudales medios diarios descargados por la central de Salto Grande, provistos por CTM.

Los caudales diarios resultan de la transformación de una única lectura de escala diaria de las 06:00hs. En consecuencia, y dada la proximidad de la escala a la presa de Salto Grande, unos 15 km agua abajo, este registro de altura corresponde a un momento de generación eléctrica alejado del pico. Bajo estas condiciones, desde que Salto Grande entró en operación (1979) el valor puntual de gasto resulta tener un error por defecto como estimador de caudal medio diario, estadístico necesario para el cómputo del medio mensual.

La curva de descarga empleada, ecuación de transformación de lectura en caudal, fue elaborada por el estudio del Ing. Gradowzyck, en 1982. Se considera esa única curva a lo largo de todo el registro como satisfactoria para la evaluación de la variable Caudal Medio Mensual. Para este estado de agregación de los datos el resultado es razonable, salvando el mencionado defecto, inevitable dada la hora de lectura.

La escala hidrométrica se encuentra en el puerto de la ciudad y pertenece a la red de escalas convencionales de la actual Dirección Nacional de Vías Navegables. La lectura diaria es realizada desde hace muchos años por personal de la Prefectura Naval Argentina.

La sección en la que se realizaron oportunamente algunos aforos se ubica unos 15 km aguas abajo de la presa. La curva mencionada es el resultado del ajuste de los pares altura-caudal resultantes de la aplicación de un modelo hidrodinámico. Por lo tanto, no se dispone de información que permita caracterizar el rango conveniente de aplicación de esa transformación. Se supone que durante el estudio mencionado el consultor dispuso de los hidrogramas operativos necesarios como para obtener una nube de puntos suficientemente abarcadora de distintas condiciones fluviales y del embalse.

La curva de descarga en la sección Concordia tiene la siguiente expresión matemática:

$$Q(h) = 177.66 \cdot (h + 1.00)^{0.22} \quad h \leq -0.329m$$

$$Q(h) = 299.35 \cdot (h + 1.00)^{1.52} \quad h \leq 3.04m$$

$$Q(h) = 227.26 \cdot (h + 1.00)^{1.72} \quad h > 3.04m$$

donde h es la lectura de la escala de Concordia, expresada en metros, y Q es el caudal erogado por la sección, en m^3/s .

La figura 1.4 muestra la curva de permanencia de caudales medios mensuales en la sección Concordia para el período de análisis (1931-2001). De la misma se pueden extraer los caudales característicos mostrados en la tabla 1.3

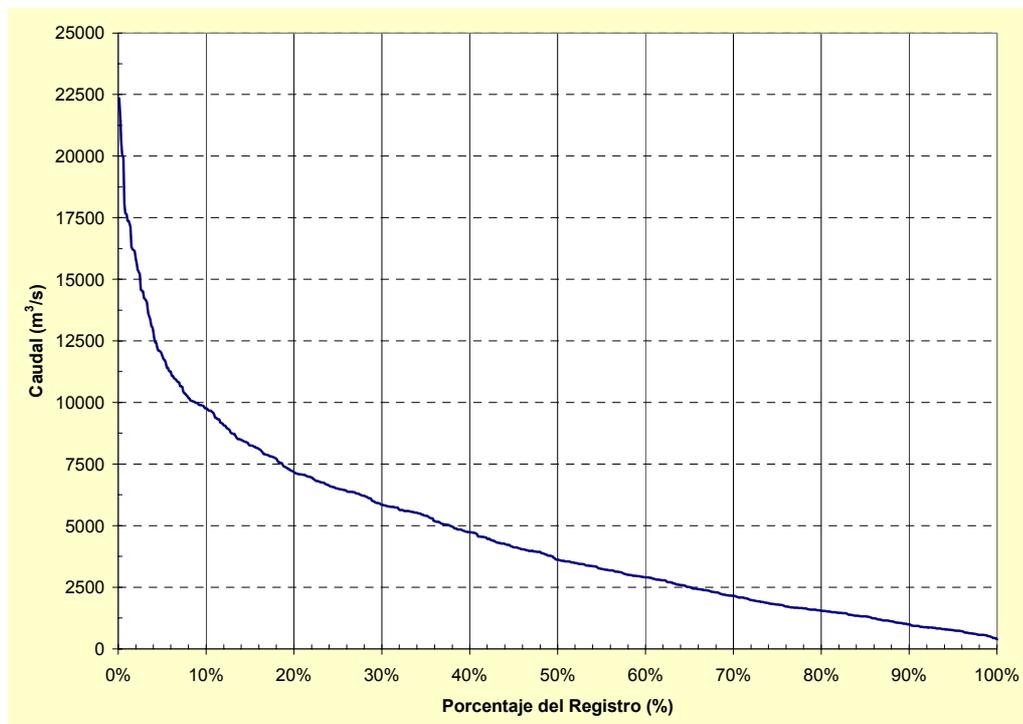


Figura 1.4 Curva de permanencia de caudales medios mensuales del Río Uruguay en la sección Concordia

Tabla 1.3
Caudales característicos del Río Uruguay en el período 1931-2001

Valor característico	Caudal (m³/s)
Mínimo Absoluto	382
Mínimo Característico (Q95%)	755
Semipermanente (Q50%)	3613
Máximo Característico (Q5%)	11902
Máximo Absoluto	22347

Para facilitar su visualización, las series temporales de caudales medios mensuales del río Paraná en la estación Paraná y del Uruguay en la estación Concordia se presentan por décadas en las figuras 1.5 a 1.11.

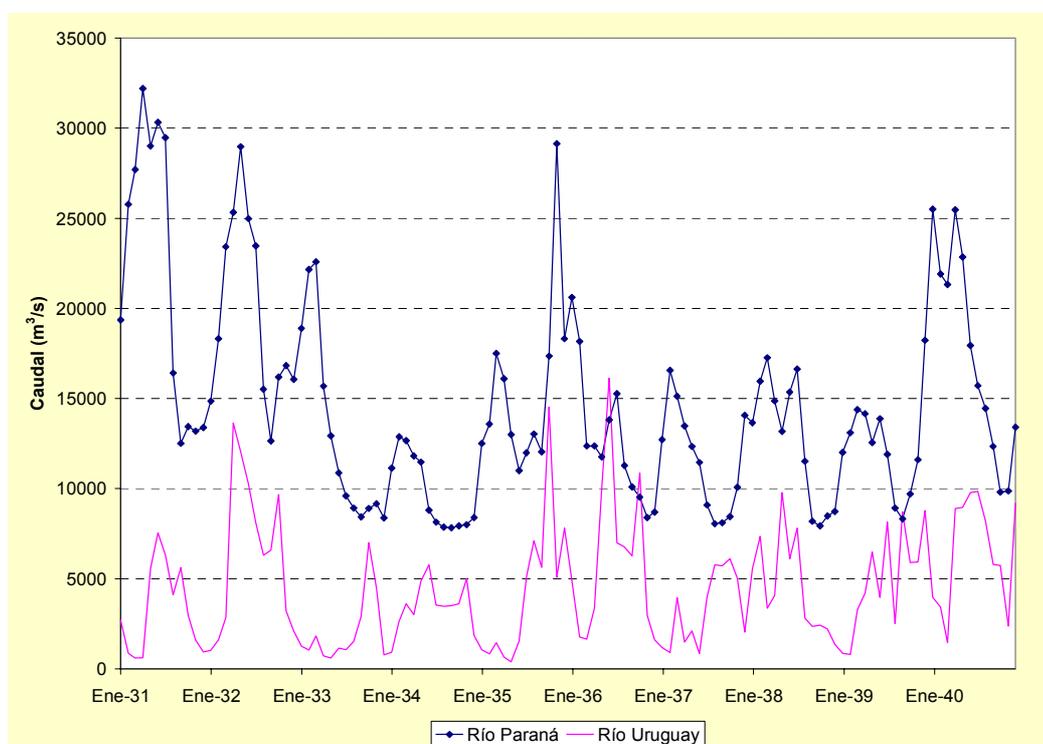


Figura 1.5 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1931-40)

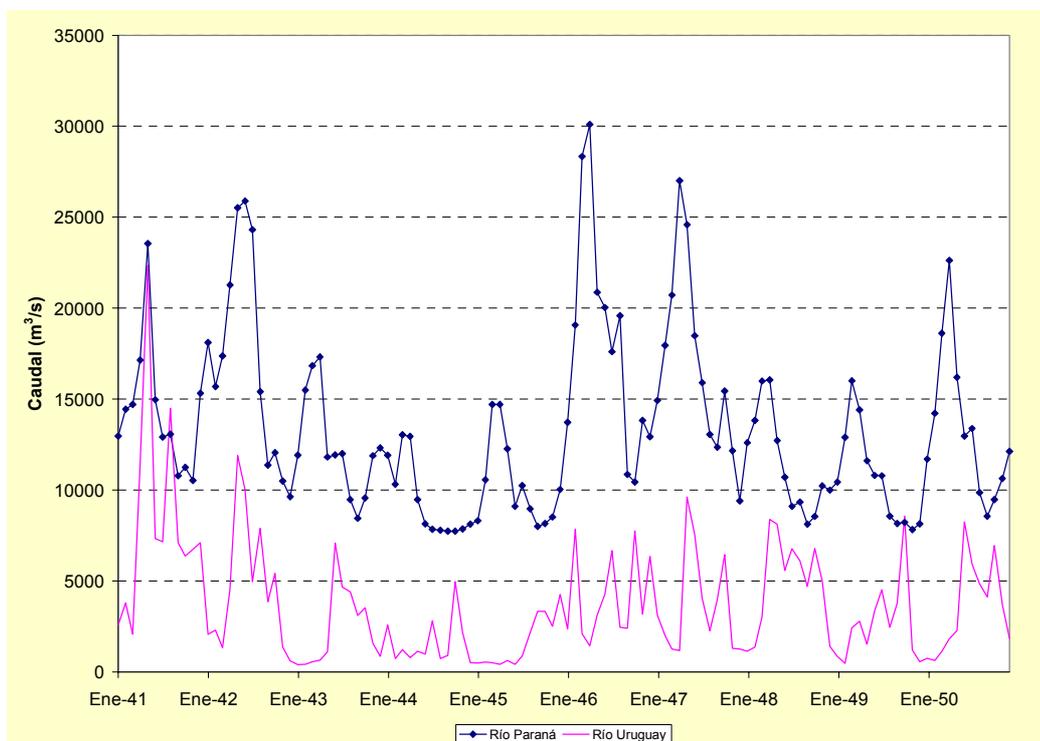


Figura 1.6 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1941-50)

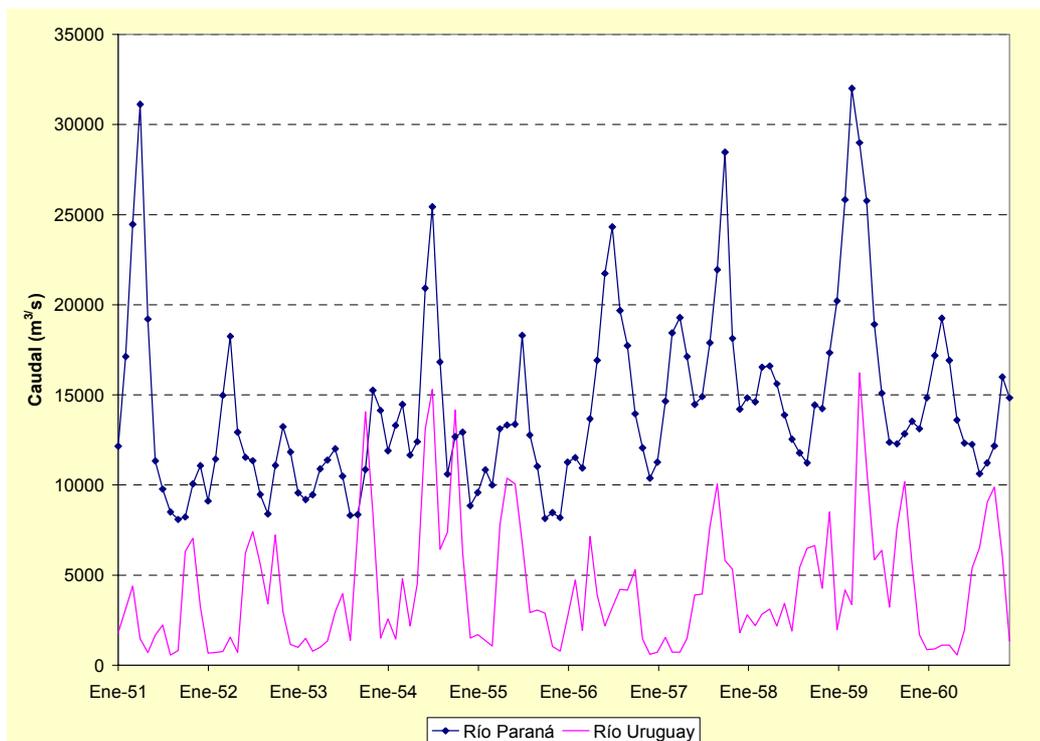


Figura 1.7 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1951-60)

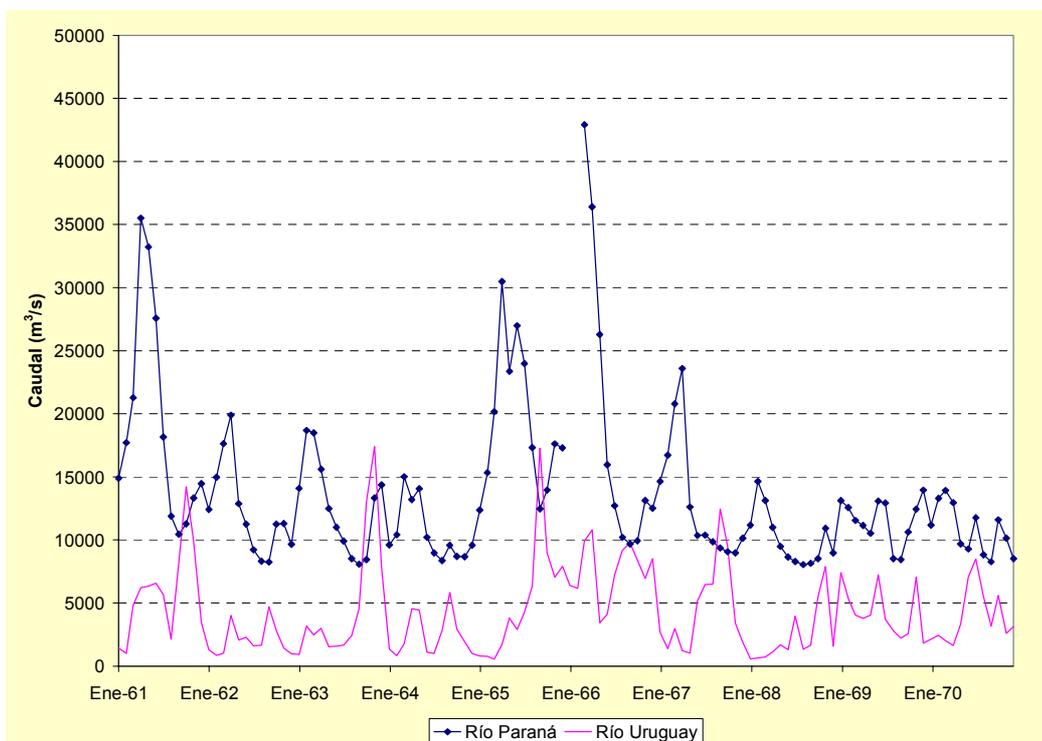


Figura 1.8 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1961-70)

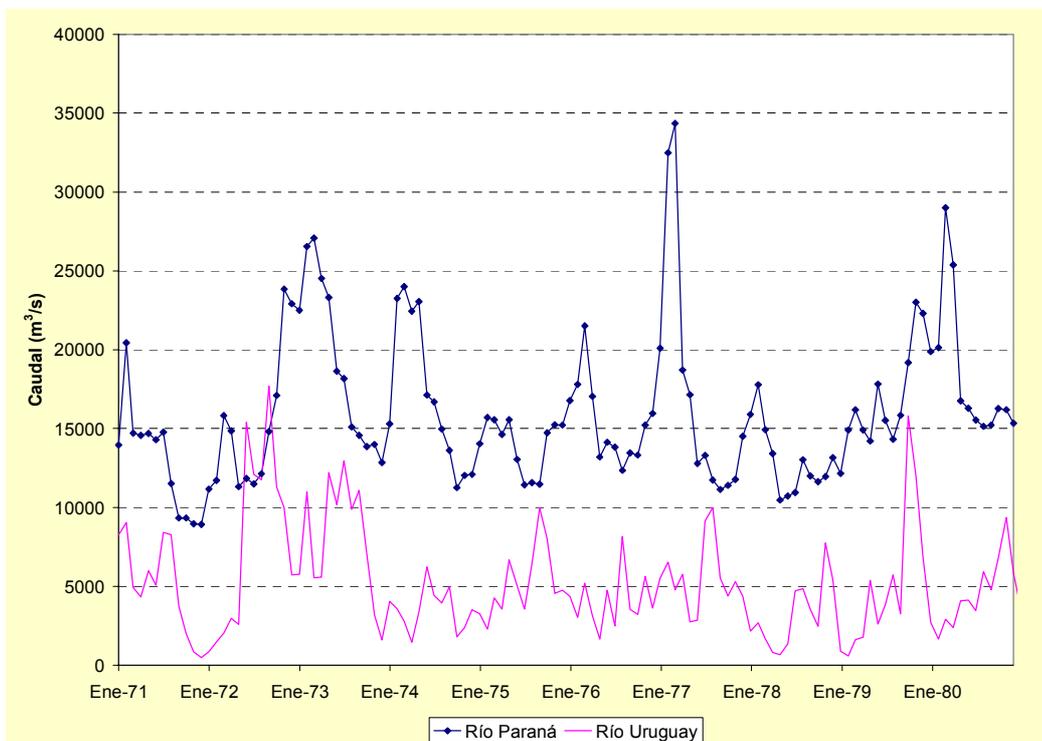


Figura 1.9 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1971-80)

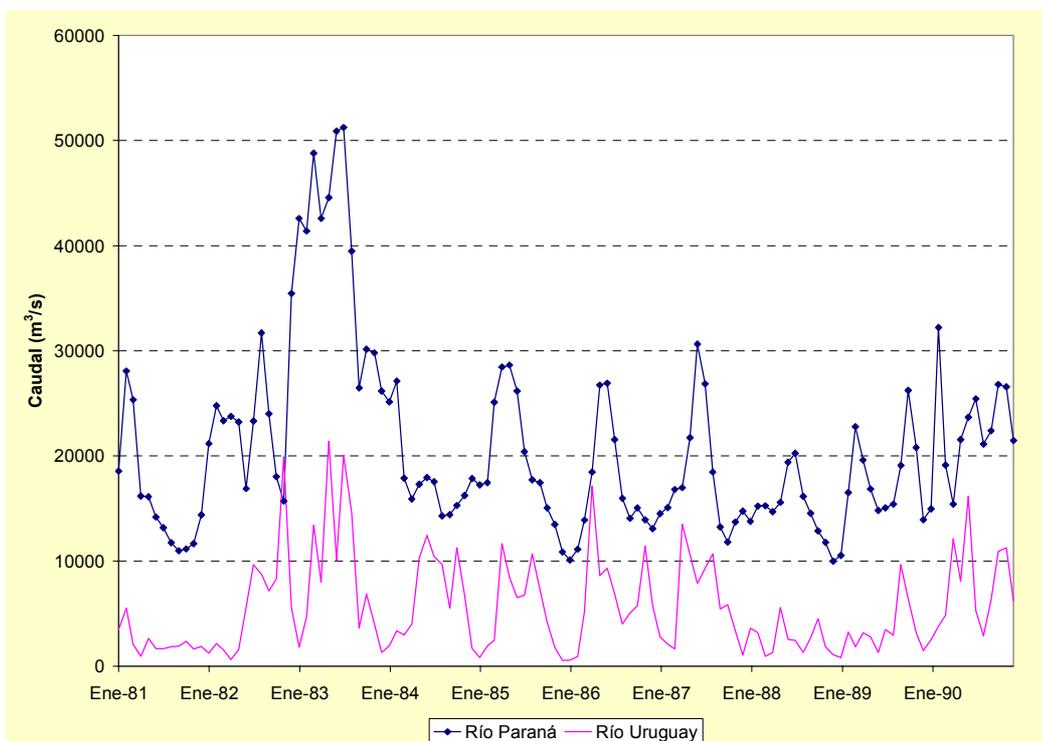


Figura 1.10 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1981-90)

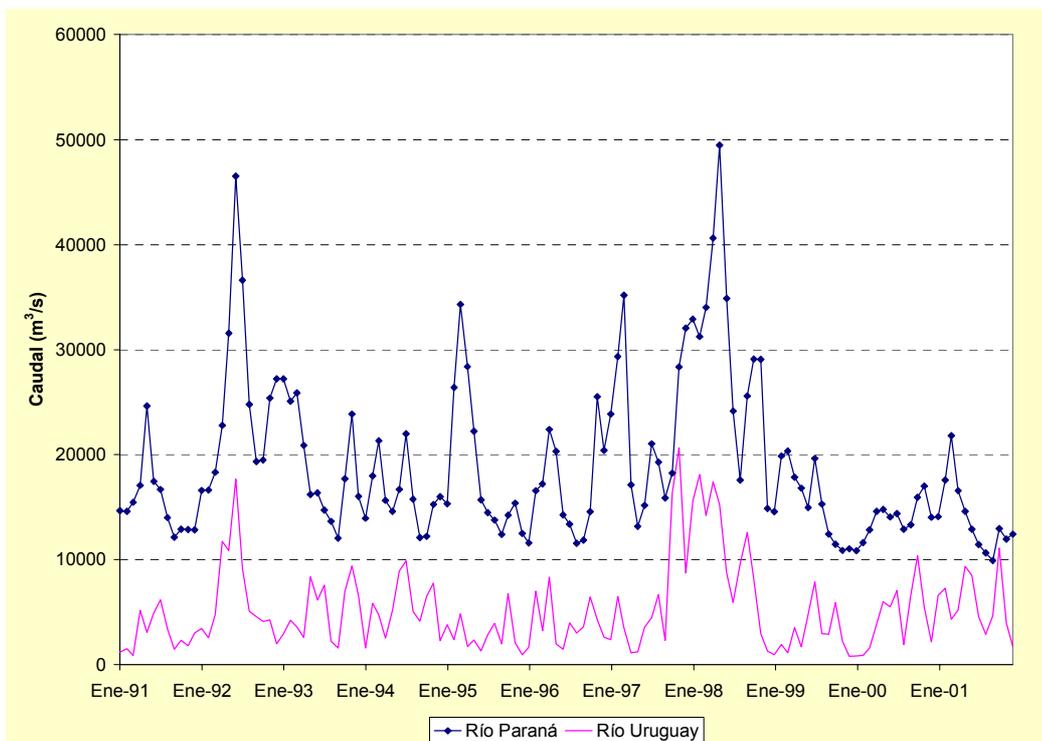


Figura 1.11 Caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1991-01)

2 IDENTIFICACIÓN DE CICLOS

2.1 ANTECEDENTES

Un aspecto que resulta relevante en el estudio del régimen hidrológico de los ríos afluentes al Río de la Plata es determinar si se observan cambios de tendencia de sus caudales.

El régimen hidrológico del río Paraná ha sido largamente estudiado en numerosos trabajos, donde se analizan las distribuciones interanual, anual, areal y probabilística de los caudales que transporta este curso. Giacosa et al (2000) refieren distintos estudios realizados sobre las series de caudales anuales de las estaciones Corrientes, Túnel y Timbúes (período 1904-1997) y advierten que los caudales anuales permiten distinguir tres períodos de características diferentes. El primer período se extiende desde comienzos del siglo hasta los años 30 y la característica predominante es que los aportes anuales se mantienen alrededor del valor medio con una leve tendencia positiva. Un segundo período comienza en los años 30 y va hasta la década del 60 al 70, donde se producen los caudales anuales más bajos de todo el siglo, dando lugar a una leve tendencia negativa. A partir de la década del 60 al 70, comienzan a presentarse caudales mayores que la media con mayor frecuencia, lo que da lugar a que se invierta la tendencia. Los autores establecen que la magnitud de los cambios en el período 1971-97 con relación a la serie total da lugar a una diferencia positiva del caudal medio anual del río que es del orden de 16%.

García y Vargas (1996, 1998) estudiaron la variabilidad climática en la cuenca del Río de la Plata a través de sus caudales, analizando series de caudales medios mensuales y medios anuales en diversas estaciones de los ríos Paraná, Uruguay y Paraguay para el período 1901-92. Mediante la aplicación del test de Mann (Sneyers, 1975) y del test de desviaciones acumuladas, detectaron un primer cambio de tendencia de la media entre 1917 y 1918 en el río Uruguay y entre 1918 y 1920 en el Paraná. El segundo cambio de tendencia de la media toma lugar entre 1943 y 1945 en el río Uruguay. En el río Paraná, el cambio se produce en 1943 aguas arriba de Itaipú, y en 1944 de Itaipú a Corrientes. El tercer cambio de tendencia toma lugar casi sin excepción en 1970. Dada la casi total coincidencia en las fechas que definen cambios de tendencias en el comportamiento de los ríos, que no difieren en más de uno o dos años en la mayoría de los casos, esos autores propusieron considerar a 1918, 1943 y 1970 como las fechas de cambio de tendencia.

Dado que en este estudio se cuenta con las series de caudales medios mensuales y medios anuales con la información de la última década en las estaciones Paraná y Concordia de los ríos Paraná y Uruguay, respectivamente, y con el propósito de complementar los estudios anteriores se ha realizado el análisis de tendencias sobre las series de caudales del período 1931-2001. El test de Mann-Kendall fue empleado para evidenciar cambios de tendencias y el método de las desviaciones acumuladas para detectar saltos en la media.

2.2 TEST DE MANN-KENDALL PARA TENDENCIAS

2.2.1 Formulación

Para poner en evidencia la existencia de una eventual tendencia de los caudales puede utilizarse el test no paramétrico basado en el estadístico de correlación de rango t de Kendall (test de Mann).

Se desea probar la hipótesis nula H_0 de que las observaciones están ordenadas en forma aleatoria (los datos son una muestra de n variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas) versus la alternativa de una tendencia monótona en el tiempo. Para este test, las observaciones originales $x_i, i=1,2,\dots, n$ son reemplazadas por los rangos y_i que le son atribuidos cuando se las ordena por magnitud creciente, y para cada rango y_i se calcula el número n_i de elementos y_j que lo preceden ($i > j$) tales que $y_i > y_j$.

El estadístico t del test está dado por la relación

$$t = \sum_i n_i$$

y su ley de distribución, bajo la hipótesis nula, es asintóticamente una ley normal de media y varianza dadas por

$$E(t) = n(n-1)/4$$

$$Var(t) = n(n-1)(2n+5)/72$$

En ausencia de toda presunción en cuanto a la existencia de una tendencia en un sentido determinado, la hipótesis alternativa es bilateral. La hipótesis nula debe ser rechazada para los valores elevados de $u(t)$, donde

$$u(t) = [t - E(t)] / \{Var(t)\}^{1/2}$$

En particular, si se determina la probabilidad α_1 con la tabla de la distribución normal reducida tal que

$$\alpha_1 = P(|u| > |u(t)|)$$

La hipótesis nula es aceptada o rechazada al nivel α_0 según que $\alpha_1 > \alpha_0$ ó $\alpha_1 < \alpha_0$. Es decir que, después de haber calculado el valor muestral del estadístico u y de haber seleccionado un nivel de significación α_0 , se puede testar la hipótesis nula, que es rechazada si el valor absoluto de u es mayor a $u_{\alpha/2}$. Cuando los valores de $u(t_i)$ son significativos se concluye que hay una tendencia creciente o decreciente, según que $u(t_i) > 0$ ó $u(t_i) < 0$.

En el caso de una tendencia significativa, el análisis progresivo de la serie con la ayuda del estadístico t permite situar el comienzo del fenómeno. Esto resulta inmediatamente del hecho que el valor t para la serie formada por los i primeros términos no es otra que la suma

$$t_i = n_1 + n_2 + \dots + n_i$$

es decir, la sumatoria hasta el i -ésimo término. Se deduce que el valor correspondiente de $u(t_i)$ se obtiene en función de $n=i$ en las fórmulas de esperanza y varianza. Este principio puede ser extendido a la serie retrógrada, si se calcula para cada término y_i el número n'_i de elementos y_j tales que $y_i > y_j$ con $i < j$, se puede controlar el primer cálculo, ya que:

$$n_i + n'_i = y_i - 1$$

entonces

$$i' = (n+1) \text{ y } n'_i = n_i'$$

Los valores de u'_i para la serie retrógrada están dados por la relación: $u'_i = -u(t_{i'})$, lo que conduce a $u'_1 = u_n$.

En ausencia de cualquier tendencia en la serie la representación gráfica de u_i y de u'_i en función de i da generalmente dos curvas que se entrecruzan, mientras que en el caso de una tendencia significativa la intersección de estas curvas permite situar aproximadamente el inicio del fenómeno.

2.2.2 Aplicación

El test de Mann-Kendall fue aplicado a las series de caudales medios anuales de los ríos Paraná y Uruguay en el período 1931-2001. Los resultados se resumen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1
Aplicación del test de Mann-Kendall

Río	N	t	E(t)	Var(t)	u(t)	Decisión $\alpha=0,05$	Decisión $\alpha=0,1$
Paraná	71	1595	1242.5	10147.1	3.499	Se rechaza Ho	Se rechaza Ho
Uruguay	71	1459	1242.5	10147.1	2.149	Se rechaza Ho	Se rechaza Ho

Ya que $u_{\alpha/2} = 1,96$ para $\alpha=0,05$ y $u_{\alpha/2} = 1,645$ para $\alpha=0,1$, resulta para ambos ríos la decisión de rechazar la hipótesis nula aún con nivel de significación de 0,05. Esto es, las series no son homogéneas y contienen tendencias. Dado que los valores calculados para $u(t)$ en ambos ríos son positivos, se infiere la existencia de una tendencia creciente en los caudales medios anuales.

En las figuras 2.1 y 2.2, que presentan los valores progresivos del estadístico $u(t)$ para los caudales medios anuales de los ríos Paraná y Uruguay, respectivamente, se observa un cambio en la evolución de las series a principios de la década del 70, algo menos marcado para el río Uruguay que para el Paraná. Este aspecto se asocia a un cambio de tendencia alrededor de ese momento. No se nota un cambio similar a principios de la década del 40, como indican García y Vargas (1998).

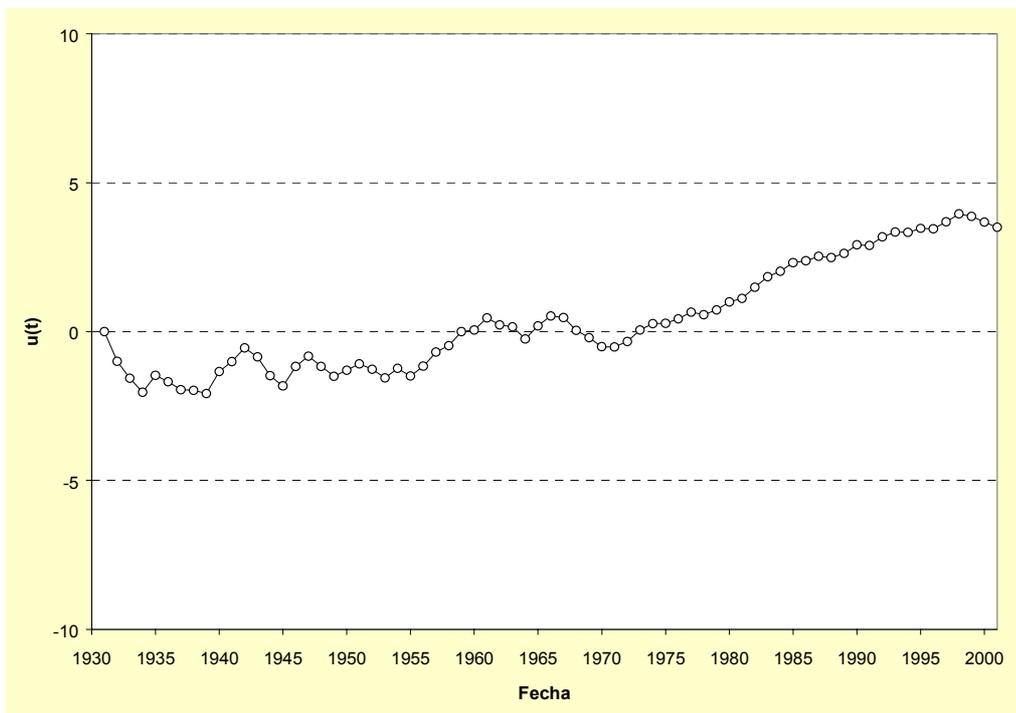


Figura 2.1 Valores progresivos del estadístico $u(t)$ de los caudales medios anuales del río Paraná en la sección Santa Fe-Paraná (1931-2001)

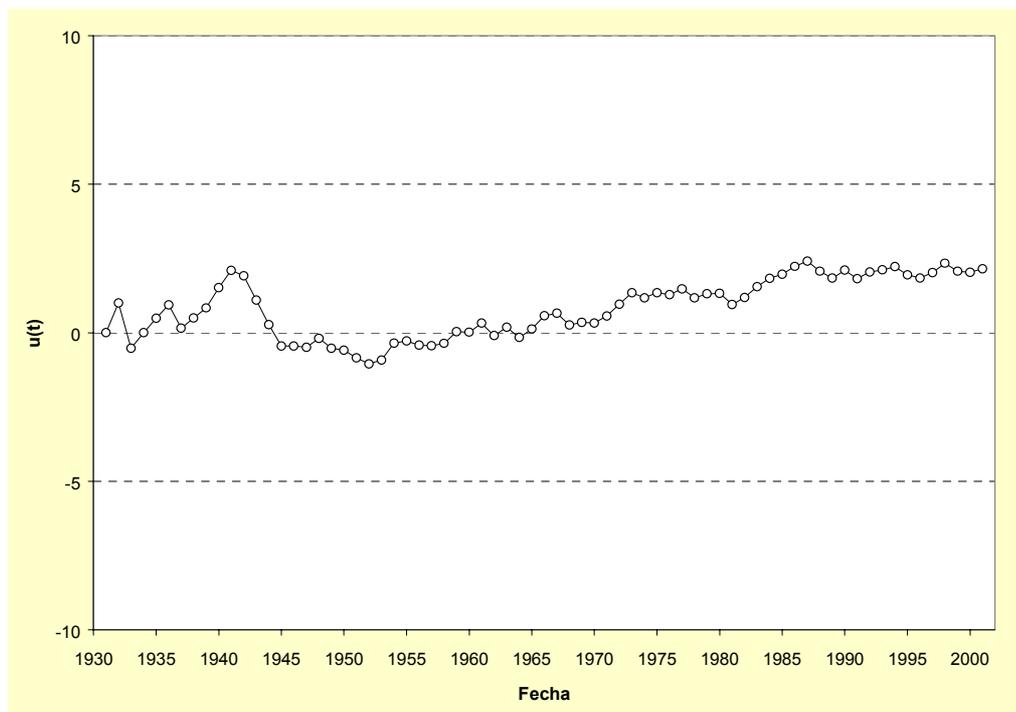


Figura 2.2 Valores progresivos del estadístico $u(t)$ de los caudales medios anuales del río Uruguay en la sección Concordia (1931-2001)

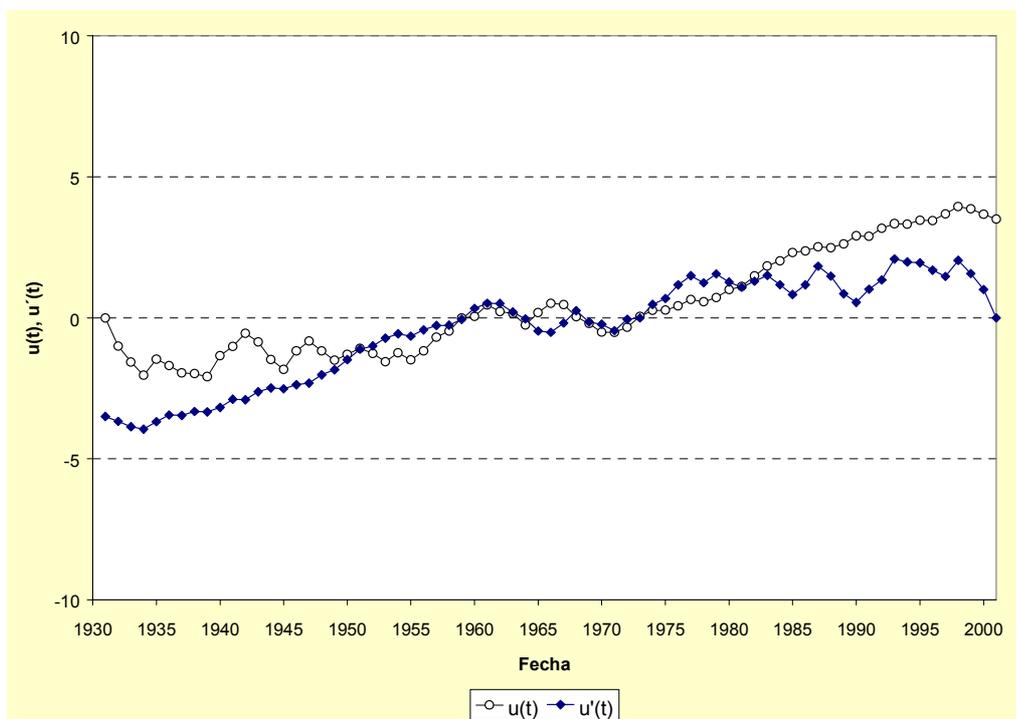


Figura 2.3 Valores progresivos de los estadístico $u(t)$ y $u'(t)$ de los caudales medios anuales del río Paraná en la sección Santa Fe-Paraná (1931-2001)

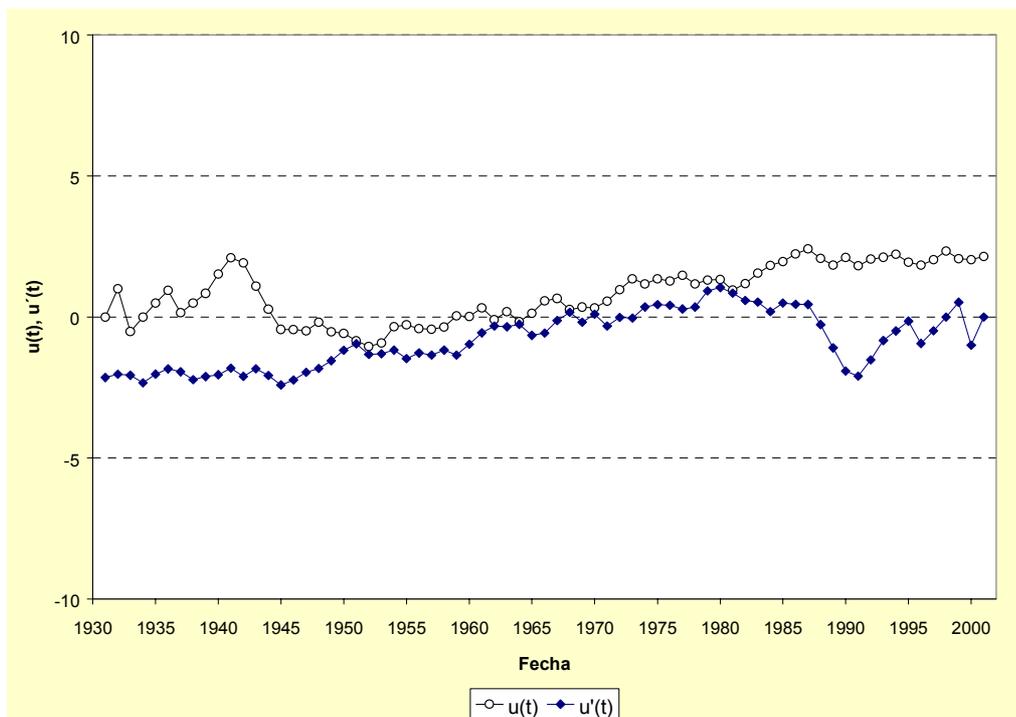


Figura 2.4 Valores progresivos de los estadísticos $u(t)$ y $u'(t)$ de los caudales medios anuales del río Uruguay en la sección Concordia (1931-2001)

En las figuras 2.3 y 2.4 se presenta el análisis progresivo de las series con los estadísticos $u(t)$ y $u'(t)$ para los ríos Paraná y Uruguay, respectivamente. Se observa que las dos curvas se interceptan varias veces entre 1950 y 1980, indicando que el cambio de tendencia se produce, efectivamente, durante este período.

2.3 TEST DE DESVIACIONES ACUMULADAS (Q)

El test de desviaciones acumuladas Q permite detectar saltos en la media de una serie de datos, buscando la máxima relación entre el desvío y la raíz cuadrada de la varianza. Si se tiene una serie de observaciones X_1, X_2, \dots, X_n , y se denota:

$$S_0^* = 0, \quad S_k^* = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) \quad \text{con } k=1,2, \dots, n$$

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / n \quad \text{y} \quad S_k^{**} = S_k^* / \sigma_x \quad \text{con } k=0,1, \dots, n$$

la posición del máximo del estadístico $|S_k^{**}|$ puede ser tomada como una estimación del punto de cambio de la media.

La evolución del estadístico S^{**} de ambos ríos en el período 1931-2001 se representa en la figura 2.5. Se observa que se obtiene el máximo valor absoluto del estadístico para el río Paraná en 1972 y para el río Uruguay en 1970, indicando entonces que en esas fechas se produce un cambio de en la media.

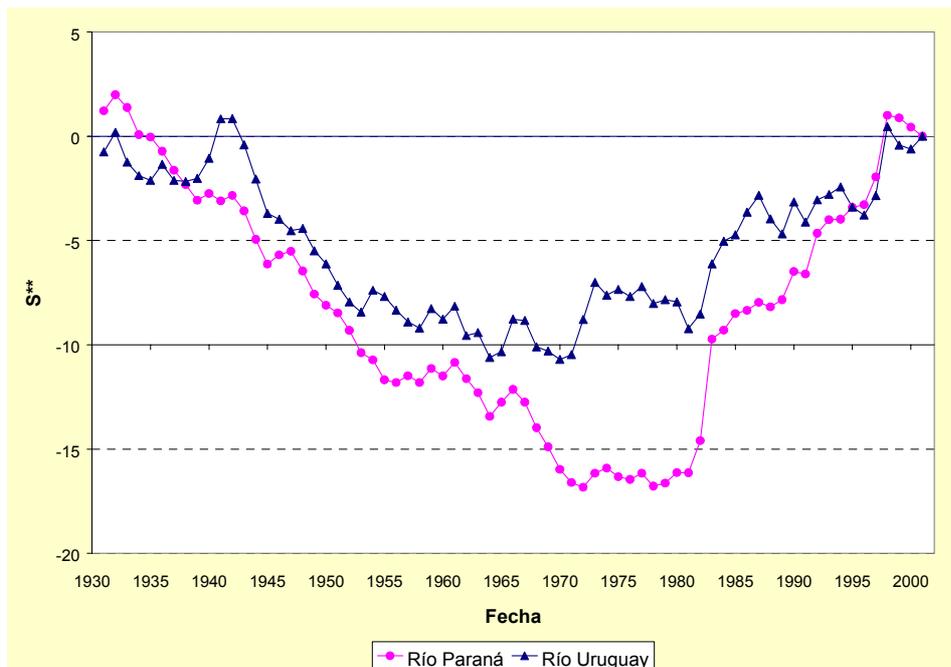


Figura 2.5 Valores progresivos del estadístico S^{**} de los caudales medios anuales de los ríos Paraná y Uruguay (1931-2001)

De la misma figura se inferiría también un cambio de medias en 1998 para ambos ríos. Sin embargo, ya que se trata de una fecha muy reciente, no es posible establecer la certeza de este último cambio debido a la escasez de datos.

2.4 PRUEBA DE MANN-WHITNEY

Para validar la existencia de dos períodos de diferentes características en la serie 1931-2001, se efectuó la prueba de Mann-Whitney, un test no paramétrico complementario que permite comparar las distribuciones de dos poblaciones. La única hipótesis necesaria para su aplicación es que las distribuciones son continuas, y de acuerdo a esto se supone que X_1, X_2, \dots, X_n y Y_1, Y_2, \dots, Y_n son muestras aleatorias de dos poblaciones con distribuciones continuas.

2.4.1 Formulación

Dadas dos muestras independientes de dos poblaciones, el test considera la prueba de la hipótesis nula que las poblaciones tienen la misma distribución. La hipótesis puede establecerse como

$$H_0: f_1(x) = f_2(y)$$

donde $f_1(x)$ y $f_2(y)$ son las correspondientes funciones de densidad de probabilidad. La hipótesis alternativa establece que las distribuciones no son las mismas (sólo implica un desplazamiento de la tendencia central y no sugiere una diferencia en la forma o en la dispersión).

La prueba se basa en una combinación de las n_1 y n_2 observaciones para formar un solo conjunto de $n_1 + n_2$ observaciones, ordenadas en forma creciente.

Para implementar el procedimiento se asigna un rango a cada observación (desde 1 a $n_1 + n_2$), se obtiene la suma de rangos asociados a las observaciones de una de las dos muestras, escogida en forma arbitraria, y se denota su suma como R_1 . La estadística U de Mann-Whitney está dada por

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1$$

La estadística U es una función de la variable aleatoria R_1 y de los tamaños de las muestras n_1 y n_2 . Si H_0 es cierta, la ocurrencia de cualquier orden particular para las observaciones en el conjunto combinado es equiprobable. Por lo tanto, bajo H_0 , R_1 es la suma de n_2 enteros positivos seleccionados de forma aleatoria de entre los primeros $n_1 + n_2$. De acuerdo con lo anterior, puede determinarse que

$$E(R_1) = \frac{n_1(n_1 + n_2 + 1)}{2}$$

$$Var(R_1) = \frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}$$

y

$$E(U) = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - E(R_1) = n_1 n_2 / 2$$

$$Var(U) = Var(R_1) = \frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}$$

Se rechaza H_0 si se obtiene un valor muy grande o muy pequeño de U , lo que ocurre cuando R_1 es muy grande o muy pequeño. Pero cuando n_1 y n_2 son mayores que 10, la distribución de U se encuentra aproximada por una distribución normal con media y varianza dados por $E(u)$ y $Var(u)$, respectivamente. Es decir, bajo H_0 , la variable aleatoria

$$z = \frac{U - E(U)}{\sqrt{Var(U)}}$$

es aproximadamente $N(0,1)$ para grandes valores de n_1 y n_2 .

2.4.2 Aplicación

La aplicación del test de Mann-Whitney a las series de caudales medios anuales de los ríos Paraná y Uruguay se detalla en la tabla 2.2. En ambos casos, las muestras se integraron con los valores de caudales correspondientes a los períodos 1931-70 (muestra 1) y 1971-2001 (muestra 2).

Tabla 2.2
Aplicación del Test de Mann-Whitney

Río	Período	Muestra	N	R	U	z	Decisión $\alpha=0,05$	Decisión $\alpha=0,1$
Paraná	1931-1970	1	40	1094	966	4.01		
	1971-2001	2	31	1462	274	-4.01	Se rechaza H_0	Se rechaza H_0
Uruguay	1931-1970	1	40	1232	828	2.41		
	1971-2001	2	31	1324	412	-2.41	Se rechaza H_0	Se rechaza H_0

Los valores de z calculados son valores de una variable aleatoria normal estándar. Para $\alpha=0,05$ y $\alpha=0,1$ los valores críticos son $\pm 1,96$ y $\pm 1,64$ respectivamente. Por lo tanto, en los dos casos se rechaza la hipótesis nula de que las muestras provienen de poblaciones con distribuciones idénticas.

2.5 SELECCIÓN DE CICLOS

Como fue expresado en 2.1, García y Vargas (1998) mostraron que hay una notable coincidencia en las fechas que definen cambios de tendencias en el comportamiento de todos los ríos de la Cuenca del Plata y, basados en esa coincidencia, establecieron ciclos que pueden ser aplicados para toda la región.

La análisis efectuados en este trabajo establecen con relativa certeza el cambio de tendencia en los caudales de los ríos Paraná y Uruguay, en las estaciones Santa Fe-Paraná y Concordia, a principios de la década del 70. Desde entonces se desarrolla un

ciclo de características húmedas. Menos claro resulta el cambio de tendencia, desde un ciclo de características medias hacia uno seco, que han indicado García y Vargas (1998) alrededor de 1943. De hecho, el presente estudio no ha encontrado evidencias firmes de este cambio. Sin embargo, dado que se ha verificado (ver capítulo 3) un cambio mensurable del caudal medio, se ha conservado ese hito, por lo que se ha considerado que entre 1944 y 1970 se desarrolla un ciclo relativamente seco diferenciado del anterior, de características medias.

Con propósitos comparativos, se adoptó la división en ciclos de las series de caudales propuesta por García y Vargas, individualizando tres períodos cuyas características serán estudiadas para describir el ciclo anual de caudales. Estos ciclos están definidos por las series de caudales mensuales correspondientes a:

- Primer ciclo: 1931-43
- Segundo ciclo: 1944-70
- Tercer ciclo: 1971-2001

3 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Las figuras 3.1 y 3.2 presentan una vista global de los caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay, respectivamente, a lo largo de los 71 años del registro disponible. En estas figuras, para evidenciar el patrón de distribución temporal de los caudales se construyeron líneas de isocaudal que manifiestan el ciclo estacional y su variación en el período.

La figura 3.1 permite observar que en el río Paraná los caudales son máximos durante el otoño (marzo-abril) y disminuyen hasta alcanzar los valores mínimos en primavera (septiembre-octubre). Se advierte también que los caudales medios mensuales durante los estiajes tienen un visible incremento en los últimos 20 años del período.

El río Uruguay (figura 3.2) presenta mayor variabilidad del ciclo estacional, con valores máximos altos tanto en otoño (abril-mayo) como en primavera (octubre). En los dos casos se advierte variabilidad interanual, más importante en el río Uruguay, aunque no se evidencia una tendencia dominante en todo el período.

Considerando la división en ciclos medio, seco y húmedo, discutida en el capítulo 2, se construyeron las isolíneas de caudales medios mensuales de las figuras 3.2a, b y c y 3.3a, b y c, respectivamente, para los dos afluentes del Río de la Plata.

En el río Paraná, durante el período 1931-43 los caudales medios mensuales variaron entre 6000 y 32000 m³/s, con los mayores valores en otoño excepto en 1935, año en el que el máximo valor medio mensual se registró en noviembre.

En el período 1944-70, los caudales medios mensuales presentaron mayor variabilidad, adoptando valores entre 6000 y 42000 m³/s con las mismas características del ciclo estacional, aunque los valores mayores se adelantaron a los meses de marzo y abril. En el subperíodo 1954-57 la mayor afluencia se da entre julio y octubre.

Finalmente, entre 1971 y 2001 se repiten las características del ciclo estacional con valores mayores desde febrero a marzo y se observan características diferentes en 1983, 1992 y 1998, años en los que los máximos se desplazan hacia el invierno.

En el río Uruguay, durante 1931-43 los caudales medios mensuales asumen valores entre 500 y 22000 m³/s y presentan claramente dos períodos de aguas altas con máximos en abril-junio y septiembre-octubre, siendo mayor el primero.

En 1944-70 el primer período de aguas altas es de menor envergadura que el segundo (octubre) y, en general, los valores son menores comparados con el del período anterior.

En 1971-2001 el patrón estacional aparece más perturbado, con máximos retrasados en junio-julio y octubre-noviembre.

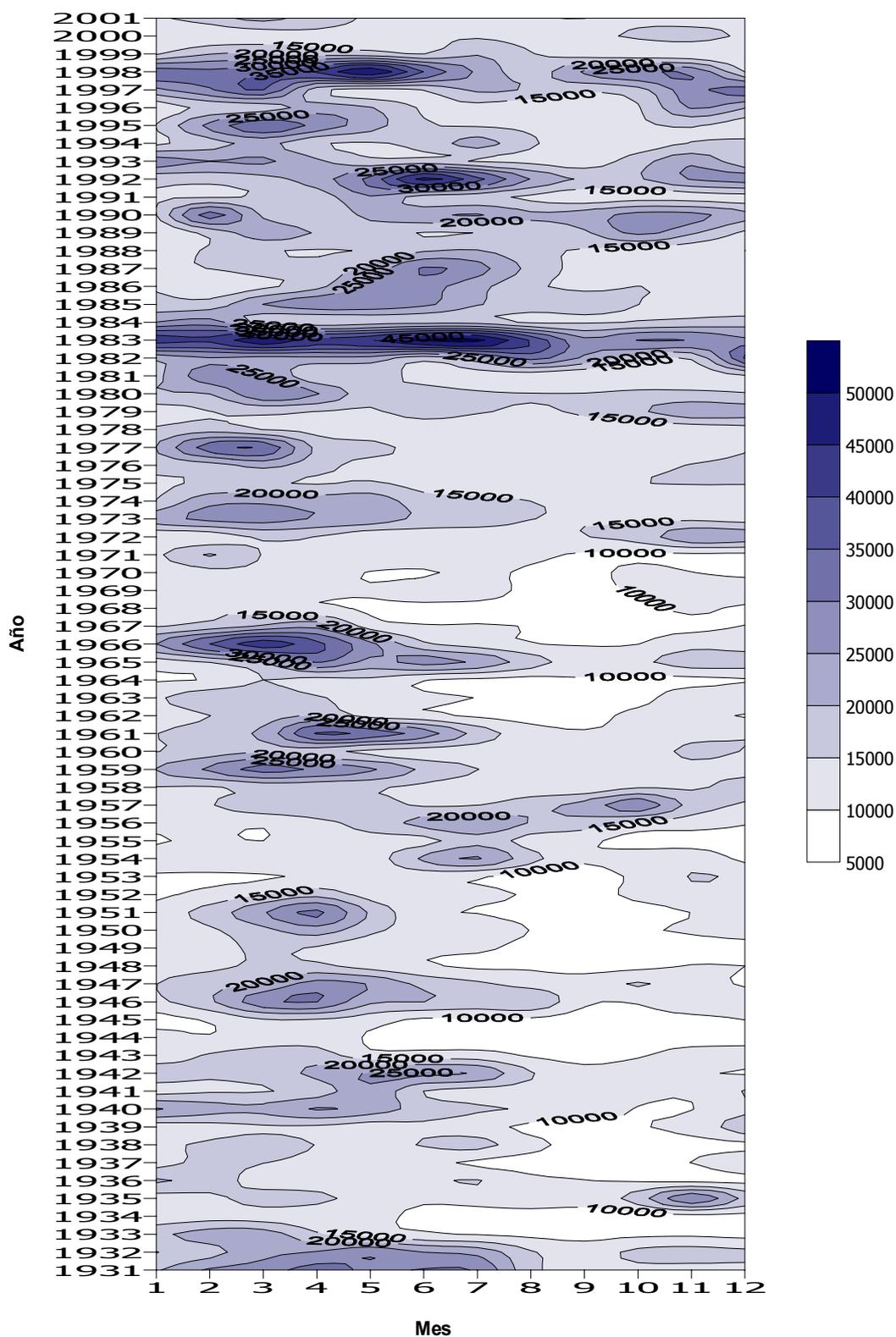


Figura 3.1 Distribución de caudales medios mensuales del río Paraná en el período 1931-2001

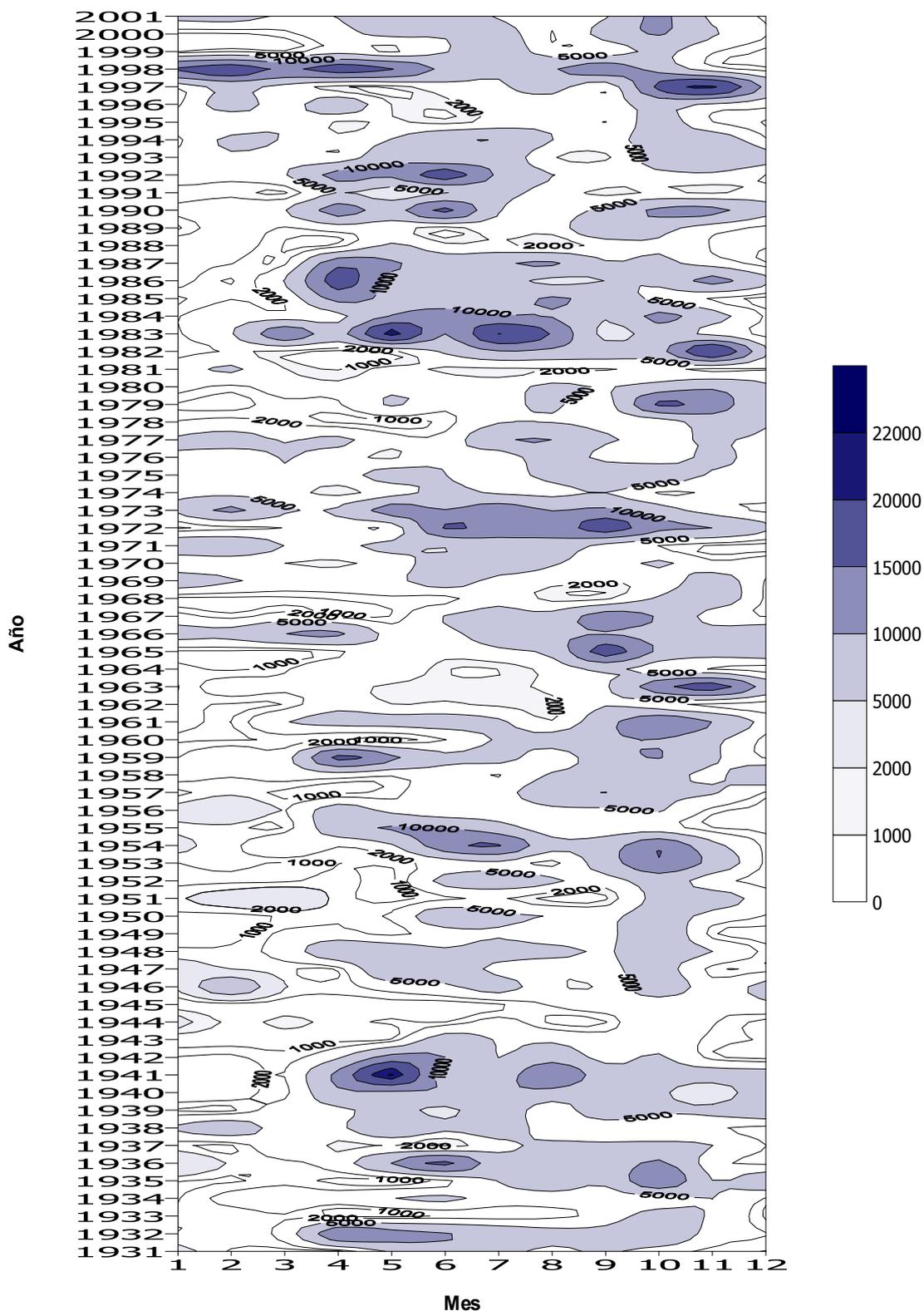


Figura 3.2 Distribución de caudales medios mensuales del río Uruguay en el período 1931-2001

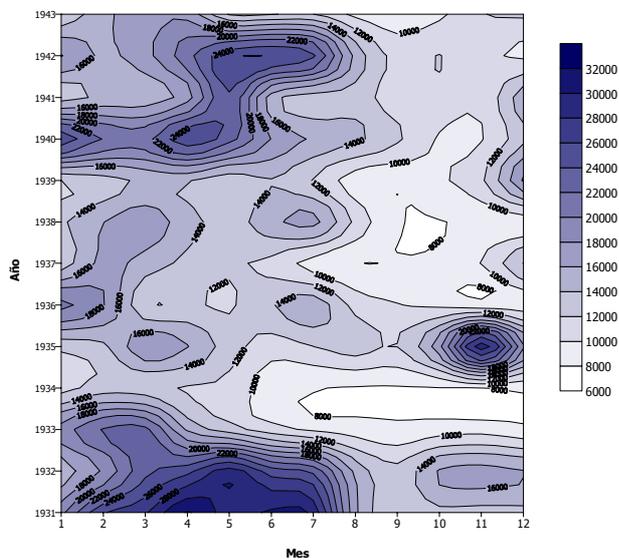


Figura 3.3.a Distribución de caudales medios mensuales del río Paraná en el período 1931-43

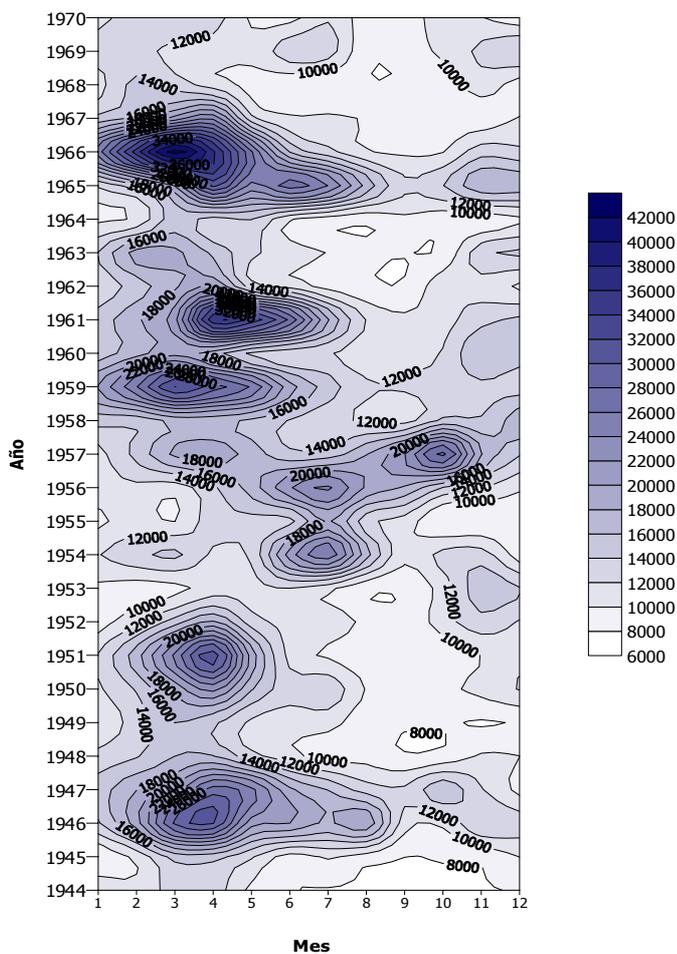


Figura 3.3.b Distribución de caudales medios mensuales del río Paraná en el período 1944-70

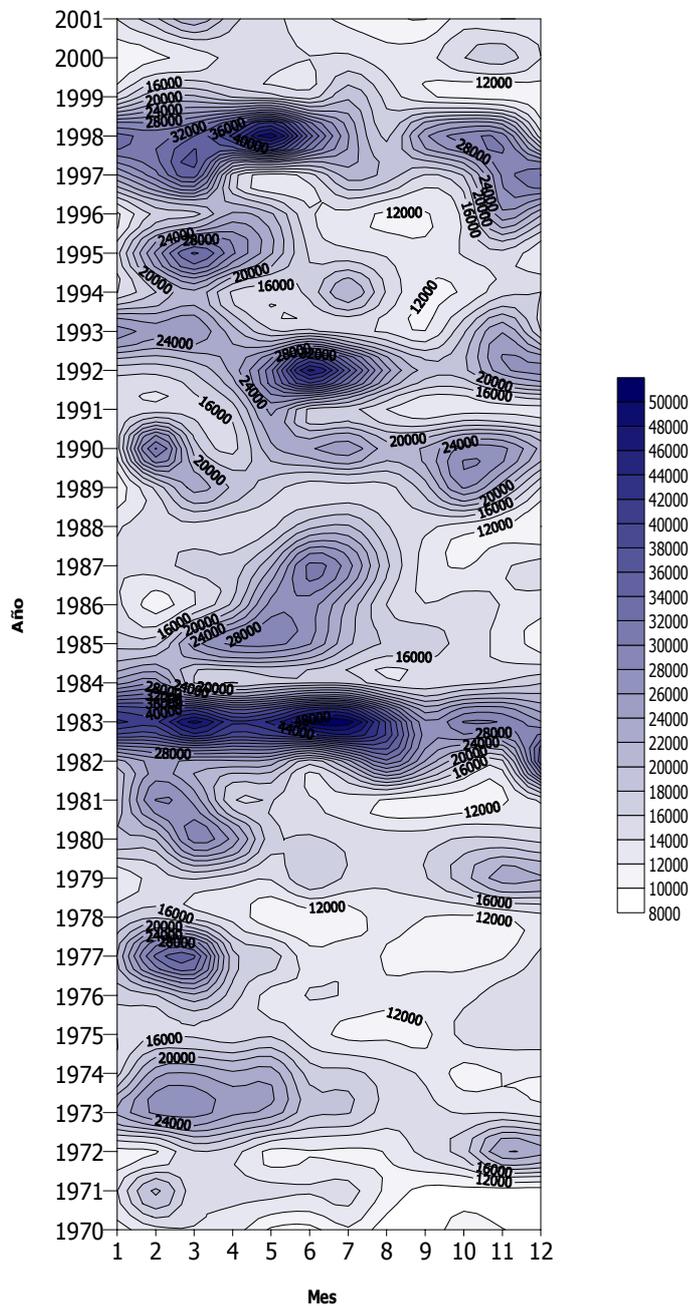


Figura 3.3.c Distribución de caudales medios mensuales del río Paraná en el período 1971-01

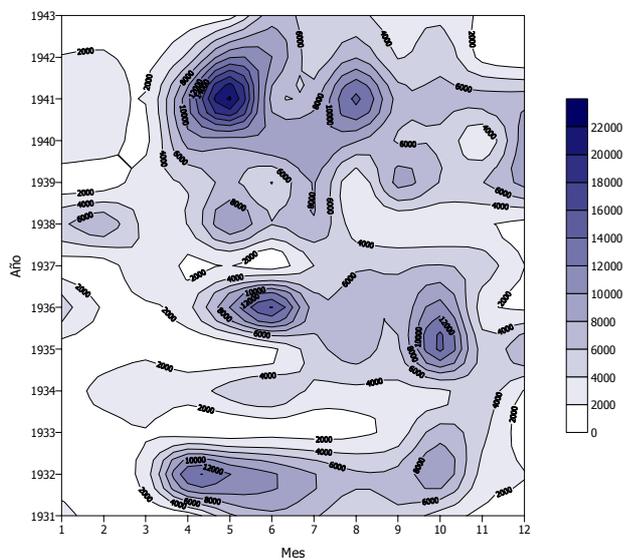


Figura 3.4.a Distribución de caudales medios mensuales del río Uruguay en el período 1931-43

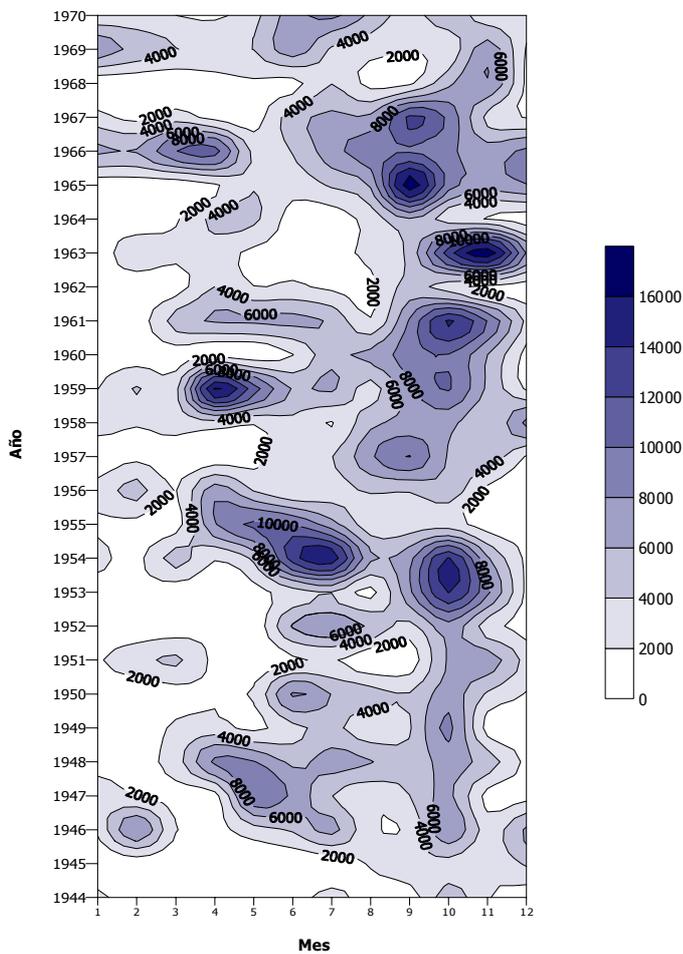


Figura 3.4.b Distribución de caudales medios mensuales del río Uruguay en el período 1944-70

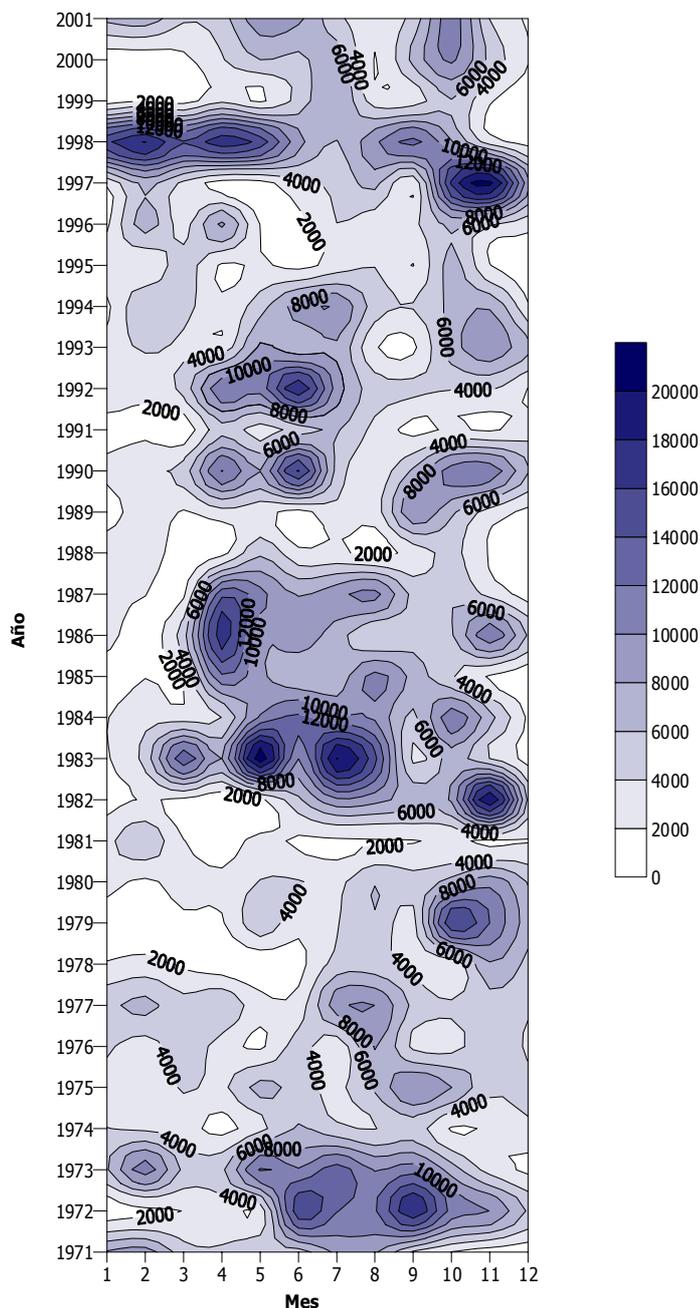


Figura 3.4.c Distribución de caudales medios mensuales del río Uruguay en el período 1971-01

3.2 ESTADÍSTICOS BÁSICOS

Con el objetivo de caracterizar en forma global la variabilidad de los caudales afluentes al Río de la Plata, se calcularon los estadísticos descriptivos de las series temporales de caudales medios mensuales de ambos ríos en el período de análisis.

Los histogramas de frecuencia de las figuras 3.5a y b para, respectivamente, los ríos Paraná y Uruguay, construidos con intervalos de clase de 2000 y 1000 m³/s y de acuerdo a las distribuciones de frecuencia presentadas en las tablas 3.1 y 3.2, ponen en evidencia el patrón existente en estas series temporales.

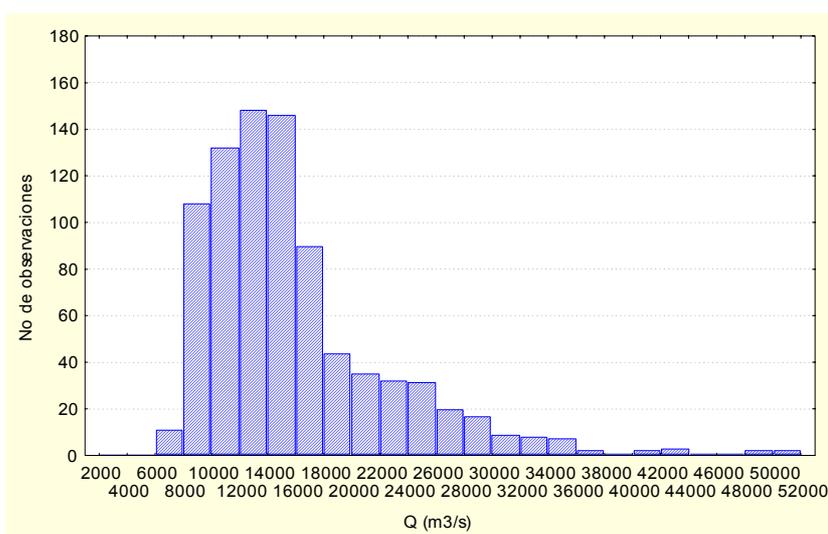


Figura 3.5.a Histograma de caudales medios mensuales del río Paraná (1931-2001)

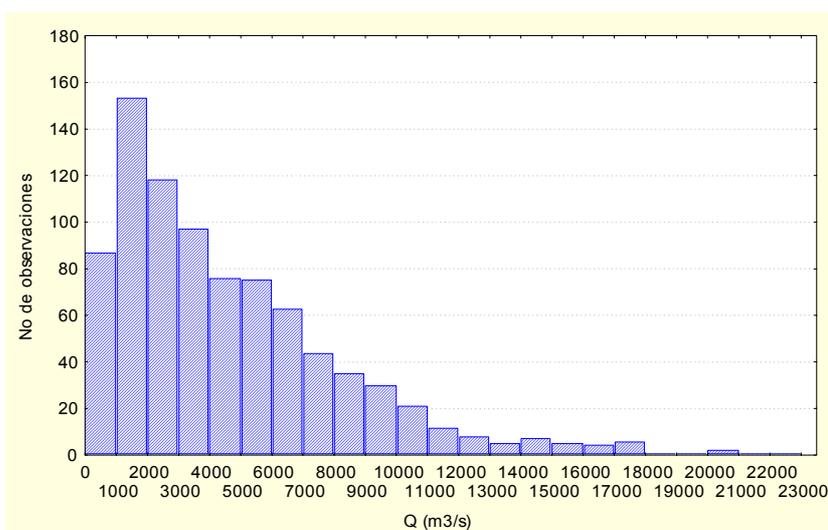


Figura 3.5.b Histograma de caudales medios mensuales del río Uruguay (1931-2001)

Tabla 3.1

Distribución de frecuencias de caudales medios mensuales del Río Paraná (1931-2001)

Q (m³/s)	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
2000.0 < x <= 4000.0	0	0	0.00	0.00
4000.0 < x <= 6000.0	0	0	0.00	0.00
6000.0 < x <= 8000.0	11	11	1.29	1.29
8000.0 < x <= 10000.	108	119	12.68	13.97
10000. < x <= 12000.	132	251	15.49	29.46
12000. < x <= 14000.	148	399	17.37	46.83
14000. < x <= 16000.	146	545	17.14	63.97
16000. < x <= 18000.	90	635	10.56	74.53
18000. < x <= 20000.	44	679	5.16	79.69
20000. < x <= 22000.	35	714	4.11	83.80
22000. < x <= 24000.	32	746	3.76	87.56
24000. < x <= 26000.	31	777	3.64	91.20
26000. < x <= 28000.	20	797	2.35	93.54
28000. < x <= 30000.	17	814	2.00	95.54
30000. < x <= 32000.	9	823	1.06	96.60
32000. < x <= 34000.	8	831	0.94	97.54
34000. < x <= 36000.	7	838	0.82	98.36
36000. < x <= 38000.	2	840	0.23	98.59
38000. < x <= 40000.	1	841	0.12	98.71
40000. < x <= 42000.	2	843	0.23	98.94
42000. < x <= 44000.	3	846	0.35	99.30
44000. < x <= 46000.	1	847	0.12	99.41
46000. < x <= 48000.	1	848	0.12	99.53
48000. < x <= 50000.	2	850	0.23	99.77
50000. < x <= 52000.	2	852	0.23	100.00

Tabla 3.2

Distribución de frecuencias de caudales medios mensuales del Río Uruguay (1931-2001)

Q (m³/s)	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
0.0000 < x <= 1000.0	87	87	10.21	10.21
1000.0 < x <= 2000.0	153	240	17.96	28.17
2000.0 < x <= 3000.0	118	358	13.85	42.02
3000.0 < x <= 4000.0	97	455	11.38	53.40
4000.0 < x <= 5000.0	76	531	8.92	62.32
5000.0 < x <= 6000.0	75	606	8.80	71.13
6000.0 < x <= 7000.0	63	669	7.39	78.52
7000.0 < x <= 8000.0	44	713	5.16	83.69
8000.0 < x <= 9000.0	35	748	4.11	87.79
9000.0 < x <= 10000.	30	778	3.52	91.31
10000. < x <= 11000.	21	799	2.46	93.78
11000. < x <= 12000.	12	811	1.41	95.19
12000. < x <= 13000.	8	819	0.94	96.13
13000. < x <= 14000.	5	824	0.59	96.71
14000. < x <= 15000.	7	831	0.82	97.54
15000. < x <= 16000.	5	836	0.59	98.12
16000. < x <= 17000.	4	840	0.47	98.59
17000. < x <= 18000.	6	846	0.70	99.30
18000. < x <= 19000.	1	847	0.12	99.41
19000. < x <= 20000.	1	848	0.12	99.53
20000. < x <= 21000.	2	850	0.23	99.77
21000. < x <= 22000.	1	851	0.12	99.88
22000. < x <= 23000.	1	852	0.12	100.00

Se advierte que en el río Paraná los valores más frecuentes de caudal medio mensual se encuentran entre 12000 y 14000 m³/s, distribuyéndose los valores en el rango de 6000 a 52000 m³/s. En la distribución de caudales medios mensuales del río Uruguay los valores más frecuentes están entre 1000 y 2000 m³/s.

Los estadísticos básicos calculados para el registro se muestran en la tabla 3.3, que evidencia que el valor medio del caudal medio mensual en el río Paraná es de 16027 m³/s y la desviación estándar es de 6822 m³/s, con una asimetría positiva de 1,77, indicando que la distribución es asimétrica a la derecha. En el río Uruguay el valor medio de la distribución de caudales medios mensuales alcanza los 4688 m³/s con una desviación estándar de 3727 m³/s y también asimetría positiva de 1,47. Para ambos ríos el coeficiente de Kurtosis es positivo, indicando distribuciones más empinadas que la normal.

Tabla 3.3

Estadísticos básicos de caudales medios mensuales en el período 1931-2001

Río	N	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango	Varianza	Desvío	Asimetría	Kurtosis
PARANÁ	852	16027	14423	7752	51230	43478	46543468	6822	1.77	4.27
URUGUAY	852	4688	3612	382	22347	21965	13887630	3727	1.47	2.60

En la figura 3.6 se presentan los diagramas de caja de las series temporales de caudal medio mensual en el período 1931-2001 para ambos ríos. En ella, los extremos de la caja representan los percentiles de 25 y 75%, expresando la variabilidad de los valores, mientras que la tendencia central está indicada por la línea interior que representa la mediana. Las marcas horizontales definen los valores máximos y mínimo del período, indicando el rango de los valores de caudal medio mensual.

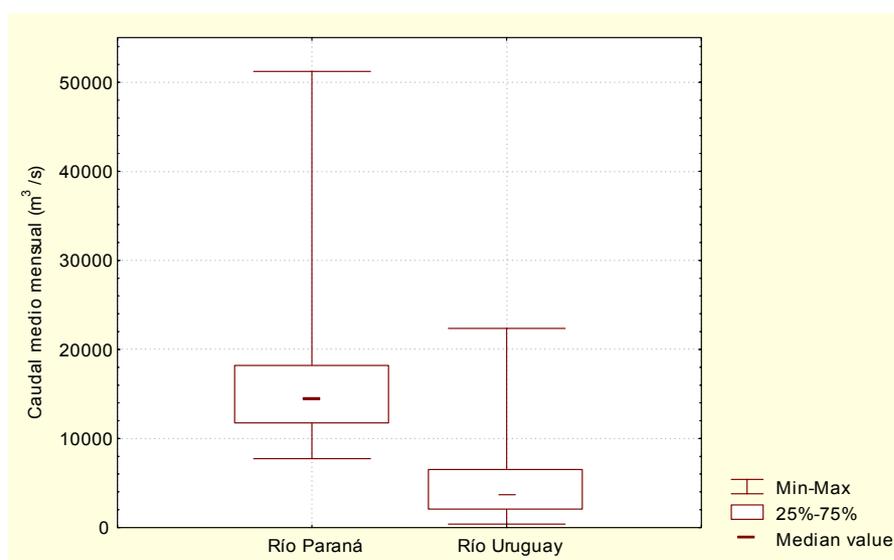


Figura 3.6 Diagrama de caja de caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay (1931-2001)

Para analizar la variabilidad temporal de los dos tributarios del Río de la Plata, se calcularon los estadísticos descriptivos de los caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay para los tres ciclos definidos en el capítulo 2.

El patrón de variabilidad temporal existente en estas series se manifiesta en los histogramas de frecuencia de las figuras 3.7a y b para, respectivamente, los ríos Paraná y Uruguay, en el período 1931-1943, con intervalos de clase de 2000 m³/s y de acuerdo a las distribuciones de frecuencia presentadas en las tablas 3.4 y 3.5. Se advierte que en el río Paraná los valores más frecuentes de caudal medio mensual se encuentran entre 12000 y 14000 m³/s distribuyéndose los valores en el rango de 4000 a 32000 m³/s. En la distribución de caudales medios mensuales del río Uruguay los valores más frecuentes son inferiores a 2000 m³/s.

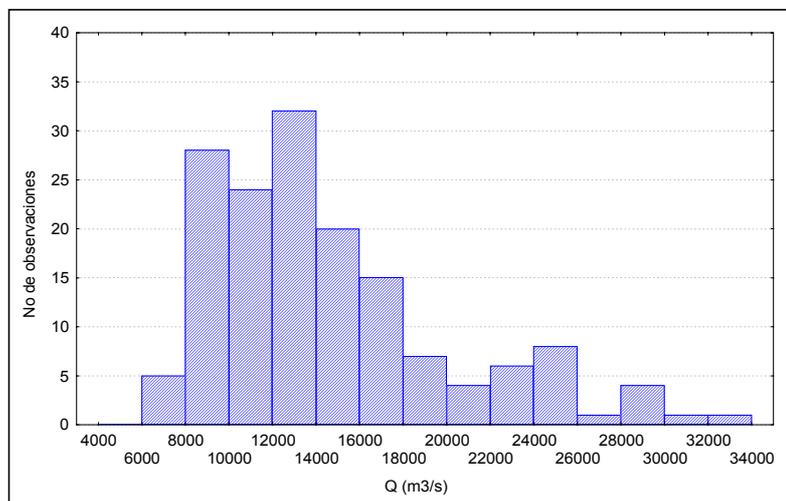


Figura 3.7.a Histograma de caudales medios mensuales del río Paraná (1931-43)

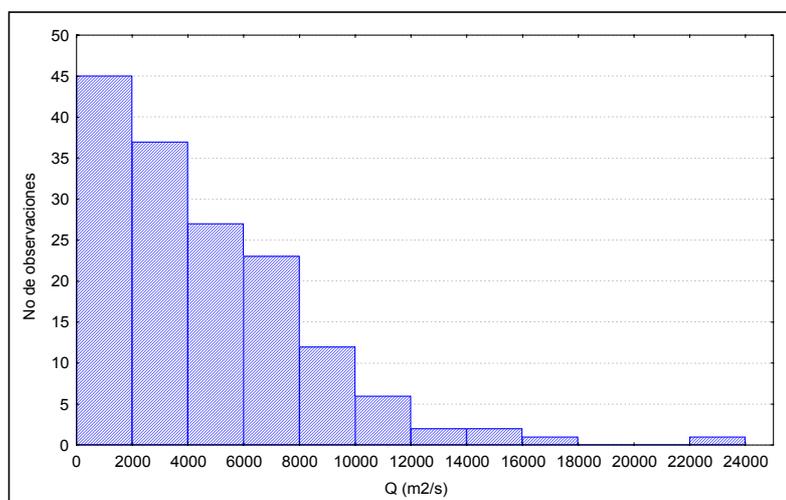


Figura 3.7.b Histograma de caudales medios mensuales del río Uruguay (1931-43)

Tabla 3.4

Distribución de frecuencias de caudales medios mensuales del Río Paraná (1931-44)

	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
4000. < x <= 6000.	0	0	0.00	0.00
6000. < x <= 8000.	5	5	3.21	3.21
8000.0 < x <= 10000.	28	33	17.95	21.15
10000. < x <= 12000.	24	57	15.38	36.54
12000. < x <= 14000.	32	89	20.51	57.05
14000. < x <= 16000.	20	109	12.82	69.87
16000. < x <= 18000.	15	124	9.62	79.49
18000. < x <= 20000.	7	131	4.49	83.97
20000. < x <= 22000.	4	135	2.56	86.54
22000. < x <= 24000.	6	141	3.85	90.38
24000. < x <= 26000.	8	149	5.13	95.51
26000. < x <= 28000.	1	150	0.64	96.15
28000. < x <= 30000.	4	154	2.56	98.72
30000. < x <= 32000.	1	155	0.64	99.36
32000. < x <= 34000.	1	156	0.64	100.00

Tabla 3.5

Distribución de frecuencias de caudales medios mensuales del Río Uruguay (1931-44)

	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
0 < x <= 2000.	45	45	28.85	28.85
2000. < x <= 4000.	37	82	23.72	52.56
4000. < x <= 6000.	27	109	17.31	69.87
6000. < x <= 8000.	23	132	14.74	84.62
8000.0 < x <= 10000.	12	144	7.69	92.31
10000. < x <= 12000.	6	150	3.85	96.15
12000. < x <= 14000.	2	152	1.28	97.44
14000. < x <= 16000.	2	154	1.28	98.72
16000. < x <= 18000.	1	155	0.64	99.36
18000. < x <= 20000.	0	155	0.00	99.36
20000. < x <= 22000.	0	155	0.00	99.36
22000. < x <= 24000.	1	156	0.64	100.00

Las medidas numéricas descriptivas calculadas para este período se muestran en la tabla 3.6. El valor medio del caudal medio mensual en el río Paraná es de 14670 m³/s y la desviación estándar es de 5580 m³/s, con una asimetría positiva de 1,14, indicando que la distribución es asimétrica a la derecha. En el río Uruguay el valor medio de la distribución de caudales medios mensuales alcanza los 4630 m³/s, con una desviación estándar de 3655 m³/s y también asimetría positiva. Para ambos ríos el coeficiente de Kurtosis es positivo, indicando distribuciones más empinadas que la normal.

Tabla 3.6

Estadísticos básicos de caudales medios mensuales en el período 1931-43

	N	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango	Varianza	Desvío Standard.	Asimetría	Kurtosis
RÍO PARANA	156	14671	13081	7823	32193	24370	31136919	5580	1.14	0.75
RÍO URUGUAY	156	4630	3827	382	22347	21965	13360717	3655	1.43	3.25

Para el río Paraná, en el período 1944-1970 el histograma de frecuencia de caudales medios mensuales (figura 3.8.a) y la tabla de frecuencias relativas (tabla 3.7) indican que los caudales más frecuentes del período se ubicaron entre 8000 y 10000 m³/s, pero resultan menos dispersos respecto del valor medio de 13864 m³/s indicado en la tabla 3.9, que muestra una desviación estándar de 5694 m³/s. La distribución es asimétrica hacia la derecha, con un coeficiente de Kurtosis elevado, de 4,40.

En el río Uruguay los caudales medios mensuales más frecuentes muestran un orden inferior a 2000 m³/s, como se observa en la figura 3.8.b y la tabla 3.8. En este período el valor medio es de 3979 m³/s y la desviación estándar es de 3263 m³/s.

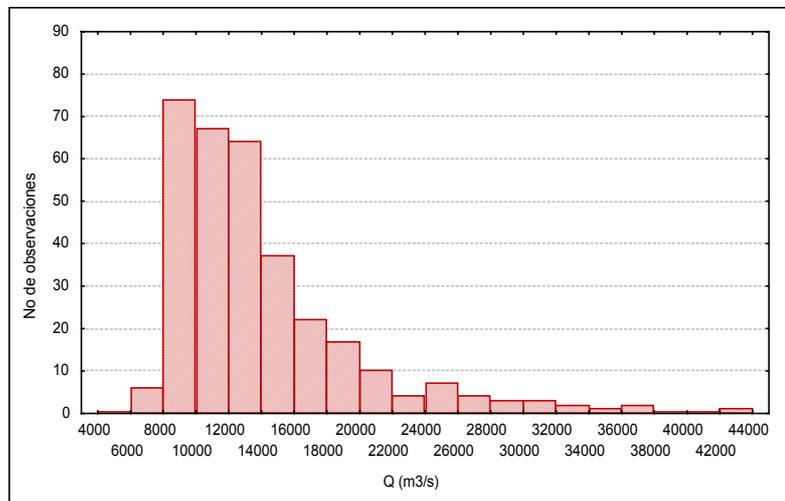


Figura 3.8.a Histograma de caudales medios mensuales del río Paraná (1944-70)

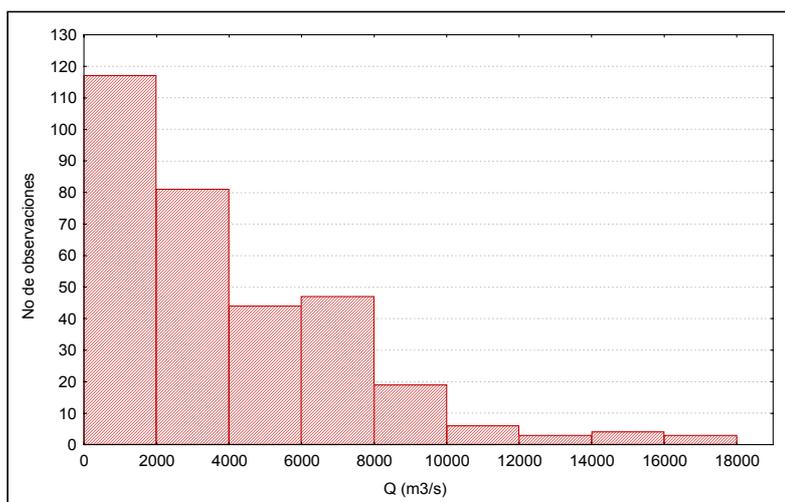


Figura 3.8.b Histograma de caudales medios mensuales del río Uruguay (1944-70)

Tabla 3.7

Distribución de frecuencias de caudales medios mensuales del Río Paraná (1944-70)

	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
4000. < x <= 6000.	0	0	0.00	0.00
6000. < x <= 8000.	6	6	1.85	1.85
8000. < x <= 10000.	74	80	22.84	24.69
10000. < x <= 12000.	67	147	20.68	45.37
12000. < x <= 14000.	64	211	19.75	65.12
14000. < x <= 16000.	37	248	11.42	76.54
16000. < x <= 18000.	22	270	6.79	83.33
18000. < x <= 20000.	17	287	5.25	88.58
20000. < x <= 22000.	10	297	3.09	91.67
22000. < x <= 24000.	4	301	1.23	92.90
24000. < x <= 26000.	7	308	2.16	95.06
26000. < x <= 28000.	4	312	1.23	96.30
28000. < x <= 30000.	3	315	0.93	97.22
30000. < x <= 32000.	3	318	0.93	98.15
32000. < x <= 34000.	2	320	0.62	98.77
34000. < x <= 36000.	1	321	0.31	99.07
36000. < x <= 38000.	2	323	0.62	99.69
38000. < x <= 40000.	0	323	0.00	99.69
40000. < x <= 42000.	0	323	0.00	99.69
42000. < x <= 44000.	1	324	0.31	100.00

Tabla 3.8

Distribución de frecuencias de caudales medios mensuales del Río Paraná (1944-70)

	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Relativa (%)	Frecuencia relativa acumulada (%)
0 < x <= 2000.	117	117	36.11	36.11
2000. < x <= 4000.	81	198	25.00	61.11
4000. < x <= 6000.	44	242	13.58	74.69
6000. < x <= 8000.	47	289	14.51	89.20
8000. < x <= 10000.	19	308	5.86	95.06
10000. < x <= 12000.	6	314	1.85	96.91
12000. < x <= 14000.	3	317	0.93	97.84
14000. < x <= 16000.	4	321	1.23	99.07
16000. < x <= 18000.	3	324	0.93	100.00

Tabla 3.9

Estadísticos básicos de caudales medios mensuales en el período 1944-70

	N	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Rango	Varianza	Desvío Standard.	Asimetría	Kurtosis
RÍO PARANÁ	324	13864	12440.5	7752	42906	35154	32426982	5694	1.88	4.39
RÍO URUGUAY	324	3979	2956	429	17382	16953	10648037	3263	1.41	2.23

En el período 1971-2001 los caudales medios mensuales del Río Paraná se distribuyen en un rango de 42000 m³/s, con los valores de mayor frecuencia entre 14000 y 16000 m³/s (ver figura 3.9a y tabla 3.10). Las medidas numéricas descriptivas se detallan en la tabla

3.12. El valor medio es de 18488 m³/s, el desvío respecto de este valor alcanza los 7400 m³/s y, como en el período anterior, el coeficiente de Kurtosis es elevado.

El río Uruguay presenta una distribución asimétrica a la derecha, con los valores más frecuentes entre 2000 y 4000 m³/s, como se muestra en la figura 3.9.b y en la tabla 3.11. El valor medio de los caudales medios mensuales es de 5329 m³/s y la desviación estándar es de 4019 m³/s.

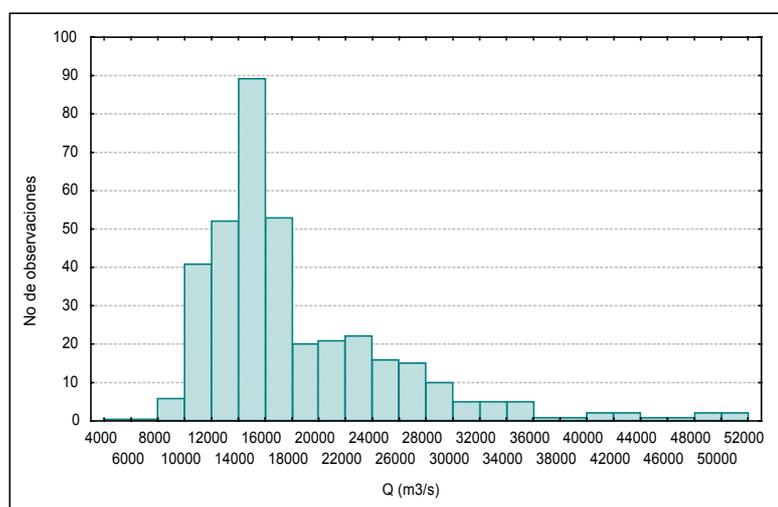


Figura 3.9.a Histograma de caudales medios mensuales del río Paraná (1971-01)

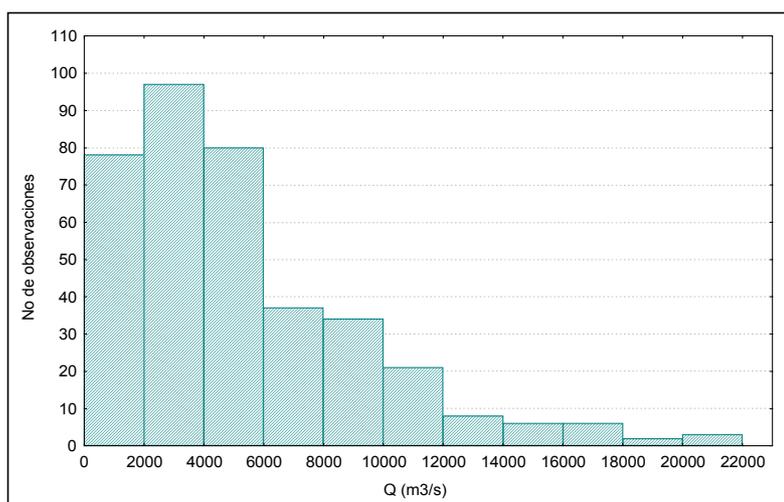


Figura 3.9.b Histograma de caudales medios mensuales del río Uruguay (1971-01)

Tabla 3.10

Distribución de frecuencias de caudales medios mensuales del Río Paraná (1971-01)

	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia Acumulada</i>	<i>Frecuencia Relativa (%)</i>	<i>Frecuencia relativa acumulada (%)</i>
4000. < x <= 6000.	0	0	0	0
6000. < x <= 8000.	0	0	0.00	0.00
8000. < x <= 10000.	6	6	1.61	1.61
10000. < x <= 12000.	41	47	11.02	12.63
12000. < x <= 14000.	52	99	13.98	26.61
14000. < x <= 16000.	89	188	23.92	50.54
16000. < x <= 18000.	53	241	14.25	64.78
18000. < x <= 20000.	20	261	5.38	70.16
20000. < x <= 22000.	21	282	5.65	75.81
22000. < x <= 24000.	22	304	5.91	81.72
24000. < x <= 26000.	16	320	4.30	86.02
26000. < x <= 28000.	15	335	4.03	90.05
28000. < x <= 30000.	10	345	2.69	92.74
30000. < x <= 32000.	5	350	1.34	94.09
32000. < x <= 34000.	5	355	1.34	95.43
34000. < x <= 36000.	5	360	1.34	96.77
36000. < x <= 38000.	1	361	0.27	97.04
38000. < x <= 40000.	1	362	0.27	97.31
40000. < x <= 42000.	2	364	0.54	97.85
42000. < x <= 44000.	2	366	0.54	98.39
44000. < x <= 46000.	1	367	0.27	98.66
46000. < x <= 48000.	1	368	0.27	98.92
48000. < x <= 50000.	2	370	0.54	99.46
50000. < x <= 52000.	2	372	0.54	100.00

Tabla 3.11

Distribución de frecuencias de caudales medios mensuales del Río Uruguay (1971-01)

	<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia Acumulada</i>	<i>Frecuencia Relativa (%)</i>	<i>Frecuencia relativa acumulada (%)</i>
0. < x <= 2000.	78	78	20.97	20.97
2000. < x <= 4000.	97	175	26.08	47.04
4000. < x <= 6000.	80	255	21.51	68.55
6000. < x <= 8000.	37	292	9.95	78.49
8000. < x <= 10000.	34	326	9.14	87.63
10000. < x <= 12000.	21	347	5.65	93.28
12000. < x <= 14000.	8	355	2.15	95.43
14000. < x <= 16000.	6	361	1.61	97.04
16000. < x <= 18000.	6	367	1.61	98.66
18000. < x <= 20000.	2	369	0.54	99.19
20000. < x <= 22000.	3	372	0.81	100.00

Tabla 3.12

Estadísticos básicos de caudales medios mensuales en el período 1944-70

	<i>N</i>	<i>Media</i>	<i>Mediana</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Rango</i>	<i>Varianza</i>	<i>Desvío Standard.</i>	<i>Asimetría</i>	<i>Kurtosis</i>
RÍO PARANA	372	18488	15945.5	8926	51230	42304	54856904	7407	1.82	4.00
RÍO URUGUAY	372	5329	4283.5	485	21418	20933	16150783	4019	1.43	2.13

En las figuras 3.10 y 3.11 se presentan los diagramas de caja para los caudales medios mensuales considerados por ciclo para ambos ríos. Estas figuras permiten establecer las variaciones experimentadas por el régimen de los ríos a lo largo de los 71 años del registro.

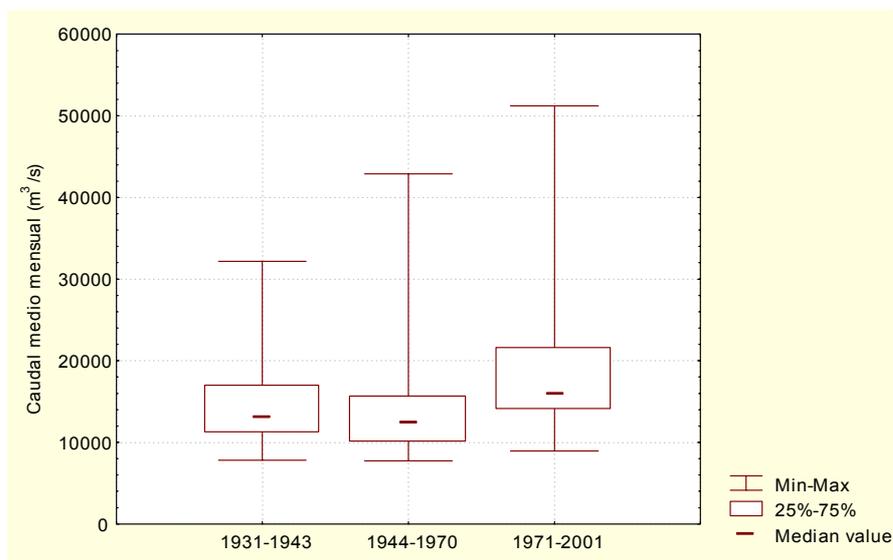


Figura 3.10 Diagramas de caja de caudales medios mensuales del río Paraná

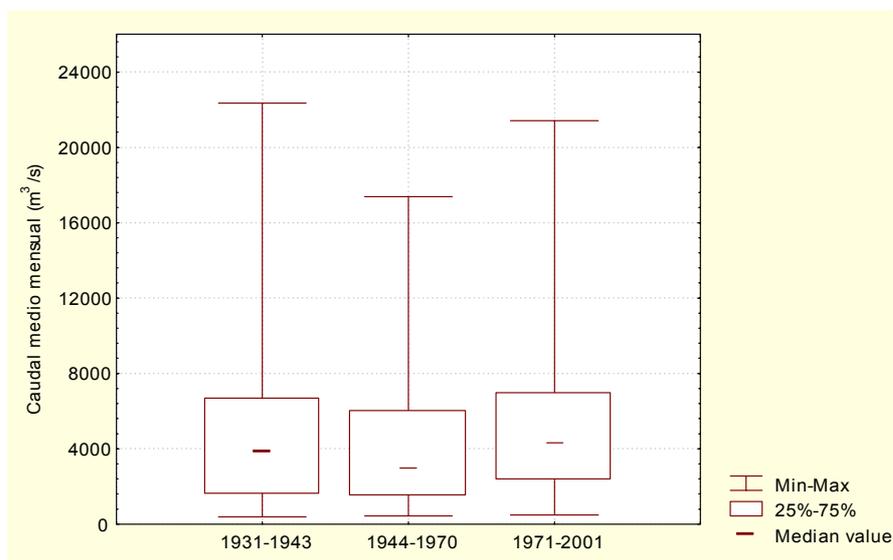


Figura 3.11 Diagramas de caja de caudales medios mensuales del río Uruguay

En el caso del río Paraná se observa que el período más reciente es el que presenta mayor variabilidad, seguido por el período 1931-43. La evolución de la mediana, que experimenta una disminución en el período 1944-70 seguida de un incremento en 1971-2001, es consistente con los cambios en las características hidrológicas de los afluentes del río de la

Plata señalados por distintos autores. (Giacosa, R. et al 2000, García, N. y Vargas, W. 1998).

En el río Uruguay los caudales medios mensuales presentan mayor variabilidad en el período 1931-43, y aunque la mediana también disminuye y luego crece de un período a otro, las diferencias son menos significativas.

3.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE CAUDALES CARACTERÍSTICOS

Los caudales bajo (percentil 75 de superación), medio y alto (percentil 25 de superación) para cada río y cada uno de los tres ciclos se presentan en las tablas 3.13 y 3.14, junto con los valores correspondientes al período completo:

Tabla 3.13
 Caudales medios mensuales característicos del Río Paraná (m³/s)

Caudal	Ciclo 31-43	Ciclo 44-70	Ciclo 71-01	Ciclo 31-01
Bajo	10.900	10.000	13.900	11.500
Medio	14.700	13.900	18.500	16.000
Alto	17.000	15.600	21.700	18.200

Tabla 3.14
 Caudales medios mensuales característicos del Río Uruguay (m³/s)

Caudal	Ciclo 31-43	Ciclo 44-70	Ciclo 71-01	Ciclo 31-01
Bajo	1.600	1.400	2.300	1.800
Medio	4.600	4.000	5.300	4.700
Alto	6.700	6.100	6.900	6.500

En las tablas 3.15 y 3.16 se presenta la magnitud de la variación de los caudales bajo, medio y alto en cada uno de los ciclos respecto de los valores históricos (período completo) y en las tablas 3.17 y 3.18, se presentan los mismos valores calculados con referencia a los del ciclo 1944-70.

Tabla 3.15

Porcentajes de variación de los caudales medios mensuales característicos del Río Paraná respecto de los valores históricos(%)

Caudal	Ciclo 31-43	Ciclo 44-70	Ciclo 71-01
Bajo	-6,46	-14,10	19,22
Medio	-8,46	-13,50	15,35
Alto	-5,30	-13,20	20,32

Tabla 3.16

Porcentajes de variación de los caudales medios mensuales característicos del Río Uruguay respecto de los valores históricos(%)

Caudal	Ciclo 31-43	Ciclo 44-70	Ciclo 71-01
Bajo	2,75	-6,61	6,88
Medio	-1,23	-15,11	13,68
Alto	-10,98	-19,96	30,35

Tabla 3.17

Porcentajes de variación de los caudales medios mensuales característicos del Río Paraná respecto de los valores del ciclo 1944-70 (%)

Caudal	Ciclo 31-43	Ciclo 44-70	Ciclo 71-01
Bajo	8,90	0,00	38,79
Medio	5,82	0,00	33,35
Alto	9,09	0,00	38,61

Tabla 3.18

Porcentajes de variación de los caudales medios mensuales característicos del Río Uruguay respecto de los valores del ciclo 1944-70 (%)

Caudal	Ciclo 31-43	Ciclo 44-70	Ciclo 71-01
Bajo	10,02	0,00	14,44
Medio	16,36	0,00	33,92
Alto	11,22	0,00	62,85

Se observa que durante el ciclo 71-01 el caudal medio del río Paraná es un 15% superior a la media histórica sobre el período completo de análisis (31-01), y que el aumento trepa a 33% si se lo compara con el caudal medio del ciclo precedente (44-70), de características secas. En el caso del río Uruguay estos guarismos son totalmente similares, 13 y 33%, respectivamente, indicando que el cambio relativo es básicamente el mismo para ambos ríos.

Por otro lado, las tablas anteriores también muestran que los aumentos de los caudales bajo y alto del río Paraná para el ciclo 71-01 respecto del 44-70 son ambos de alrededor del 39%, poniendo en evidencia el crecimiento significativo absoluto de los caudales altos, es decir, un corrimiento positivo significativo del valor umbral de caudal alto. En cambio, para el río Uruguay los guarismos son de 63% y 14%, respectivamente, ó, más significativamente, de entre 800 y 900 m³/s para ambos, indicando que los umbrales de caudal bajo y alto se corrieron en forma rígida.

4 DESCOMPOSICIÓN ESTACIONAL

Para caracterizar la naturaleza del fenómeno representado por las series de caudales medios mensuales de los ríos durante el período de análisis y formalizar el conocimiento de algunas características del ciclo estacional, se objetivó la identificación del patrón de los datos observados, asumiendo que los mismos resultan de la suma de un patrón sistemático y un ruido aleatorio.

Se supuso que el patrón sistemático tiene dos componentes básicas: tendencia y estacionalidad. La dependencia estacional es la dependencia correlacional de orden k entre elementos de la serie y se identifica como un patrón que se repite cada k elementos.

Para identificar estas componentes se aplicó el método clásico de descomposición estacional de series temporales Census I, que asume que la serie temporal contiene cuatro diferentes componentes:

- Componente estacional S_t ,
- Componente de tendencia T_t ,
- Componente cíclica C_t , y
- Componente irregular, aleatoria o ruido I_t .

La diferencia entre las componentes C_t y S_t es que la componente estacional ocurre a intervalos regulares mientras que los factores cíclicos usualmente tienen una duración más larga que varía de ciclo a ciclo.

En este método, las componentes de tendencia y cíclica se combinan en una única componente $T-C$ y se supone que la relación funcional entre estas componentes es de tipo aditivo

$$X_t = TC_t + S_t + I_t$$

donde X_t es el valor del caudal medio mensual de la serie en el mes t .

La variabilidad de la serie observada se elimina calculando las medias móviles con un lag de 12 meses y el efecto combinado de los factores estacional e irregular se obtiene restando de la serie original la serie filtrada de valores medios. La componente estacional se aísla calculando el promedio para cada punto durante un año.

Una vez individualizada la componente estacional se la deduce de la serie observada y se obtiene la serie ajustada estacionalmente, a partir de la cual se calcula la componente TC mediante la media móvil pesada de 5 puntos, con pesos 1, 2, 3, 2 y 1. Finalmente, la componente irregular se obtiene restando la componente TC de la serie ajustada estacionalmente.

4.1 RÍO PARANÁ

Las figuras 4.1.a a 4.1.d presentan, respectivamente, la serie de medias móviles (lag=12), la componente estacional, la componente TC y la componente irregular para los caudales medios mensuales del río Paraná en el registro de 71 años (1931-2001).

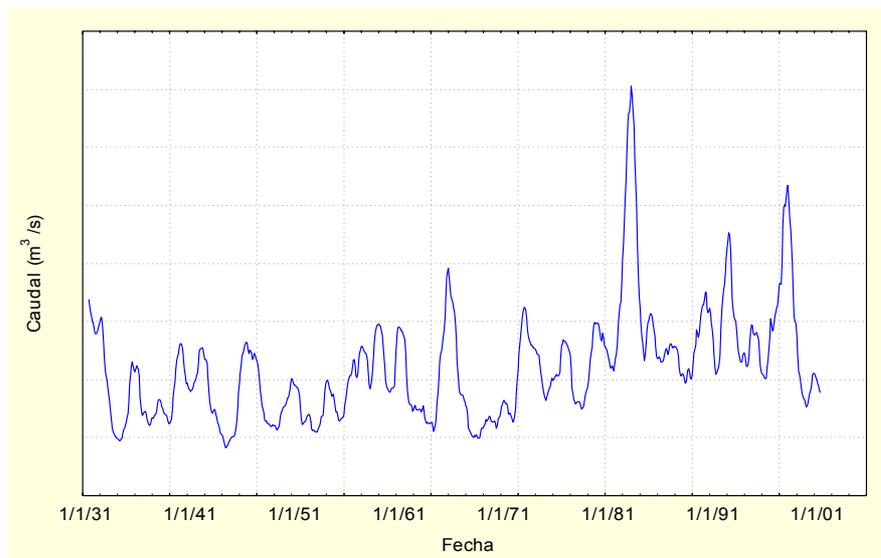


Figura 4.1.a Medias móviles de caudal medio mensual (1931-01)



Figura 4.1.b Componente estacional del caudal medio mensual (1931-01)

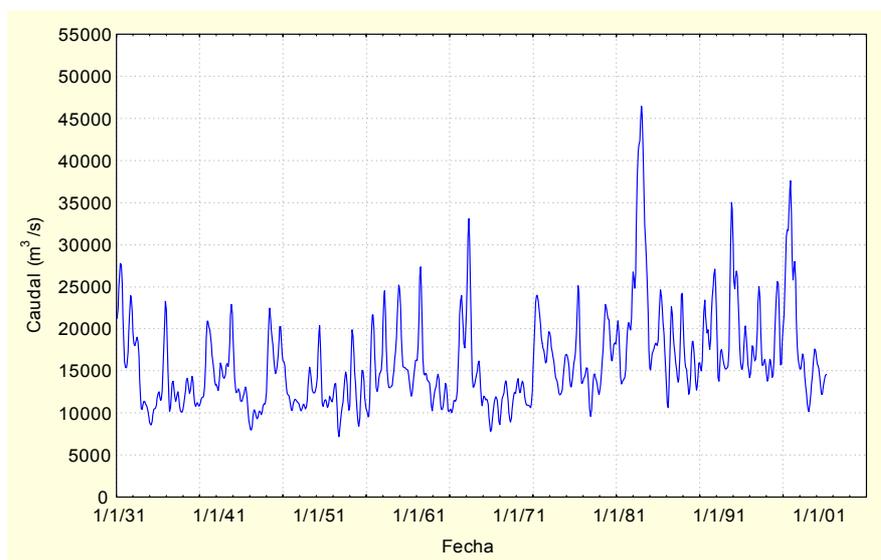


Figura 4.1.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1931-01)

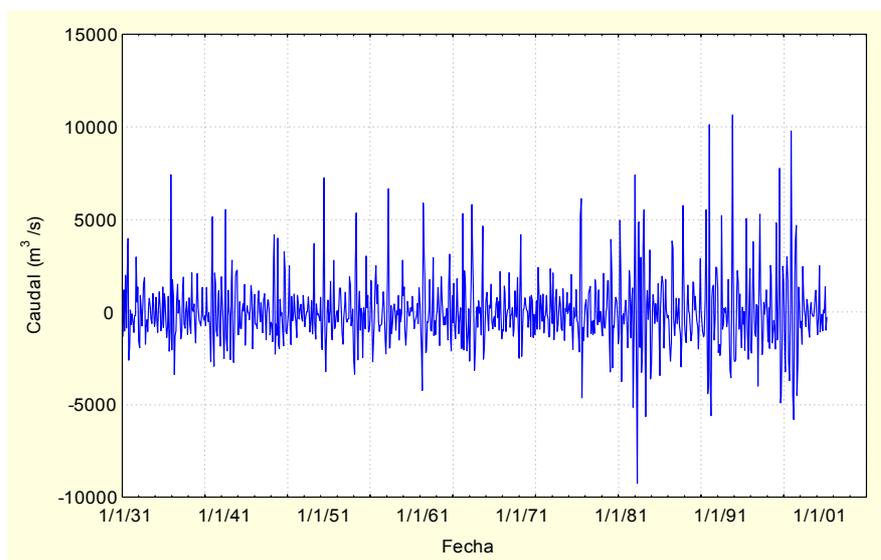


Figura 4.1.d Componente irregular del caudal medio mensual (1931-01)

Para el período total, la componente estacional calculada presenta un patrón claramente definido con una zona de valores altos coincidente con los meses de febrero a abril, con máximo en marzo. El período de estiaje se extiende entre agosto y noviembre, presentando el máximo en septiembre. La componente irregular aislada oscila con valores absolutos de 2000 m³/s en términos medios, pero presenta fuertes oscilaciones de hasta 10000 m³/s que se verifican con períodos de entre 3 y 4 años.

Similarmente a lo realizado en el capítulo anterior, para poner de manifiesto la variación del ciclo estacional de los caudales medios mensuales a lo largo del registro disponible, el análisis de descomposición fue aplicado a los subperíodos definidos en el capítulo 2.

Las figuras 4.2.a a 4.2.d presentan, respectivamente, la serie de medias móviles (lag=12) y las componentes estacional, *TC* e irregular para los caudales medios mensuales del río Paraná en el período 1931-43.

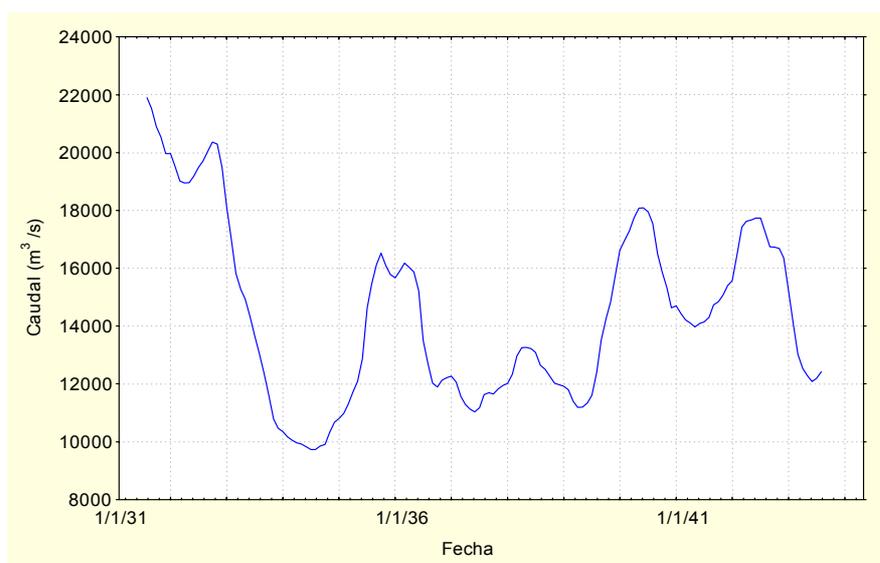


Figura 4.2.a Medias móviles de caudal medio mensual (1931-43)

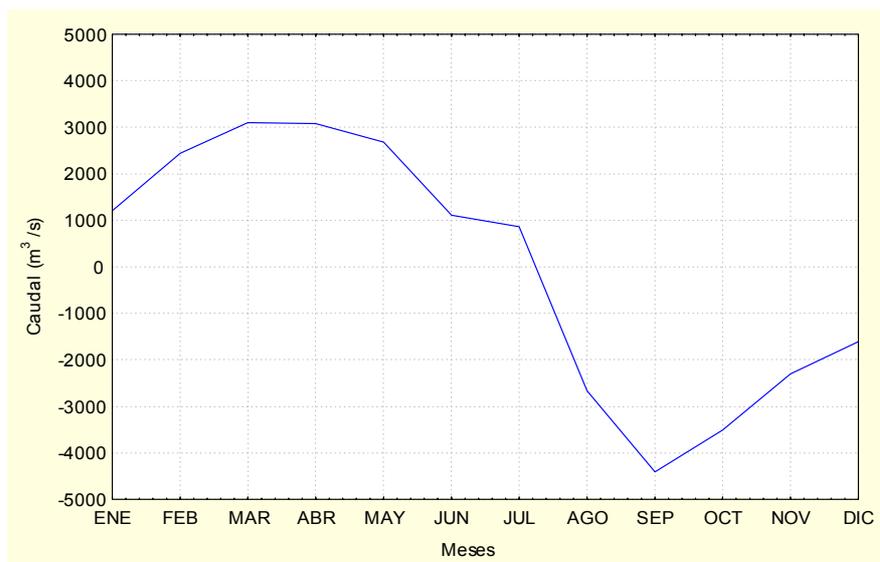


Figura 4.2.b Componente estacional del caudal medio mensual (1931-43)

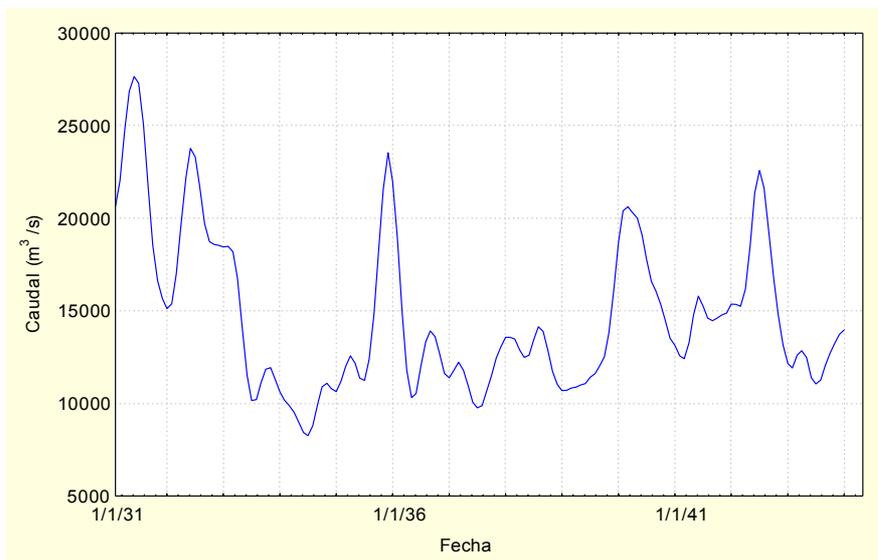


Figura 4.2.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1931-43)

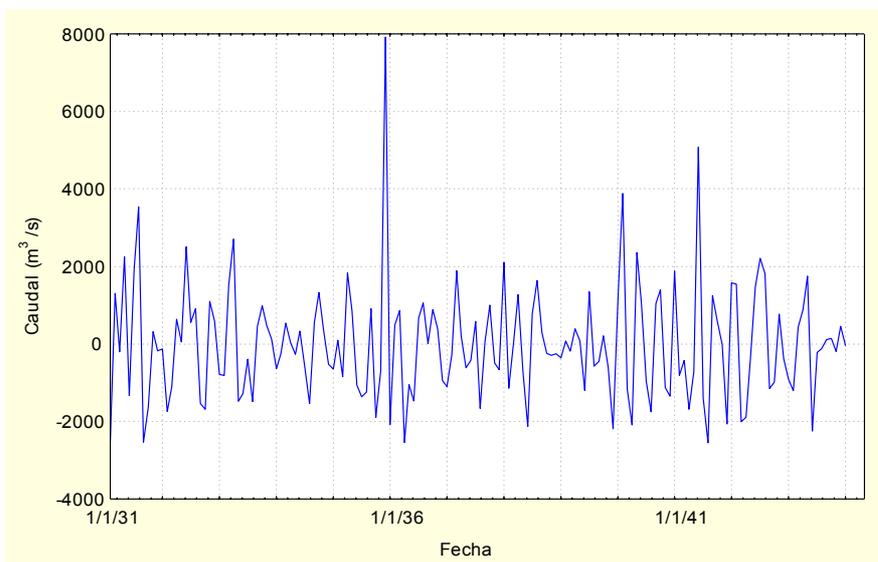


Figura 4.2.d Componente irregular del caudal medio mensual (1931-43)

Se observa que la componente estacional presenta una distribución en la que los valores máximos se establecen en una meseta que se extiende aproximadamente entre febrero y mayo y los meses correspondientes a caudales bajos tienen un mínimo en septiembre.

La componente aleatoria evoluciona con valores de entre -2000 y $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, con algunos extremos como el de noviembre de 1935 que llega a $8000 \text{ m}^3/\text{s}$.

La descomposición estacional de los caudales medios mensuales del período 1944-70 se muestra en las figuras 4.3.a a 4.3.d.

La serie de factores estacionales evidencia el ciclo anual de este período y presenta un valor máximo en abril, mientras los meses de agosto a octubre corresponden a aguas bajas, localizándose el mínimo en septiembre. La variabilidad de la componente aleatoria es elevada, entre -4000 y 6000 m^3/s en torno a los valores de la componente de tendencia y cíclica.

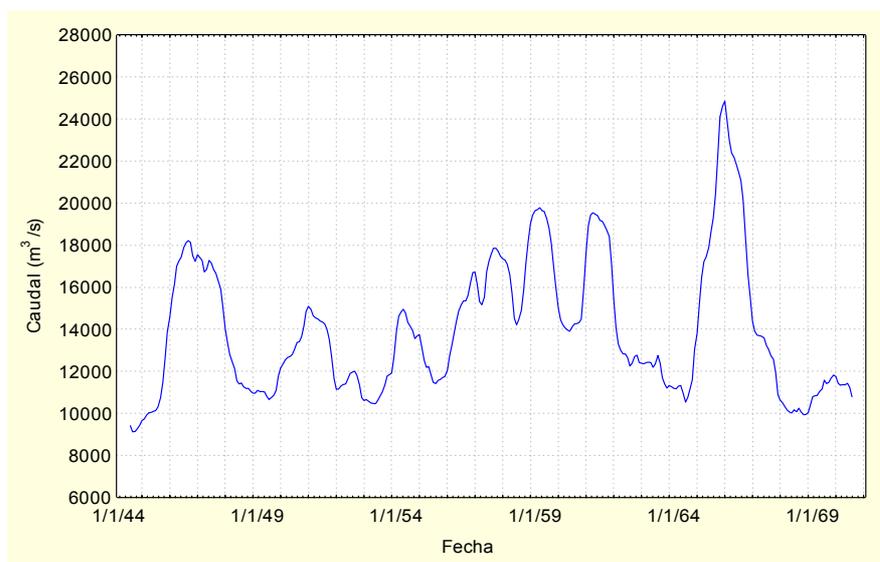


Figura 4.3.a Medias móviles de caudal medio mensual (1944-70)

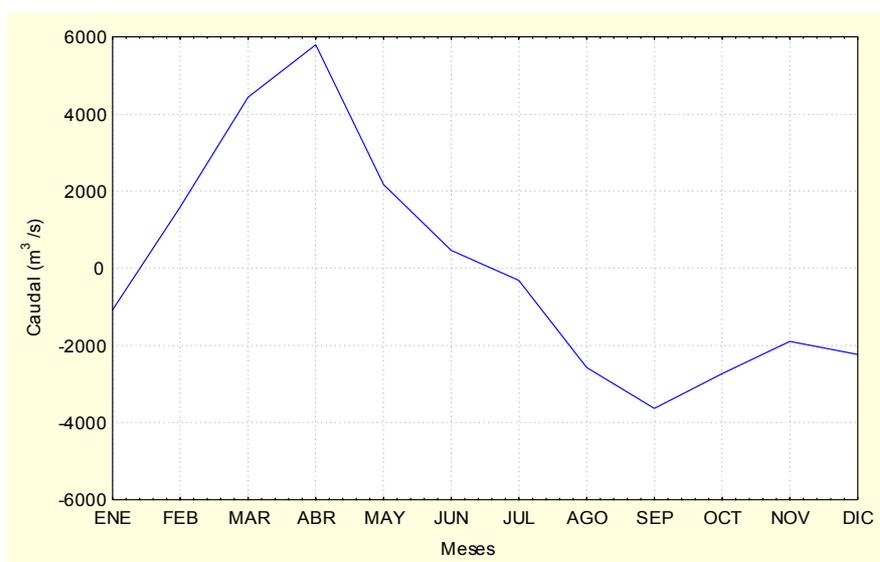


Figura 4.3.b Componente estacional del caudal medio mensual (1944-70)

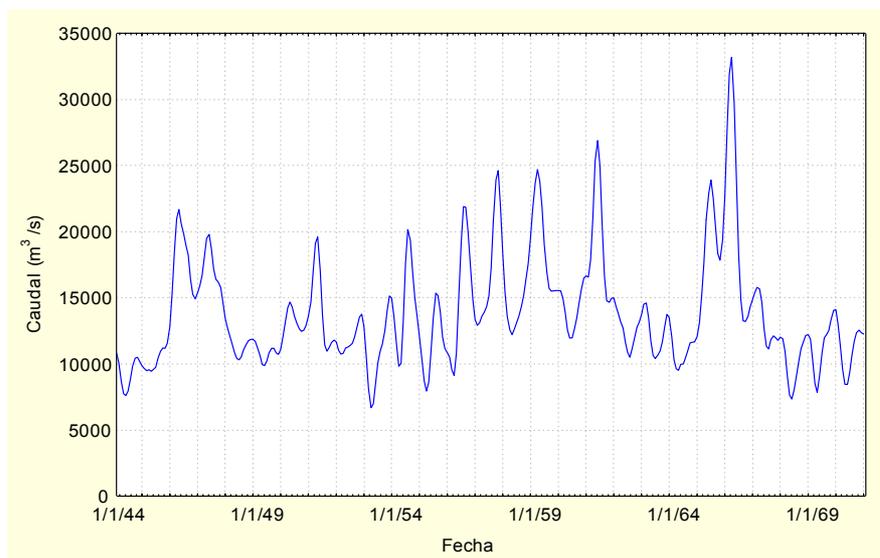


Figura 4.3.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1944-70)

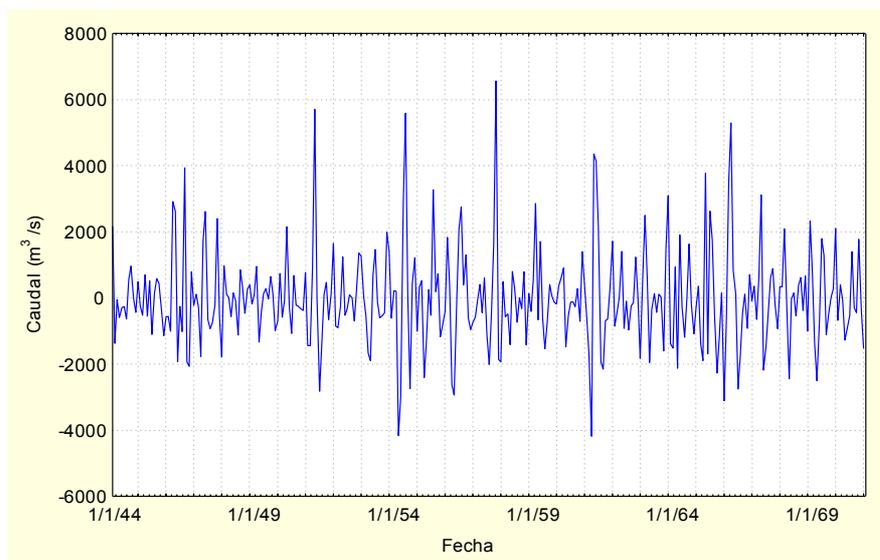


Figura 4.3.d Componente irregular del caudal medio mensual (1944-70)

En el último período (figuras 4.4.a a 4.4.d), el máximo de ciclo anual se desplazó al mes de marzo y se evidencia un segundo pico en noviembre. Los valores mínimos se dan en septiembre, como en los períodos anteriores.

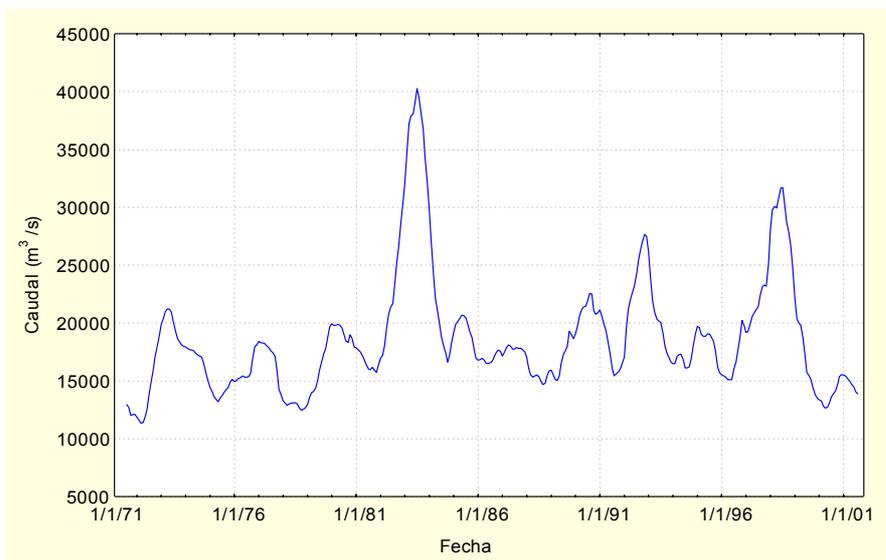


Figura 4.4.a Medias móviles de caudal medio mensual (1971-01)

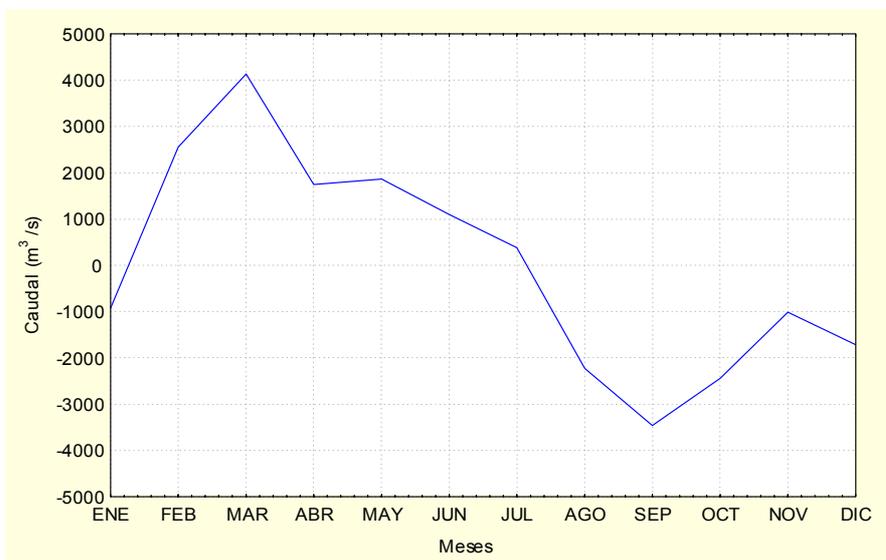


Figura 4.4.b Componente estacional del caudal medio mensual (1971-01)

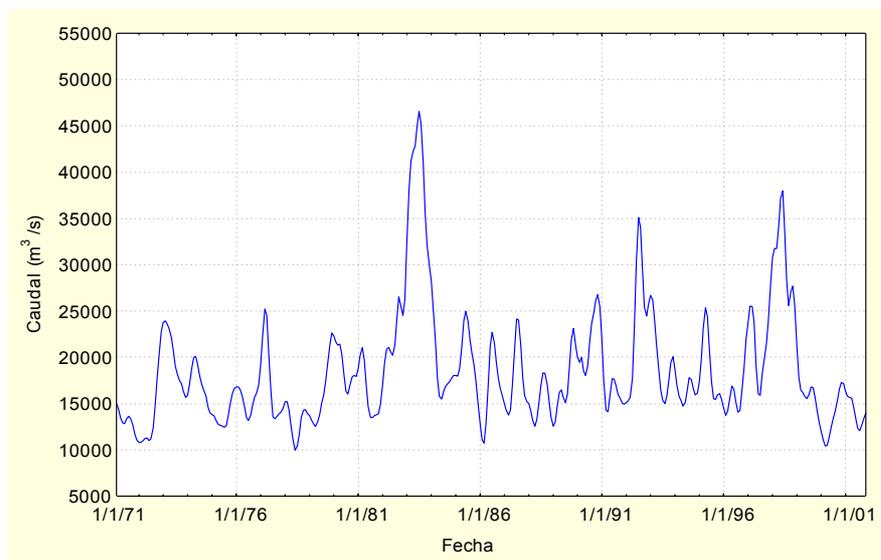


Figura 4.4.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1971-01)

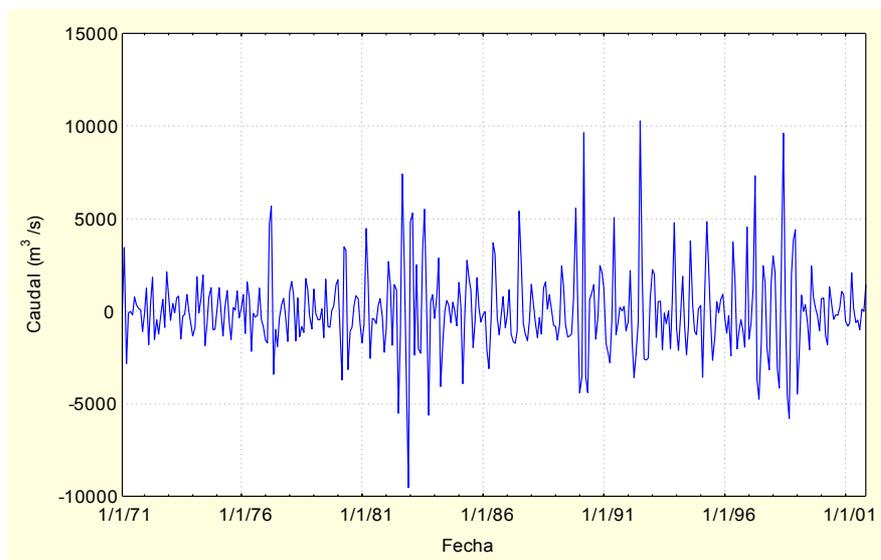


Figura 4.4.d Componente irregular del caudal medio mensual (1971-01)

Cuando se comparan las componentes estacionales identificadas del caudal medio mensual se advierte que el mínimo de caudal se presenta siempre en septiembre, mientras que el máximo que se muestra en marzo en el período 1931-43, se desplaza a abril en el segundo período y luego nuevamente a marzo en el período más reciente.

Los períodos 1931-43 y 1971-01 presentan épocas de aguas altas más extensas (enero a julio) comparadas con el segundo y la recesión (entre julio y septiembre) es más pronunciada. Otra característica identificable es la aparición de un segundo pico de caudal

de valor inferior al primero, que está bien establecido en noviembre en el período 1971-01 pero que ya se advierte en 1944-70.

4.2 RÍO URUGUAY

La serie de medias móviles (lag=12), la componente estacional, la componente de tendencia y cíclica TC y la componente irregular para los caudales medios mensuales del río Uruguay en el registro de 71 años (1931-2001) se presentan en las figuras 4.5.a a 4.5.d, respectivamente.

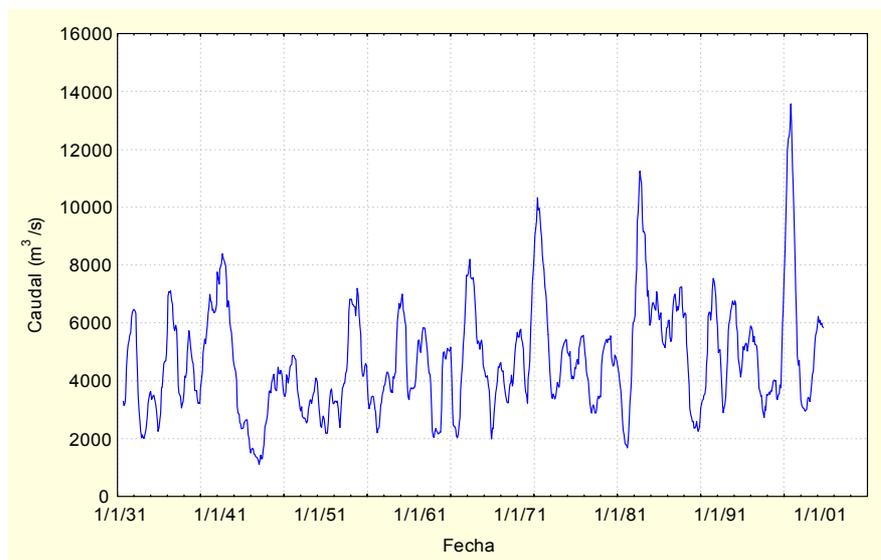


Figura 4.5.a Medias móviles de caudal medio mensual (1931-01)

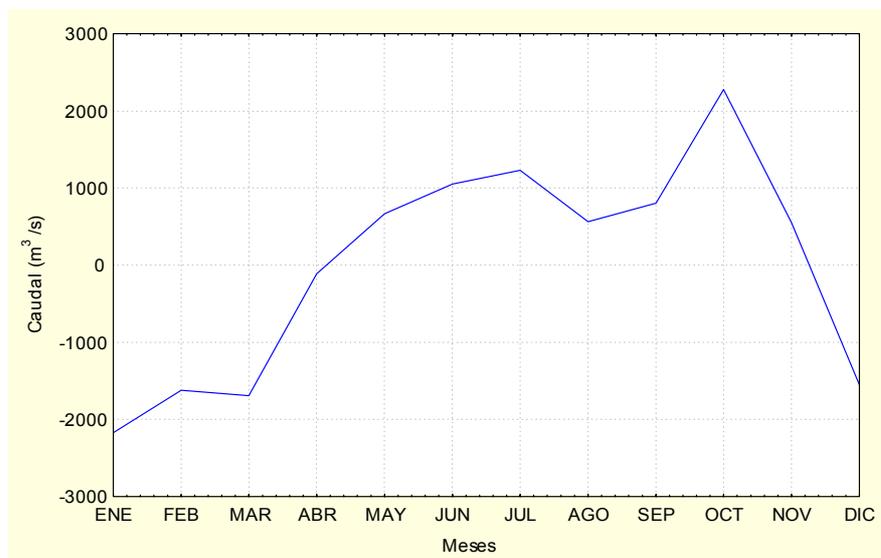


Figura 4.5.b Componente estacional del caudal medio mensual (1931-01)

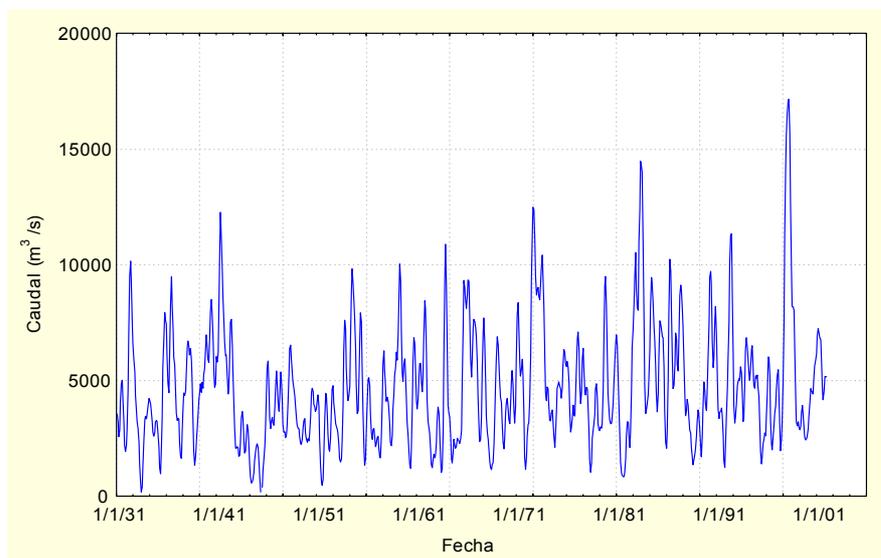


Figura 4.5.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1931-01)

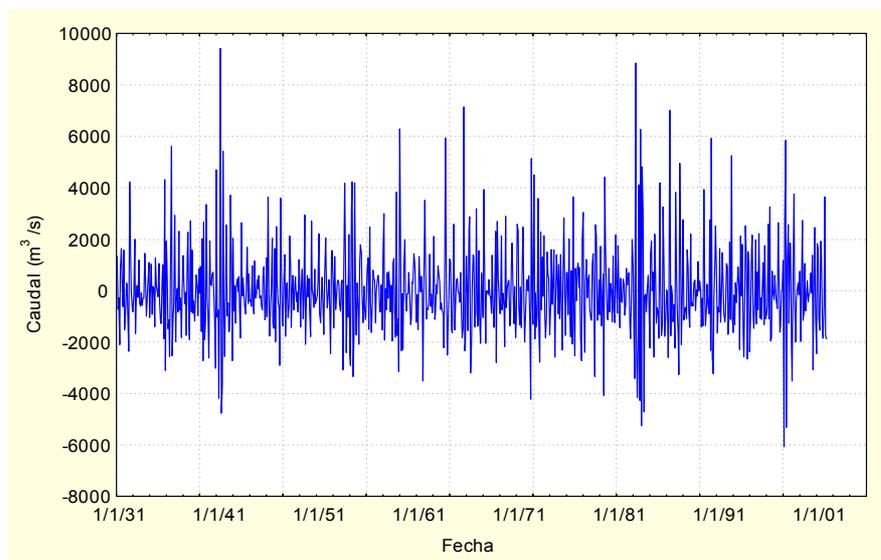


Figura 4.5.d Componente irregular del caudal medio mensual (1931-01)

Como se advierte en la figura 4.5.b, el patrón estacional para el período completo presenta dos zonas de valores elevados, siendo el primero (julio) de menor cuantía que el segundo (octubre). El estiaje se extiende de diciembre a abril. La componente irregular oscila en torno a la componente de tendencia y cíclica con valores absolutos medios de aproximadamente $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, presentándose oscilaciones de más de $8000 \text{ m}^3/\text{s}$.

En el período 1931-43, la componente estacional tiene un máximo en mayo y otro en octubre levemente inferior. El período de aguas bajas se extiende entre noviembre y marzo (ver figuras 4.6.a a 4.6.d).

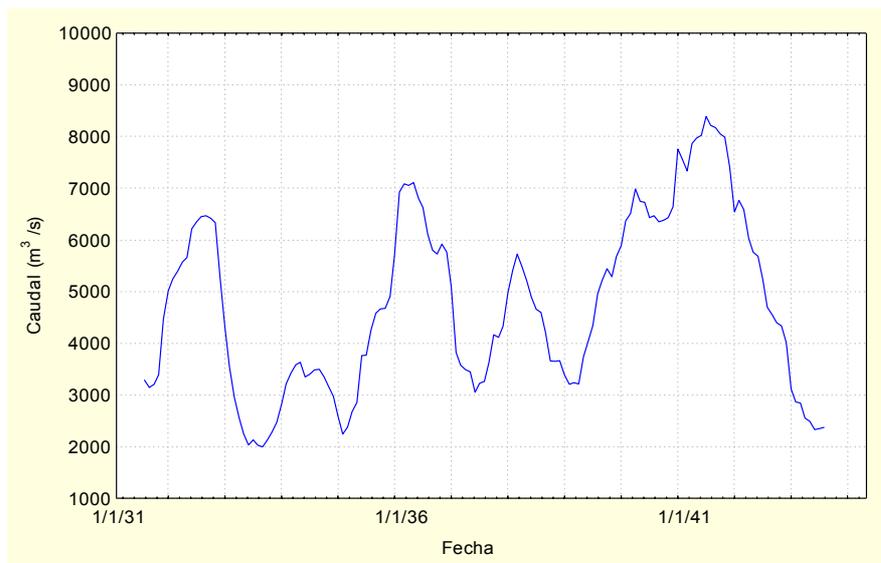


Figura 4.6.a Medias móviles de caudal medio mensual (1931-43)



Figura 4.6.b Componente estacional del caudal medio mensual (1931-43)

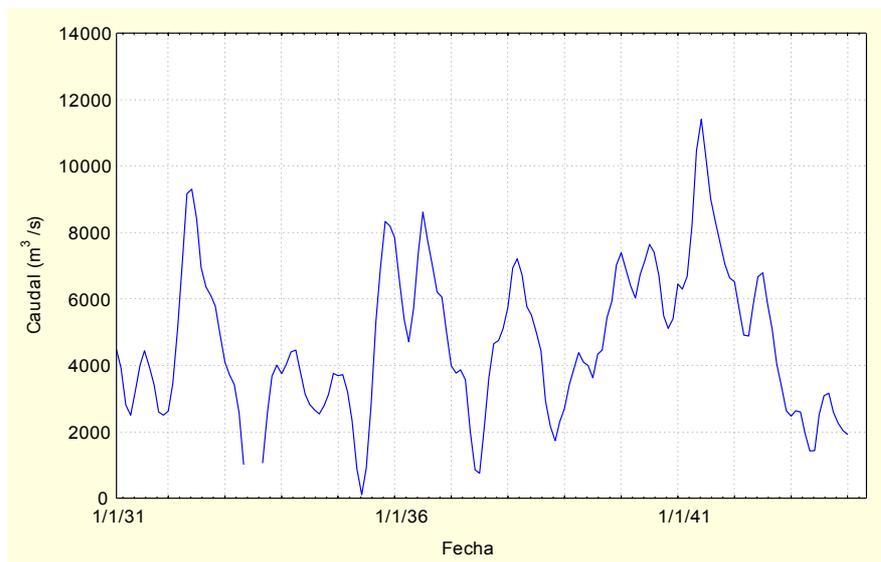


Figura 4.6.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1931-43)

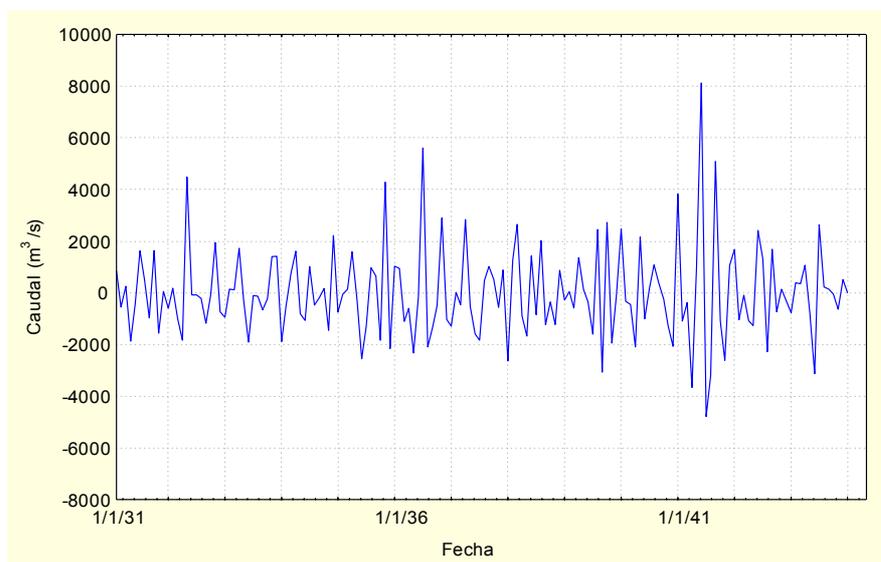


Figura 4.6.d Componente irregular del caudal medio mensual (1931-43)

Durante el período 1944-70 la distribución anual de los factores estacionales también presenta dos máximos, el primero en julio y el segundo en octubre de mayor magnitud. El período seco es más corto que en el ciclo anterior, extendiéndose de enero a marzo. La contribución aleatoria al escurrimiento medio mensual varía entre -2000 y $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, con extremos que alcanzan $6000 \text{ m}^3/\text{s}$. (ver figuras 4.7.a a 4.7.d).

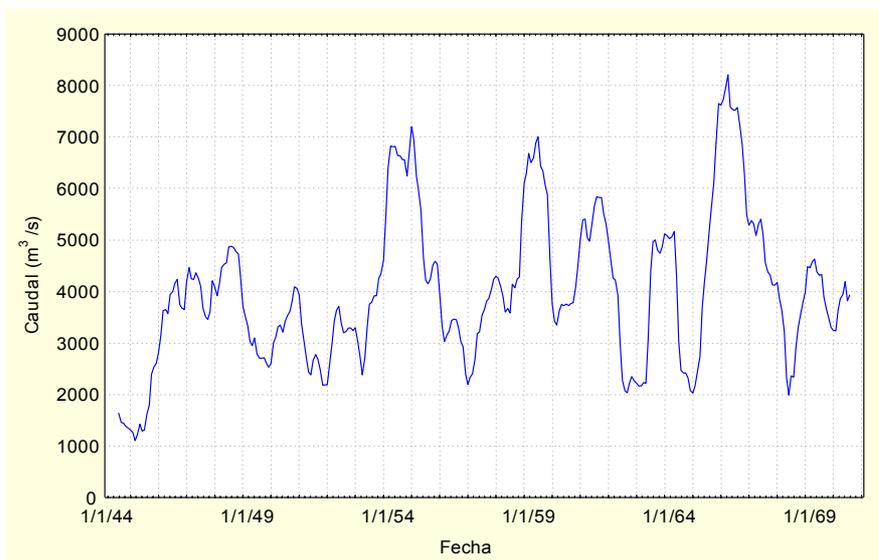


Figura 4.7.a Medias móviles de caudal medio mensual (1944-70)

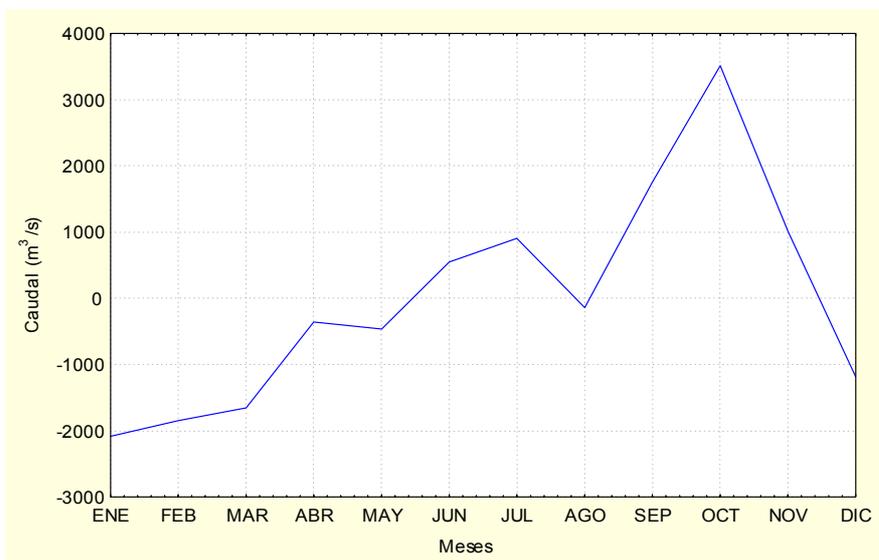


Figura 4.7.b Componente estacional del caudal medio mensual (1944-70)

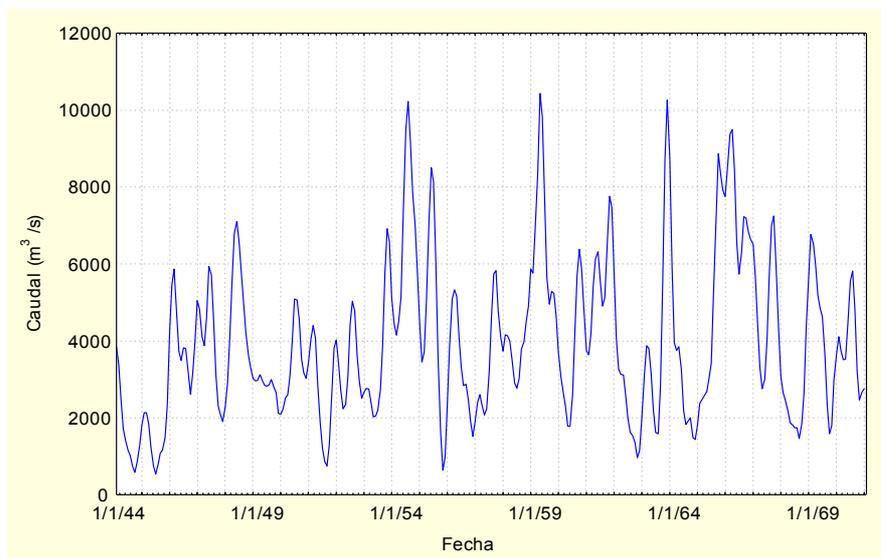


Figura 4.7.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1944-70)

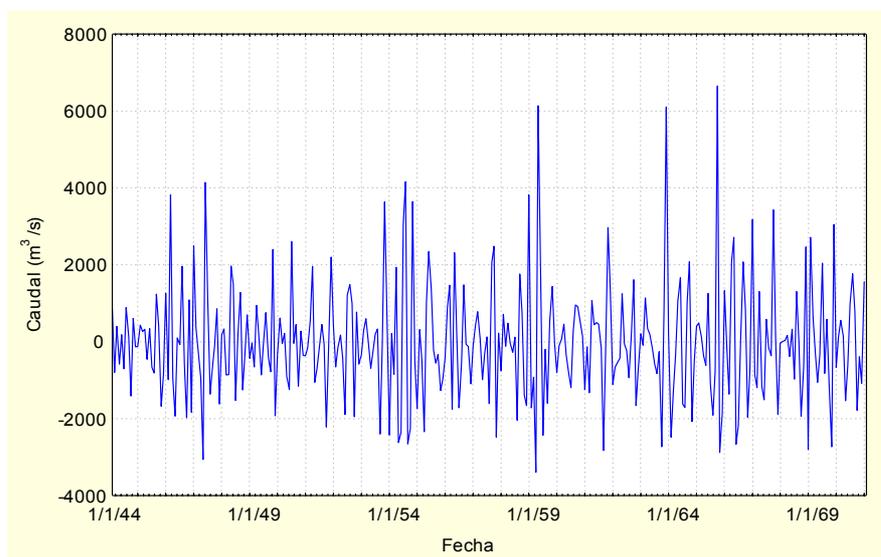


Figura 4.7.d Componente irregular del caudal medio mensual (1944-70)

En el período más reciente (figuras 4.8a a 4.8d) la componente estacional muestra una zona de valores elevados que se extiende entre abril y noviembre, con un período de aguas bajas intermedio que alcanza el mínimo en septiembre. El período seco se ubica entre diciembre y enero.

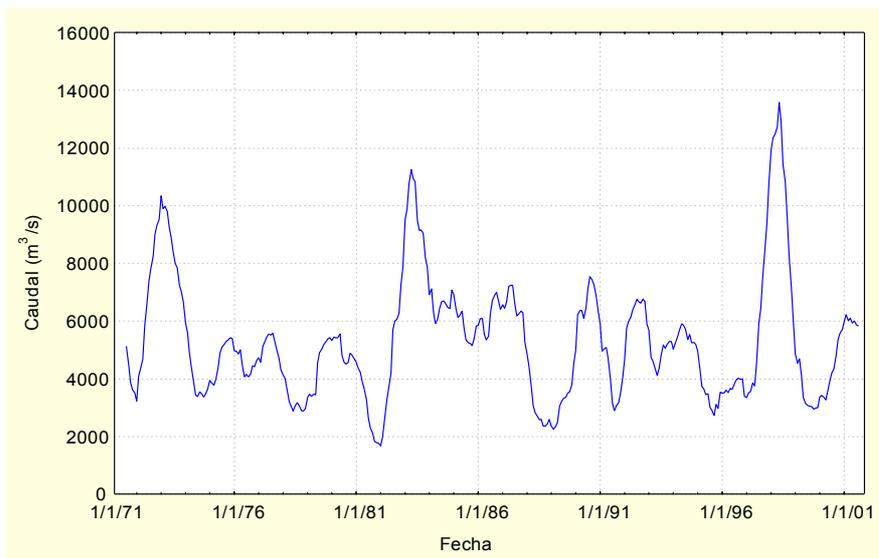


Figura 4.8.a Medias móviles de caudal medio mensual (1971-01)

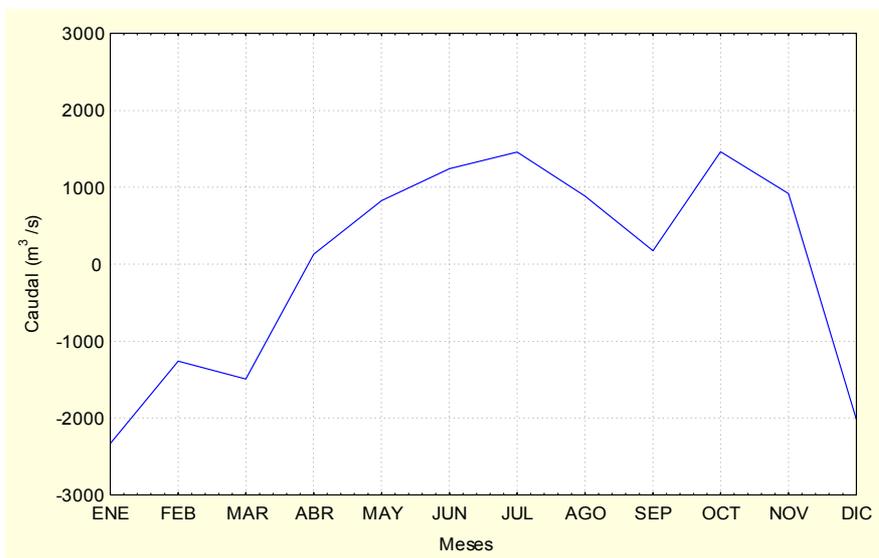


Figura 4.8.b Componente estacional del caudal medio mensual (1971-01)

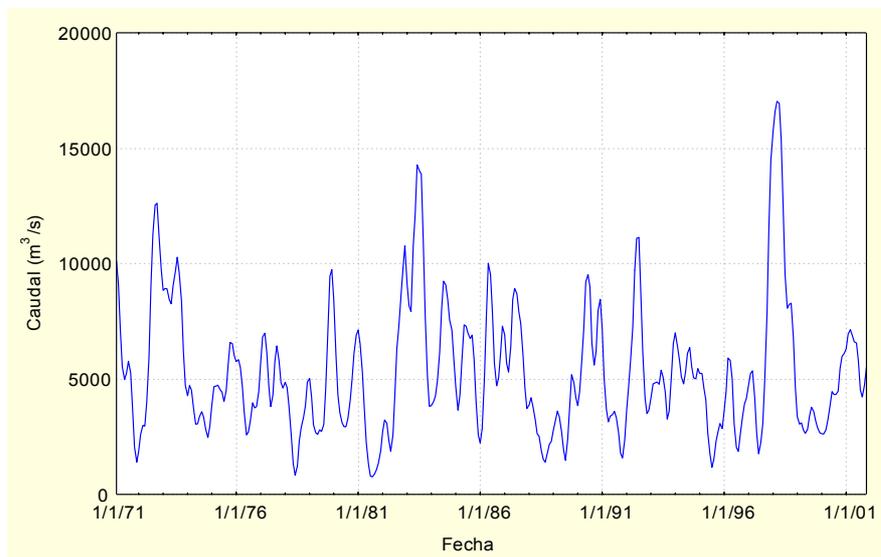


Figura 4.8.c Componentes de tendencia y cíclica del caudal medio mensual (1971-01)

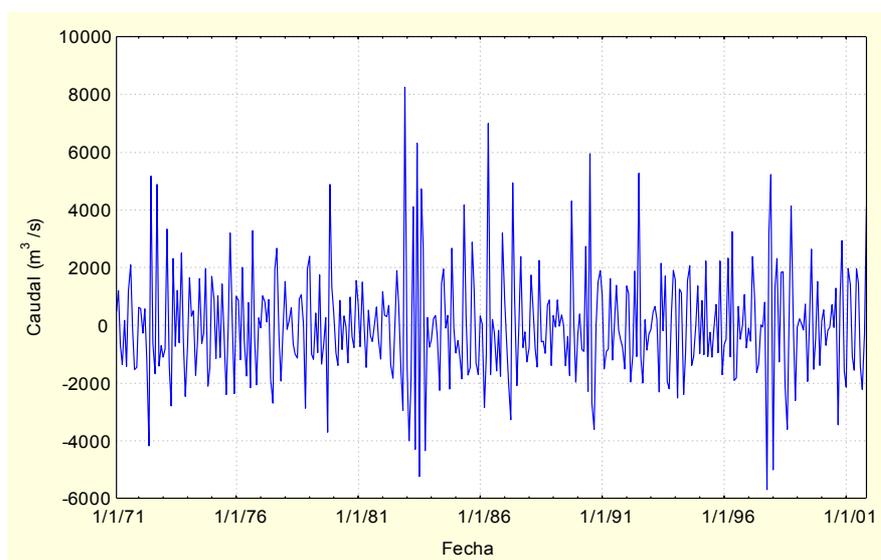


Figura 4.8.d Componente irregular del caudal medio mensual (1971-01)

De la comparación del ciclo estacional en los tres períodos surgen evidentes diferencias. El primer pico de caudal medio mensual (junio) resulta superior al segundo (octubre) entre 1931-1943, a diferencia de lo que ocurre en los dos períodos siguientes. Entre éstos, la diferencia principal es la envergadura del primer pico, muy inferior al segundo en el período 1944-70. Por otro lado, el valle que los separa se adelanta a agosto, localizándose en septiembre en los otros dos períodos.

4.3 RÉGIMEN MENSUAL DE LOS RÍOS PARANÁ Y URUGUAY

Las características de las series de caudales medios mensuales aparecen claramente evidenciadas al analizar el régimen mensual de los ríos a través de los valores promedios de los caudales medios mensuales en los períodos mencionados.

En las figuras 4.9 a 4.12 se resume en diagramas de caja la evolución anual de los caudales medios mensuales, en cada uno de los tres ciclos y en el período total, a través de tres componentes; el valor medio, como medida de la tendencia central, la variabilidad en torno a la media, medida por el error estándar y el rango, por la desviación estándar.

La figura 4.13 muestra el contraste en la progresión anual de los promedios en cada período en el río Paraná y permite comparar el comportamiento entre los mismos. En todos los períodos, febrero y marzo son los meses correspondientes a crecidas y agosto y septiembre a aguas bajas.

Se advierte que el período 1943-70 es el más seco y que 1971-01 tiene características húmedas.

Comparando el período 1931-43 con los valores calculados para la serie histórica total, se observa en general un déficit de aproximadamente 5-10%, excepto en enero en que el valor promedio del período es apenas superior al promedio histórico total.

Entre 1944 y 1970, sólo el promedio calculado para abril excede el promedio histórico en aproximadamente 10%, mientras que el resto del año los valores son inferiores a los valores calculados para el período completo, con déficits del orden de 20%.

En el período 1971-01 los promedios de caudales medios mensuales son siempre superiores a los medios históricos, superándolos en promedio en 20%.

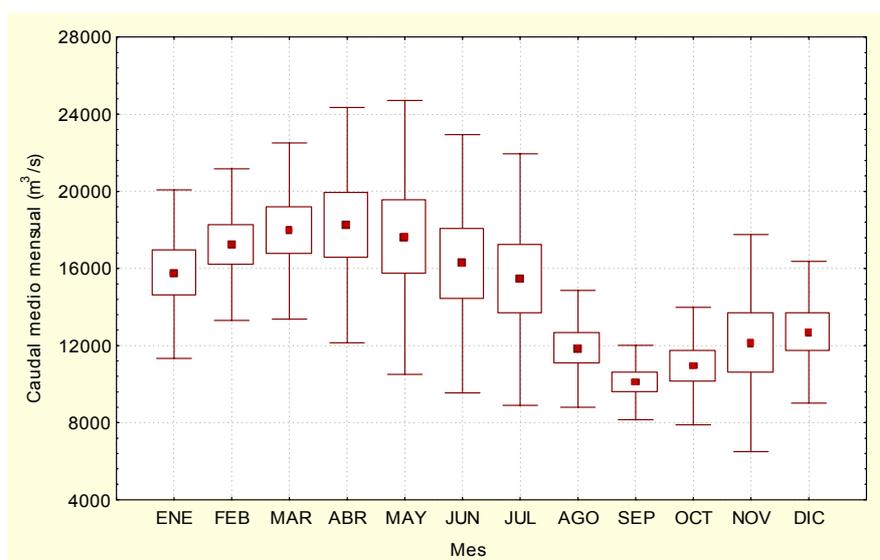


Figura 4.9 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Paraná (1931-43)

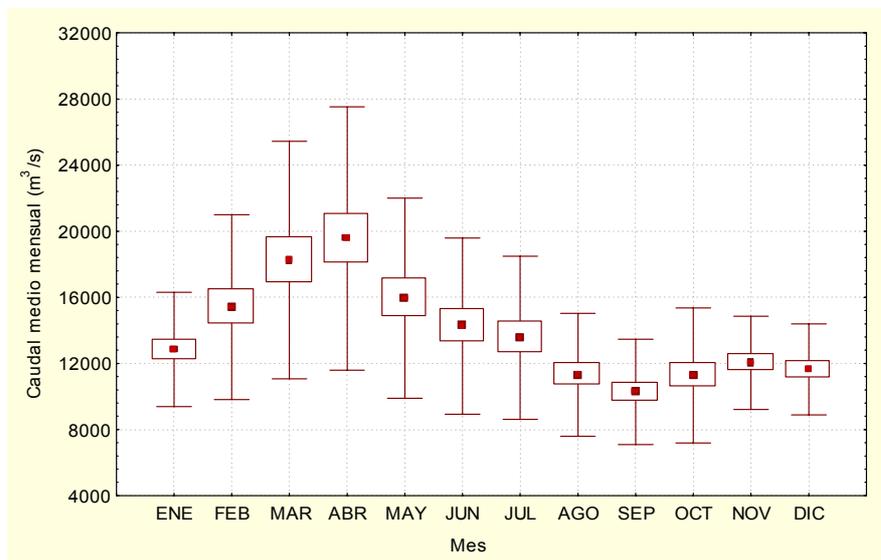


Figura 4.10 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Paraná (1944-70)

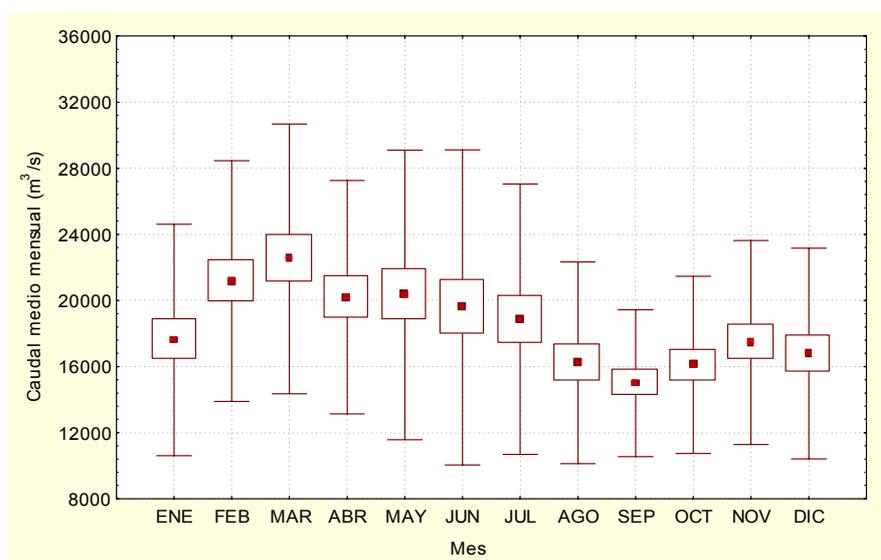


Figura 4.11 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Paraná (1971-01)

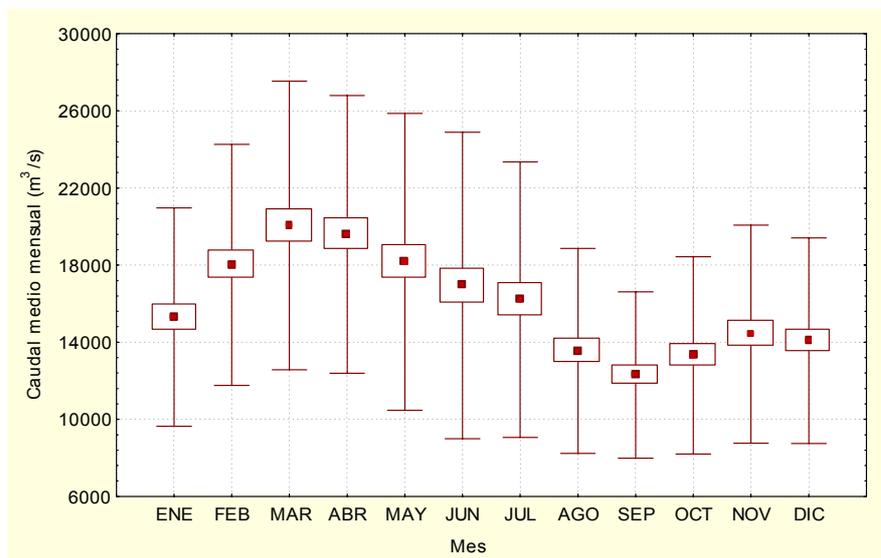


Figura 4.12 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Paraná (1931-01)

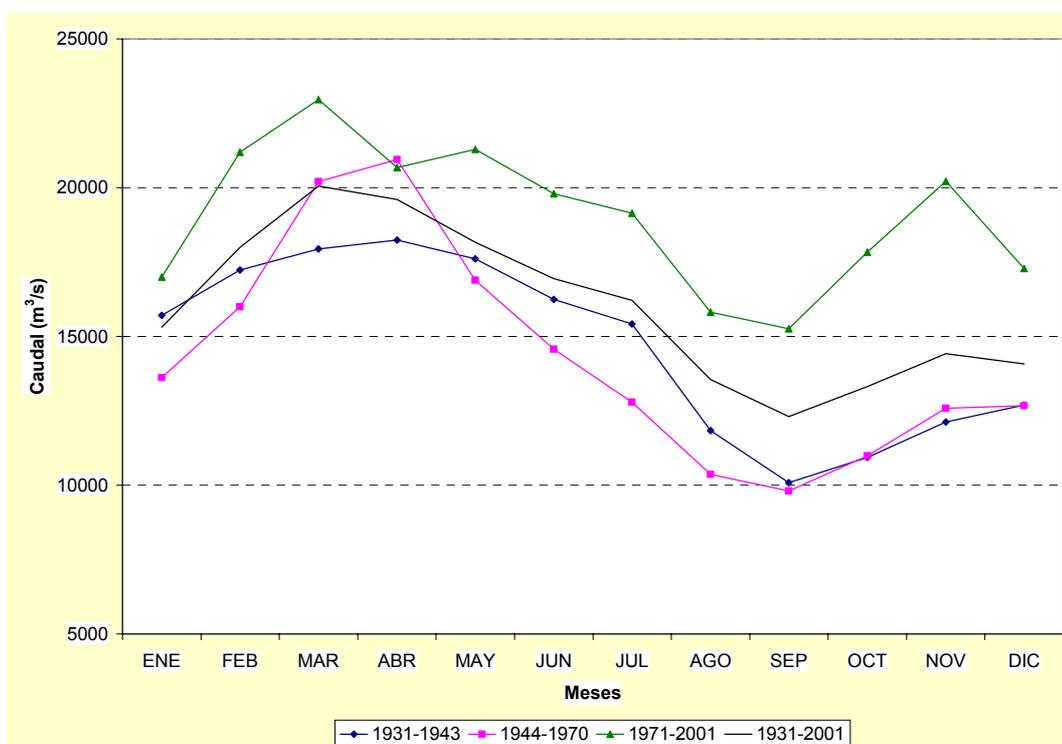


Figura 4.13 Promedios de caudales medios mensuales en el río Paraná por ciclo

Las figuras 4.14 a 4.17 muestran la progresión anual de las medias de caudales medios mensuales, el error estándar y la desviación estándar respecto del valor medio para la escorrentía del río Uruguay. Como en el caso del río Paraná, los resultados se presentan en diagramas de caja para cada ciclo y para el registro total.

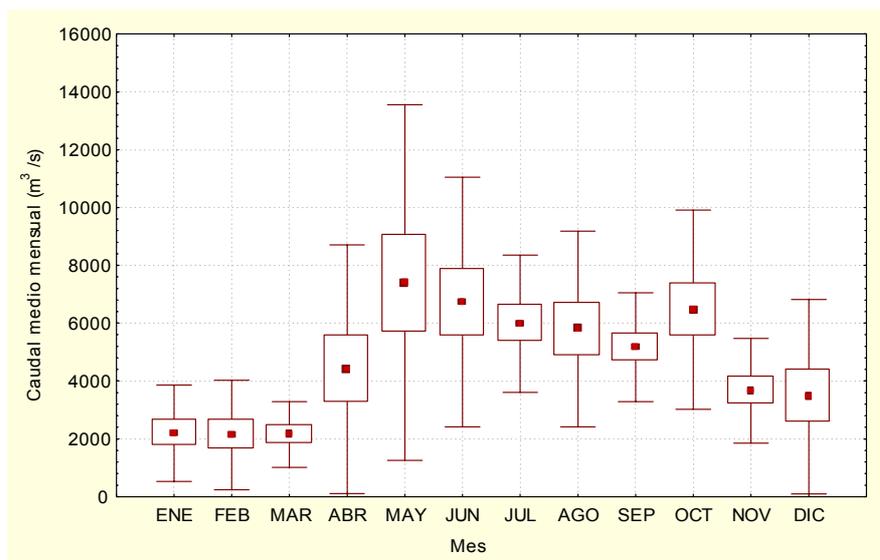


Figura 4.14 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Uruguay (1931-43)

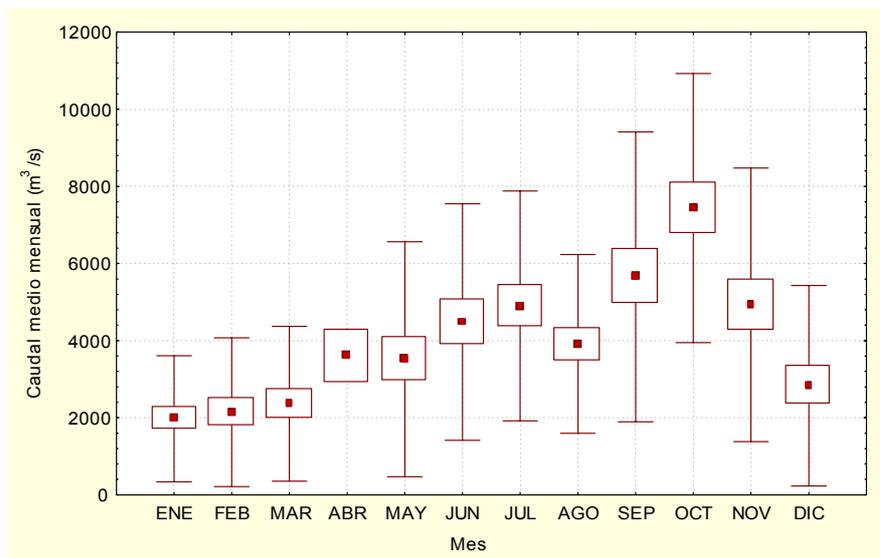


Figura 4.15 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Uruguay (1944-70)

En la figura 4.18 se comparan los valores promedios de los caudales medios mensuales de cada ciclo, para evidenciar las variaciones experimentadas en el ciclo estacional.

El período 1931-43 muestra un valor máximo en mayo y otro en octubre, 15% inferior al primero. (En realidad el extremo de mayo se debe a un único valor extraordinario de 22340 m³/s en mayo de 1941, que es 5 veces superior a la media del período). La época de aguas bajas se extiende entre noviembre y marzo, mientras que para la serie histórica completa el período seco va de diciembre a marzo.

Durante el período 1944-70 el ciclo anual de los valores promedios también presenta dos máximos, el primero en otoño (abril) y el segundo en octubre, y la estación seca se extiende entre enero y marzo.

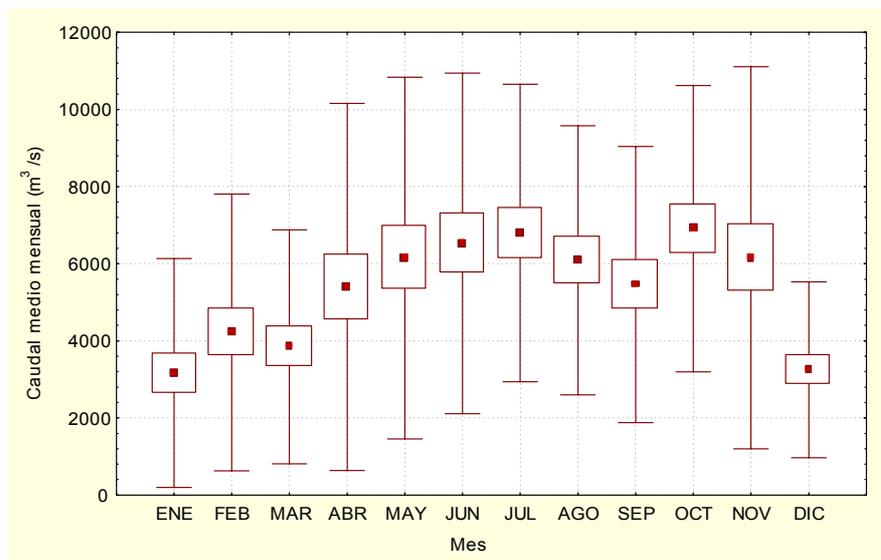


Figura 4.16 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Uruguay (1971-01)

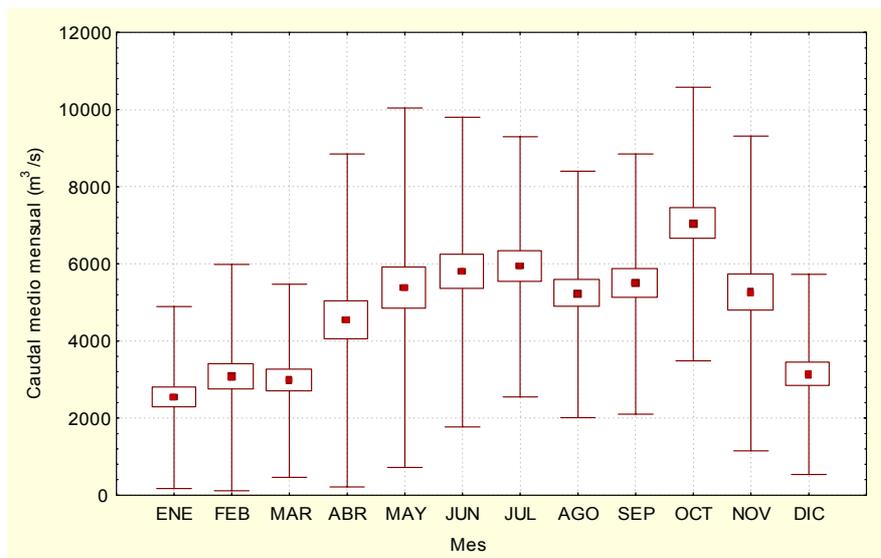


Figura 4.17 Evolución anual promedio de caudales medios mensuales en el río Uruguay (1931-01)

Finalmente, en 1971-2001 los dos máximos se dan en junio y octubre y, excepto en agosto y septiembre que presentan valores inferiores a los promedios de todo el registro (aproximadamente 25%), los promedios exceden a los medios históricos.

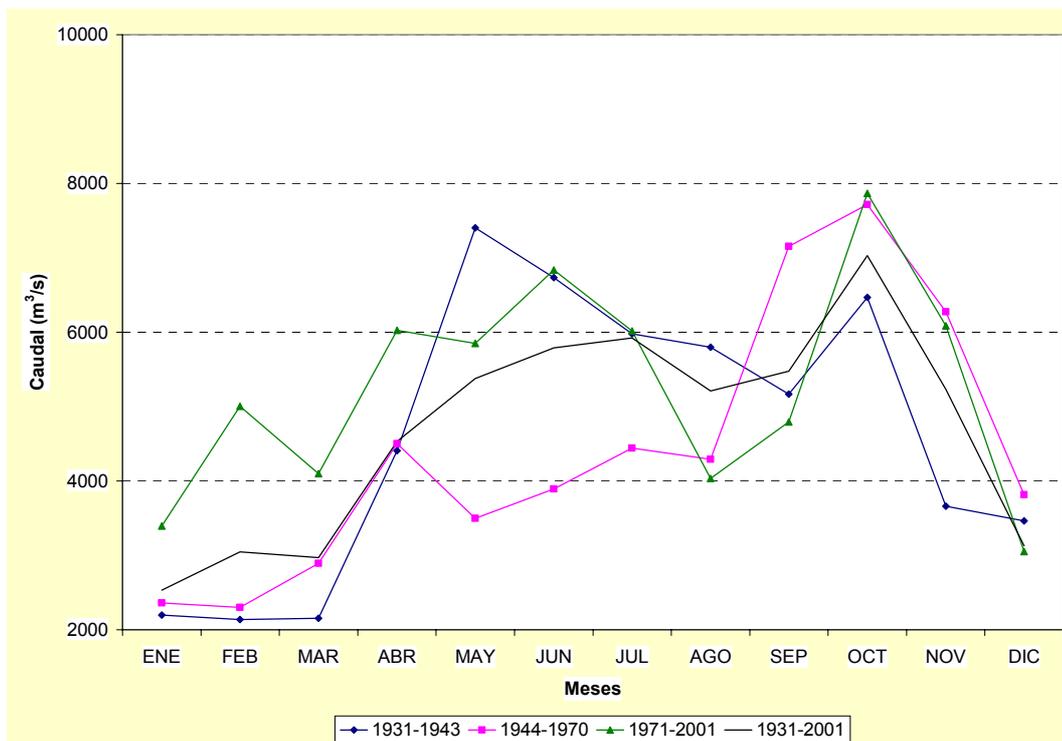


Figura 4.18 Promedios de caudales medios mensuales en el río Uruguay por ciclo

5 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

5.1 EL CICLO ESTACIONAL MEDIO

Las componentes estacionales de las series de caudales medios mensuales de los ríos Paraná y Uruguay, fueron presentadas en el capítulo 4, observándose que en el primero de ellos el flujo medio mensual es alto en la primera mitad del año, con máximo en marzo, y desciende en la segunda mitad. En el río Uruguay la mayor tasa de escurrimiento medio se da entre mayo y noviembre y es mínima durante los meses de verano.

En las figuras 5.1 y 5.2 se presentan en diagramas de caja los valores promedios de los caudales de los ríos Paraná y Uruguay para cada estación del año en el período 1931-2001, que fueron definidas como Diciembre-Enero-Febrero (verano), Marzo-Abril-Mayo (otoño), Junio-Julio-Agosto (invierno) y Septiembre-Octubre-Noviembre (primavera).

En estas figuras, los extremos de la caja representan el error estándar de la media expresando la variabilidad de los valores, mientras que la tendencia central está indicada por la línea interior que representa la media. Las marcas horizontales indican el rango de los valores de caudal medio estacional a través del desvío estándar.

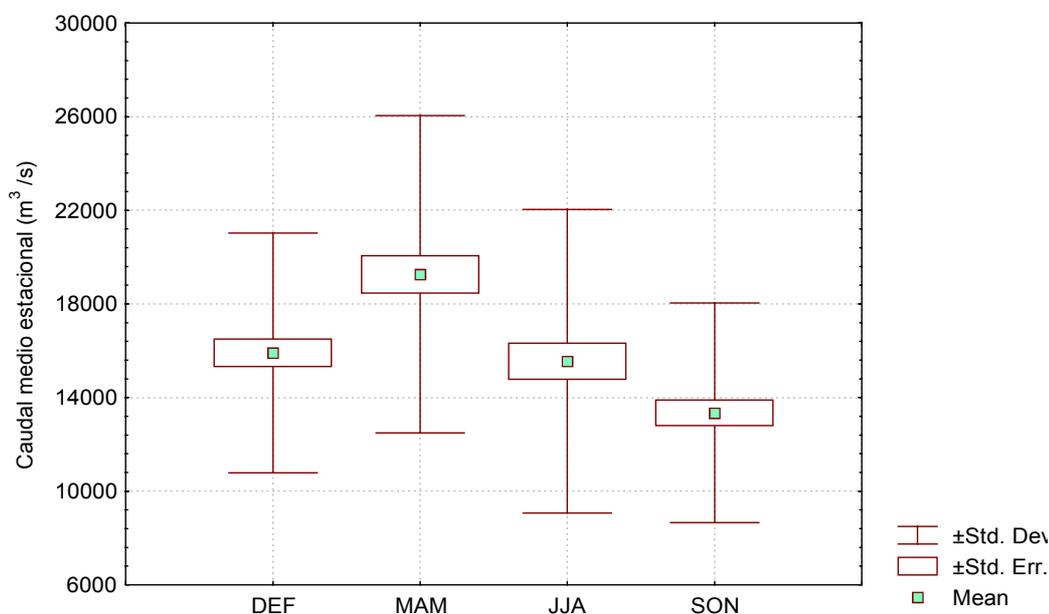


Figura 5.1 Evolución anual del caudal medio estacional del río Paraná (período 1931-2001)

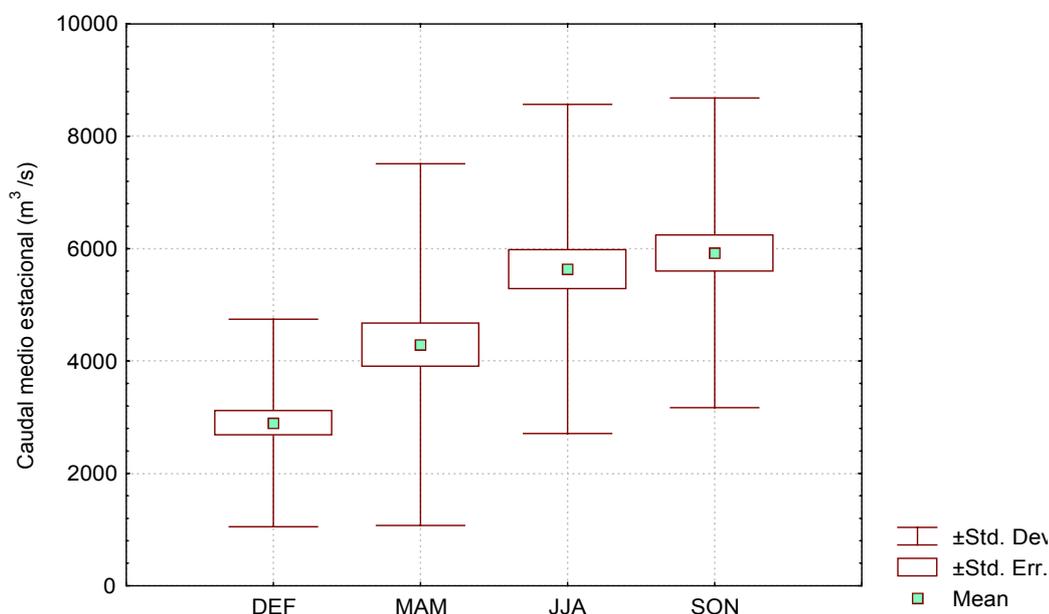


Figura 5.2 Evolución anual del caudal medio estacional del río Uruguay (período 1931-2001)

En el río Paraná se observa que el ciclo estacional está dominado por el módulo de otoño, que alcanza los 19300 m³/s. Durante la primavera el valor medio es mínimo, de 13300 m³/s. En el río Uruguay la mayor tasa de escurrimiento medio estacional se presenta en primavera (5900 m³/s), muy próxima al módulo de invierno, y la mínima en verano (2900 m³/s).

Para describir las variaciones experimentadas por este ciclo estacional medio, en las figuras 5.3 a 5.5 se presentan en diagramas de caja los valores medios estacionales de caudales para el río Paraná calculados en los períodos 1931-43, 1944-70 y 1971-01. Se advierte que, con diferencias de magnitud, el máximo estacional se presenta siempre en otoño y el mínimo en primavera.

En la figura 5.6 se comparan los valores medios estacionales que se obtienen para la serie completa con los correspondientes a los períodos. Se observa que en los meses de verano e invierno los módulos trimestrales del período 1944-70 son entre un 10 y un 15% inferiores a los del período anterior, pero las diferencias son casi despreciables para otoño y primavera.

Por su parte, los módulos estacionales de verano, invierno y primavera son entre 40 y 45 % superiores en 1970-01 a los del período 1944-70 (en otoño la diferencia es de 17 %). Estos resultados manifiestan que el aumento de caudales más significativos se produce en primavera e invierno.

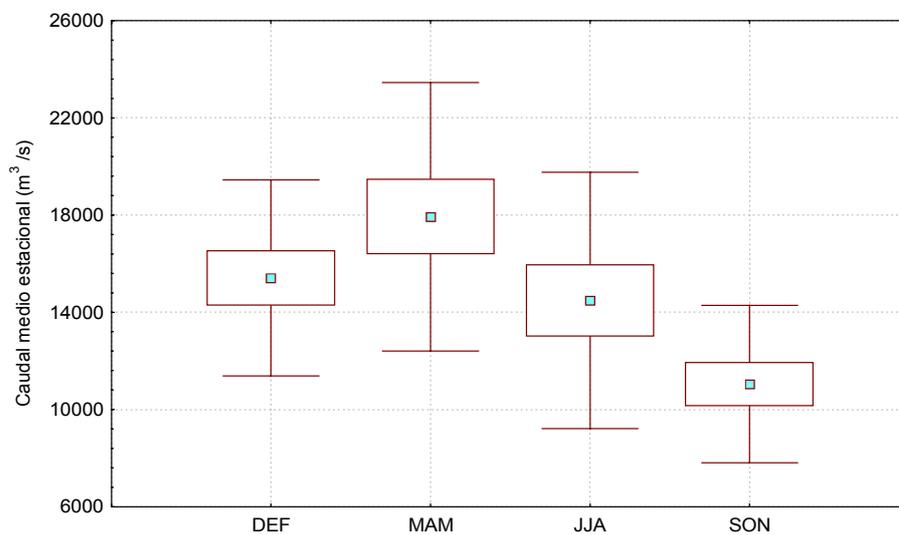


Figura 5.3 Evolución anual del caudal medio estacional del río Paraná (período 1931-43)

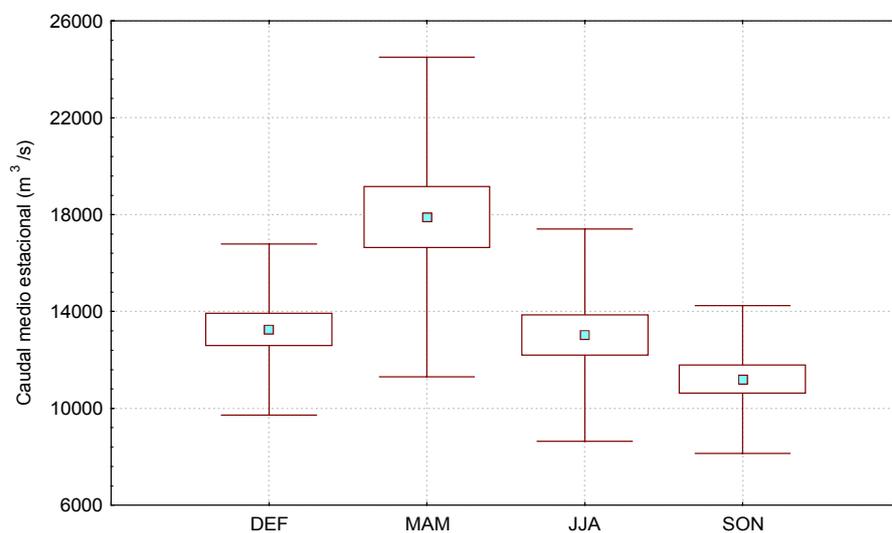


Figura 5.4 Evolución anual del caudal medio estacional del río Paraná (período 1944-70)

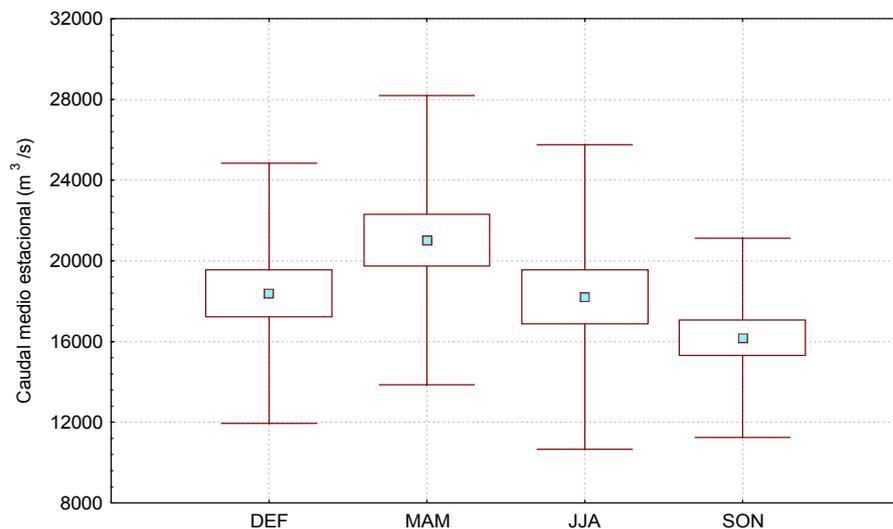


Figura 5.5 Evolución anual del caudal medio estacional del río Paraná (período 1971-01)

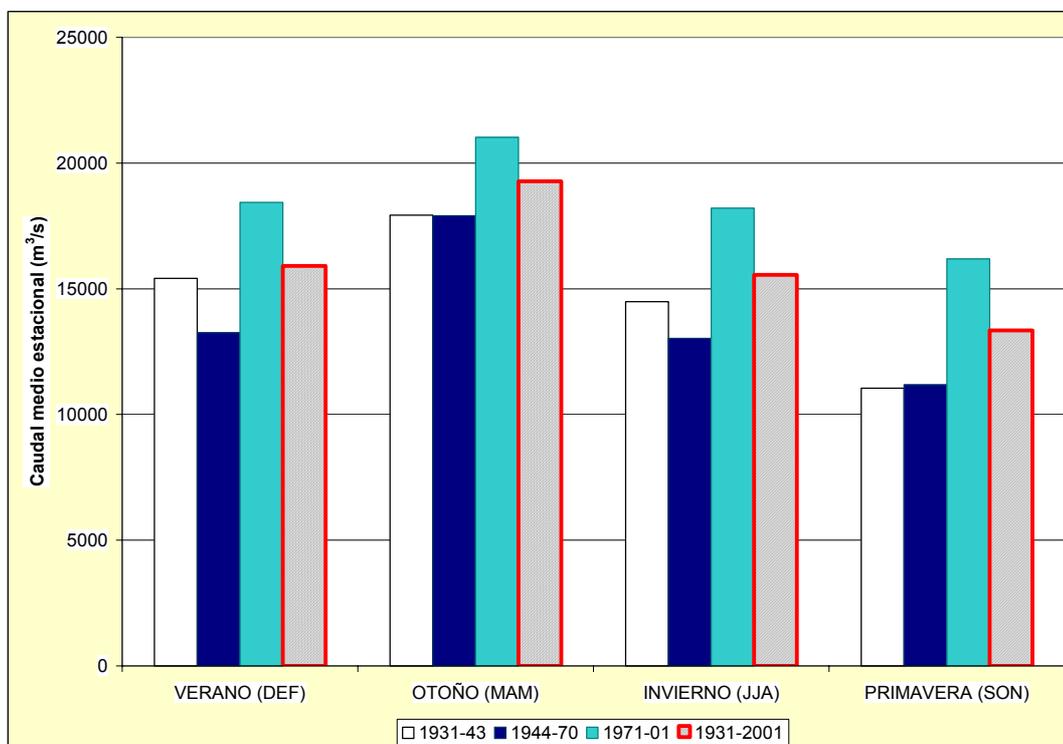


Figura 5.6 Comparación de caudales medios estacionales del río Paraná

En las figuras 5.7 a 5.9 se presentan los diagramas correspondientes para los flujos medios estacionales del río Uruguay calculados por ciclos, y en la figura 5.10 se efectúa la comparación entre los mismos.

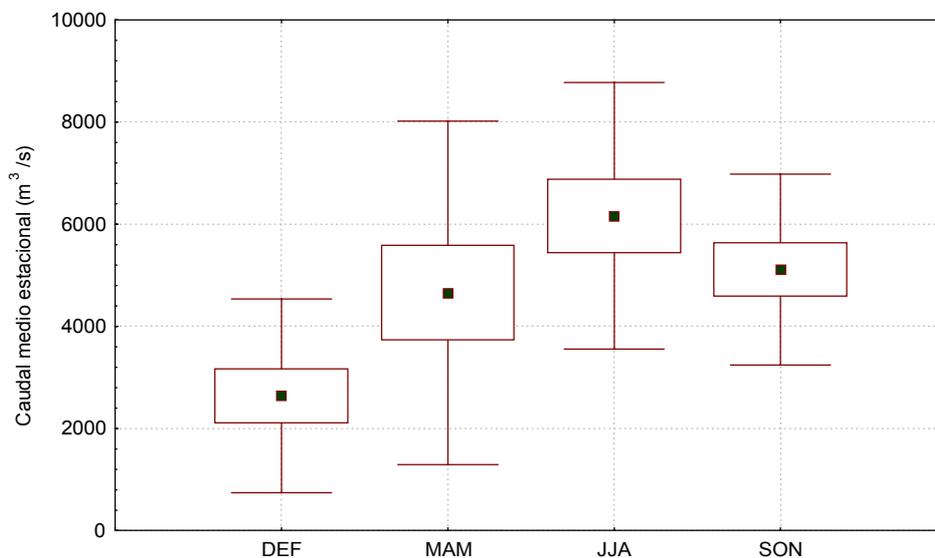


Figura 5.7 Evolución anual del caudal medio estacional del río Uruguay (período 1931-43)

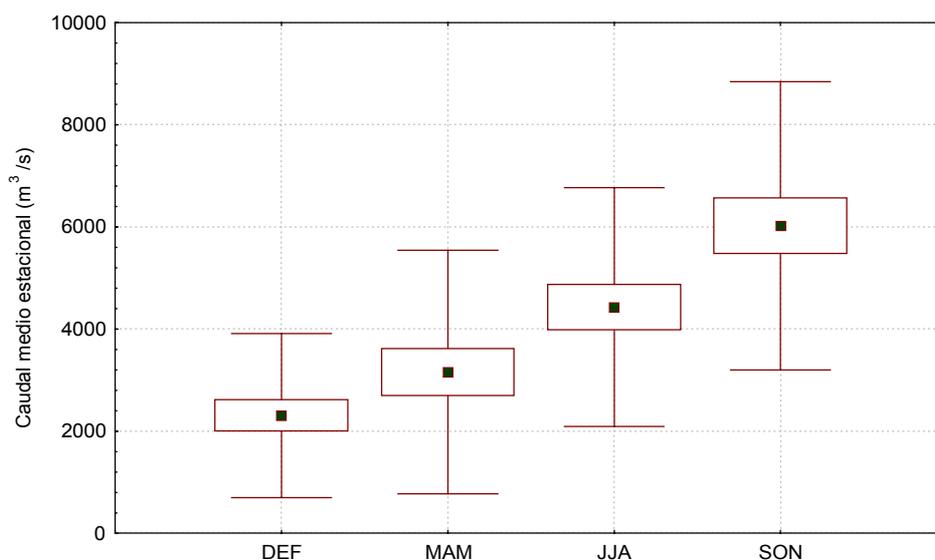


Figura 5.8 Evolución anual del caudal medio estacional del río Uruguay (período 1944-70)

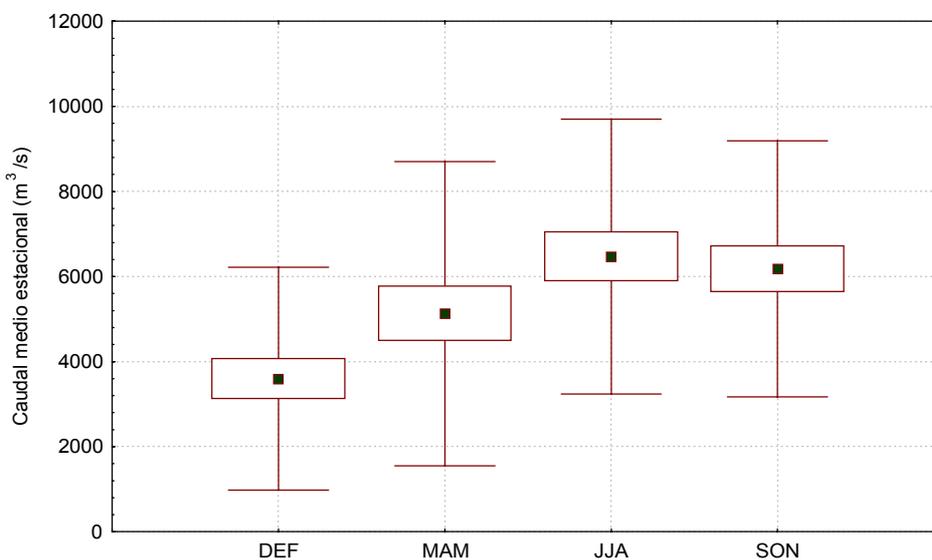


Figura 5.9 Evolución anual del caudal medio estacional del río Uruguay (período 1971-01)

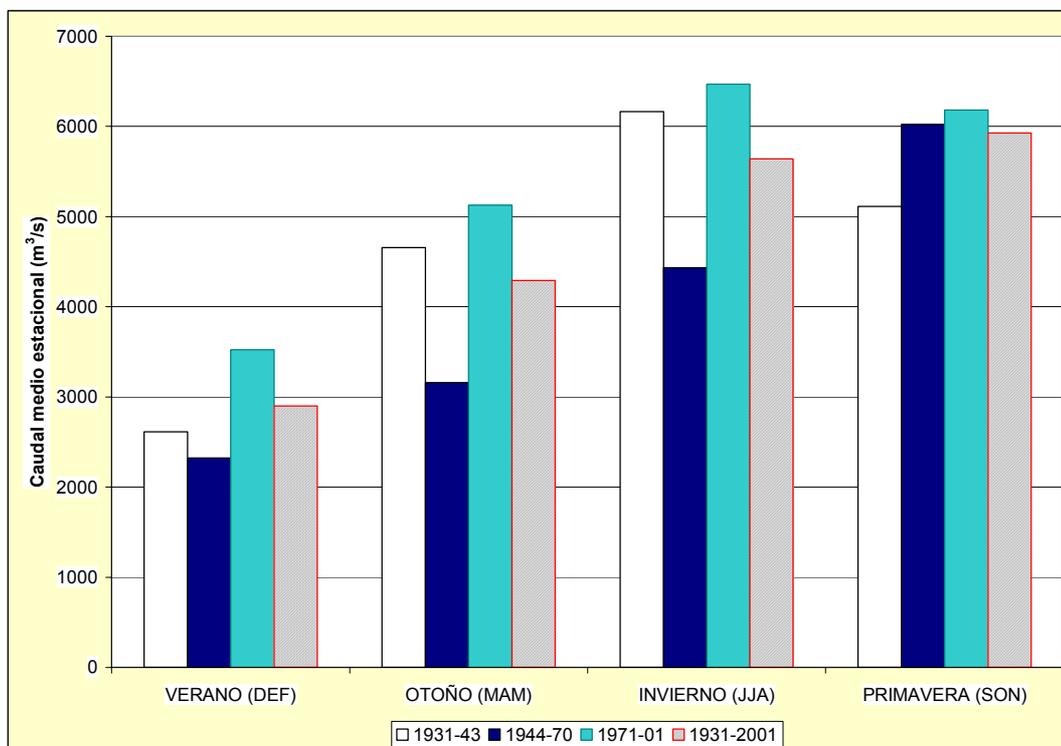


Figura 5.10 Comparación de caudales medios estacionales del río Uruguay

Se advierte que, a diferencia de lo que ocurre en el río Paraná en el que las diferencias en el ciclo estacional medio son sólo de magnitud, en el río Uruguay hay un atraso del máximo estacional desde el invierno en 1931-43 a la primavera en 1944-70, que luego vuelve a presentarse en invierno en el período más reciente.

Comparando los valores del período 1944-70 con los del período anterior, se advierte que en los meses de verano, otoño e invierno los módulos trimestrales disminuyen, respectivamente, 11, 32 y 28 %, pero aumentan un 17 % en primavera.

Durante 1971-01 los promedios trimestrales aumentan a lo largo de todo el año, respecto de los valores del período 1944-70, en porcentajes de 51, 62, 45 y 2 % para verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente.

5.2 ANÁLISIS DE MODOS PROPIOS

5.2.1 Formulación

La estructura del ciclo estacional medio de caudales fue estudiada mediante el análisis de modos propios considerando las series temporales de valores medios estacionales en el período 1931-2001, ya que este tipo de análisis resulta una herramienta útil para revelar correlaciones y patrones en la distribución espacio-temporal de algunos fenómenos.

El análisis de componentes principales (PCA) recibe nombres diferentes incluyendo análisis de modos propios y de funciones ortogonales empíricas (EOF), y consiste en la reconstrucción de los datos observados como superposición de actividad de un conjunto de modos independientes (Green, 1978).

Los modos propios de un sistema dinámico definen un conjunto de estados de actividad independientes para el sistema. Así, el comportamiento observado de una variable puede descomponerse en superposiciones de esos modos si se puede encontrar un conjunto de soluciones ortonormales de las ecuaciones de movimiento para el sistema.

Los datos se proyectan en un conjunto de vectores base ortogonales, eligiéndose la base de forma que la proyección de los datos sea mayor. En otras palabras, la primera EOF es *el patrón más frecuentemente realizado*. El segundo modo es el más frecuentemente realizado bajo la restricción de la ortogonalidad al primero, el tercero es el patrón más frecuentemente realizado que es ortogonal a los anteriores y así sucesivamente.

Eliminando iterativamente cada variación independiente se crea un conjunto de autovectores que representan los cambios en las variables que son comunes a todas ellas. Los datos se reducen a dos matrices, la de autovectores y la de puntuaciones (los valores de peso de los autovectores para todas las muestras). La expresión matricial de la ecuación para los datos resulta:

$$A = SF + E_A$$

donde A es una matriz de $n \times p$ datos, S es una matriz de $n \times f$ valores de puntuaciones para todas las series, F es una matriz de $f \times p$ autovectores y E_A es la matriz de residuos. Las

dimensiones de las matrices son representativas de los datos, n es el número de muestras, p es el número de variables y f es el número de componentes principales o EOF.

Para encontrar las funciones ortogonales empíricas de la matriz de datos se calcula la matriz de covarianza C (el producto $C=A A^T$, donde A^T es la matriz traspuesta de A) y a partir de ella, se calculan los autovalores y autovectores. Cada autovector e_j de la matriz de covarianza puede considerarse como un patrón de covarianza, los autovectores son los “modos” de covarianza de los valores medidos en diferentes muestras (es decir, los modos propios del sistema) y forman un conjunto de funciones base (EOF) en las que se puede expandir los datos.

Los autovalores λ_j correspondientes a cada autovector dan una medida de la contribución de esos modos a la varianza total del conjunto de datos y, por lo tanto la fracción de la señal que es explicada por ese modo (la cantidad de varianza explicada por un factor para las variables como un todo).

La técnica fue aplicada a los caudales estacionales de los ríos Paraná y Uruguay en el período 1931-2001 para explicar la estructura de los datos, considerando cada muestra (año) constituida por los cuatro valores medios estacionales.

La elección del número de componentes a conservar se efectuó aplicando el criterio de Kaiser, que indica conservar solamente aquellos factores cuyos valores propios son mayores a la unidad. Para facilitar la interpretación de los factores se realizó una rotación factorial girando los ejes de coordenadas, que representan los factores, hasta conseguir que se aproximen al máximo a las variables en que están saturados utilizando el método Varimax de rotación ortogonal.

5.2.2 Aplicación

En las tablas 5.1 y 5.2 se presentan los autovalores calculados para los caudales estacionales de los ríos Paraná y Uruguay, respectivamente. En el Río Paraná, un 85% de la varianza total del caudal estacional es explicada por los 2 primeros modos, que son presentados en la figura 5.11. El primer modo da cuenta del 71 % de la varianza en el período, representa el patrón medio y tiene máximo y mínimo en otoño y primavera, respectivamente. El segundo modo tiene características opuestas al primero, con amplitud mínima en otoño y máxima en primavera (cuando el primer modo es pequeño), representando el estiaje durante esa estación. Se advierte que estas cargas o ponderaciones factoriales no tienen esencialmente un significado interpretable; sus magnitudes relativas y signos identifican la estructura de los caudales medios estacionales en el período.

Tabla 5.1

Componentes Principales de caudal medio estacional del Río Paraná – Período 1931-2001

Extracción de Componentes Principales				
	Autovalor	% Varianza Total	Autovalor Acumulado	% Varianza Acumulada
1	2.85	71.33	2.85	71.33
2	0.55	13.66	3.40	84.99

Tabla 5.2

Componentes Principales de caudal medio estacional del Río Uruguay – Período 1931-2001

Extracción de Componentes Principales				
	Autovalor	% Varianza Total	Autovalor Acumulado	% Varianza Acumulada
1	1.93	48.24	1.93	48.24
2	0.96	24.12	2.89	72.36

La figura 5.12 presenta la serie temporal de puntuaciones factoriales correspondientes a cada uno de los modos, sobre las que se realizó el análisis espectral mediante la transformada rápida de Fourier.

El propósito del análisis espectral es explorar si hay patrones cíclicos en los datos descomponiendo las series originales en las funciones cosenoidales subyacentes de diferentes frecuencias para determinar aquellas que son particularmente importantes. En este análisis se identifica la correlación de funciones seno y coseno de diferente frecuencia con los datos observados, de forma que si se advierte una gran correlación (coeficiente de seno y coseno) se puede concluir que hay una fuerte periodicidad de la respectiva frecuencia (o período) en los datos.



Figura 5.11 Cargas factoriales del caudal estacional del río Paraná (período 1931-2001)

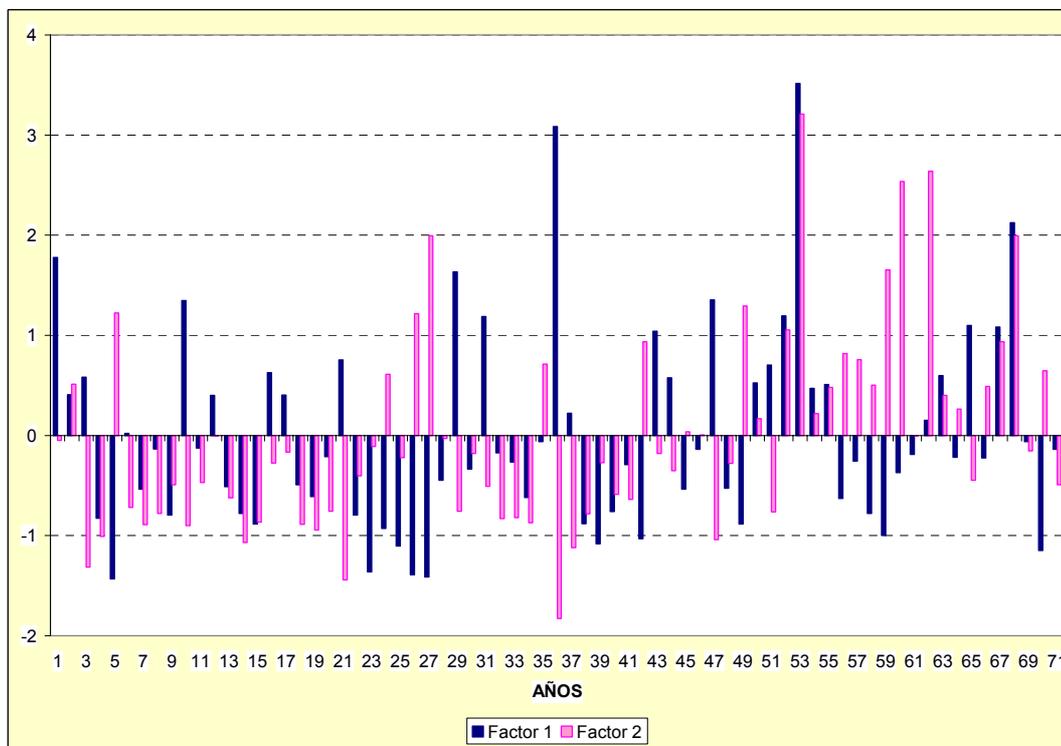


Figura 5.12 Puntuaciones factoriales del caudal estacional del río Paraná (período 1931-2001)

Las tablas 5.3 y 5.4 presentan los valores de frecuencia, período, coeficientes de senos y cosenos, valores del periodograma y la densidad espectral estimada para los cinco mayores valores del periodograma del espectro de puntuaciones factoriales de las dos componentes principales, respectivamente.

Tabla 5.3

Análisis espectral de la puntuación factorial del primer modo del caudal medio estacional
Río Paraná - Período 1931-2001

Frecuencia	Período	Coefficientes Cosenos	Coefficientes Senos	Valor del Periodograma	Densidad espectral
0.06	17.50	0.31	-0.44	10.07	4.84
0.11	8.75	0.45	0.09	7.27	4.23
0.27	3.68	-0.22	0.27	4.16	3.26
0.20	5.00	0.22	0.23	3.52	2.72
0.33	3.04	0.31	0.07	3.49	2.17

Tabla 5.4

Análisis espectral de la puntuación factorial del segundo modo del caudal medio estacional
 Río Paraná - Período 1931-2001

<i>Frecuencia</i>	<i>Período</i>	<i>Coefficientes Cosenos</i>	<i>Coefficientes Senos</i>	<i>Valor del Periodograma</i>	<i>Densidad espectral</i>
0.27	3.68	0.51	0.18	10.42	4.95
0.01	70.00	0.30	-0.14	3.83	2.57
0.11	8.75	0.10	-0.30	3.41	1.85
0.04	23.33	0.16	0.26	3.25	2.82
0.03	35.00	-0.18	-0.20	2.46	2.89
0.06	17.50	-0.18	0.19	2.42	2.40

Los valores del periodograma son calculados por la suma de los cuadrados de los coeficientes para cada frecuencia (multiplicada por N/2, siendo N la longitud de la serie) y pueden ser interpretados en términos de varianza de los datos a una frecuencia o período dado. La densidad espectral se calcula con una media móvil ponderada de los valores del periodograma para poder identificar “regiones” de frecuencia (frecuencias adyacentes) que contribuyen al comportamiento cíclico de la serie y se presenta en la figura 5.13.

La densidad espectral de la puntuación del primer modo revela dos picos significativos de períodos de alrededor 17 y 8 años (frecuencias de 0,06 y 0,11 1/año). El segundo modo exhibe un pico significativo de frecuencia 0,27 1/año, es decir, con un período de aproximadamente 4 años.

Una vez que los picos significativos han sido aislados en el espectro, la señal asociada puede ser reconstruida en el dominio del tiempo. La serie es recalculada por medio de la transformada inversa de Fourier.

Las figuras 5.14 y 5.15 presentan la reconstrucción de la serie de puntuaciones factoriales de los dos modos dominantes del caudal medio estacional utilizando en forma separada cada una de las dos componentes de frecuencia más significativas.

En la figura 5.14 se llega a distinguir cómo la componente de periodicidad 17,5 años modula la ocurrencia de intervalos de tiempo en los que la primera componente principal presenta puntuaciones factoriales máximas negativas. La componente oscilatoria de 8,75 años parece modular los períodos en los que la puntuación factorial es positiva (con una estructura en general de doble pico).

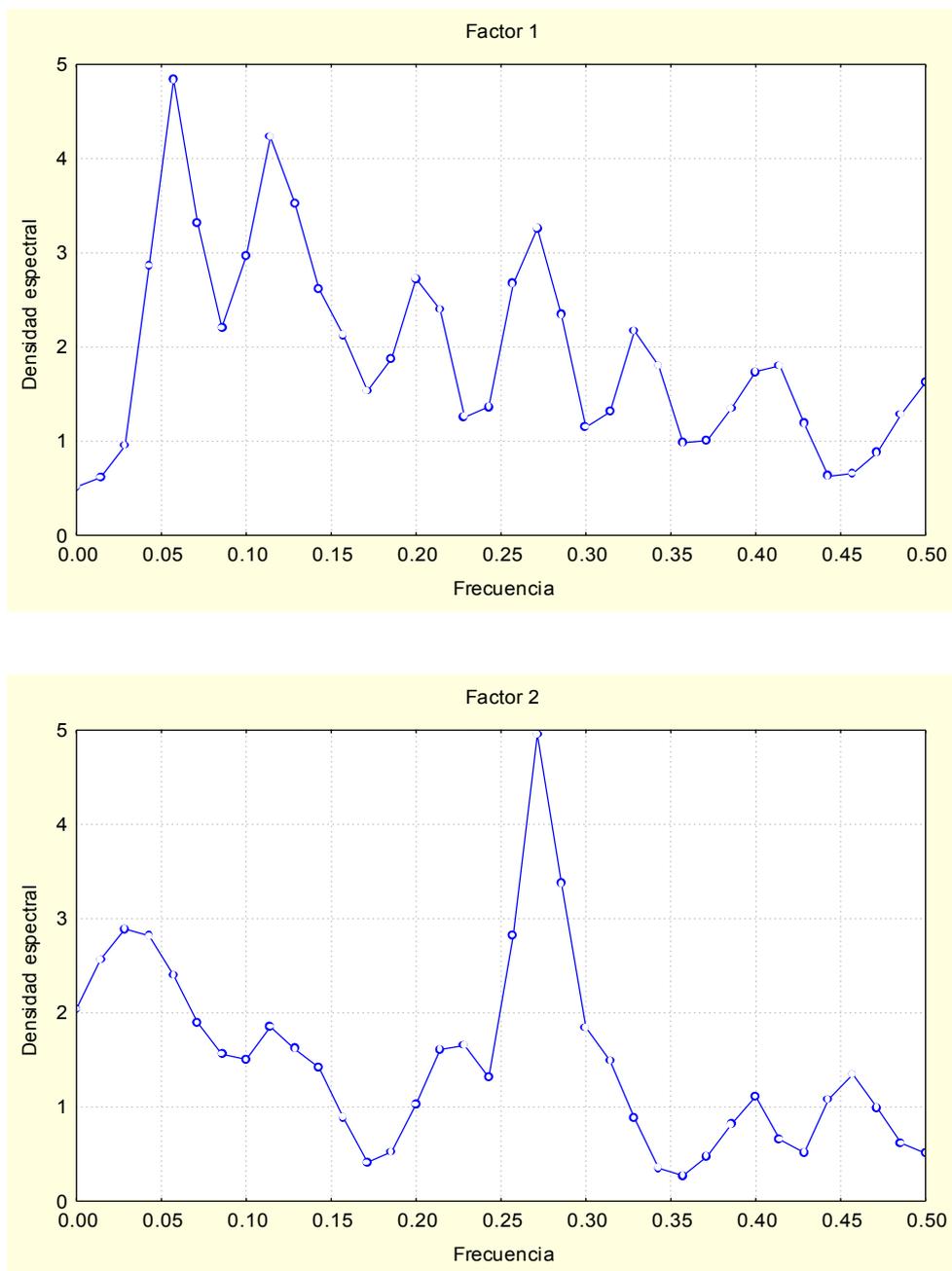


Figura 5.13 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Paraná 1931-2001)

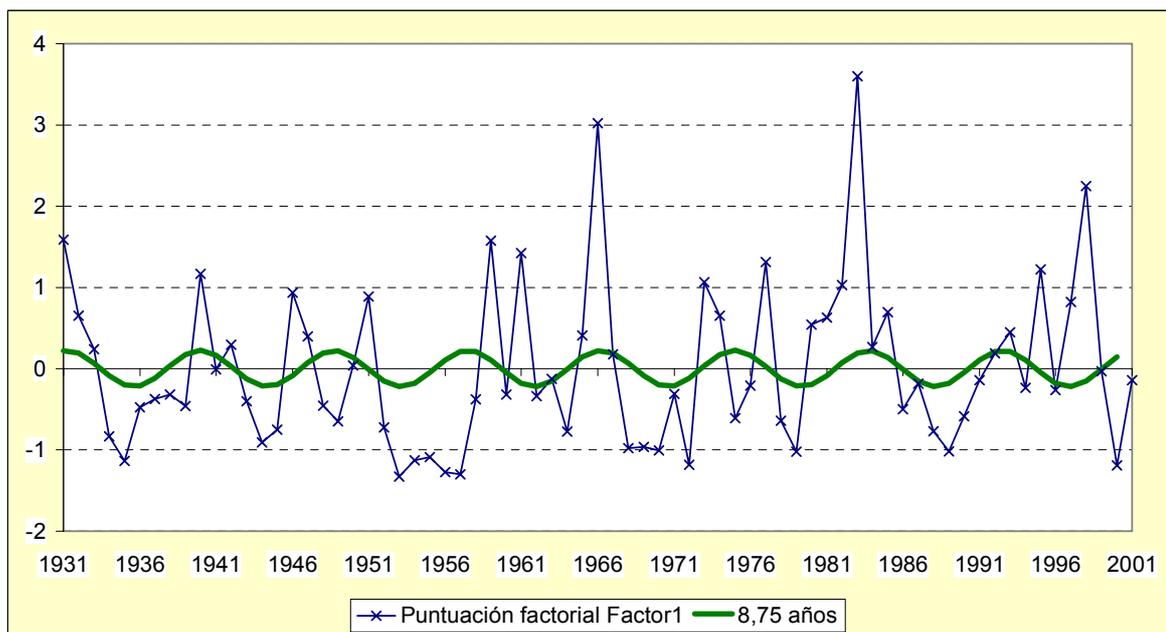
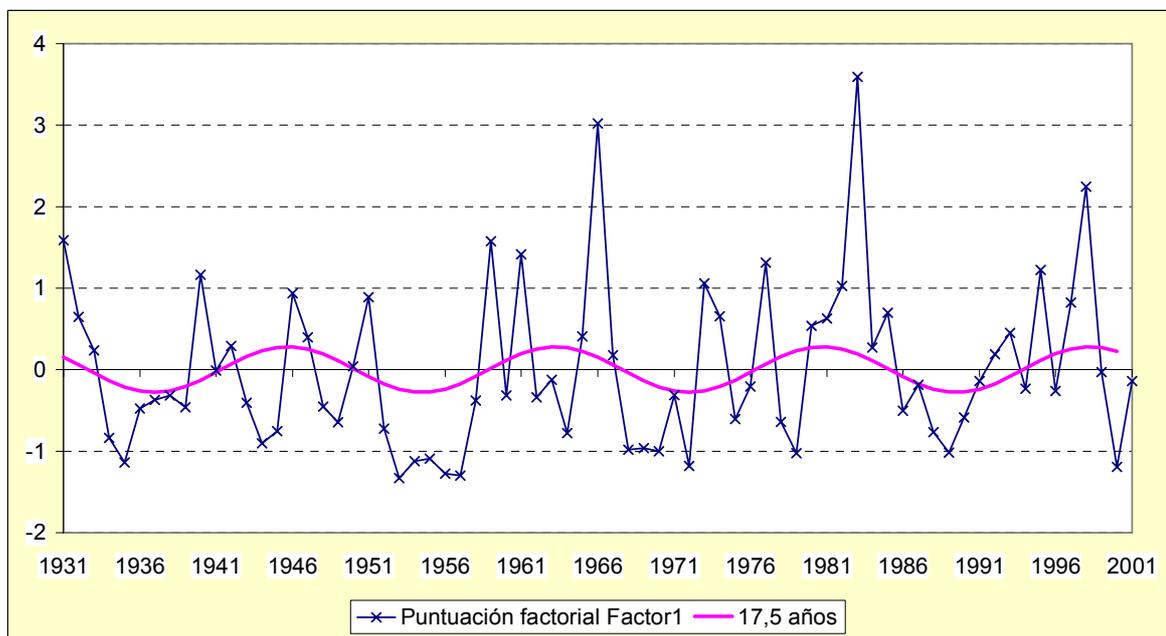


Figura 5.14 Reconstrucción de la serie de puntuaciones factoriales de la primera componente principal (Río Paraná 1931-2001)

En la reconstrucción de la serie de puntuaciones factoriales de la segunda componente principal (figura 5.15) se evidencia que la componente de periodicidad de 3,68 años modula los períodos en los que la puntuación factorial es máxima y mínima.

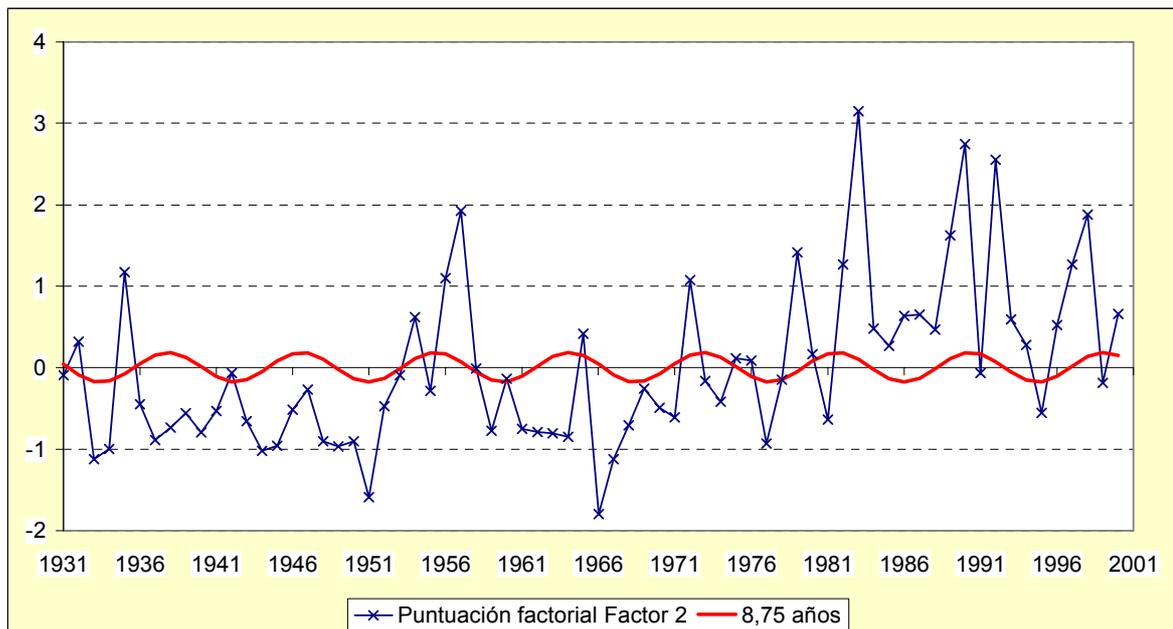
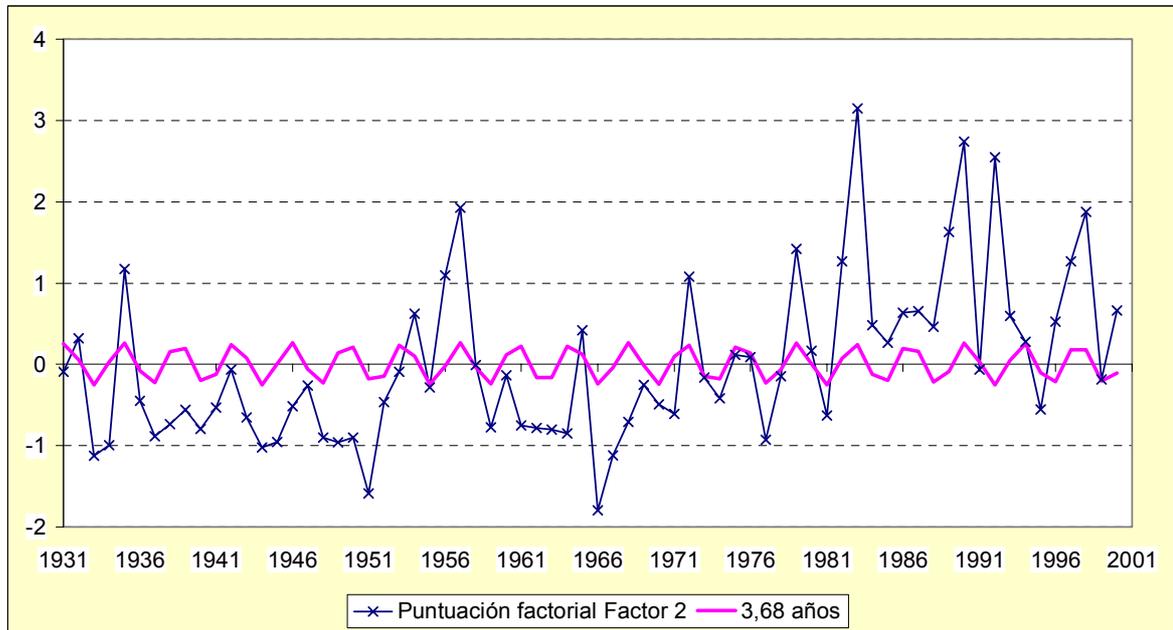


Figura 5.15 Reconstrucción de la serie de puntuaciones factoriales de la segunda componente principal (Río Paraná 1931-2001)

La figura 5.16 presenta las dos primeras componentes principales del caudal estacional para el río Uruguay, que explican en conjunto aproximadamente un 72% de la varianza total de la muestra (ver tabla 5.2).

El modo dominante da cuenta del 48% de la varianza, presenta los menores valores en verano y primavera, cuando es mínimo, y el máximo se establece en invierno aún cuando el valor de otoño es también alto. El segundo modo disminuye desde la primavera hasta el mínimo en el trimestre MAM explicando el 24% de la varianza.

En la figura 5.17 se muestran las puntuaciones factoriales para ambos modos y en la 5.18 se presenta la densidad espectral, advirtiéndose que el primer modo revela picos significativos de período 8, 6 y 14 años (frecuencias de 0,11, 0,16 y 0,07 1/año, respectivamente). El segundo modo muestra períodos de aproximadamente 4, 6 y 3 años (frecuencias de 0,27, 0,16 y 0,33 1/año). Los valores resultantes del análisis espectral se resumen en las tablas 5.5 y 5.6 para el primer y segundo modo del caudal medio estacional, respectivamente.

Tabla 5.5

Análisis espectral de la puntuación factorial del primer modo del caudal medio estacional
Río Uruguay - Período 1931-2001

<i>Frecuencia</i>	<i>Período</i>	<i>Coefficientes Cosenos</i>	<i>Coefficientes Senos</i>	<i>Valor del Periodograma</i>	<i>Densidad espectral</i>
0.11	8.75	0.45	0.03	7.15	4.12
0.16	6.36	-0.39	-0.14	5.88	4.09
0.07	14.00	0.16	-0.35	5.27	3.93
0.17	5.83	0.33	-0.12	4.23	3.47
0.49	2.06	-0.31	0.14	3.99	2.81

Tabla 5.6

Análisis espectral de la puntuación factorial del segundo modo del caudal medio estacional
Río Uruguay - Período 1931-2001

<i>Frecuencia</i>	<i>Período</i>	<i>Coefficientes Cosenos</i>	<i>Coefficientes Senos</i>	<i>Valor del Periodograma</i>	<i>Densidad espectral</i>
0.27	3.68	0.47	0.09	7.88	4.30
0.16	6.36	-0.40	0.04	5.60	3.13
0.33	3.04	-0.34	-0.17	5.16	2.70
0.41	2.41	0.15	0.35	5.08	4.29
0.43	2.33	-0.17	-0.30	4.14	3.81



Figura 5.16 Cargas factoriales del caudal estacional del río Uruguay (período 1931-2001)

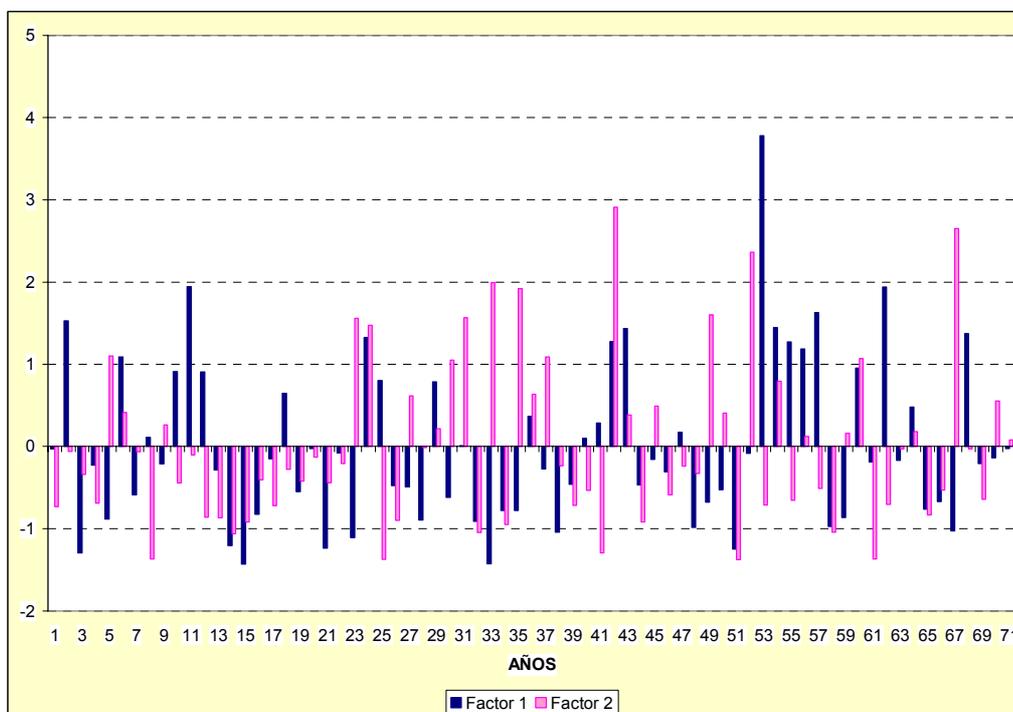


Figura 5.17 Puntuaciones factoriales del caudal medio mensual del río Uruguay (período 1931-2001)

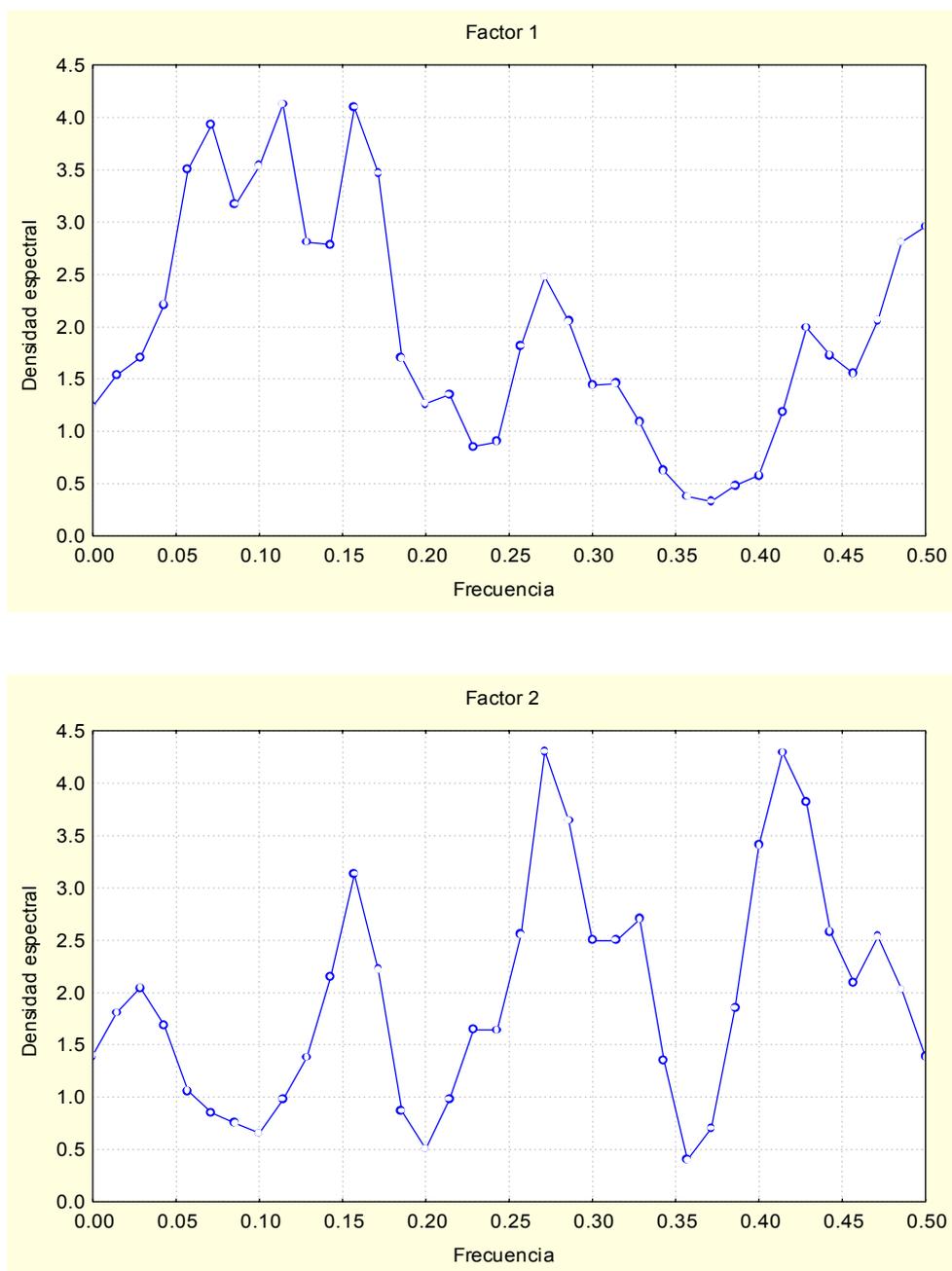


Figura 5.18 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Uruguay 1931-2001)

Considerando las dos componentes más significativas de frecuencia, las series de puntuaciones factoriales de las componentes principales del caudal medio estacional del río Uruguay en el período 1931-2001 fueron reconstruidas considerando cada una de las componentes en forma aislada y se presentan en las figuras 5.19 y 5.20 para las

puntuaciones factoriales de los dos modos dominantes del caudal medio estacional, respectivamente.



Figura 5.19 Reconstrucción de la serie de puntuaciones factoriales de la primera componente principal (Río Uruguay 1931-2001)

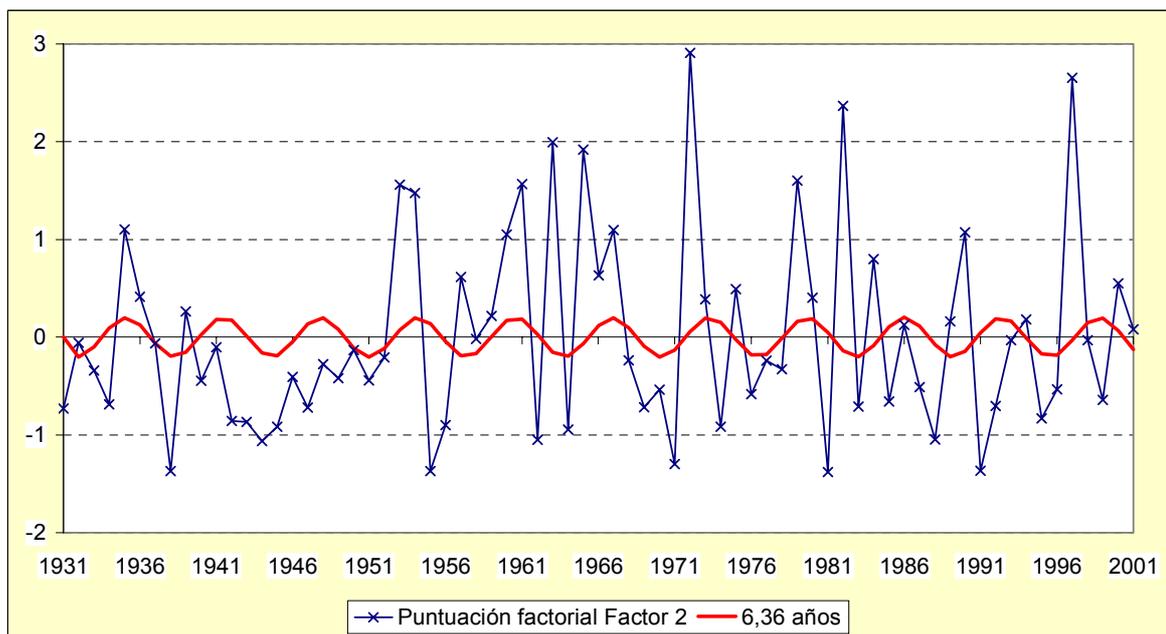
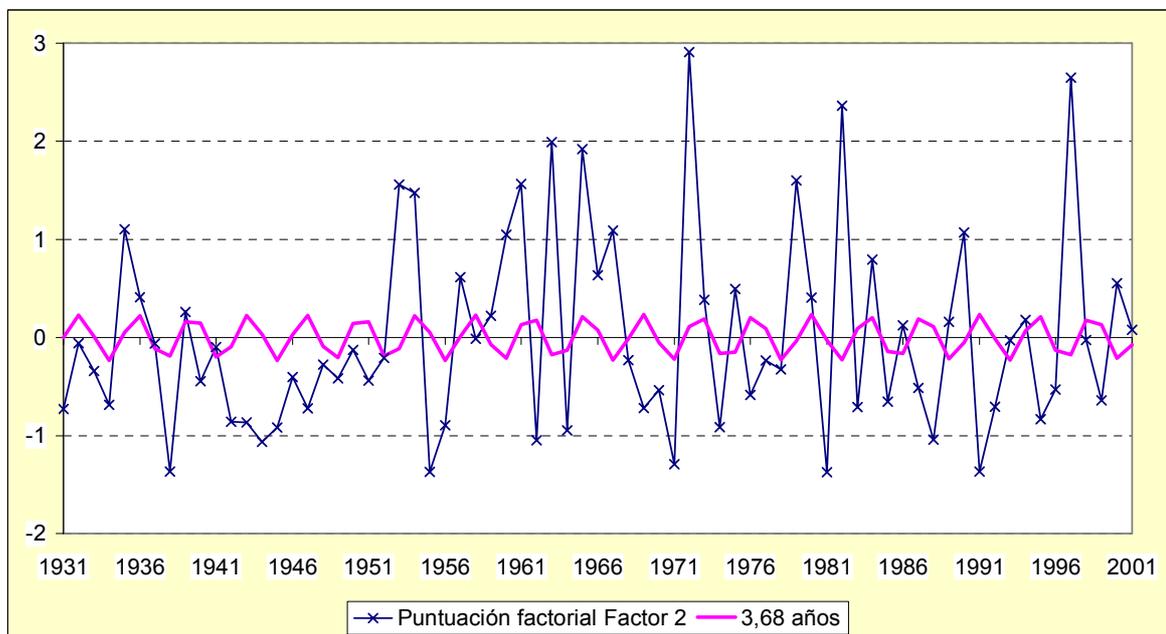


Figura 5.20 Reconstrucción de la serie de puntuaciones factoriales de la segunda componente principal (Río Uruguay 1931-2001)

5.2.3 Cálculo de las componentes principales por ciclo

Para chequear la estabilidad de estas componentes principales se efectuaron análisis de modos propios adicionales para los períodos 1931-43, 1944-70 y 1971-2001. Las tablas 5.7 a 5.9 detallan los resultados obtenidos para los caudales estacionales del río Paraná.

Tabla 5.7

Componentes Principales de caudal medio estacional del Río Paraná – Período 1931-43

Extracción de Componentes Principales				
	Autovalor	% Varianza Total	Autovalor Acumulado	% Varianza Acumulada
1	2.57	64.31	2.57	64.31
2	1.02	25.54	3.59	89.85

Tabla 5.8

Componentes Principales de caudal medio estacional del Río Paraná – Período 1944-70

Extracción de Componentes Principales				
	Autovalor	% Varianza Total	Autovalor Acumulado	% Varianza Acumulada
1	2.15	53.81	2.15	53.81
2	1.25	31.21	3.40	85.02

Tabla 5.9

Componentes Principales de caudal medio estacional del Río Paraná – Período 1971-01

Extracción de Componentes Principales				
	Autovalor	% Varianza Total	Autovalor Acumulado	% Varianza Acumulada
1	2.91	72.72	2.91	72.72
2	0.57	14.14	3.47	86.86

Las figuras 5.21, 5.22 y 5.23 presentan los modos dominantes para cada período. En 1931-43, el primer modo, que explica el 64% de la varianza total, tiene valores elevados durante las 3 primeras estaciones del año y disminuye abruptamente en la primavera. El segundo modo que explica 25 % de la varianza total crece desde el verano, cuando tiene valores negativos, hasta alcanzar el máximo en primavera.

En el segundo período, el primer modo es máximo en verano y disminuye rápidamente ente otoño e invierno hasta alcanzar el mínimo en primavera, mientras que el segundo modo es más o menos estable en verano y otoño y luego crece hasta la primavera.

En el período 1971-2001, la evolución de ambas componentes principales, que explican respectivamente el 72 y el 14 % de la varianza total, es similar a la del período anterior.

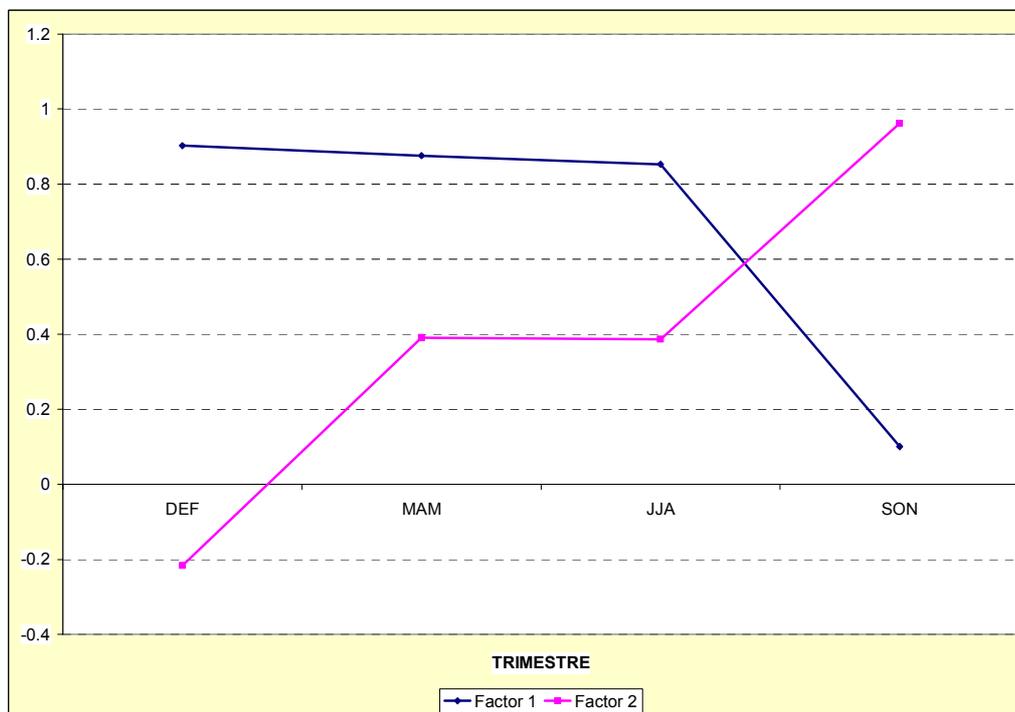


Figura 5.21 Cargas factoriales del caudal medio estacional del río Paraná (período 1931-43)

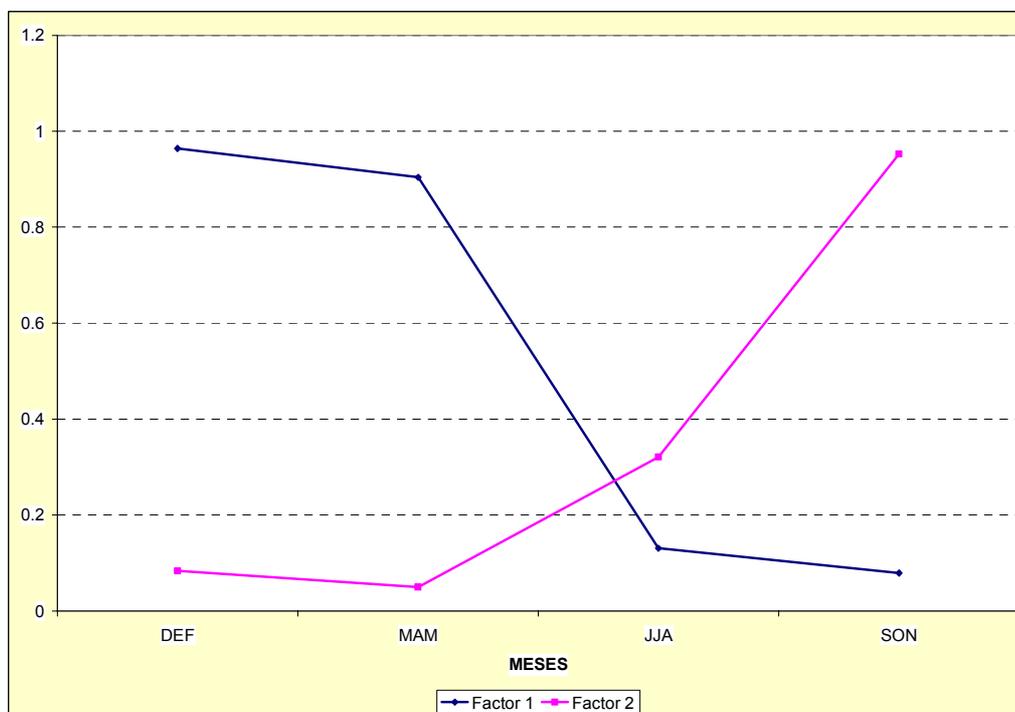


Figura 5.22 Cargas factoriales del caudal medio estacional del río Paraná (período 1943-70)

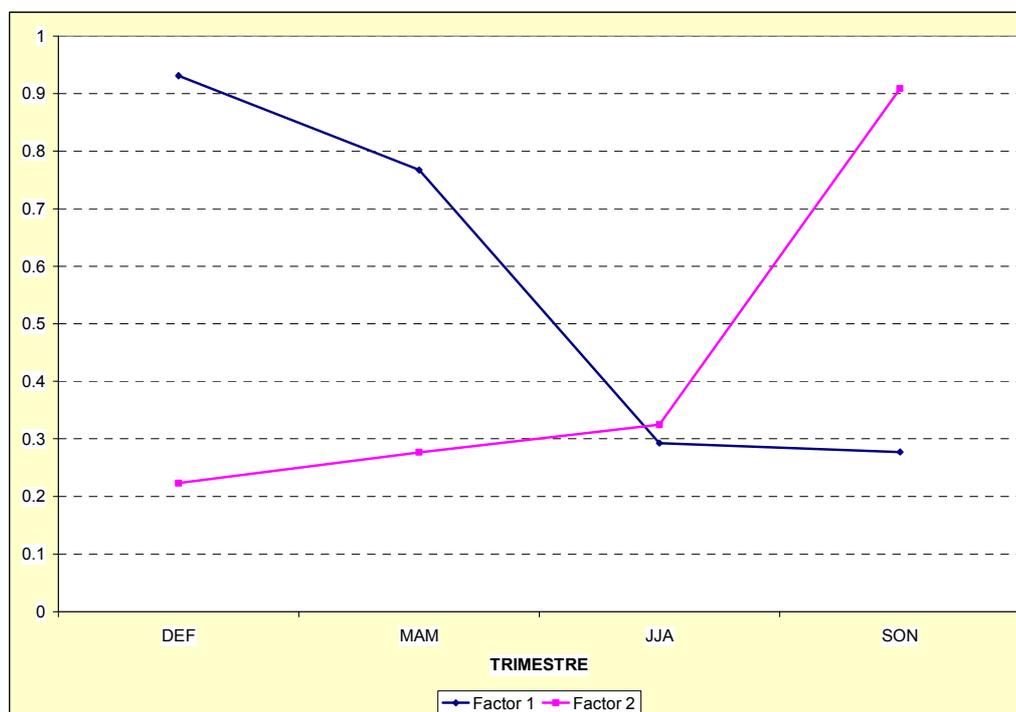


Figura 5.23 Cargas factoriales del caudal medio estacional del río Paraná (período 1971-01)

En los gráficos de las figuras 5.24 y 5.25 se presenta la comparación de las 2 primeras componentes principales calculadas por ciclo y para el período completo. Es evidente la diferencia entre el primer período y los restantes, que manifiestan un descenso abrupto de otoño a invierno, en tanto en el primer período esta caída está retrasada a invierno-verano.

La segunda componente experimenta un cambio similar en la evolución temporal, ya que tiene siempre un desarrollo inverso a la primera; el mínimo valor se da en verano en el primer período y aparece retrasado en los demás períodos.

Las puntuaciones factoriales de las componentes principales en cada período de presentan en las figuras 5.26, 5.27 y 5.28 y el análisis espectral de las puntuaciones en cada período se presenta en los gráficos de densidad espectral de las figuras 5.29, 5.30 y 5.31, respectivamente para 1931-43, 1944-70 y 1970-2001.

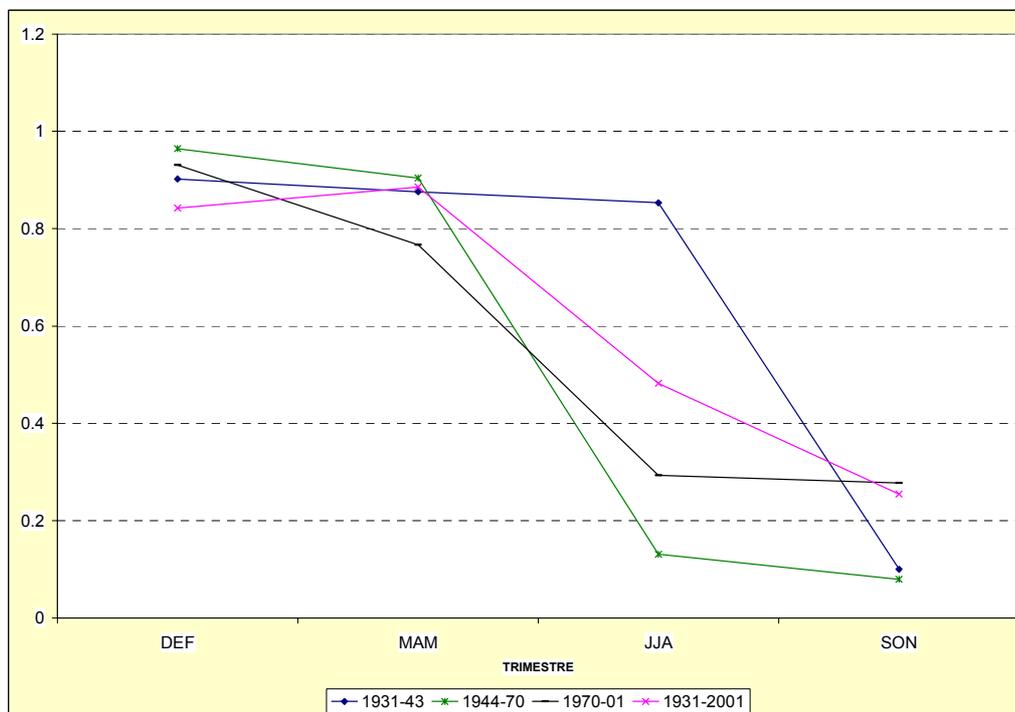


Figura 5.24 Comparación de primer modo del caudal medio mensual del río Paraná



Figura 5.25 Comparación de segundo modo del caudal medio mensual del río Paraná

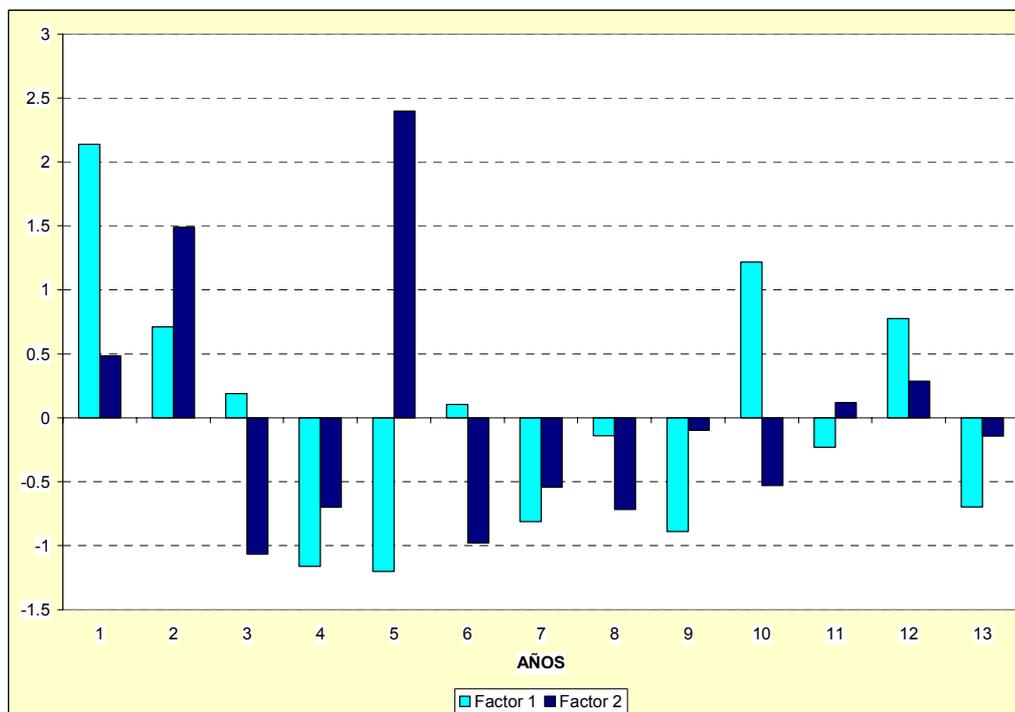


Figura 5.26 Puntuaciones factoriales del caudal medio mensual del río Paraná (período 1931-43)

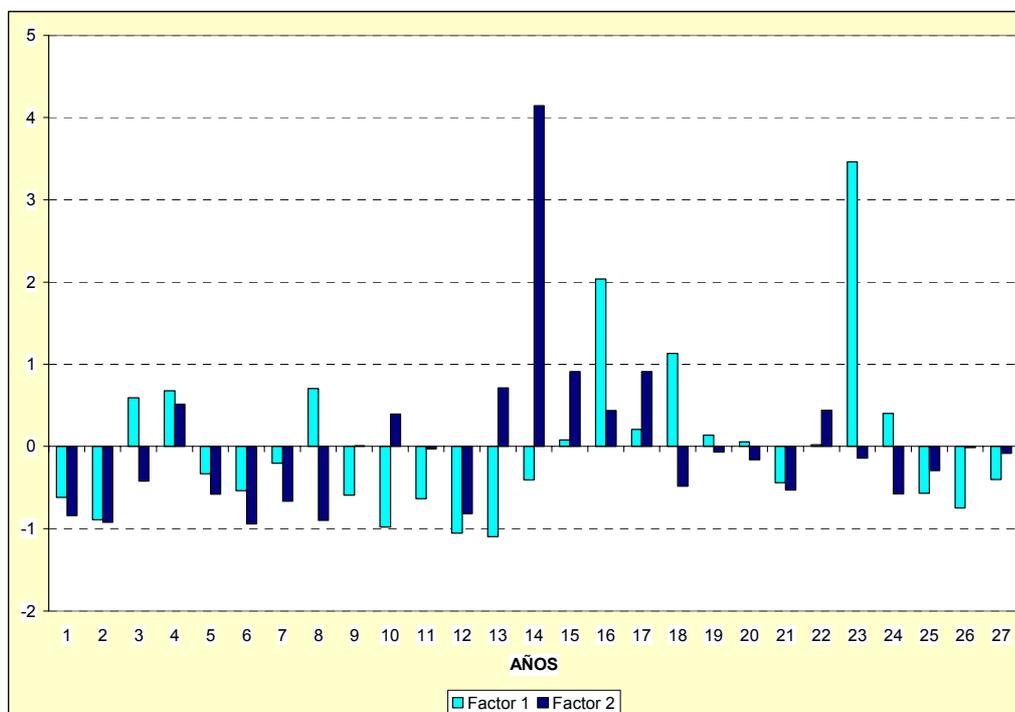


Figura 5.27 Puntuaciones factoriales del caudal medio mensual del río Paraná (período 1944-70)

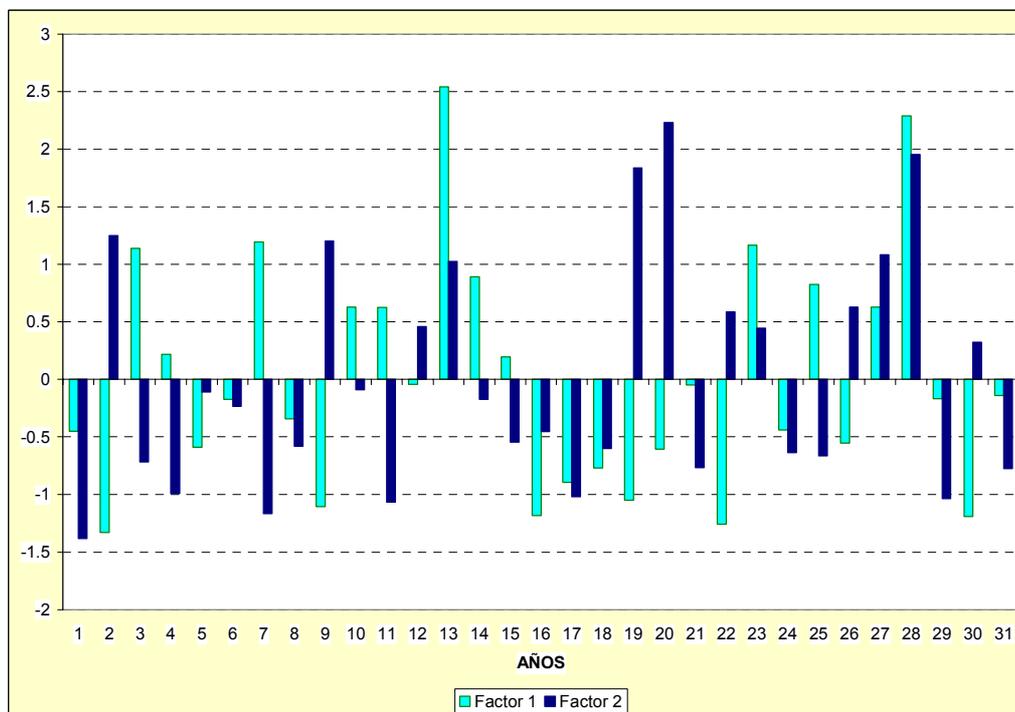


Figura 5.28 Puntuaciones factoriales del caudal medio mensual del río Paraná (período 1971-01)

Durante 1931-44 se presenta un pico importante de período de 12 años (frecuencia de 0,08 1/año) para el primer modo y 3 años (frecuencia 0,3 1/año) en el segundo modo.

En 1944-70 se tienen altas densidades espectrales para períodos de 6, 4 y aproximadamente 2 años para el primer modo (frecuencias de 0,15, 0,27 y 0,43 1/año), mientras que las puntuaciones factoriales del segundo no presentan picos significativos.

Finalmente, entre 1971 y 2001, el modo principal tiene máxima densidad para períodos de entre 10 y 15 años (frecuencias de 0,10 y 0,07 1/año) . El segundo modo exhibe períodos que oscilan entre 4 y 3 años (frecuencias entre 0,27 y 0,30 1/año).

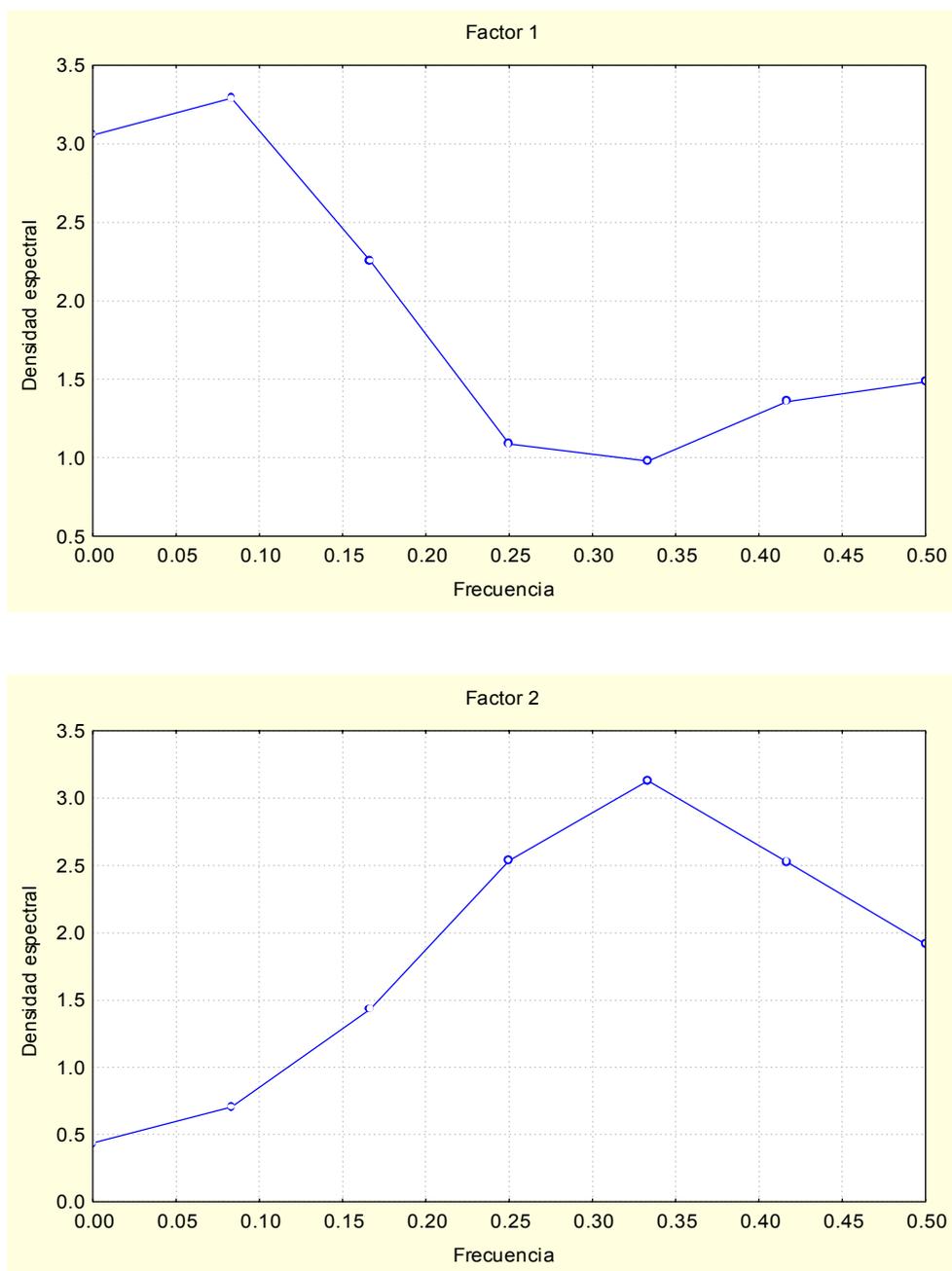


Figura 5.29 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Paraná 1931-43)

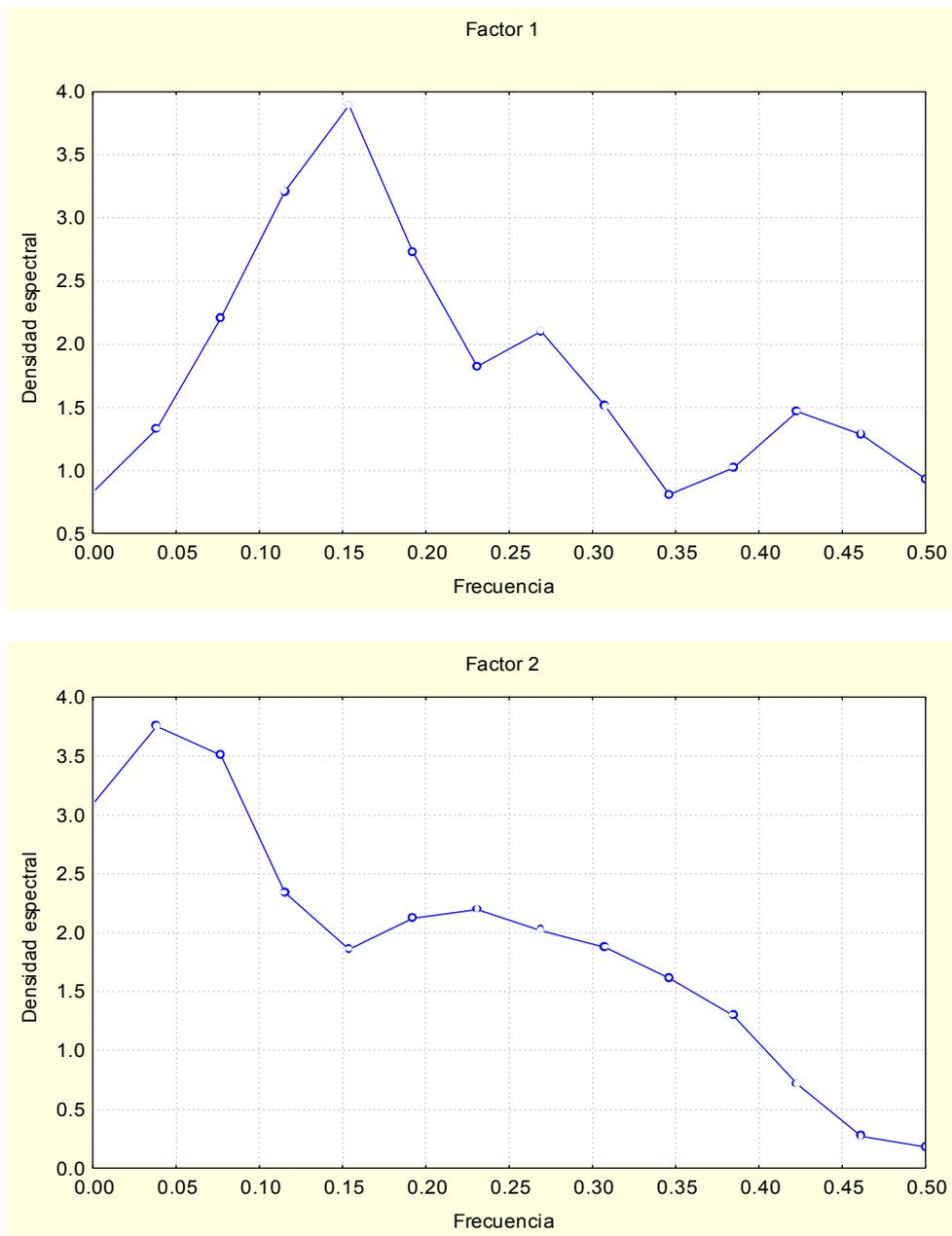


Figura 5.30 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Paraná 1944-70)

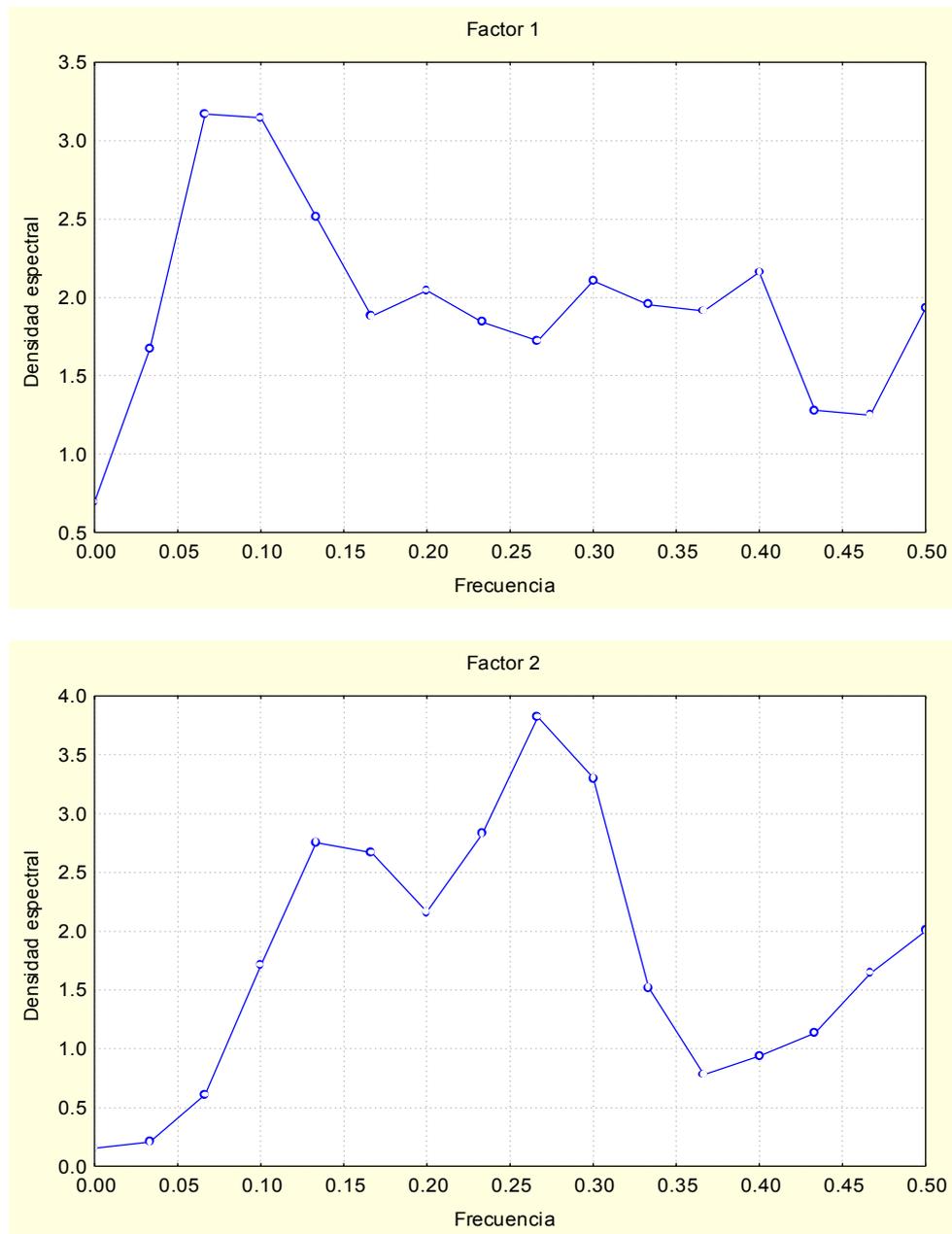


Figura 5.31 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Paraná 1971-01)

Las tablas 5.10 a 5.12 presentan los autovalores y varianza explicada por las componentes principales de los caudales estacionales del río Uruguay calculados por ciclo.

Tabla 5.10

Componentes Principales de caudal medio estacional del Río Uruguay-Período 1931-43

Extracción de Componentes Principales				
	Autovalor	% Varianza Total	Autovalor Acumulado	% Varianza Acumulada
1	2.38	59.38	2.38	59.38
2	1.05	26.27	3.43	85.64

Tabla 5.11

Componentes Principales de caudal medio estacional del Río Uruguay- Período 1944-70

Extracción de Componentes Principales				
	Autovalor	% Varianza Total	Autovalor Acumulado	% Varianza Acumulada
1	1.76	44.11	1.76	44.11
2	1.12	27.93	2.88	72.04

Tabla 5.12

Componentes Principales de caudal medio estacional del Río Uruguay-Período 1971-01

Extracción de Componentes Principales				
	Autovalor	% Varianza Total	Autovalor Acumulado	% Varianza Acumulada
1	1.84	45.97	1.84	45.97
2	1.23	30.82	3.07	76.79

Los valores de las componentes principales extraídas se presentan en los gráficos de las figuras 5.32 a 5.34 respectivamente para 1931-1943, 1944-1970 y 1971-2001.

En todos los períodos, las dos primeras componentes principales explican más del 70 % de la variabilidad de los datos. Puede observarse en el período 1931-43 que la primera componente tiene un primer máximo en verano y uno de menor envergadura en el invierno alcanzando el mínimo en primavera. La segunda componente, tiene valor negativo la primera estación del año, se mantiene aproximadamente estable en otoño e invierno, y luego aumenta alcanzando el máximo en primavera.

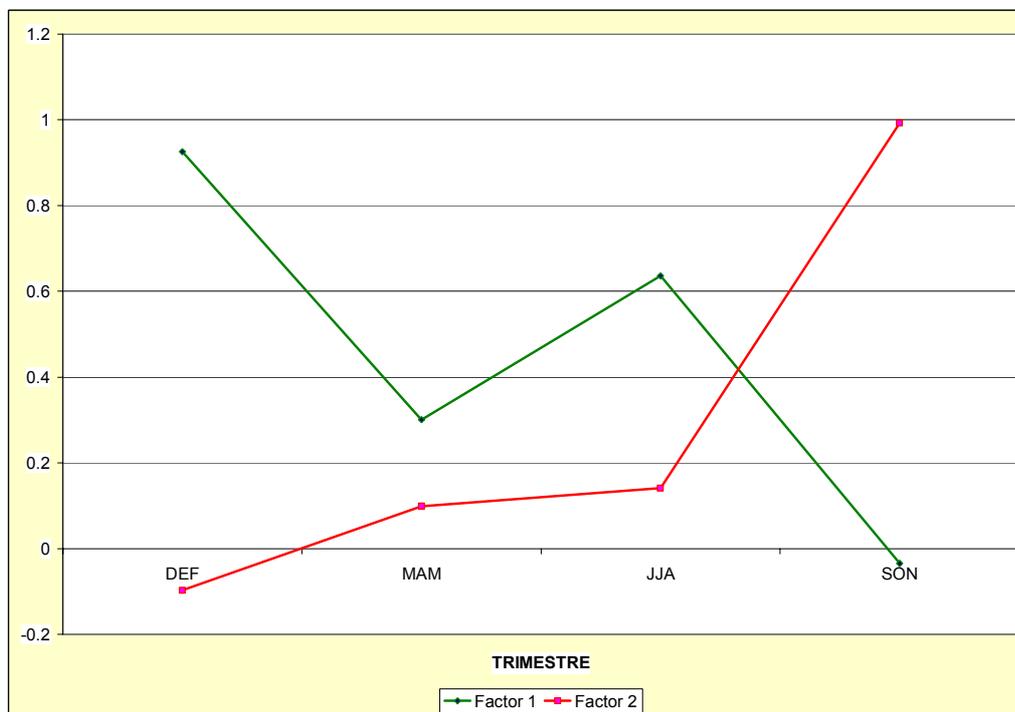


Figura 5.32 Cargas factoriales del caudal estacional del río Uruguay (período 1931-43)

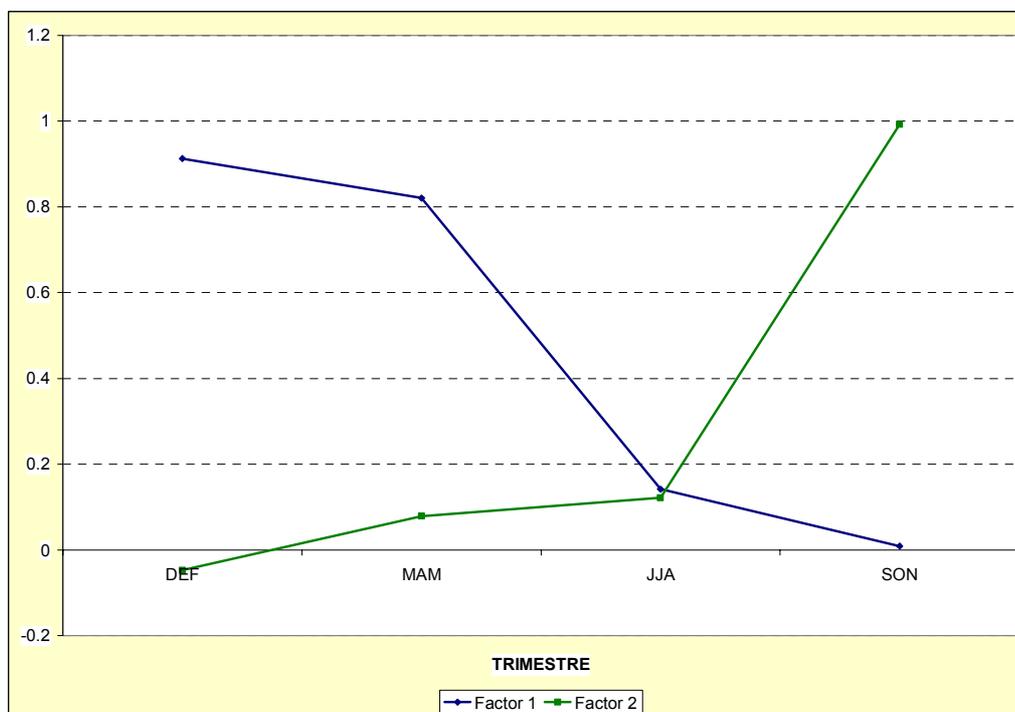


Figura 5.33 Cargas factoriales del caudal estacional del río Paraná (período 1944-70)



Figura 5.34 Cargas factoriales del caudal estacional del río Paraná (período 1971-01)

Durante 1944-70, el primer modo, que explica casi 45 % de la varianza, tiene un sólo valor máximo en verano, aunque el valor de otoño es también alto, y el mínimo en diciembre, mientras que el segundo modo se comporta en la misma forma que en el período anterior.

En el último período, la primera componente tiene también una zona de valores altos otoño e invierno y una de bajos de igual magnitud en primavera y verano. La segunda componente conserva el comportamiento de los períodos anteriores.

Los valores que adquieren las componentes principales en los 3 ciclos predefinidos se comparan en las figuras 5.35 y 5.36 para evidenciar su evolución temporal, indicando que el primer modo pasa de presentar 2 picos en el primer período a tener una amplia zona de valores altos en los períodos siguientes, y que esta zona se atrasa desde el verano-otoño a otoño-invierno.

En cambio, la segunda componente tiene un comportamiento más homogéneo en los 3 períodos, siendo la diferencia más notoria el adelanto de una estación del mínimo con posterioridad a 1944.

Las figuras 5.37 a 5.39 presentan las series temporales de puntuaciones factoriales de las componentes principales en cada período. Sobre ellas, se ha efectuado el análisis espectral, cuyos resultados se expresan en términos de densidad espectral versus la frecuencia en los figuras 5.40 a 5.42.

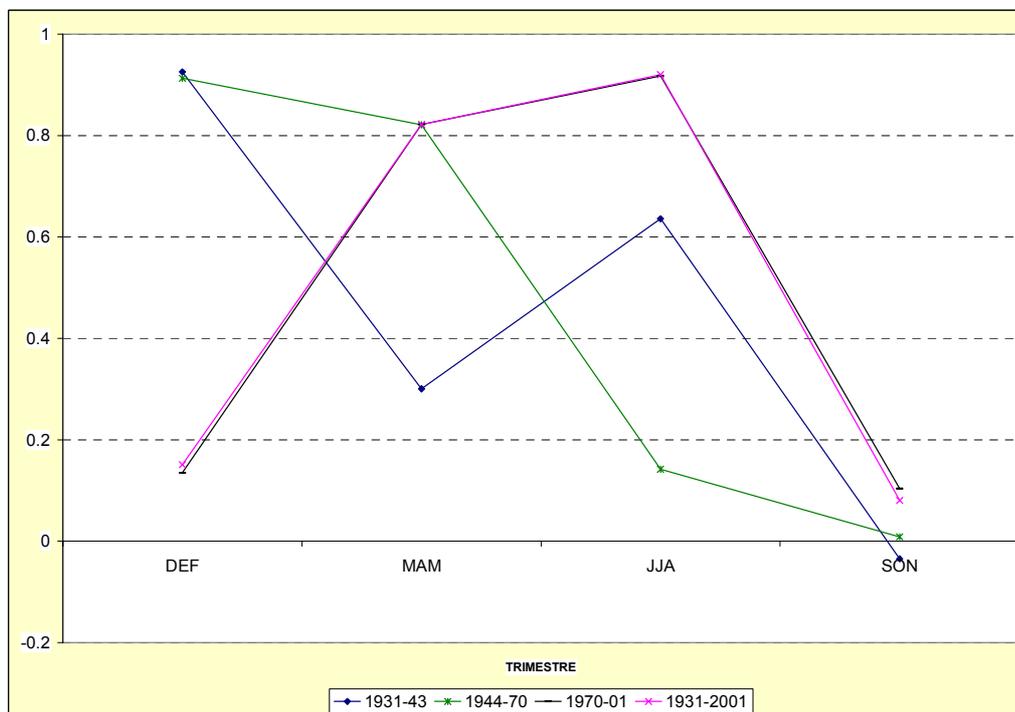


Figura 5.35 Comparación de primer modo del caudal estacional del río Uruguay

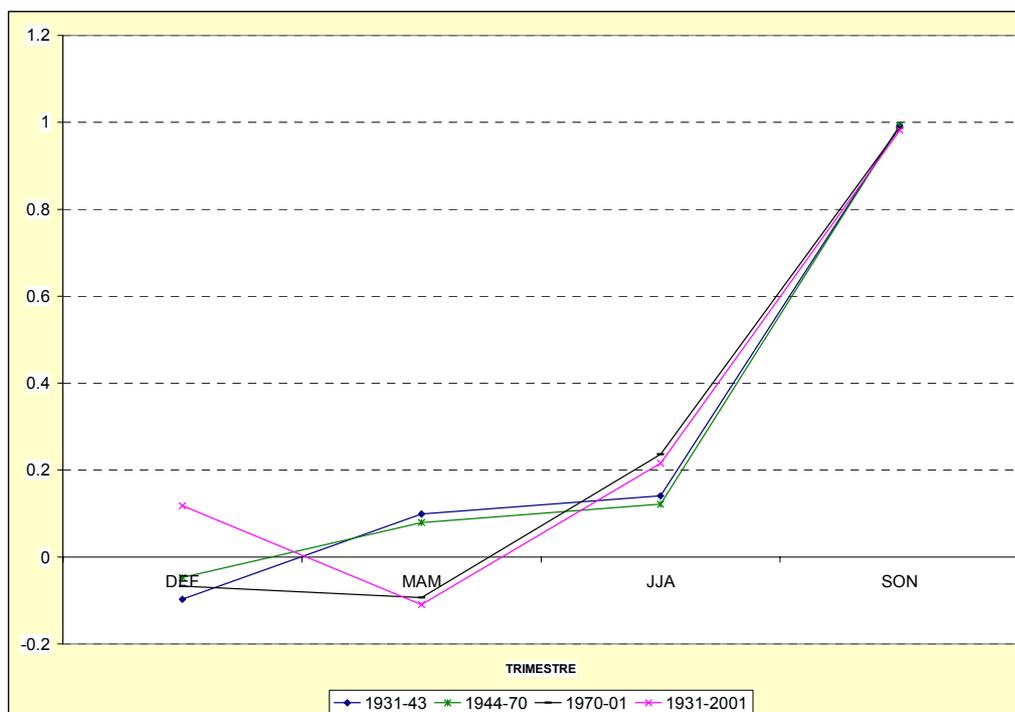


Figura 5.36 Comparación de segundo modo del caudal estacional del río Uruguay

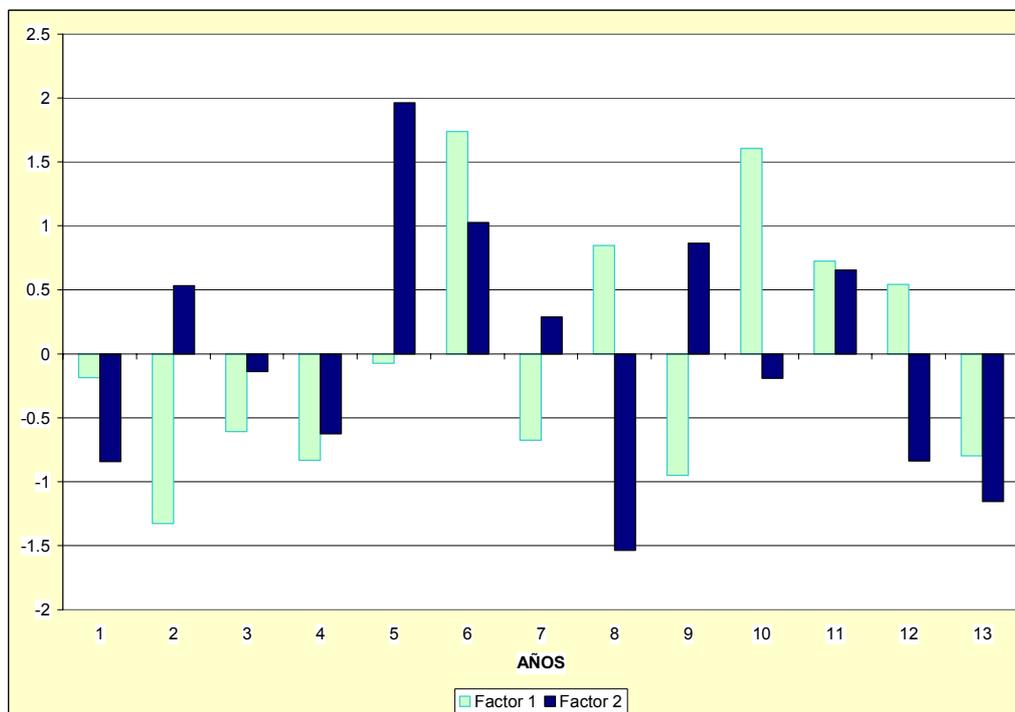


Figura 5.37 Puntuaciones factoriales del caudal estacional del río Uruguay (período 1931-43)

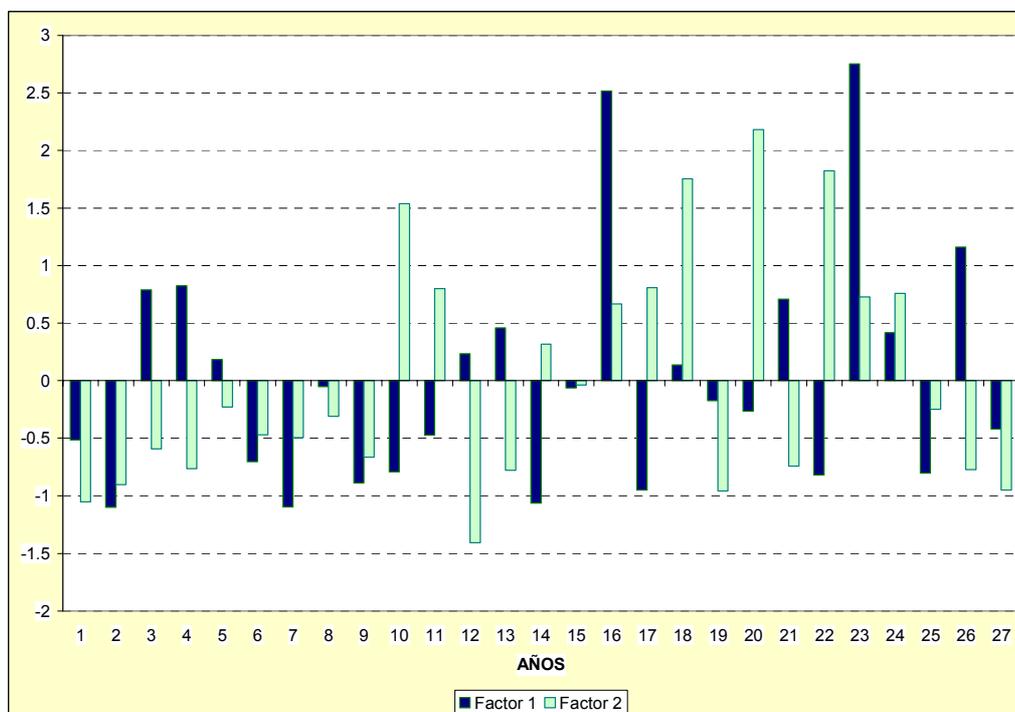


Figura 5.38 Puntuaciones factoriales del caudal estacional del río Uruguay (período 1944-70)

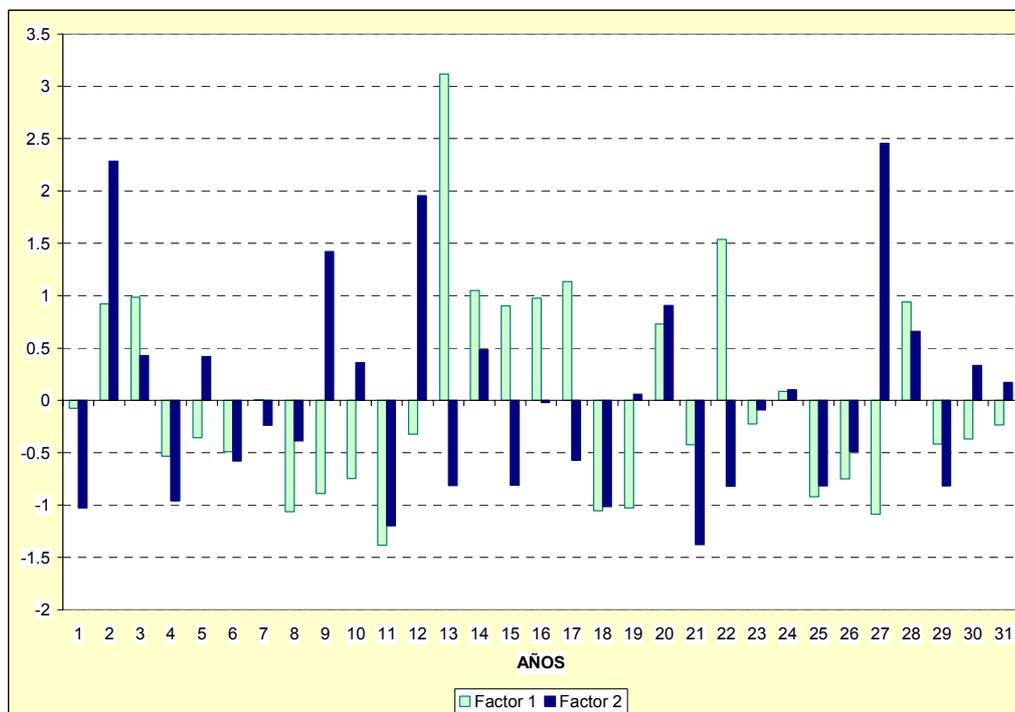


Figura 5.39 Puntuaciones factoriales del caudal estacional del río Uruguay (período 1971-01)

Los períodos significativos encontrados en 1931-43 oscilan entre 2 y 6 años para el primer modo (frecuencias de 0,42 y 0,17 1/año) y entre 4 y 6 para el segundo (frecuencias de 0,25 y 0,16 1/año). En 1944-70 los períodos oscilan, respectivamente, entre 2 y 4 (frecuencias de 0,27 y 0,37 1/año) y entre 2 y 6 años (frecuencias de 0,5 y 0,16), para las puntuaciones factoriales del primer y segundo modo respectivamente.. Finalmente en 1971-2001 se encuentran picos de períodos entre 4 y 10 años (frecuencias de 0,27 y 0,10 1/año) para la primera componente principal y alrededor de 2-4 años (frecuencias de 0,4 y 0,27 1/año) para la segunda.

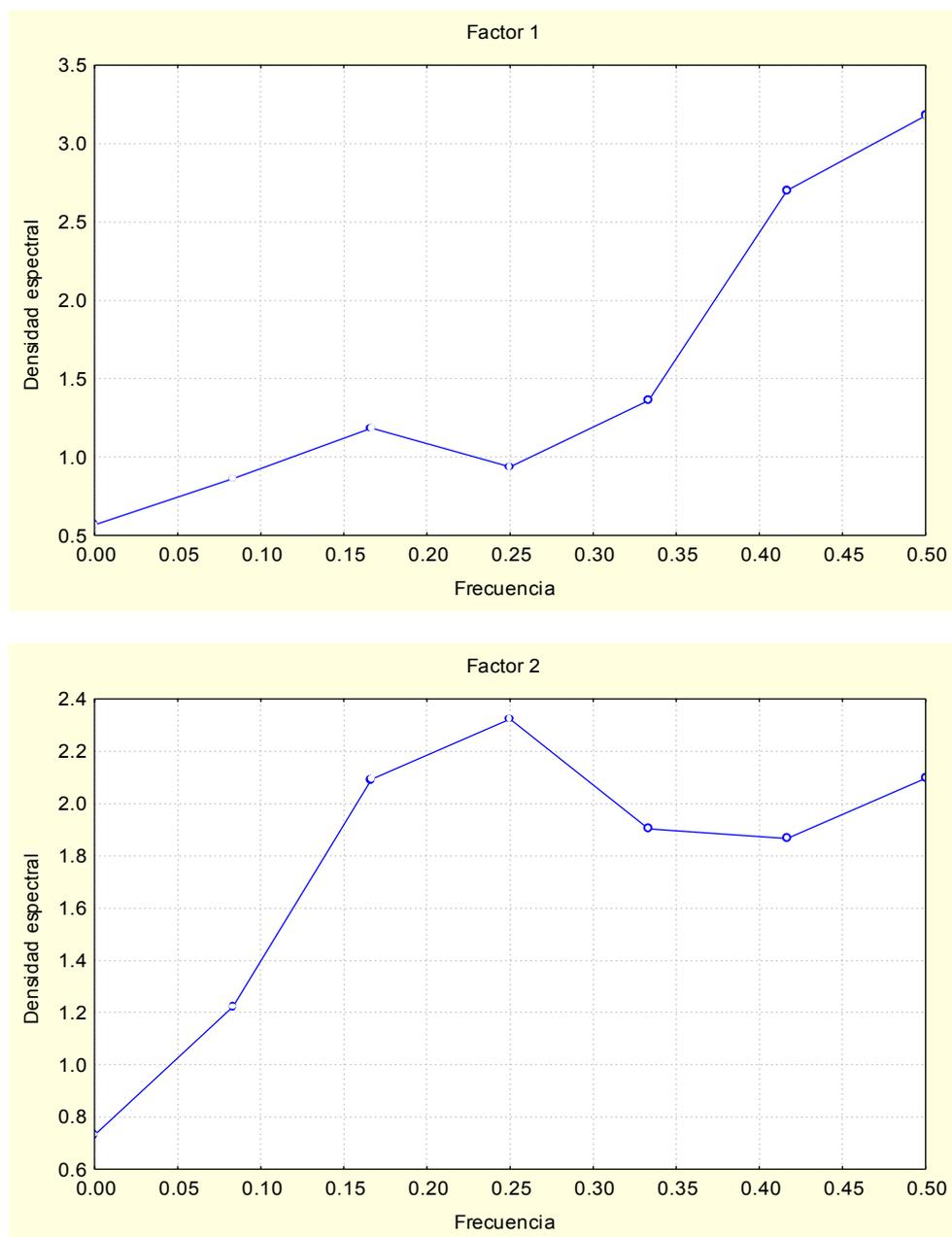


Figura 5.40 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Uruguay 1931-43)

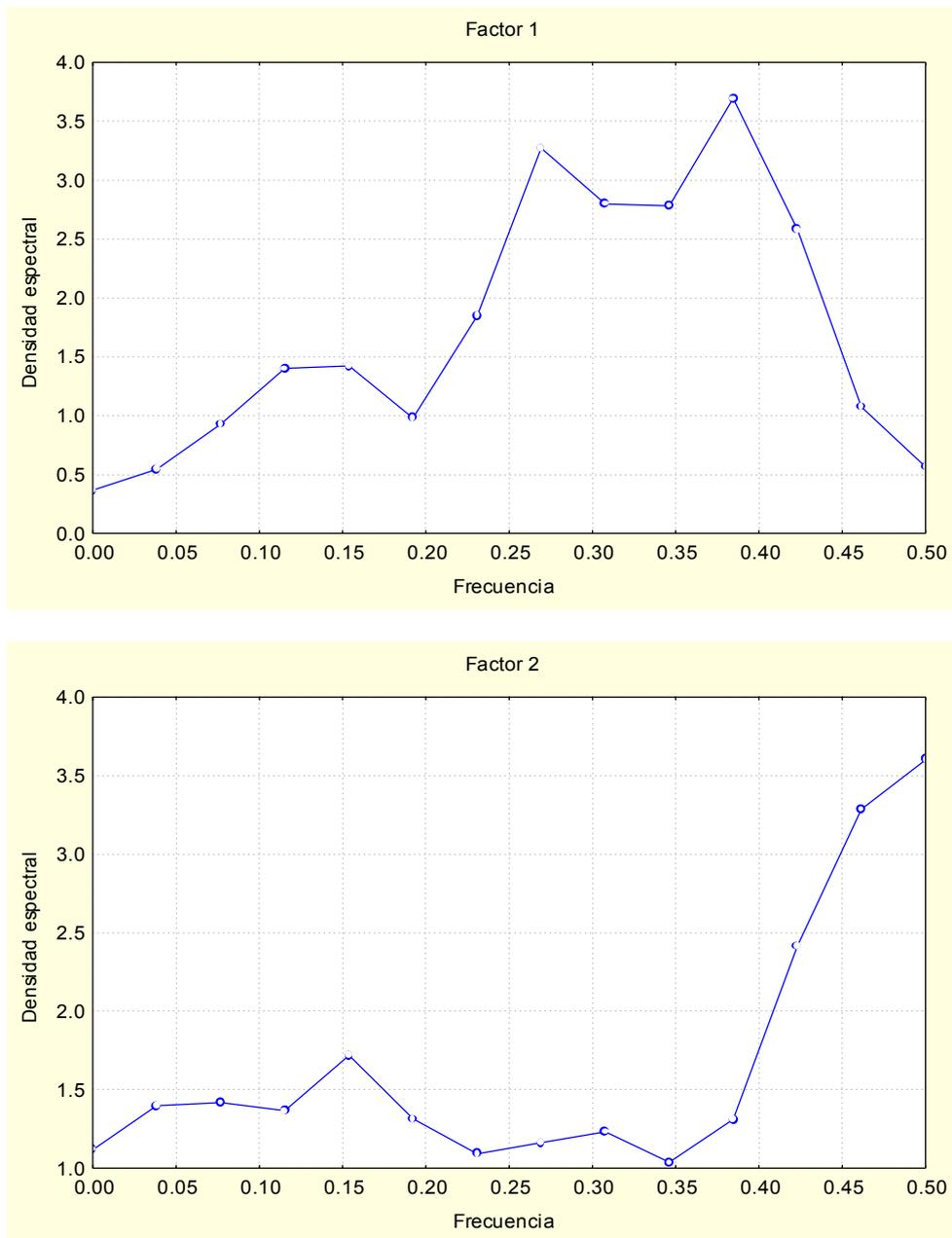


Figura 5.41 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Uruguay 1944-70)

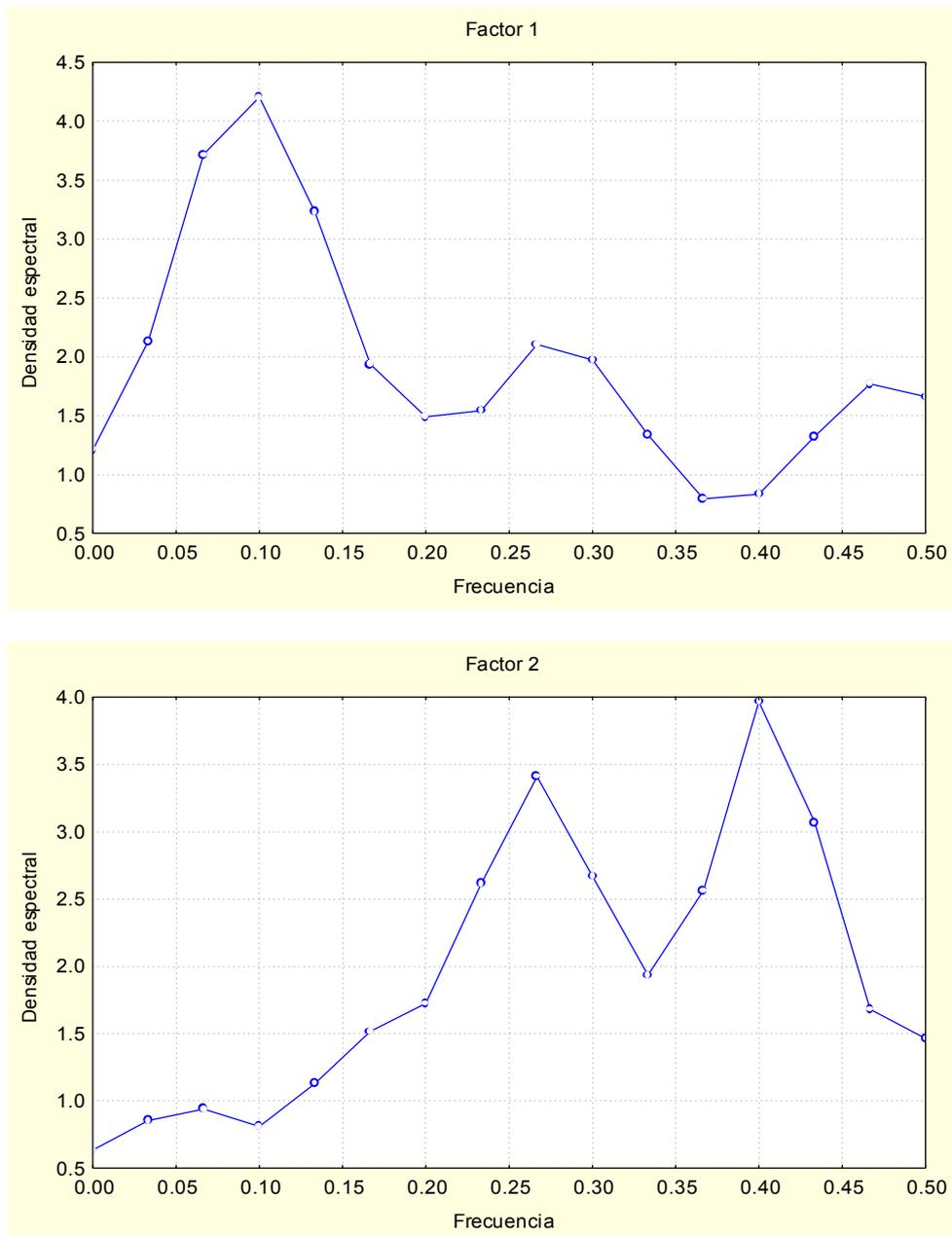


Figura 5.42 Análisis espectral de puntuaciones factoriales (Río Uruguay 1971-01)

5.2.4 Reconstrucción de las series de caudales medios estacionales

Con el propósito de completar el análisis de componentes principales efectuado sobre los caudales estacionales de los ríos Paraná y Uruguay, manifestando la bondad del método para la caracterización de las series temporales, se incluye en las figuras 5.43 a 5.48 la reconstrucción de los caudales medios estacionales para cada ciclo utilizando las componentes principales calculadas para la serie total. Asimismo se incluye la reconstrucción de las series utilizando sólo el modo dominante.

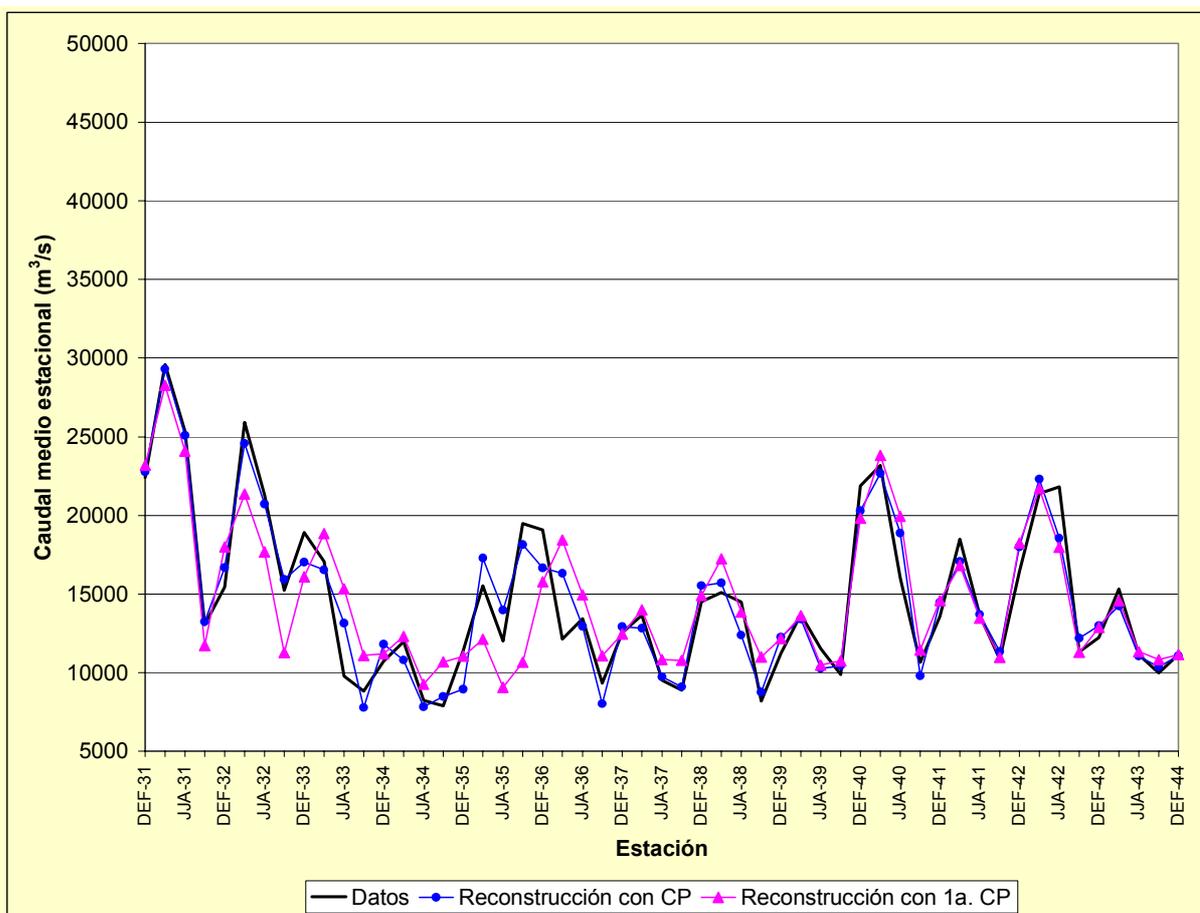


Figura 5.43 Caudales medios estacionales del Río Paraná (1931-43)

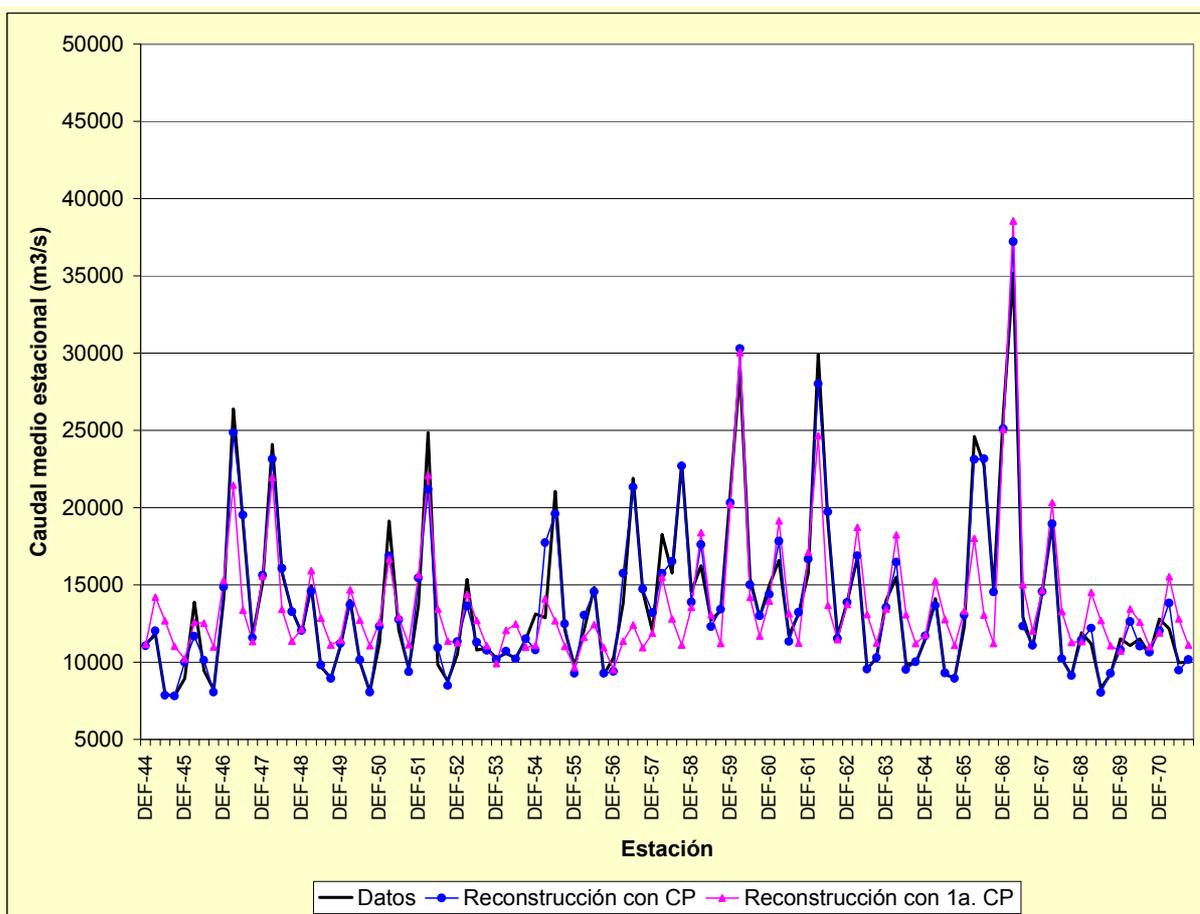


Figura 5.44 Caudales medios estacionales del Río Paraná (1944-70)

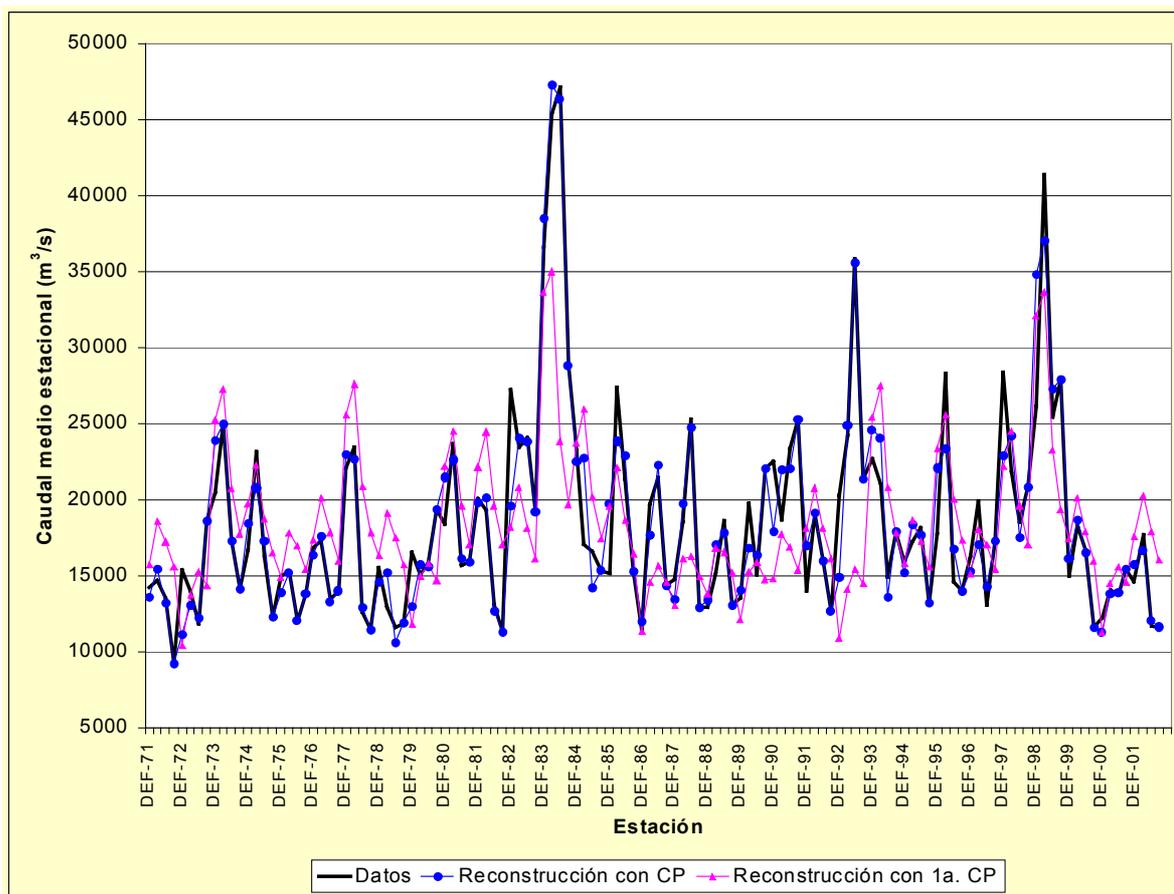


Figura 5.45 Caudales medios estacionales del Río Paraná (1971-01)

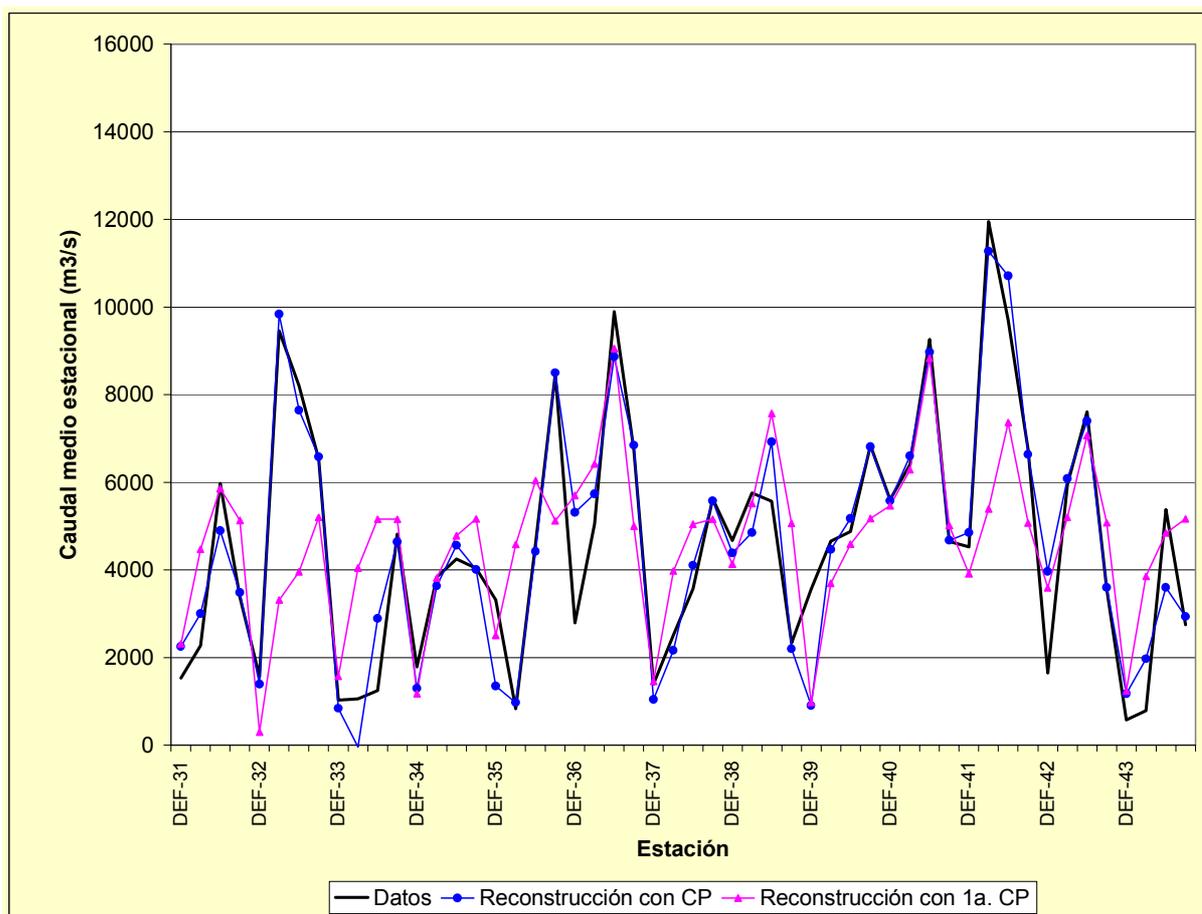


Figura 5.46 Caudales medios estacionales del Río Uruguay (1931-43)

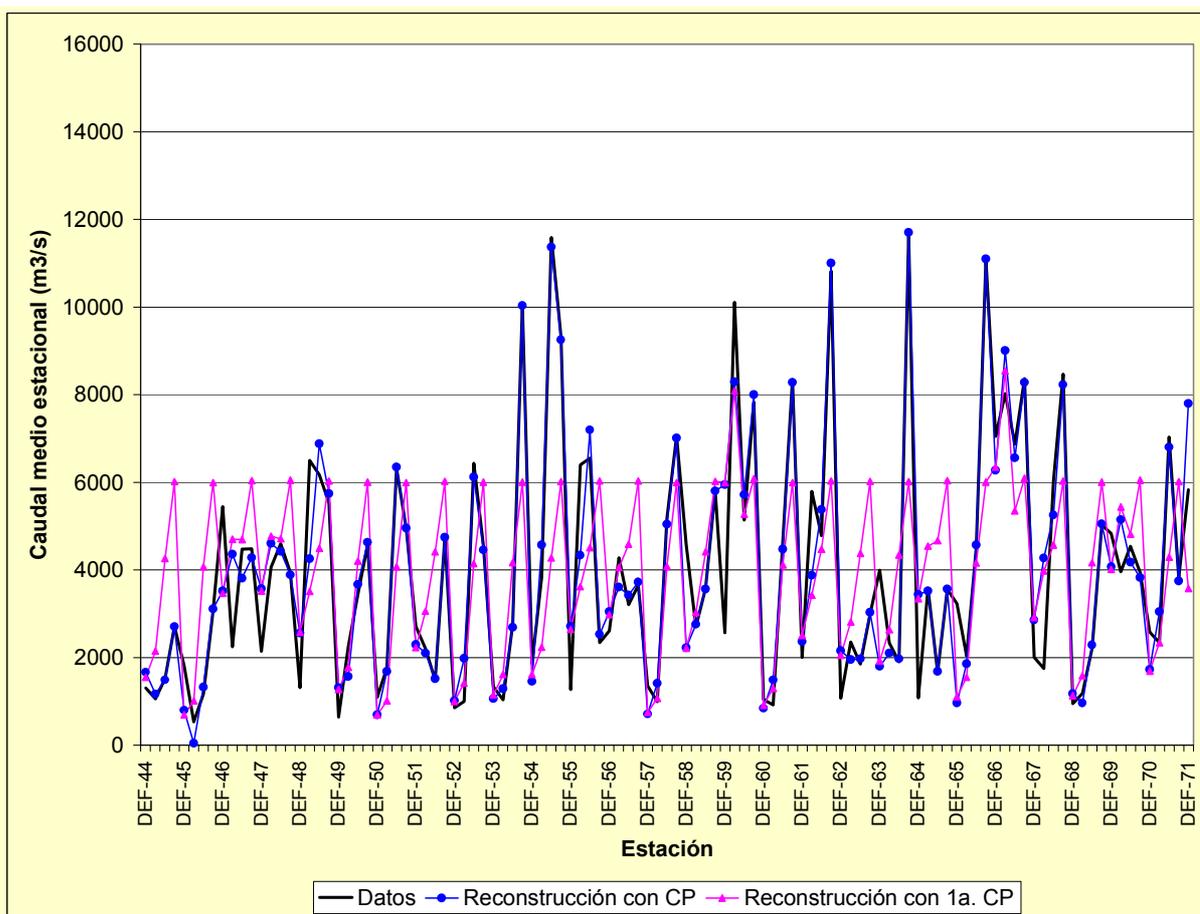


Figura 5.47 Caudales medios estacionales del Río Uruguay (1944-70)

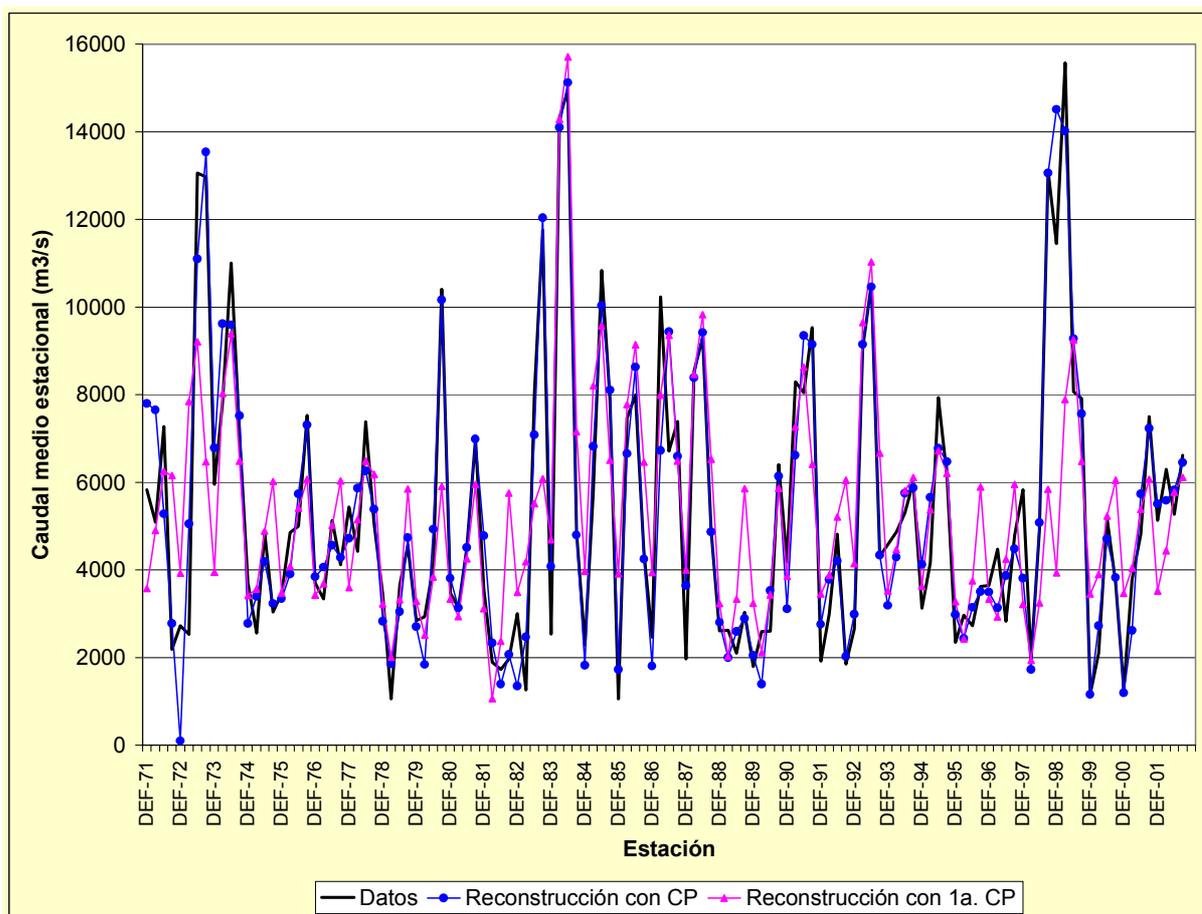


Figura 5.48 Caudales medios estacionales del Río Uruguay (1971-01)

6 ANÁLISIS DE ONDITAS

6.1 ANÁLISIS DISCRETO

Las **onditas** (wavelets) son funciones capaces de generar todo un espacio vectorial S , en el cual se pueden incluir todas las funciones de cuadrado integrable ($L_2(R)$).

A grandes rasgos, una ondita es una función que tiene muy corta duración, lo que le da una buena ubicación temporal y un contenido de frecuencias conocido. Son de cuadrado integrable, al igual que las señales que se analizarán, y tienen valor medio nulo. Entre las propiedades de estas funciones se encuentra que, haciendo uso de dos parámetros, permiten generar subespacios V_j y W_j , con $j \in N$, de modo tal que el espacio de análisis S quede expresado como suma directa de ellos (Burrus, S. et al, 1997, Vetterly, M. and Kovacevic, J., 1995)

Si $\{\phi_j(t)\}$ es un conjunto de dichas funciones, entonces cualquier función $f(t) \in S$ se podrá escribir como

$$f(t) = \sum_j \alpha_j \phi_j(t)$$

Cada una de estas $\phi_j(t)$ y todas sus combinaciones lineales generan un subespacio que se distinguiremos con V_j . Por dilataciones (cambio de escala) y traslaciones, estas funciones de duración finita dan origen a subespacios cada vez más amplios.

A las traslaciones de dichas funciones se las denotará como:

$$\phi_k(t) = \phi(t - k) \quad \text{con } k \in Z$$

En particular, para un parámetro de escala dado, al subespacio generado por todas las combinaciones lineales de ellas y sus traslaciones se lo denominará V_0

$$V_0 = \{\phi_0(t - k)\} \quad \text{y } k = 0, \dots, \pm\infty$$

Considerando un segundo parámetro, se puede ampliar la familia de funciones con:

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k)$$

donde j corresponde a las *dilataciones* de la función, lo que cambia su contenido de frecuencias, y k a las *traslaciones* de la misma. Existen funciones de este tipo que generan el espacio S y son bases ortonormales del mismo. Además son ortogonales no sólo dentro

de la misma escala sino también con respecto a otras escalas (j). El factor $2^{j/2}$ es una constante de escala.

De esta manera aparece el subespacio generado por:

$$V_j = \{\phi_k(2^j t)\}_k = \{\phi_{j,k}(t)\}_k \quad \text{con } k \in \mathbb{Z}$$

y así, si $f(t)$ está en V_j se puede escribir:

$$f(t) = \sum_k a_k \phi(2^j t - k) \quad \text{para ciertos valores de } a_k$$

Es de notar que $V_0 \subset V_1$ tomando simplemente $j = 0$ y esto implica, entre otras cosas, que la función $f(t)$ se encuentra “viviendo” en distintos subespacios.

Como la misma $\phi(t) \in V_0$ entonces para $j = 1$ resulta:

$$\phi(t) = \sum_n h(n) \sqrt{2} \phi(2t - n) \quad (1)$$

donde $h(n)$ son coeficientes, *importantes*, a determinar y nos muestra que también $\phi(t) \in V_1$

Resolver la ecuación (1), *ecuación de dilatación para la función de escala*, es el punto central. Los $h(k)$ son los coeficientes de un filtro y deben cumplir con que:

$$\sum_k h(k) = 1 \quad \text{y} \quad \sum_k (-1)^k h(k) = 0$$

La ecuación (1) establece la relación entre escalas y permite generar las funciones $\phi(t)$ que, siguiendo con el mismo razonamiento, serán base en la escala adyacente.

Para $j > 0$ resultan subespacios más amplios, ya que las funciones son más angostas y las traslaciones de menor magnitud, pudiendo de esta forma mostrar más detalles.

En general resulta:

$$V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset \dots \subset V_j$$

donde es fácil apreciar que si $f(t) \in V_j$ entonces $f(t), f(2t), f(t-k), f(2t-k)$ están en V_{j+1} .

Además, los subespacios V_j dan origen a las **onditas**, que son exactamente la diferencia entre dos de ellos. W_j es la “diferencia” entre V_j y V_{j+1} . Así V_{j+1} es la suma de V_j y W_j .

Para los casos en que es posible definir una función de escala se puede, a partir de ella, generar las familias de onditas W_j .

Como cada $W_0 \subset V_1$ se puede escribir:

$$\varphi(t) = \sum_n h_1(n) \sqrt{2} \phi(2t - n) \quad \text{con } n \in Z \quad (2)$$

para ciertos coeficientes $h_1(n)$. Estos coeficientes, se puede demostrar, están relacionados con los coeficientes $h(n)$ de la función de escala a través de la relación:

$$h_1(n) = (-1)^n h(1 - n)$$

La función generada por (2) da el prototipo u ondita madre cuya expresión es:

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k)$$

donde 2^j es la escala y $2^{-j}k$ es la translación en t . Con estos parámetros se puede generar toda la familia.

Entonces con las funciones de escala y las onditas toda función de energía finita la podemos expresar como:

$$g(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \varphi_k(t) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \varphi_{j,k}(t) \quad (3)$$

Los coeficientes c_j y $d_j(k)$ resultan de los productos internos:

$$c(k) = c_0(k) = \langle g(t), \phi_k(t) \rangle = \int g(t) \phi_k(t) dt \quad (4)$$

$$d_j(k) = d(j,k) = \langle g(t), \varphi_{j,k}(t) \rangle = \int g(t) \varphi_{j,k}(t) dt$$

No es difícil probar que los coeficientes $c_j(k)$ se pueden expresar como:

$$c_j(k) = \sum_m h(m - 2k) \int f(t) 2^{(j+1)/2} \phi(2^{j+1} t - m) dt$$

y análogamente para $d_j(k)$.

El factor $h(m-2k)$ es un submuestreo y filtro que es lo que cambia la escala.

Se pasa de una escala de mayor resolución a otra de menor resolución y también se descartan la mitad de los coeficientes. Esto no produce ningún tipo de fenómeno de aliasing ya que al pasar a una escala de menor resolución también se está variando la frecuencia crítica.

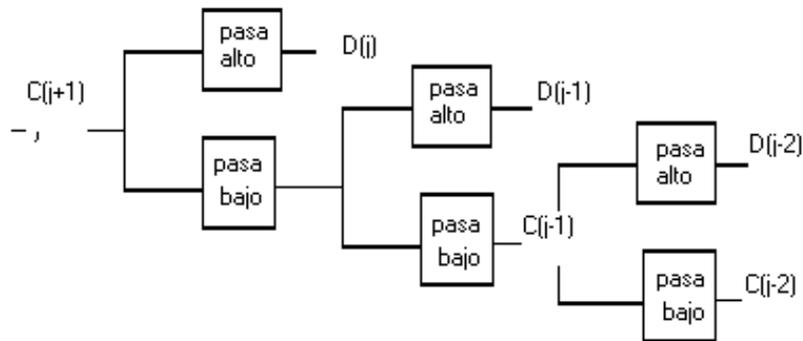
La integral anterior es el producto interno de $f(t)$ con la función de escala correspondiente a $(j + 1)$. Entonces, con la notación de (4):

$$c_j(k) = \sum_m h(m - 2k)c_{j+1}(m)$$

y

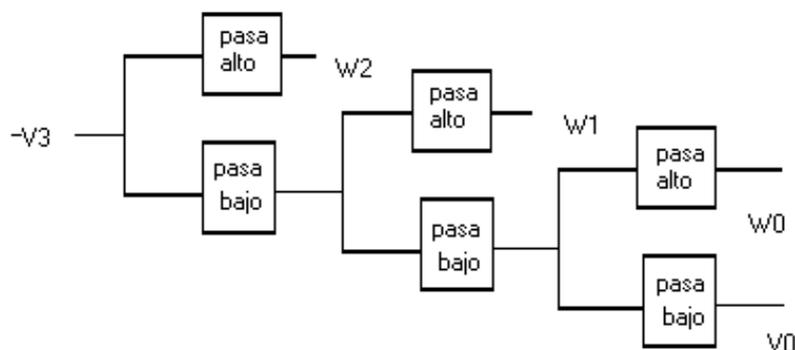
$$d_k(k) = \sum_m h_1(m - 2k)d_{k+1}(m)$$

Como ya se había expresado, los coeficientes h_1 y h son coeficientes de filtros que permiten implementar un sistema de multirresolución que sigue un esquema como el siguiente:



donde el filtro pasa-bajo corresponde a los coeficientes $h_0(n)$ y $h(n)$ (ó $h_1(n)$) corresponde a filtros pasa-altos, incluyendo ambos casos el submuestreo. El esquema anterior representa el método que se utiliza para obtener los coeficientes denominados DWT (Transformada Ondita Discreta).

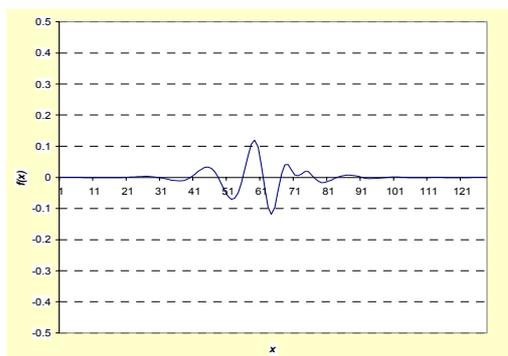
En forma análoga se obtiene el esquema que representa la relación entre la función de escala y las onditas.



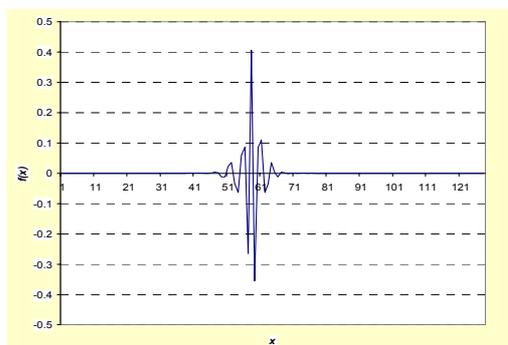
Un punto a tener en cuenta es que éste método, bajo ciertas condiciones y con un proceso exactamente inverso al seguido aquí, permite la reconstrucción de la señal separando los

detalles de las aproximaciones y, eventualmente, la señal misma sumando los detalles y las aproximaciones.

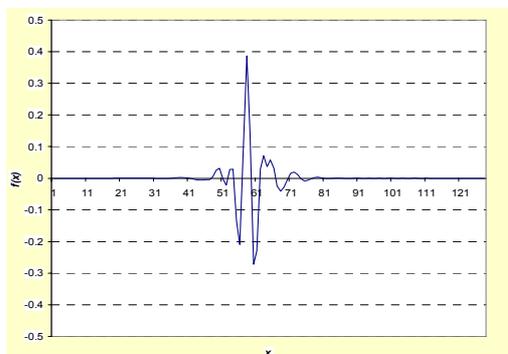
Formas de onditas para una misma ubicación espacial, pero distinta escala, se muestran en la figura 6.1. Representan algunas de las que intervienen en la descomposición de la señal original según los pesos de los coeficientes c_{jk} y los $d_{j,k}$, con las traslaciones dadas por k y las dilataciones dadas por j . Las figuras muestran onditas del sistema db10 y se pueden apreciar, claramente, las dilataciones para un mismo k y tres valores distintos de j .



a)



b)



c)

Figura 6.1 Onditas para tres escalas normalizadas a energía 1 e igual parámetro t'

En general resulta que la escala y el nivel j están relacionados como se indica en la tabla 6.1.

Tabla 6.1
Relación entre nivel, escala y resolución

Nivel j	10	9	2	1	0	-1
Escala	1024	512		4	2	1	1/2
Resolución	$1/2^{10}$	$1/2^9$		$1/2^4$	1/2	1	2

6.2 APLICACIÓN DE ANÁLISIS DISCRETO

6.2.1 Río Paraná

En el estudio de los caudales del Río Paraná toda la información que se puede extraer de los datos que se disponen está presente en un gráfico de caudal vs. tiempo (figura 6.2).

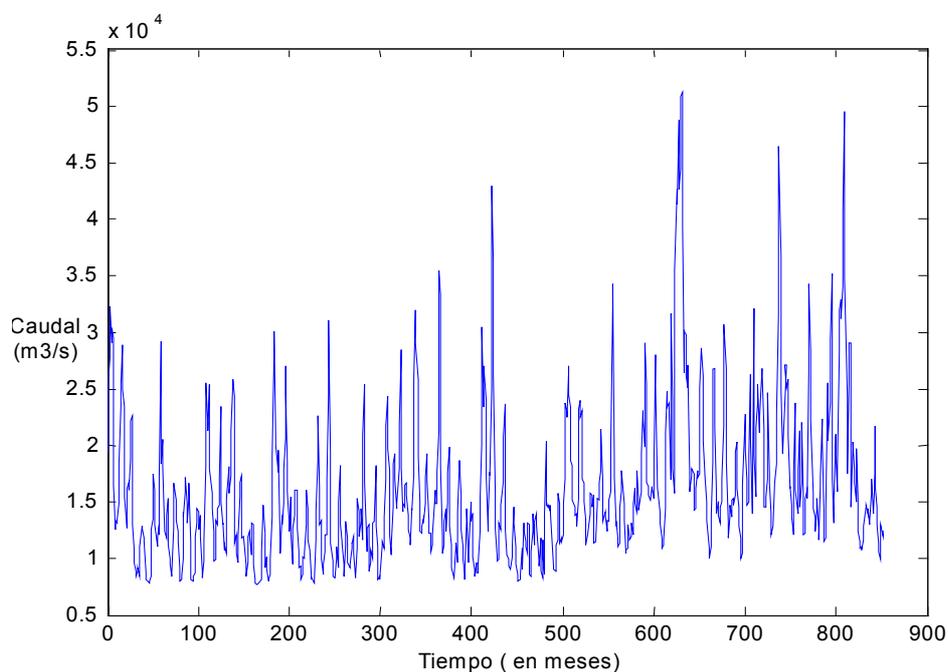


Figura 6.2 Caudales medios mensuales del Río Paraná en el período 1931-2001

La misma información se puede presentar transformando la misma serie a otro dominio, como el de amplitud-frecuencia mediante la Transformada de Fourier (figura 6.3). Nótese la envergadura del pico para 12 meses. También se observa un pico para 4 meses aunque de

intensidad mucho menor. Este tipo de representación, si bien muestra las frecuencias presentes, no da indicio de la ubicación temporal de las mismas.

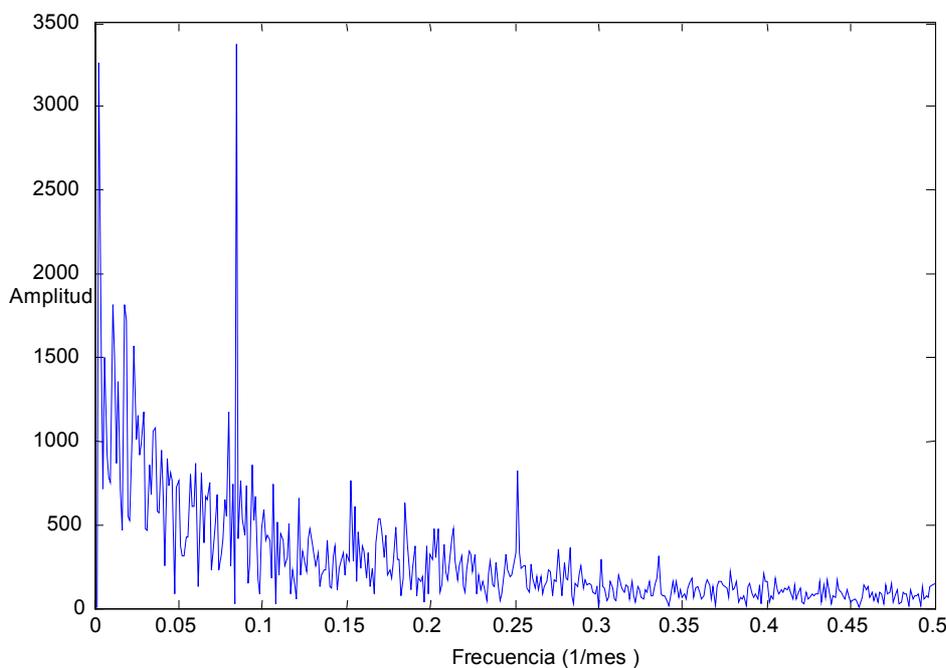


Figura 6.3 Espectro de frecuencias de los caudales medios mensuales del Río Paraná en el período 1931-2001

La técnica basada en onditas, permite, en cambio, conocer el contenido de frecuencias y su localización temporal. Esencialmente lo que esta técnica brinda es un *análisis local* de la señal.

Para este tipo de análisis son utilizadas varias familias de funciones, cada una con sus características, para resaltar aspectos deseados en las señales. La función de escala de la familia Daubechies, que es utilizada en el presente análisis, se muestra en la figura 6.4. El nombre corresponde al de Ingrid Daubechies, quien describió el denominado *sistema de onditas de soporte compacto* que define y hace practicable el análisis discreto.

A los efectos de la aplicación la señal original fue extendida por simetría hacia ambos lados hasta hacer que la señal tenga una cantidad de datos igual a un múltiplo de 2, lo que acelera el proceso de cómputo y permite disminuir el efecto de borde que, en la práctica, se presentan como abruptas discontinuidades debido al carácter finito de las series. Estos puntos agregados (86 a ambos lados), donde se manifestará más fuertemente la anomalía mencionada, son luego dejados de lado.

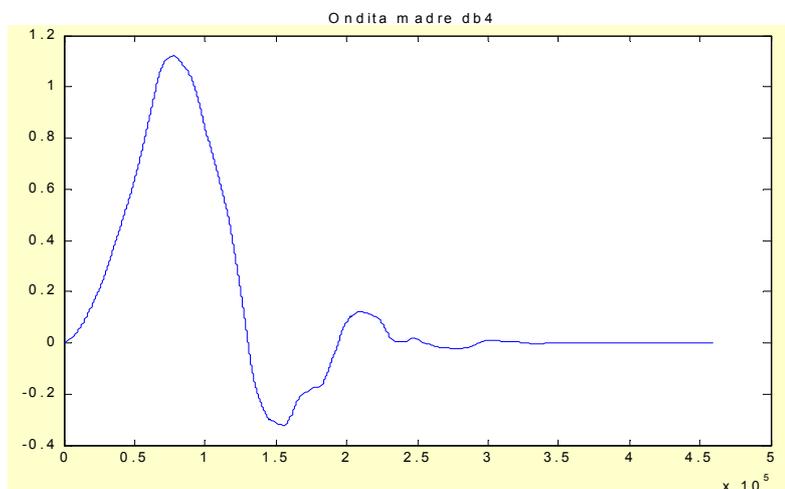


Figura 6.4 Función de escala de la familia Daubechies

Un análisis con los filtros derivados para el caso discreto permite la descomposición de la señal en una aproximación, a_8 , y en detalles, d_1 a d_8 , utilizando el sistema de onditas db10. Las ventanas de detalle están centradas, aproximadamente, en las siguientes frecuencias:

Detalle	Frecuencia dominante (1/mes)	Período dominante (meses)
d_1	0,342	2,92 (~3 meses)
d_2	0,171	5,85 (~6 meses)
d_3	0,086	11,7 (~1 año)
d_4	0,043	23,38 (~2 años)
d_5	0,021	46,8 (~4 años)
d_6	0,011	93,54 (~8 años)
d_7	0,005	187 (~16 años)
d_8	0,003	374 (~32 años)

Tal como se muestra en la figura 6.5, en el nivel de aproximación a_8 se manifiestan los ciclos medio, seco y húmedo que se han distinguido en el presente trabajo. En la misma

figura 6.5 se presenta una división del dominio temporal en tramos que presentan algunas particularidades que esta técnica permite visualizar, los cuales se describen a continuación.

Tramo (a)

En el nivel de detalle d_3 (periodicidad anual) se aprecia la estructura fina de las variaciones locales. Las oscilaciones llegan a tener amplitudes de importancia, que luego se atenúan en alrededor de un 50%.

El nivel d_6 (periodicidad 8 años) da una visión global del suceso.

Tramo (b)

El comienzo de decrecimiento de caudales se aprecia en d_3 y con niveles significativos en el detalle d_5 y en menor medida en los detalles d_6 .

Un pico agudo de crecida se proyecta en d_5 (período 4 años). En d_2 y d_1 se puede apreciar su detalle y es en el nivel de mayor resolución donde se ve una importante crecida cercana al máximo del registro.

A partir de la mitad de este tramo el crecimiento del nivel de detalle d_6 indica la región que en la señal se ven como tres picos consecutivos. La escala a que corresponde el fenómeno se muestra en d_4 y con amplitudes relativamente altas en d_3 (periodicidades anuales).

El nivel de mayor resolución, d_1 (trimestral), muestra dos señales que indican componentes de alta frecuencia.

Tramo (c)

Ya iniciado el ciclo seco, la señal muestra dos picos de magnitud media y esto se ve proyectado en d_5 y su estructura a mayor detalle, en d_3 y d_2 . Parte de este intervalo aparece, aunque con baja amplitud, en d_1 .

También en d_5 aparece la proyección de dos picos y su composición en los niveles d_5 y d_2 . Dentro de la misma región se aprecia en d_5 un incremento que muestra su detalle en d_1 , reflejando el hecho de tratarse de fenómenos de alta frecuencia y relativamente aislados, ya que no tiene componentes de significación en otras escalas.

Tramo (d)

Un complejo de tres picos de amplitud media se corresponde con oscilaciones de amplitudes crecientes en d_4 (bianual) y d_3 (anual).

El nivel d_6 corresponde a la componente de las amplitudes altas que presenta la señal en la última parte de este tramo. Su detalle se ve en d_3 con amplitudes importantes (las máximas de todo el registro) y un complejo oscilatorio en d_1 .

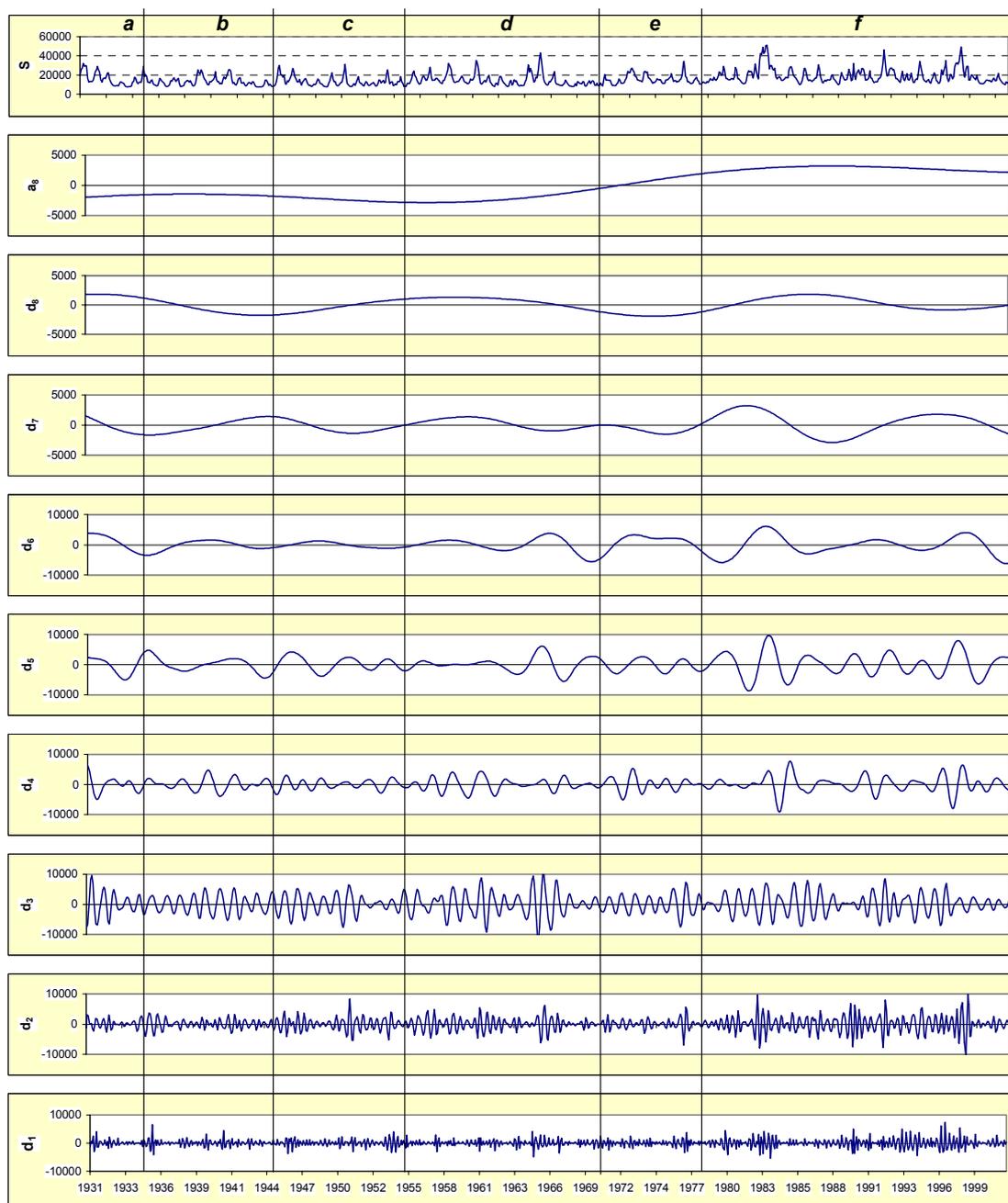


Figura 6.5 Descomposición de los caudales medios mensuales del Río Paraná

Tramo (e)

La proyección sobre d_6 de magnitud media explica las variaciones de la señal. Se aprecia también la componente oscilatoria y notoriamente regular en d_5 , mientras que d_3 muestra la componente de mayor importancia de los dos primeros picos de la señal. El tercer pico tiene componentes significativas en d_3 (anual) y otras de menos magnitud en d_2 (semestral) y d_1 (trimestral).

Tramo (f)

Se ven dos periodos de amplitudes importantes en d_7 que da idea de la existencia de dos subtramos de duración relevante. El primero de ellos es el más amplio del registro y en su estructura de detalle se ven también valores máximos en d_6 , d_5 , d_4 y d_2 , con picos notables en d_1 , no tanto por su magnitud sino por la duración.

La amplitud de d_7 tiene una estructura comparable a la anterior, pero de magnitud menor. En otras escalas se observan los detalles significativos en todas ellas, pero particularmente en d_2 , porque alcanza su mayor amplitud, y en d_1 , que también muestra sus valores máximos y refleja gran actividad en toda esta zona.

6.2.2 Río Uruguay

Los caudales medios mensuales del Río Uruguay en la estación Concordia se presentan en la figura 6.6 y el espectro de frecuencias correspondientes se aprecia en la figura 6.7.

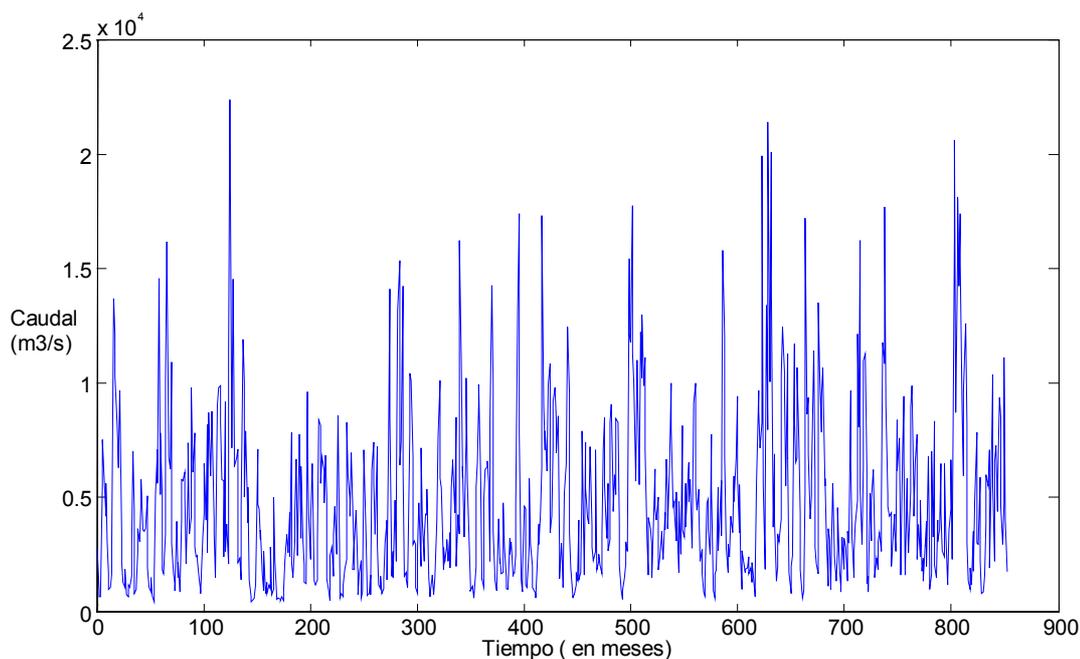


Figura 6.6 Caudales medios mensuales del Río Uruguay en el período 1931-2001

La misma información se puede presentar transformando la misma serie a otro dominio, como el de amplitud-frecuencia mediante la Transformada de Fourier (figura 6.7). Nuevamente se observan los picos para 12 y 4 meses, aunque ahora el segundo se ve superado en amplitud por un pico para 6 meses.

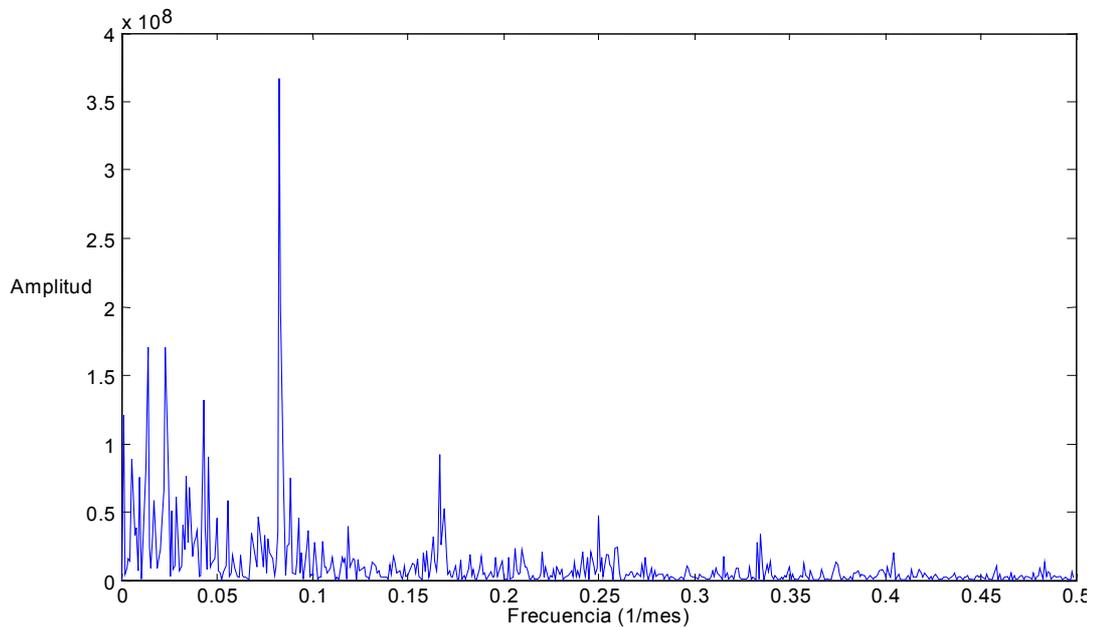


Figura 6.7 Espectro de frecuencias de los caudales medios mensuales del Río Uruguay en el período 1931-2001

Se aplicó el análisis discreto de ondas a la serie de caudales medios mensuales del Río Uruguay en el período 1931-2001. Los resultados se muestran en la figura 6.8. En a_8 ahora se distingue claramente sólo el ciclo húmedo del resto. La división en tramos se explica a continuación.

Tramo (a)

Se observa una envolvente con periodicidad de 4-5 años, cuya estructura se refleja en las escalas d_3 (anual) y d_2 (semestral), y se corresponde a una amplitud media en la señal original S .

Tramo (b)

Hay dos máximos relativos en este tramo. Incluidos como un ciclo completo de nivel d_7 (16 años), sus componentes de frecuencia se aprecian a nivel d_3 , d_2 y d_1 . En este último nivel se observa un pico de amplitud importante.

Tramo (c)

Es un tramo de amplitudes bajas y el único detalle a observar corresponde a un intervalo de altura casi constante en la mitad del registro, que revela d_6 y muestra sus componentes en d_3 .

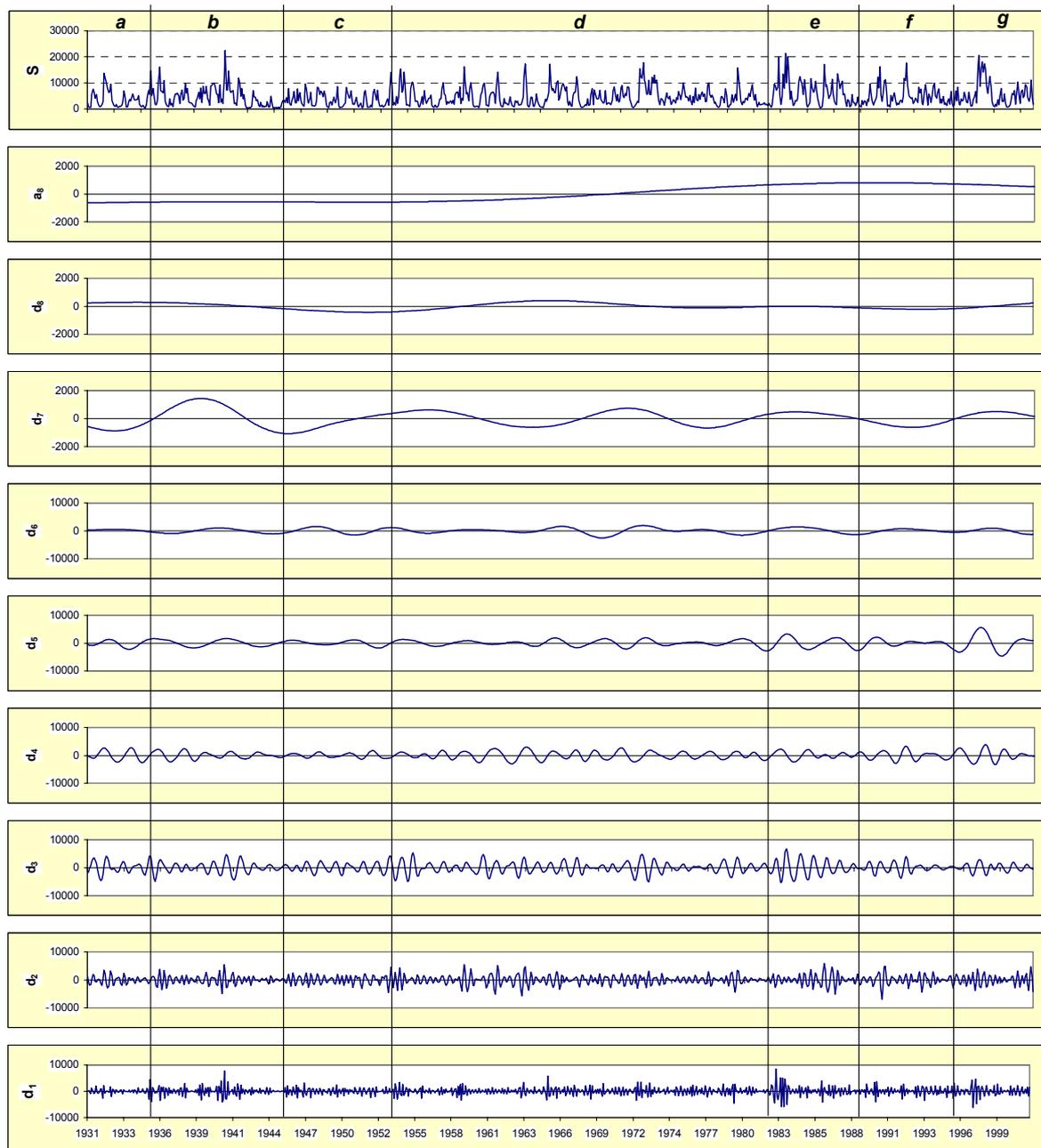


Figura 6.8 Descomposición de los caudales medios mensuales del Río Uruguay

Tramo (d)

En este tramo es donde los caudales inician un periodo de crecimiento. El nivel de detalle d5 muestra los máximos presentes y es en los niveles anuales d3 y semestrales d2 donde se puede encontrar el detalle espectral.

Tramo (e)

En la señal original se observa un periodo de amplitudes importantes y contiguas.

Una envolvente en d_6 (8 años) abarca toda la región. En el nivel de detalle d_5 (4 años) el tramo se divide en mitades. Las componentes presentes se muestran en d_3 , d_1 y d_5 para la primer mitad y fundamentalmente en d_2 y d_5 para la segunda mitad.

En este tramo se aprecia el máximo de todo el registro en el nivel d_1 y corresponde al pico agudo que se puede ver en la señal.

Tramo (f)

La variabilidad se muestra en dos picos. El primero se refleja en d_5 , con picos de significación en d_2 (periodo semestral) y d_1 (periodo trimestral). El segundo lo hace en d_1 , d_3 y d_4 .

Tramo (g)

Se caracteriza por un tramo de amplitud importante y de larga duración.

Si bien d_7 , d_6 y d_4 muestran componentes espectrales, es el nivel de detalle d_5 (período 4~5 años) el que tiene mayor significación.

El pico agudo que se ve en esta región se puede apreciar en d_1 y, en menor medida, en d_2 .

6.3 ANÁLISIS CONTINUO

El análisis continuo consiste en comparar cada elemento de la sucesión que se desea transformar con la ondita seleccionada.

La Transformada Ondita Continua se define como:

$$CWT_x^\psi(\tau, s) = \Psi_x^\psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \cdot \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt$$

donde s es la escala y τ es la traslación en t .

El procedimiento para el cálculo consiste en tomar la ondita madre ($s = 1$) y, comenzando en $t = 0$, se lo multiplica por el valor de la señal también en $t = 0$ y luego integrar para todo t . El valor así obtenido es la $CWT_x^\psi(0,1)$ y corresponde al primer valor de la Transformada Ondita Continua.

Con un desplazamiento en t igual a $t = \tau$ se repite el mismo proceso de multiplicación e integración hasta completar todos los elementos de la sucesión $x(t)$ con sucesivos corrimientos en t hasta $t = N\tau$. De esta manera se completa en el plano escala-tiempo una línea $CWT_x^\psi(t,1)$.

Incrementando, ahora s , en una cantidad “pequeña” y siguiendo exactamente el mecanismo anterior se completa una nueva línea para un nuevo valor de la escala. El procedimiento se continúa idénticamente para cada incremento de escala.

El algoritmo que se implementa para el cálculo hace uso de la Transformada de Fourier y del producto de convolución sabiendo que:

$$f * g = IFFT(FFT(f).FFT(g))$$

donde $*$ indica la convolución entre f y g

Ésta es la forma de discretización en el plano escala-tiempo.

Como se trata del caso continuo los valores de los incrementos en s y τ pueden elegirse lo suficientemente pequeños, pero teniendo en cuenta el aumento en el tiempo de cálculo que acarrea y que no necesariamente agrega información.

De esta manera, cuando la señal tiene componentes espectrales similares a las de la ondita, para un valor dado de s , el valor de la integral será mayor.

En el presente estudio se utilizó la ondita denominada Morlet (figura 6.9) como ondita “exploradora”.

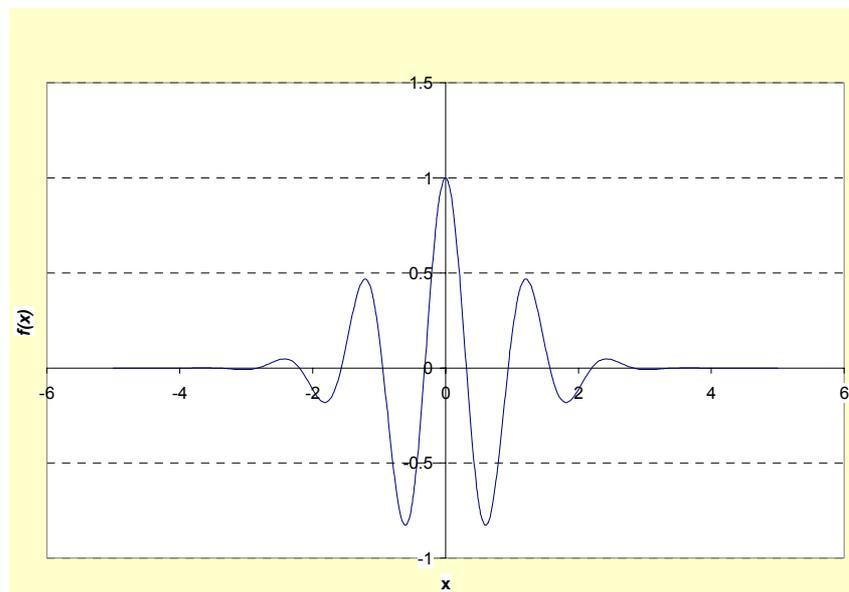


Figura 6.9 Ondita Morlet

Esta ondita, en particular, tiene una expresión analítica y sencilla

$$f(x) = C.e^{\frac{-x^2}{2}} \cdot \cos(5x)$$

Se debe tener en cuenta que tanto en el caso discreto como en el continuo la determinación simultánea de frecuencia (período) y tiempo se encuentran limitados por el Principio de Incerteza.

6.4 APLICACIÓN DE ANÁLISIS CONTINUO

6.4.1 Río Paraná

La figura 6.10 muestra los resultados de la aplicación del análisis continuo al río Paraná. Las líneas de división separan una zona inferior donde los resultados no son confiables por un problema de precisión.

En esta representación se hace evidente una región de caudales medios mensuales de gran intensidad a partir del año 1966, aproximadamente. Los períodos predominantes son al principio los correspondientes a un año y a una banda de períodos que se extiende desde poco menos de 3 años hasta alrededor de 8 años. La actividad se concentra luego, con mayor intensidad, alrededor de los 8 años, para extenderse después, entre 1980 y 1985, aproximadamente, con la misma fuerza a una banda de periodicidades de entre 2 y 4 años, aproximadamente.

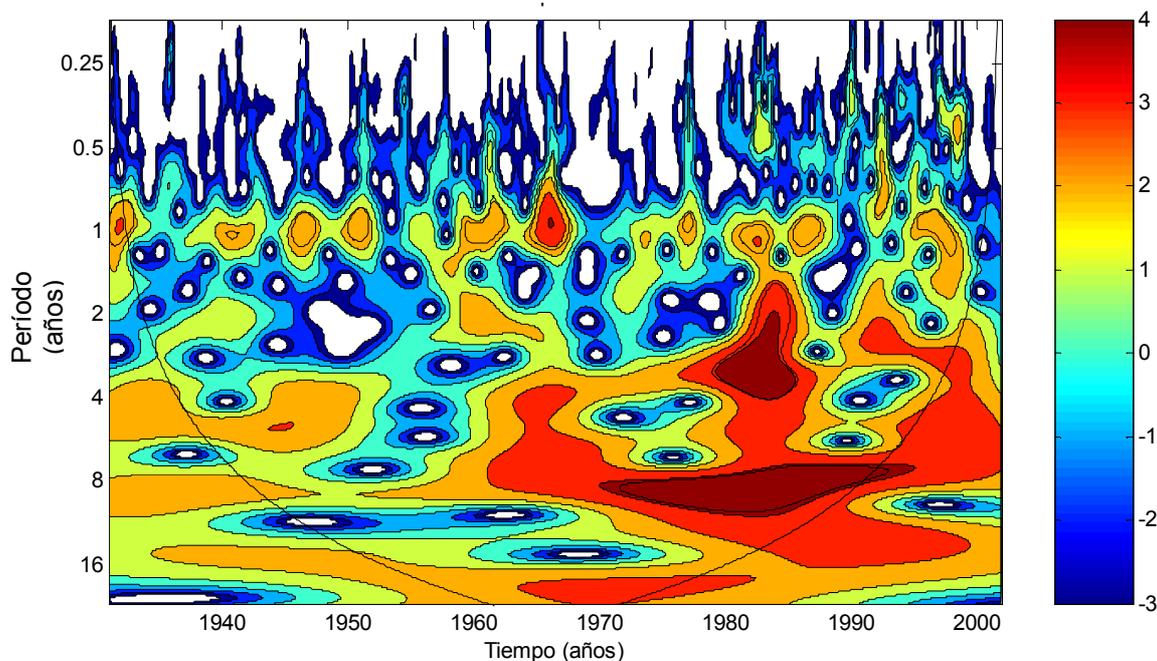


Figura 6.10 Espectro de potencia continuo para el río Paraná

Con intensidades menores, se aprecia actividad significativa con período anual en los años 1940, 1948, 1951, 1960, 1972, 1980, 1986 y 1995. Aisladamente, se observa en 1997 una actividad importante con período inferior al semestral y algo menor que el anual en 1992.

Con anterioridad a 1958 sólo se pueden identificar períodos de 1 y 4 años con una actividad media.

En síntesis, a partir aproximadamente del año 1960 se puede notar, en este plano escala-tiempo, un cuadrante de alta energía con períodos que van desde algo menos de 1 año hasta más de 8 años.

6.4.2 Río Uruguay

Los resultados se presentan en la figura 6.11. Se observan componentes de alta magnitud para periodicidad anual en los años 1940, 1952, 1972 y en el período 1982-1985. Con períodos de 2-3 años en los años 1961/62 y 3-4 años en los años 1983/86, la magnitud es elevada. Este mismo nivel de actividad luego se aprecia en períodos de alrededor de 6 años en los períodos 1940-52 y 1962-71. Hasta poco antes de 1960 se pueden ver en amplios intervalos actividad media en períodos de 6-8 años. La misma continúa hasta pasado el año 1975. A partir de 1970 el mismo grado de actividad se aprecia en la zona 2-4 años y 8-16 años.

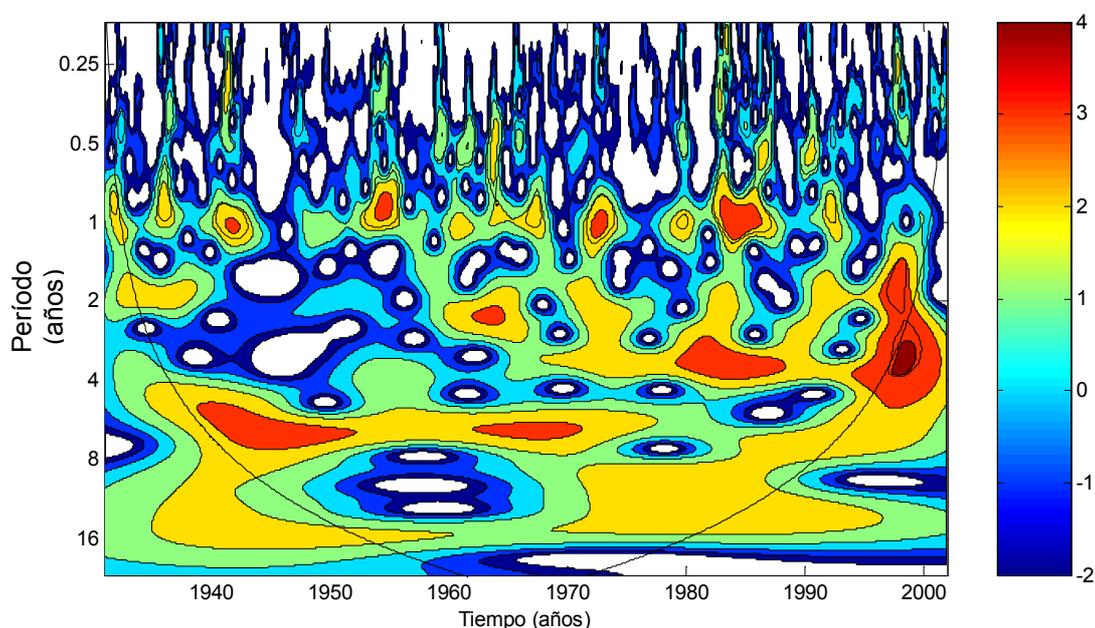


Figura 6.11 Espectro de potencia continuo para el río Uruguay

7 ANÁLISIS DE EVENTOS

Con vistas a definir escenarios de afluencia probable para el Río de la Plata, resulta de interés estudiar las características que presentan los períodos de aguas altas y de estiaje de los dos tributarios.

El análisis de estos períodos de abundancia o escasez hídrica, representativos de situaciones hidrológicamente distintivas, se efectuó sobre los registros disponibles definiendo valores umbrales de caudal.

Cabe aclarar que, a los fines de este estudio, las series disponibles empleadas de caudales medios mensuales imponen el grado de discretización temporal, de modo que se considera un período de aguas altas a la ocurrencia de caudales medios mensuales superiores a un umbral predefinido, independientemente de que un dado caudal mensual alto se deba a la ocurrencia dentro del mes de uno o más episodios de tormenta.

Es en el río Uruguay donde esta aclaración importa especialmente, dados los relativamente cortos tiempos de respuesta de la cuenca. En general, una onda de crecida generada en la alta cuenca se desarrolla, culmina y recede en un plazo generalmente no mayor que un mes y, muy posiblemente, dentro de unas dos semanas. En resumen, en un determinado mes en que resulte grande la magnitud del caudal medio, aquélla puede deberse a la ocurrencia de más de una onda de crecida de duración relativamente corta o, por el contrario, a un sostenimiento de caudales más bien altos por el pasaje de una onda más larga, posiblemente engrosada por fuertes aportes de los afluentes de margen brasileña.

Por el contrario, el río Paraná, especialmente si se lo estudia en una estación relativamente cercana a la desembocadura como lo es la de la ciudad de Paraná, presenta un comportamiento hidrológico totalmente distinto al de su contraparte mesopotámica. En ello influyen factores determinantes como la enorme diferencia de áreas de cuenca a favor de este río, a lo que se suman otros de importancia no menor como es la confluencia de dos ríos como el Alto Paraná y el Paraguay, la existencia de un vastísimo humedal como El Pantanal en las nacientes del Paraguay, el emplazamiento de un gran número de presas en su alta cuenca (más de 40 emprendimientos en el Alto Paraná en Brasil), la conformación de la red de drenaje con gran número de tributarios y un gradiente menor en el mapa de isoyetas. Todo lo anterior confluye al hecho de que las ondas de crecida a la altura de la estación analizada suelen ser de una duración mucho mayor que las del río Uruguay, generalmente mayor que un mes y llegando a superar incluso el año, tal como ocurrió en la crecida de 1982-83. Se concluye que para el caso de este gran río la discretización impuesta por un paso mensual es mucho más fina y representativa que para el río Uruguay.

7.1 FRECUENCIA DE PERÍODOS DE AGUAS BAJAS Y ALTAS

La selección de umbrales de caudal para identificar períodos de aguas altas fue realizada a partir de valores que superaran el valor del módulo. Este valor de umbral fue incrementado sucesivamente para definir la sensibilidad del análisis a esta elección. El mismo tipo de estudio se planteó para analizar los meses hídricamente menos ricos, definiendo períodos

de aguas bajas esta vez como la ocurrencia de caudales medios mensuales menores que un umbral de aguas bajas predefinido.

Las tablas 7.1 y 7.2 presentan los períodos de aguas altas y bajas identificados para el río Paraná en cada uno de los ciclos previamente establecidos. Las tablas 7.3 y 7.4 presentan la misma información para el río Uruguay. En las mismas se distinguen los valores de caudal umbral, la cantidad de períodos que verifican la condición de excedencia del umbral y la frecuencia anual de ocurrencia de estos eventos (tomando como referencia la cantidad de años del ciclo).

Tabla 7.1
Frecuencia anual de aguas altas en el río Paraná

Umbral Q (m³/s)	1931-1943		1944-1970		1971-2001	
	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia
17500	9	0.69	19	0.70	35	1.13
20000	8	0.62	12	0.44	33	1.06
22500	8	0.62	12	0.44	27	0.87
25000	6	0.46	10	0.37	20	0.65
28000	3	0.23	7	0.26	14	0.45
30000	1	0.08	6	0.22	10	0.32
32000	1	0.08	3	0.11	8	0.26

Tabla 7.2
Frecuencia anual de aguas bajas en el río Paraná

Umbral Q (m³/s)	1931-1943		1944-1970		1971-2001	
	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia
8000	2	0.15	2	0.07	0	0.00
9000	8	0.62	20	0.74	1	0.03
10000	9	0.69	28	1.04	3	0.10
11000	12	0.92	33	1.22	8	0.26
12000	14	1.08	31	1.15	16	0.52
13000	17	1.31	36	1.33	23	0.74
15000	12	0.92	26	0.96	35	1.13

Tabla 7.3
Frecuencia anual de aguas altas en el río Uruguay

Umbral Q (m3/s)	1931-1943		1944-1970		1971-2001	
	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia
6000	20	1.54	37	1.37	46	1.48
7000	21	1.62	29	1.07	39	1.26
8000	14	1.08	20	0.74	35	1.13
9000	11	0.85	15	0.56	34	1.10
10000	7	0.54	13	0.48	25	0.81
11000	6	0.46	8	0.30	24	0.77
15000	2	0.15	4	0.15	12	0.39
17000	1	0.08	2	0.07	9	0.29
18000	1	0.08	0	0.00	5	0.16

Tabla 7.4
Frecuencia anual de aguas bajas en el río Uruguay

Umbral Q (m3/s)	1931-1943		1944-1970		1971-2001	
	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia	Cantidad	Frecuencia
500	2	0.15	2	0.07	1	0.03
800	6	0.46	17	0.63	7	0.23
900	9	0.69	20	0.74	9	0.29
1000	11	0.85	23	0.85	13	0.42
1100	13	1.00	27	1.00	14	0.45
1200	12	0.92	27	1.00	17	0.55
1500	14	1.08	32	1.19	26	0.84
1700	15	1.15	34	1.26	33	1.06
2000	14	1.08	40	1.48	40	1.29
2500	16	1.23	49	1.81	46	1.48

Las figuras 7.1 y 7.2 presentan la evolución de la frecuencia de períodos de aguas bajas y altas, respectivamente para cada ciclo en el río Paraná en función de los valores del caudal umbral. La frecuencia de períodos de aguas altas es mayor en el ciclo más reciente, mientras la frecuencia de períodos de escorrentía pobre es mayor durante 1944-70, consistente con sus características de período seco.

En las figuras 7.3 y 7.4 se presentan los gráficos correspondientes al río Uruguay con las mismas características mencionadas para el río Paraná.

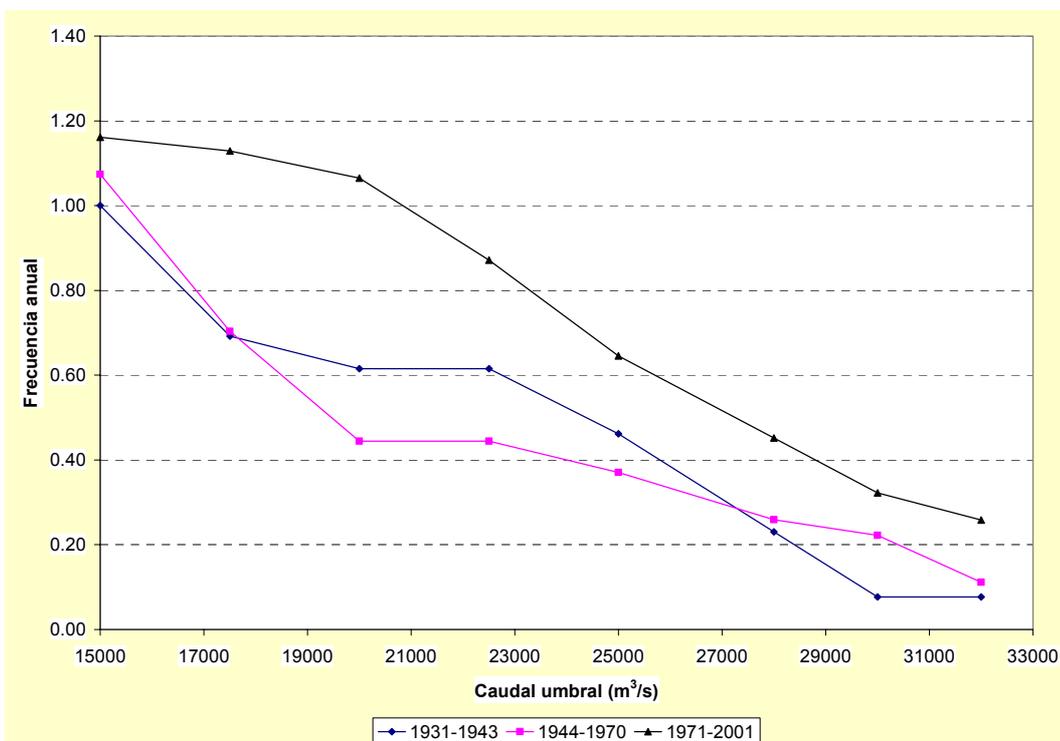


Figura 7.1 Frecuencia de períodos de aguas altas en el río Paraná

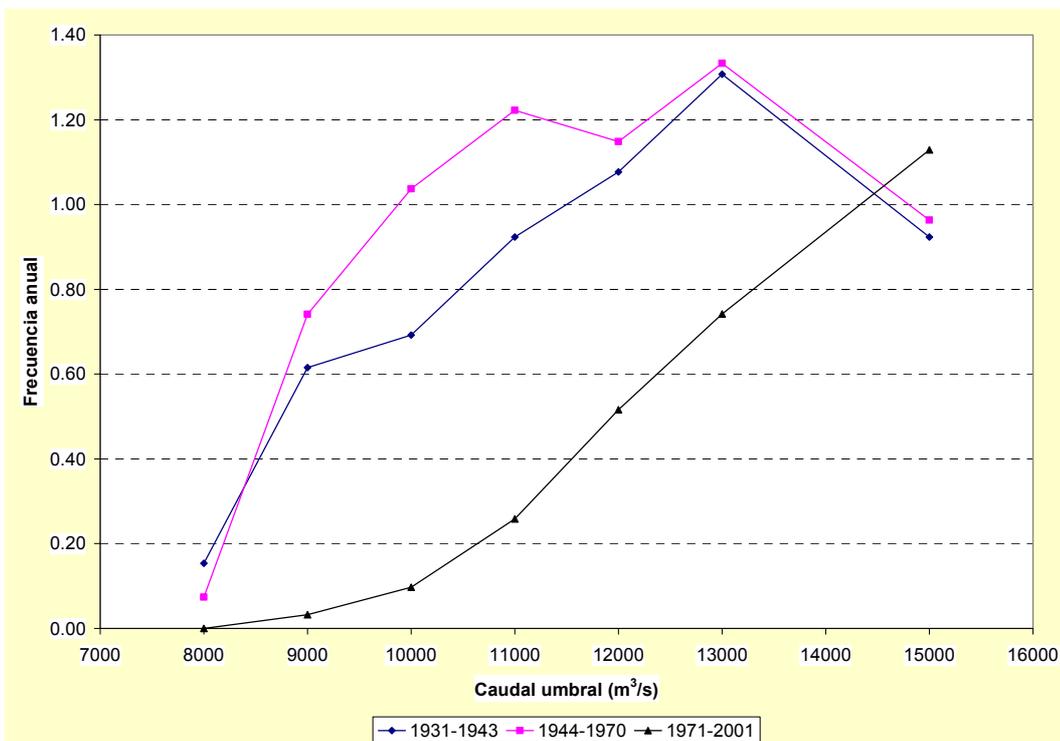


Figura 7.2 Frecuencia de períodos de aguas bajas en el río Paraná

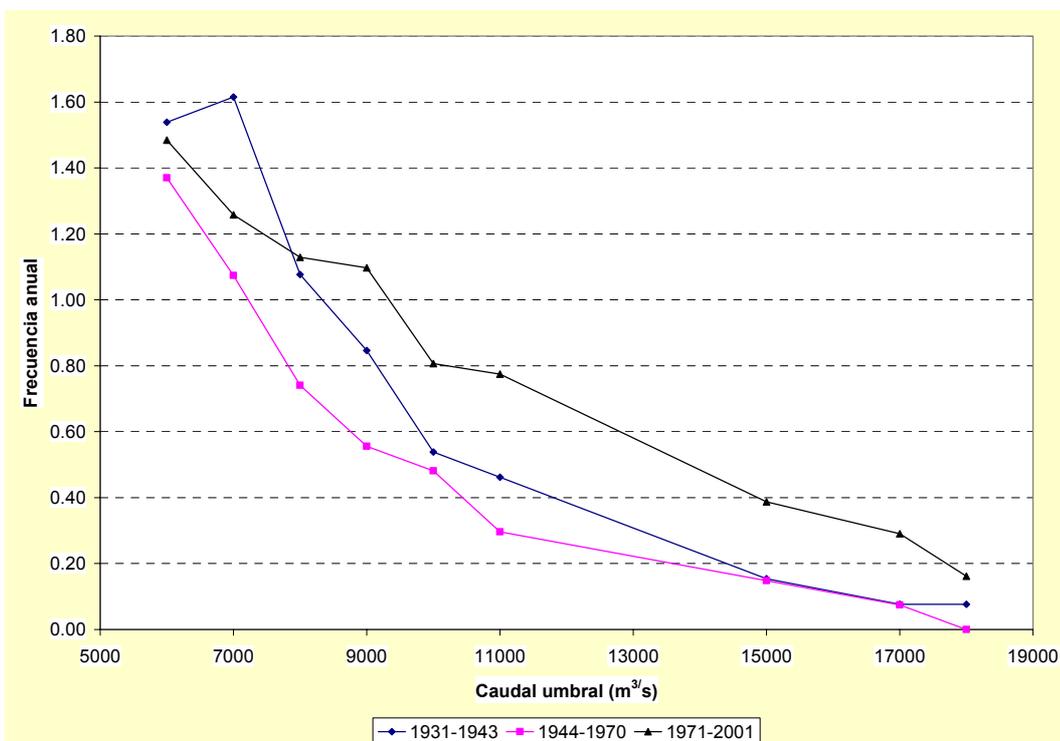


Figura 7.3 Frecuencia de períodos de aguas altas en el río Uruguay

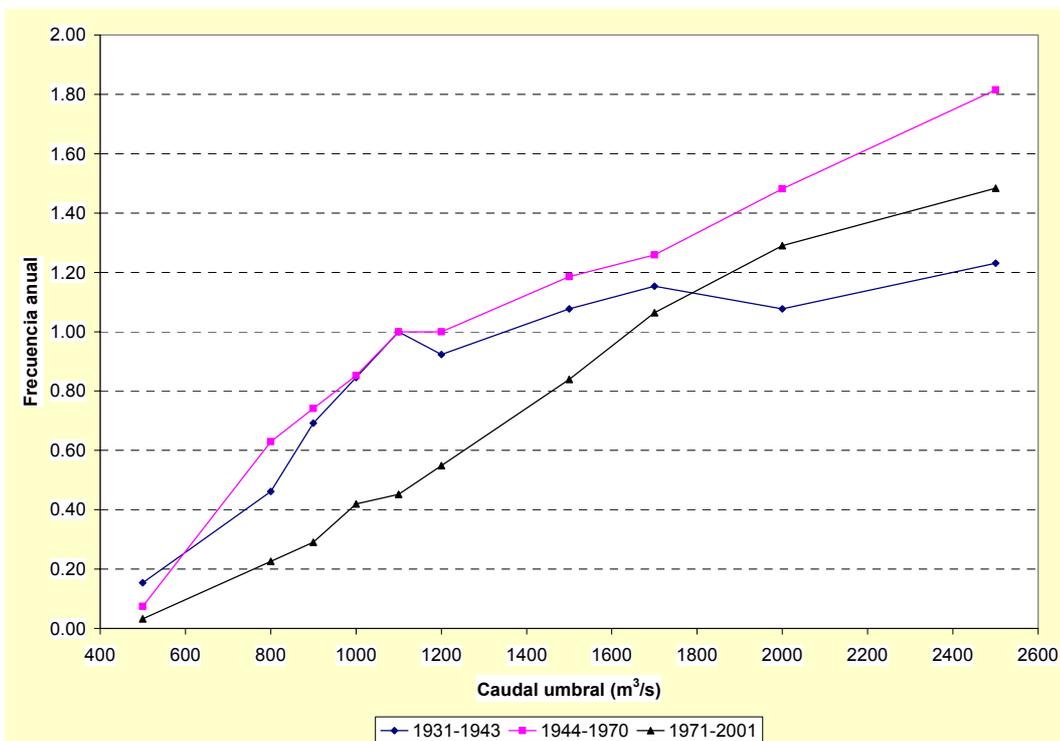


Figura 7.4 Frecuencia de períodos de aguas bajas en el río Uruguay

De los resultados del análisis anterior pueden interpolarse frecuencias de ocurrencia y períodos de interés de estos episodios en cada ciclo de análisis e inferir el valor del caudal umbral asociado. Los valores calculados se presentan en las tablas 7.5 y 7.6, para el río Paraná y en las tablas 7.7 y 7.8 para el Uruguay.

Tabla 7.5
 Frecuencia de ciclos de aguas altas en el río Paraná

Frecuencia	Período (años)	1931-43	1944-70	1970-2001
1	1	15000	15500	21000
0.5	2	24500	19500	27000
0.33	3	27000	26000	30000
0.25	4	27800	28500	32000
0.20	5	28300	30500	33000
0.10	10	29900	32000	43000

Tabla 7.6
 Frecuencia de ciclos de aguas bajas en el río Paraná

Frecuencia	Período (años)	1931-43	1944-70	1970-2001
1	1	11500	9800	14400
0.5	2	8750	8600	12000
0.33	3	8400	8400	11300
0.25	4	8200	8250	11000
0.20	5	8100	8200	10700
0.10	10	<8000	8100	10000

Tabla 7.7
 Frecuencia de ciclos de aguas altas en el río Uruguay

Frecuencia	Período (años)	1931-43	1944-70	1970-2001
1	1	8300	7200	9300
0.5	2	10500	9700	13900
0.33	3	12800	10900	16200
0.25	4	13700	12000	17300
0.20	5	14500	13500	17800
0.10	10	16300	1630	>18000

Tabla 7.8
Frecuencia de ciclos de aguas bajas en el río Uruguay

Frecuencia	Período (años)	1931-43	1944-70	1970-2001
1	1	1100	1100	1650
0.5	2	820	720	1150
0.33	3	670	630	930
0.25	4	600	600	850
0.20	5	580	570	750
0.10	10	-	550	600

Una vez seleccionada la frecuencia de interés y el valor de umbral de caudal asociado, pueden identificarse los períodos de aguas altas o bajas localizándolos en el tiempo y caracterizándolos a través de su permanencia y el valor extremo (máximo o mínimo) del caudal medio mensual.

Ahora bien, se sabe que la ocurrencia de episodios fuertes del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur provoca impactos climáticos severos en distintas regiones del planeta, y en particular en el litoral de la República Argentina, donde las consecuencias son inundaciones en el Río Paraná (Berri, 1996). Por su parte, Mechoso y Perez Iribarren (1992) encontraron que los caudales del río Uruguay tienden a estar bien por encima de la media durante los años Niño. En términos generales se indica que condiciones más húmedas que la normal se observan desde el sur de Brasil hacia el centro de Argentina, cuando se está en presencia de un fenómeno Niño (cálido), con precipitaciones por encima de la media en el noroeste de Argentina, Uruguay y Paraguay (principalmente en primavera y verano), precipitaciones abundantes (principalmente en primavera y lluvias intensas de mayo a julio) y aumento de la temperatura media en el sur de Brasil. A pesar que la correspondencia entre lluvia y caudal es indirecta y presumiblemente no lineal, es razonable esperar que las anomalías de precipitación se asocien a anomalías del mismo signo en los caudales.

En el Estudio de regulación del Valle Aluvial de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay para el control de Inundaciones (W. Halcrow and Partners-SUCCE, 1994) se relacionan los eventos cálidos en la corriente del Niño y años con crecidas registradas cuyo pico supera al del intervalo de retorno de 1:10 años.

Cacik (1995) encontró coeficientes de correlación máximos de $r=0,64$ entre las anomalías de temperatura de la zona Niño 3 con los caudales trimestrales registrados en las estaciones Posadas y Corrientes del río Paraná.

Ya que el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) es el modo dominante de la variabilidad climática interanual global y reaparece con una periodicidad de entre 2 y 7 años, se ha seleccionado una periodicidad media de 4 años (frecuencia de 0,25) para distinguir períodos de abundancia o escasez hidrológica en los afluentes del Río de la Plata.

Las tablas 7.9 a 7.14 muestran los períodos identificados en los tres ciclos de análisis, que se asocian a una frecuencia de ocurrencia de 0,25. El mismo análisis efectuado para el río Uruguay se resume en las tablas 7.15 a 7.20. Resulta claro que ya que estos episodios son definidos por caudales que permanecen superiores o inferiores a un valor umbral, ocasionalmente pueden individualizarse varias situaciones que en realidad corresponden a un mismo proceso. Como ejemplo en el río Uruguay en el ciclo 1944-70 se identifican dos bajas inferiores a 600 m³/s con picos en abril y junio de 1945 cuando en realidad se trata del mismo estiaje (lo mismo ocurre en el Paraná en octubre-diciembre de 1955 o en noviembre de 1999-enero de 2000).

Tabla 7.9

Períodos de aguas altas sobre umbral de 27800 m³/s (Río Paraná, 1931-43)

Alta N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qpico (m3/s)	Tpico (meses)	Fecha de Pico	
						Mes	Año
1	Abr-31	Jul-31	4	32193	0.98	4	31
2	May-32	May-32	1	28967	0.32	5	32
3	Nov-35	Nov-35	1	29139	0.11	11	35

Tabla 7.10

Períodos de aguas bajas inferiores al umbral de 8200 m³/s (Río Paraná, 1931-43)

Baja N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qmínimo (m3/s)	Tmínimo (meses)	Fecha de Mínimo	
						Mes	Año
1	Jul-37	Nov-37	5	7823	2.11	9	34
2	Ago-37	Sep-37	2	8050	0.14	8	37
3	Sep-38	Oct-38	2	7929	1	10	38

Tabla 7.11

Períodos de aguas altas sobre umbral de 28500 m³/s (Río Paraná, 1944-70)

Alta N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qpico (m3/s)	Tpico (meses)	Fecha de Pico	
						Mes	Año
1	Abr-46	Abr-46	1	30107	0.9	4	46
2	Abr-51	Abr-51	1	31114	0.39	4	51
3	Mar-59	Abr-59	2	32005	0.57	3	59
4	Abr-61	May-61	2	35503	0.49	4	61
5	Abr-65	Abr-65	1	30477	0.19	4	65
6	Mar-66	Abr-66	2	42906	0.56	3	66

Tabla 7.12

Períodos de aguas bajas inferiores al umbral de 8250 m³/s (Río Paraná, 1944-70)

Baja N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qmínimo (m ³ /s)	Tmínimo (meses)	Fecha de Mínimo	
						Mes	Año
1	Jun-44	Dic-44	7	7752	3.08	9	44
2	Sep-45	Oct-45	2	8013	0.25	9	45
3	Sep-48	Sep-48	1	8125	0.1	9	48
4	Sep-49	Dic-49	4	7833	2.2	11	49
5	Sep-51	Oct-51	2	8079	0.41	9	51
6	Oct-55	Oct-55	1	8134	0.04	10	55
7	Dic-55	Dic-55	1	8186	0.23	12	55
8	Sep-62	Sep-62	1	8239	0.13	9	62
9	Sep-63	Sep-63	1	8075	0.38	9	63
10	Ago-68	Sep-68	2	8047	0.77	8	68

Tabla 7.13

Períodos de aguas altas sobre umbral de 32000 m³/s (Río Paraná, 1971-01)

Alta N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qpico (m ³ /s)	Tpico (meses)	Fecha de Pico	
						Mes	Año
1	Feb-77	Mar-77	2	34341	1.04	3	77
2	Dic-82	Ago-83	9	51230	7.17	7	83
3	Feb-90	Feb-90	1	32187	0.01	2	90
4	Jun-92	Jul-92	1	46506	0.97	6	92
5	Mar-95	Mar-95	1	34297	0.29	3	95
6	Mar-97	Mar-97	1	35172	0.54	3	97
7	Dic-97	Ene-98	2	32894	1.01	1	98
8	Mar-98	Jul-98	4	49451	2.72	5	98

Tabla 7.14

Períodos de aguas bajas inferiores al umbral de 11000 m³/s (Río Paraná, 1971-01)

Baja N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qmínimo (m3/s)	Tmínimo (meses)	Fecha de Mínimo	
						Mes	Año
1	Sep-71	Dic-71	4	8926	3.76	12	71
2	May-78	Jul-78	3	10457	0.18	5	78
3	Sep-81	Sep-81	1	10986	0.02	9	81
4	Dic-85	Ene-86	2	10107	1.05	1	86
5	Dic-88	Ene-89	2	9995	0.56	12	88
6	Nov-99	Nov-99	1	10869	0.22	11	99
7	Ene-00	Ene-01	1	10825	0.97	1	0
8	Ene-02	Ene-02	2	9924	1.47	9	1

Tabla 7.15

Períodos de aguas altas sobre umbral de 13700 m³/s (Río Uruguay, 1931-43)

Alta N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qpico (m3/s)	Tpico (meses)	Fecha de Pico	
						Mes	Año
1	Oct-35	Oct-35	1	14524	0.09	10	35
2	Jun-36	Jun-36	1	16134	0.4	6	36
3	May-41	May-41	1	22347	0.79	5	41
4	Ago-41	Ago-41	1	14508	0.11	8	41

Tabla 7.16

Períodos de aguas bajas inferiores al umbral de 600 m³/s (Río Uruguay, 1931-43)

Baja N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qmínimo (m3/s)	Tmínimo (meses)	Fecha de Mínimo	
						Mes	Año
1	Mar-31	Mar-31	1	591	0.29	3	31
2	May-35	May-35	1	382	1.02	5	35
3	Ene-43	Mar-43	3	419	1.07	1	43

Tabla 7.17

Períodos de aguas altas sobre umbral de 12000 m³/s (Río Uruguay, 1944-70)

Alta N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qpico (m³/s)	Tpico (meses)	Fecha de Pico	
						Mes	Año
1	Oct-53	Oct-53	1	14071	0.32	10	53
2	Jul-54	Jul-54	1	15293	1.13	7	54
3	Oct-54	Oct-54	1	14149	0.32	10	54
4	Abr-59	Abr-59	1	16215	0.33	4	59
5	Oct-61	Oct-61	1	14232	0.37	10	61
6	Nov-63	Nov-63	1	17382	1.12	11	63
7	Sep-65	Sep-65	1	17266	0.48	9	65
8	Sep-67	Sep-67	1	12436	0.07	9	67
9	Jun-72	Jul-72	2	15408	0.27	6	72

Tabla 7.18

Períodos de aguas bajas inferiores al umbral de 600 m³/s (Río Uruguay, 1944-70)

Baja N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qmínimo (m³/s)	Tmínimo (meses)	Fecha de Mínimo	
						Mes	Año
1	Dic-44	Abr-45	5	438	4.06	4	45
2	Jun-45	Jun-45	1	429	0.83	6	45
3	Feb-49	Feb-49	1	475	0.33	2	49
4	Dic-49	Dic-49	1	563	0.06	12	49
5	Ago-51	Ago-51	1	555	0.03	8	51
6	May-60	May-60	1	551	0.09	5	60
7	Mar-65	Mar-65	1	553	0.21	3	65
8	Ene-68	Ene-68	1	581	0.01	1	68

Tabla 7.19

Períodos de aguas altas sobre umbral de 17300 m³/s (Río Uruguay, 1971-01)

Alta N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qpico (m ³ /s)	Tpico (meses)	Fecha de Pico	
						Mes	Año
1	Sep-72	Sep-72	1	17682	0.06	9	72
2	Nov-82	Nov-82	1	19935	0.23	11	82
3	May-83	May-83	1	21418	0.31	5	83
4	Jul-83	Jul-83	1	20060	0.28	7	83
5	Jun-92	Jun-92	1	17647	0.05	6	92
6	Nov-97	Nov-97	1	20633	0.77	11	97
7	Feb-98	Feb-98	1	18085	0.32	2	98
8	Abr-98	Abr-98	1	17384	0.03	4	98

Tabla 7.20

Períodos de aguas bajas inferiores al umbral de 850 m³/s (Río Uruguay, 1971-01)

Baja N°	Inicio	Fin	Duración (meses)	Qmínimo (m ³ /s)	Tmínimo (meses)	Fecha de Mínimo	
						Mes	Año
1	Dic-71	Dic-71	1	485	0.98	12	71
2	May-78	May-78	1	653	1.03	5	78
3	Feb-79	Feb-79	1	575	0.86	2	79
4	Abr-82	Abr-82	1	628	0.24	4	82
5	Ene-85	Ene-85	1	793	0.06	1	85
6	Dic-85	Ene-86	2	541	0.25	12	85
7	Ene-89	Ene-89	1	812	0.14	1	89
8	Mar-91	Mar-91	1	821	0.04	3	91
9	Dic-99	Feb-00	3	765	0.06	12	99

Los resultados anteriores presentados en las tablas 7.9 a 7.20 pueden visualizarse en las figuras 7.5 y 7.6 para el río Paraná y en las 7.7 y 7.8 para el río Uruguay, para períodos de aguas altas y bajas, respectivamente. En ellas, se representa la magnitud de la excedencia o déficit de caudal medio mensual respecto del umbral definido.

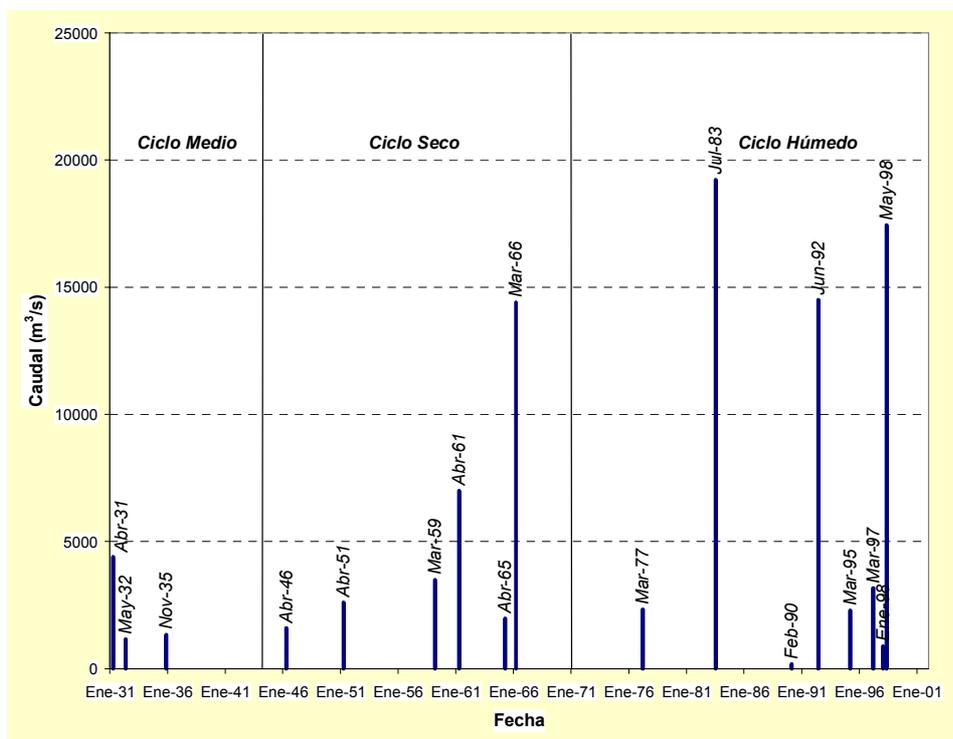


Figura 7.5 Caudales medios mensuales excedentes del umbral de aguas altas en el río Paraná

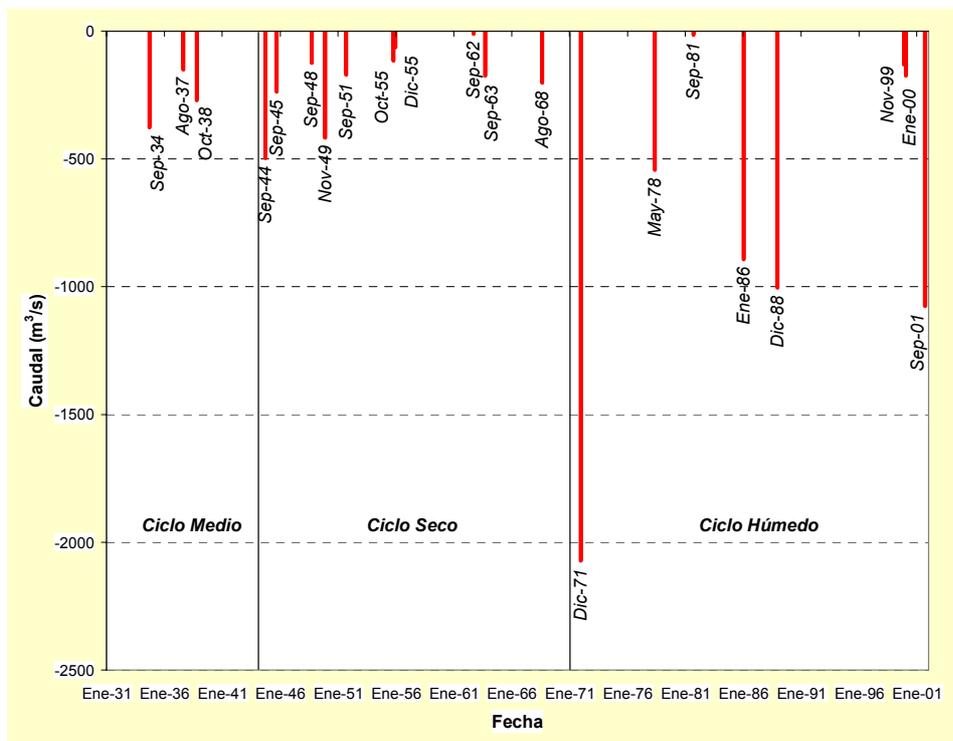


Figura 7.6 Caudales medios mensuales inferiores al umbral de aguas bajas en el río Paraná

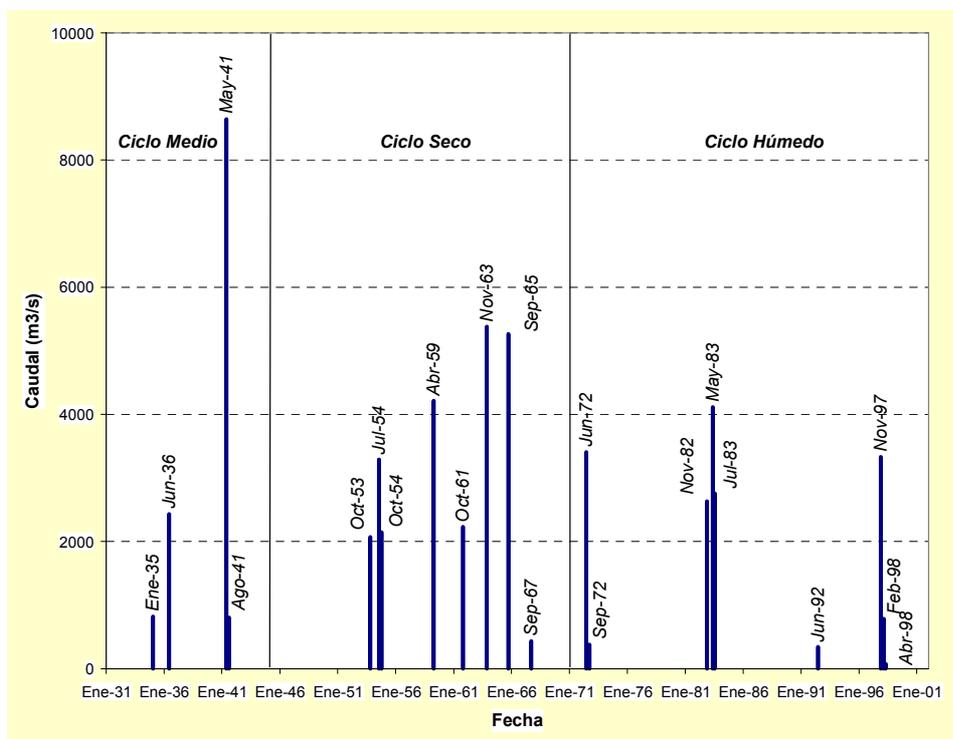


Figura 7.7 Caudales medios mensuales excedentes del umbral de aguas altas en el río Uruguay

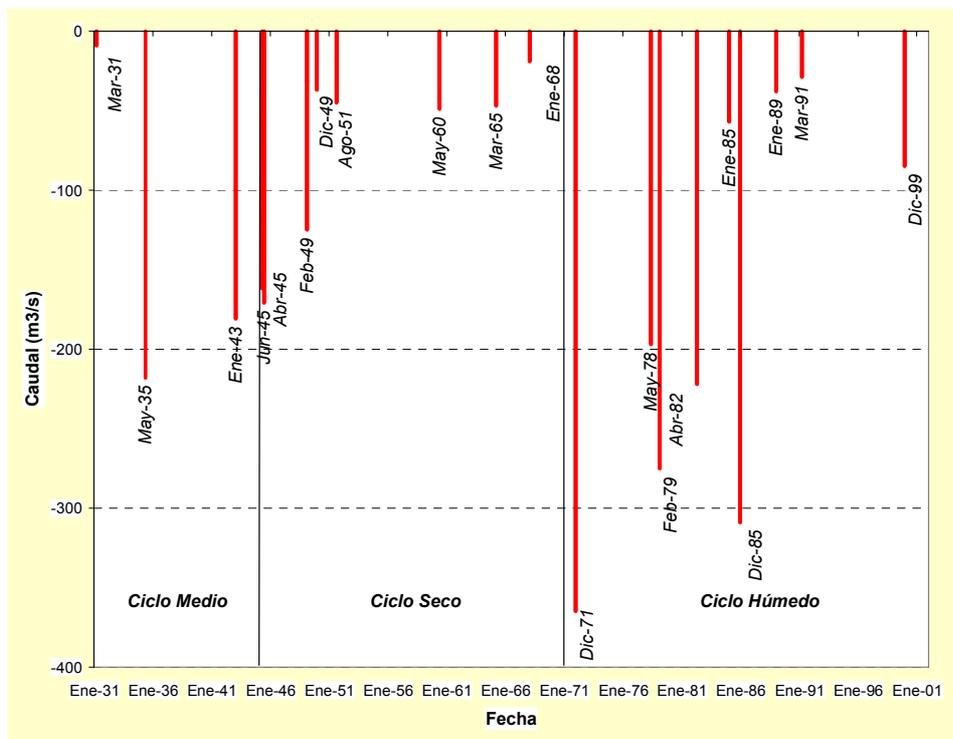


Figura 7.8 Caudales medios mensuales inferiores al umbral de aguas bajas en el río Uruguay

Se advierte que en el Río Paraná los caudales más altos ocurren predominantemente en marzo, abril y mayo. A partir de la década del 70 la magnitud de los caudales medios mensuales extremos en períodos de aguas altas se incrementa sensiblemente (en promedio). En el mismo período, los caudales bajos extremos también son más agudos.

En el río Uruguay no se advierte claramente un cambio en las tasas de excedencia que, a excepción de mayo de 1941, son mayores en el período que se extiende entre 1954 y 1972. Los períodos de aguas bajas más intensos se concentran entre 1970 y 1985. El impacto de almacenamiento aguas arriba por la cadena de embalses brasileña, que afecta el régimen normal de estiajes atenuándolo, no parece afectar la magnitud de las bajantes pico.

8 CONCLUSIONES

A continuación, se sintetizan las principales conclusiones obtenidas del estudio de las series de caudales (medios mensuales y medios anuales) de los ríos Paraná y Uruguay sobre el período 1931-2001.

1) *Calidad de los datos:*

Se consideran lo suficientemente precisos para la presente aplicación. En otras palabras, los errores de que están afectados no deberían incidir significativamente sobre las conclusiones.

2) *Ciclos:*

En concordancia con estudios previos, se ha establecido fehacientemente un cambio de tendencia en ambos ríos desde principios de la década del 70. Este cambio ha sido materializado en 1971. Desde entonces se desarrolla un ciclo de características húmedas.

Menos claro resulta el cambio de tendencia, desde un ciclo de características medias hacia uno seco, que se ha indicado en estudios antecedentes para alrededor de 1943. De hecho, el presente estudio no ha encontrado evidencias firmes de este cambio. Sin embargo, sí puede verificarse una disminución mensurable del caudal medio, por lo que se ha aceptado considerar que entre 1944 y 1970 se desarrolla un ciclo relativamente seco.

3) *Caracterización general:*

Durante el ciclo húmedo 71-01 el caudal medio del río Paraná ha resultado un 15% superior a la media histórica sobre el período completo de análisis (31-01). Ese aumento trepa a 33% si se lo compara con el caudal medio del ciclo precedente (44-70), de características secas. En el caso del río Uruguay estos guarismos son totalmente similares, 13 y 33%, respectivamente, indicando que el cambio relativo es básicamente el mismo para ambos ríos.

Los aumentos de los caudales bajo (percentil 75 de superación) y alto (percentil 25 de superación) del río Paraná para el ciclo 71-01 respecto del 44-70 son ambos de alrededor del 39%, poniendo en evidencia el aumento de la amplitud de variación del caudal, es decir, un aumento de los picos de crecida y bajante respecto del caudal medio. En particular, se observa que el crecimiento absoluto de los caudales altos es muy significativo. En cambio, para el río Uruguay los guarismos son de 64% y 14%, respectivamente, ó, más significativamente, de entre 800 y 900 m³/s para ambos, indicando que los umbrales de caudal bajo y alto han aumentado en forma rígida, es decir, que prácticamente se ha mantenido la misma amplitud de variación del caudal alrededor del nuevo valor medio.

4) Estacionalidad:

El río Paraná presenta una estacionalidad marcada en los tres ciclos, con el caudal medio mensual máximo en marzo o abril y el mínimo en septiembre.

La estacionalidad del río Uruguay es menos evidente. No obstante, puede hablarse de dos picos máximos, con el segundo siempre significativo y fijo en octubre y el primero, de relativamente poca envergadura durante el ciclo 44-70, produciéndose entre mayo y julio. El mínimo es único y se da en enero.

5) Variabilidad interanual:

En el caso del río Paraná la primera componente principal explica más del 70% de la variabilidad. Incorporando la segunda componente principal se alcanza el 85%. Esa primera componente muestra el mayor contenido energético en períodos de aproximadamente 17 y 8 años. La segunda componente muestra una clara predominancia del período de alrededor de 4 años.

Para el río Uruguay la explicación de la variabilidad por la primera componente principal alcanza al 50%, llegándose hasta más del 70% con la segunda componente. El mayor contenido energético de la primera componente principal se distribuye entre períodos de alrededor de 14, 8 y 6 años. Para la segunda componente las contribuciones principales se dan en 6, 4 y 3 años.

6) Variabilidad dentro de cada ciclo:

En el río Paraná se han incentivado fuerte y continuamente las componentes de alrededor de 8 años durante el tercer ciclo (71-01), lo cual parece correlacionar con la sucesión de crecidas extraordinarias observadas en este período (82-83, 92 y 98). También se nota una activación intermitente de las componentes de entre 2 y 4 años, en concomitancia con la ocurrencia de esas crecidas extraordinarias.

En el río Uruguay, por el contrario, se observa una desactivación de las componentes de alrededor de 6 años al comenzar el ciclo húmedo, activándose en cambio componentes alrededor de los 4 años.

7) Eventos:

En el ciclo 71-01 se ha producido la mayor secuencia de picos extremos de crecida y de bajante en el río Paraná. En el río Uruguay esto sólo se ha manifestado para las bajantes.

REFERENCIAS

1. Subsecretaría de Recursos Hídricos, Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable: 1997, 'Estadística Hidrológica 1997', República Argentina..
2. Giacosa, R., Paoli, C. y Cacik, P..2000, 'Conocimiento del Régimen Hidrológico', en "El Río Paraná en su Tramo Medio. Contribución al Conocimiento y Prácticas Ingenieriles en un Gran Río de Llanura", Capítulo 2. C. Paoli y M. Schreider, editores. Centro de Publicaciones Universidad Nacional del Litoral, Ciudad de Santa Fe, República Argentina.
3. García, N. and Vargas, W.: 1998, 'The temporal climatic variability en the Río de la Plata basin displayed by the river discharges', Climate Change Vol 38, 359-379
4. García, N. y Vargas, W.: 1996, 'Análisis de la variabilidad climática en la cuenca del Plata a través de sus caudales', Anales del II Congreso Latino-Americano e Ibérico de Meteorología, 18-25 October, Belo Horizonte, Brasil.
5. Sneyers, R., 1975: 'Sur L'analyse statistique des séries d'observatio', Technical Note No. 143, WMO., Geneve.
6. Green, P. E.,1978: 'Analyzing Multivariate Data', The Dyden Press, Illinois, 519 pp.
7. Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1971: 'Random data: Analysis and measurement procedures', Wiley Interscience, New York.
8. Burrus, S., Gopinath, R.A. and Gvo, H., 1997: 'Introduction to Wavelet Transforms', A Primer, Prentice Hall.
9. Vetterly, M. and Kovacevic, J., 1995: 'Wavelets and Subbands Coding', Prentice Hall.
10. Berri, G. J. (ed), 1996: 'El Niño Impact on Water Resources in Central and South America and New Methodologies of Practical Use to Seasonal and Interannual Hydrologic Forecast, IRIP-CR-SF96/1, International Research Institute for Climate Prediction (IRI), Palisades, New York, 99 p.
11. Mechoso, C. and Perez Iribarren, G.: 1992, 'Streamflow in Southeastern South America and the Southern Oscillation', J. Clim. 5, 1535-1539.
12. W. Halcrow and Partners-SUCCE: 1994, 'Estudio de Regulación del Valle Aluvial de los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay para el Control de Inundaciones'.
13. Cacik, P., 1995: 'Relaciones entre variabilidad climática en los océanos Pacífico y Atlántico y los caudales registrados en un sector de la Cuenca del río Paraná', IRIP-CR_SF96/1.