

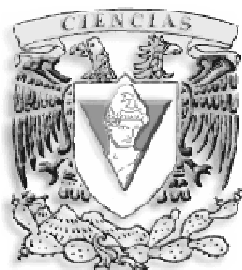
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD DE LAS
DESCARGAS DE AGUA DE LOS
PRINCIPALES RÍOS DEL SUR DE LA
CUENCA HIDROLÓGICA DEL
GOLFO DE MÉXICO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
A C T U A R I A
P R E S E N T A
MAYRA LORENA RIVERÓN ENZÁSTIGA

DIRECTOR DE TESIS: DR. DAVID ALBERTO SALAS DE LEÓN



2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVO	7
CAPÍTULO II. DATOS Y MÉTODOS	8
2.1 Origen de la información	8
2.2 Características de las series de tiempo	8
2.3 Series analizadas	9
2.4 Estaciones de aforo	9
2.5 Análisis estadístico exploratorio de las series	10
2.6 Descargas diarias	11
2.7 Evolución temporal de las descargas diarias por año	11
2.8 Promedios, desviaciones estándar, varianzas anuales y anomalías estandarizadas redondeadas o años anómalos	11
2.9 Años normales	11
2.10 Espectros de potencia	12
2.11 Cambios de fase de las oscilaciones a diferentes frecuencias	12
2.12 Dimensión fractal (D) de las descargas de los ríos	12
CAPÍTULO III. RESULTADOS	14
3.1 Análisis estadístico exploratorio	14
3.2 Descargas Diarias	16
3.3 Evolución de las descargas diarias por años	23
3.4 Promedios, desviaciones estándar, varianzas anuales y anomalías estandarizadas redondeadas	33
3.5 Años normales	43
3.6 Espectros de potencia	52
3.7 Principales periodos de oscilación	60
3.8 Cambios de fase de las oscilaciones a diferentes frecuencias	61
3.9 Dimensión fractal (D) de las descargas de los ríos	69
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN	72
CONCLUSIONES	77
REFERENCIAS	79

RESUMEN

Se analizaron series de tiempo de las descargas de agua de los 15 ríos más caudalosos del sur de la cuenca hidrológica del Golfo de México por diferentes métodos estadísticos, se obtuvieron las principales frecuencias de oscilación de las descargas mediante análisis espectral y se calcularon las dimensiones fractales de las series. Los resultados muestran que no hay una disminución significativa en los 30 años analizados en las descargas de los ríos, por lo que la disminución en el abasto de agua se debe fundamentalmente al incremento en la demanda de dicho recurso, resultado del crecimiento de la población y de los procesos agrícolas, ganaderos e industriales. Las principales frecuencias de oscilación corresponden a periodos de un año, seis y tres meses, los cuales están asociados con las temporadas de lluvias, las tormentas invernales y las de verano. Los valores normales establecen los máximos de descargas de junio a principios de noviembre con una disminución entre julio y agosto producto de la canícula. Las anomalías estandarizadas no muestran eventos anómalos de consideración. Las descargas de agua de los ríos estudiados son fuertemente dependientes de los procesos océano-atmósfera como El Niño y La Niña. Un resultado importante es la asociación que se puede hacer de los ríos en función de la dimensión fractal de sus descargas.

ABSTRACT

River water discharges time series of the 15 more important rivers of the southern Gulf of Mexico were analyzed by different statistical methods. The main oscillation frequencies of the river discharges were obtained by means of spectral analysis, and fractal dimension. The results show that there is not a significant decrease in the river discharges in the 30 years analyzed, the decrease in the water supplies owes fundamentally to the increment in the population, the agricultural processes, and the industrial cattlemen development. The main oscillation frequencies correspond to periods of one year, and six and three months, which are associated with the rain seasons, the winter storms, the summer storms, and hurricane seasons. The maxima discharge of the normal values was present from the beginning of June until November with a decrease in July and August product of the midsummer. The standardized anomalies don't show anomalous events of consideration. The river discharges of the studied rivers are strongly dependent of the ocean-atmosphere processes as El Niño and La Niña. An important result is the river clustering that can be made as function of their fractal river discharge dimensions.

OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es describir la variabilidad en los flujos o descargas de los principales ríos del sur de la cuenca del Golfo de México. Como metas se establecieron: encontrar los periodos característicos de las oscilaciones de las descargas en las series y las tendencias de los flujos.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia el desarrollo de los países ha dependido de la existencia de agua. La población de México y sus actividades socio-económicas se han incrementado sustancialmente en los últimos 20 años, este crecimiento ha requerido de condiciones favorables para su sostenimiento: infraestructura, alimentos, transporte, educación y un adecuado abasto de agua. El agua generalmente es escasa en México. Es abundante en regiones de poca densidad poblacional y de modesta actividad económica y, escasa en los polos industriales desarrollados, generadores de un alto porcentaje del producto interno bruto (PIB).

La importancia del agua, en los últimos años, es tan grande que se formó un Consejo Mundial del Agua. En octubre de 2003, la Junta de Gobierno del Consejo Mundial del Agua (CMA) otorgó a México la organización del IV Foro Mundial del Agua. En la página electrónica del IV Foro Mundial del Agua¹ se puede leer: *“El Foro Mundial del Agua es una iniciativa del Consejo Mundial del Agua (CMA) que tiene por objeto el despertar la conciencia sobre los asuntos del agua en todo el mundo. Como el evento internacional más importante sobre el tema, el Foro busca propiciar la participación y diálogo de múltiples actores con el fin de influir en la elaboración de políticas a nivel global, asegurando un mejor nivel de vida para la humanidad en todo el mundo y un comportamiento social más responsable hacia los usos del agua, en congruencia con la meta de alcanzar un desarrollo sostenible. El Foro Mundial del Agua se estableció como un proceso abierto y participativo que se nutre de los conocimientos, experiencias y aportaciones de la comunidad mundial del agua. Privilegia el valor del conocimiento y las experiencias locales como factor clave en el éxito de la formulación de políticas hídricas, la formulación de políticas dirigidas al apoyo de acciones locales a escala mundial y reconoce que los problemas del agua son complejos y tienen muchos ángulos, por lo tanto,*

¹ <http://www.worldwaterforum4.org.mx/home/genwwf.asp?lan=spa>

el Foro buscará promover el diálogo entre los sectores responsables de las políticas de agua y los diferentes usuarios para responder de manera adecuada a las demandas de la población”.

México es un país que enfrenta grandes problemas de agua. Es probablemente, el país que gasta más dinero en agua embotellada, lo cual es sintomático de la baja calidad y disponibilidad de agua de uso doméstico. La presión social sobre la demanda de agua para fines domésticos, agrícolas, ganaderos, industriales y para generar electricidad ha crecido fuertemente en los últimos años. En muchos lugares del país existe un desequilibrio entre la demanda y la oferta derivada de las reservas existentes en la región, lo cual se trata de subsanar llevando agua desde regiones alejadas. La mayoría de las grandes ciudades del país presentan este tipo de problemas y la ciudad de México es el mejor ejemplo de ello.

México estableció a principios de los años 20's una política de desarrollo de infraestructura hidráulica que fuera capaz de responder a las necesidades de la población en materia de agua potable para consumo humano y para actividades industriales y de generación de energía eléctrica, dejando en segundo plano el desarrollo de sistemas de riego agrícola y para uso en la ganadería. A partir de los 70's se incrementa la inversión para el desarrollo de infraestructura hidráulica y se forman complejos distritos agrícolas con riego altamente tecnificado. A la par, se establecieron oficinas gubernamentales para monitorear la cantidad y calidad del agua de los ríos, lagos y mantos acuíferos subterráneos, en especial cabe mencionar la creación de la Comisión Nacional del Agua (CNA). A fines de los 90's se observa una disminución drástica en las actividades de desarrollo de infraestructura hidráulica y de acopio de información de los recursos en el país, situación que contrasta con la actitud de los países denominados de primer mundo, basta con mencionar que Canadá, uno de los países con mayor cantidad de agua de buena calidad, manifiesta una creciente preocupación por sus recursos hídricos e invierte grandes cantidades en mejorar su infraestructura y sus sistemas de información y planeación de uso del agua (Brookshire y Ganderston, 2004). Por otro lado, el sur del estado de California en los USA importa el 70 % del agua que consume (aproximadamente 1500 millones de dólares americanos al año), lo que le representa un gasto considerable ya que además de comprarla a sus estados vecinos tiene que transportarla y almacenarla; en la actualidad

tratan de eliminar o disminuir el gasto invirtiendo grandes cantidades en investigación sobre el agua en el sur de California (Quinion, 2006; Pulido-Velázquez *et al.*, 2004).

El agua se ha transformado en un recurso económico negociable de alto valor y en algunos casos, generador de conflictos. El valor y el costo que tiene el agua se han ido incrementando con el aumento de la población, en algunas regiones cuesta más un litro de agua embotellada que un litro de gasolina (Mirre, 2004).

Por otro lado, hay un gran número de trabajos efectuados en torno a estimar las oscilaciones de las descargas de agua dulce de los ríos en países europeos, USA, Canadá, Japón, China, Australia y Argentina (Dai y Trenberth, 2002; Baumgartner y Reichel, 1975). Estudios recientes (Twilley, 2006) enfocados a identificar estructuras climáticas coherentes con la circulación atmosférica, han sido de particular importancia para interpretar las variaciones y persistencia de eventos en series de tiempo hidrológicas: lluvias, humedad del suelo, flujos en ríos, sequías, entre otros. Las fluctuaciones climáticas de baja frecuencia se reflejan localmente en la variabilidad interanual de las variables hidroclimáticas (temperatura, precipitación, gasto o descarga de los ríos), que son elementos claves para entender la dinámica de los ciclos hidrológicos (USCCSP, 2006). Un mejor entendimiento entre las condiciones regionales de las fluctuaciones climáticas de baja frecuencia y las variaciones de las descargas de los ríos nos pueden llevar a establecer mejores modelos y tener mejores predicciones, con un consecuente mejor manejo de los recursos hídricos. Sin embargo, establecer un análisis y efectuar comparaciones de las variables atmosféricas y su relación con los regímenes hidrológicos resulta una tarea difícil en México debido a la falta de una red adecuada de estaciones meteorológicas. Como una alternativa se pueden analizar las descargas de los ríos ya que estos actúan como integradores espaciales y temporales de las precipitaciones en regiones específicas (Maurer *et al.*, 2004). De esta forma, las descargas de los ríos pueden servir como índices de la variabilidad interanual hidroclimática a escala local y regional.

Para poder responder a las demandas de la población, en cuestión de agua, se requiere de infraestructura adecuada y de un buen conocimiento del comportamiento del

recurso hídrico, por esto se consideró importante estudiar las oscilaciones que presenta el flujo de los ríos del sur de la cuenca del Golfo de México, principales fuentes potenciales de abastecimiento para la zona centro del país, entre las cuales se localiza el Distrito Federal. Una correcta representación del régimen de frecuencias de las descargas de los ríos es una componente básica en muchas aplicaciones en hidrología, incluyendo los estudios sobre variabilidad de los flujos, transporte de sedimentos, calidad del agua para la agricultura, la ganadería, para consumo humano, como puntos finales de aguas residuales y para generación de energía eléctrica. El agua en nuestro país, representa un amplio mercado que rebasó los 1000 millones de pesos en 2006, tan sólo en lo que concierne al agua embotellada para consumo humano, no obstante su importancia, no existen trabajos como los reportados en esta tesis para los ríos de México, por lo cual no fue posible establecer antecedentes específicos a este estudio.

CAPÍTULO II

DATOS Y MÉTODOS

2.1 Origen de la información

La información analizada en esta tesis procede de la base de datos digital “BANDAS”, de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos de la Subdirección General Técnica de la Comisión Nacional del Agua de México.

2.2 Características de las series de tiempo

La CNA reporta en su base de datos, las descargas en diferentes puntos de medición o estaciones de aforo, en forma de tablas de gasto ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) promedio por día, por mes, por año. Estas tablas se acomodaron en forma de series de tiempo las cuales se identificaron con el nombre del río correspondiente. Sólo se usaron las series de tiempo de la base de datos que cumplieron con las siguientes características:

1. Series de datos de estaciones consideradas como prístinas, esto es que antes de la estación de aforo no existieran derivaciones importantes o sistemas de retención y regulación de agua (presas) que pudieran filtrar las variaciones naturales.
2. Se consideraron series de tiempo con 10 años de duración, como mínimo, para estimar variaciones de tipo climático, de acuerdo a Maunder (1994).
3. Series continuas, esto es que no presentaran interrupciones en la información.
4. Series obtenidas en estaciones de aforo confiables. Estaciones en las cuales se tenga una adecuada descripción de los equipos usados, su ubicación y continuidad en la aplicación de controles de calidad.

2.3 Series analizadas

Las series de datos que cumplieron con los requisitos establecidos en la sección anterior se presentan en la tabla 1, se incluyen las fechas de inicio y final y la ubicación de la estación de aforo.

Tabla 1

Ríos, estaciones de aforo, año de inicio y de fin de la serie y ubicación de la estación

Río	Estación	Inicio	Fin	Longitud	Latitud
Actópan	Naranjillo	1962	1994	96° 34' 42"	19° 29' 40"
La Antigua	Carrizal	1966	1994	96° 22' 24"	19° 21' 42"
Atoyac	Santa Anita	1967	1994	96° 49' 18"	18° 54' 54"
Blanco	Puerto Valles	1982	1994	97° 35' 45"	20° 09' 20"
Bobos	Martínez de la Torre	1952	1993	97° 02' 18"	20° 03' 42"
Candelaria	Candelaria	1954	1994	91° 04' 00"	18° 11' 00"
Cazones	Poza Rica	1952	1993	97° 28' 30"	20° 32' 48"
Coatzacoalcos	Las Perlas	1953	1991	94° 52' 00"	17° 26' 17"
Colipa	Vega de la Torre	1959	1994	96° 37' 42"	20° 01' 12"
Chamotón	Chamotón	1956	1993	90° 31' 00"	19° 18' 00"
De la Sierra	Pueblo Nuevo	1951	1962	92° 52' 45"	17° 51' 15"
Grijalva	Las Peñas	1947	1985	91° 59' 06"	17° 54' 59"
Ídolos	Ídolos	1963	1994	96° 33' 12"	19° 24' 12"
Misantla	El Raudal	1967	1994	96° 42' 48"	20° 09' 30"
Papaloapan	Chacaltianguis	1982	1990	95° 47' 55"	18° 13' 09"

Se efectuó una excepción en la serie que corresponde al río Papaloapan la cual es de solo ocho años, pero se incluyó por ser uno de los ríos de mayor caudal en el sur de la cuenca del Golfo de México.

2.4 Estaciones de aforo

Una vez identificadas las series que cumplieron con los requisitos establecidos, se ubicaron las estaciones de aforo. La figura 1 muestra la ubicación de las estaciones de aforo.

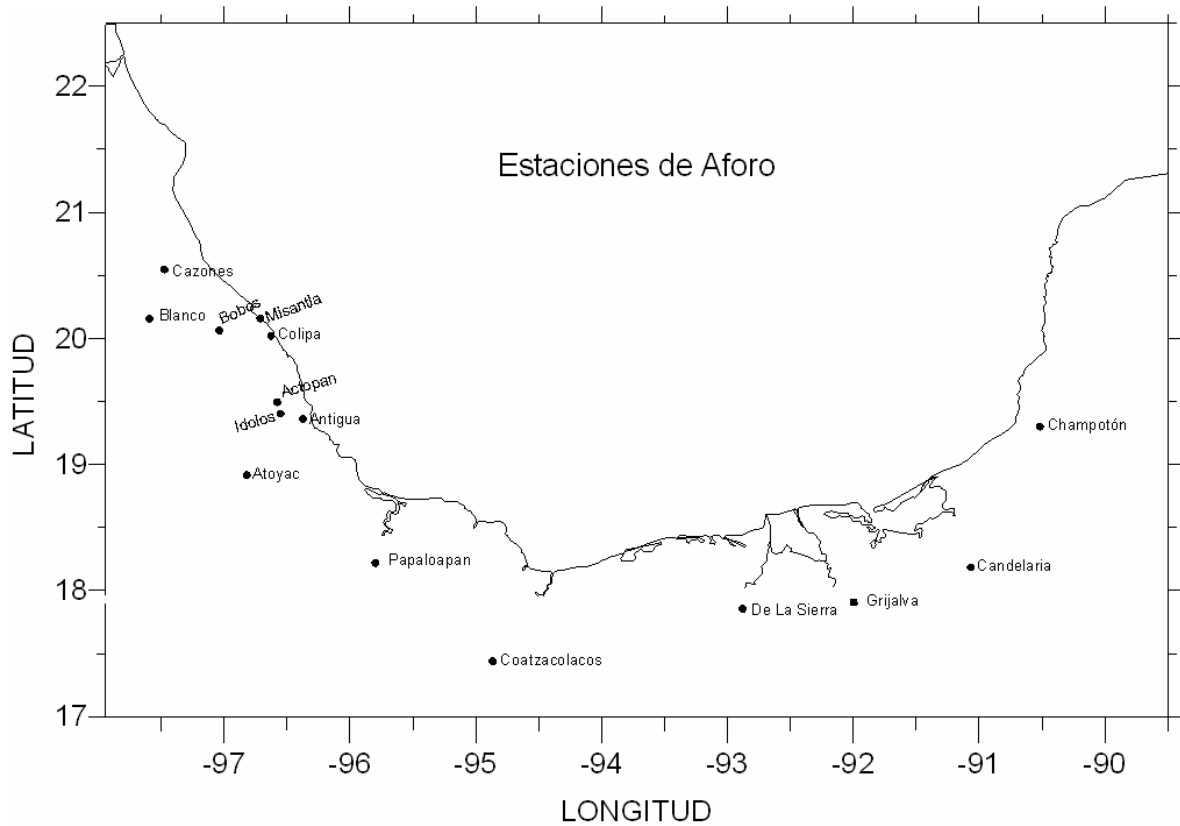


Fig. 1.- Ubicación de las estaciones de aforo.

2.5 Análisis estadístico exploratorio de las series

Las series se procesaron sometiéndolas a un análisis estadístico exploratorio para conocer la calidad de la información. Mediante el análisis se obtuvo: número total de datos válidos, promedio, intervalo de 95 % de confianza del límite superior y límite inferior, mediana, varianza, desviación estándar, el mínimo, máximo, intervalo, intervalo entre cuartiles, sesgo y curtosis.

2.6 Descargas diarias

Se graficaron las series de tiempo de descargas diarias y se analizaron los resultados para identificar temporadas de descargas mínimas y descargas máximas. Con base en los resultados se asociaron los ríos en cinco grupos de acuerdo a los volúmenes máximos de descarga.

2.7 Evolución temporal de las descargas diarias por años

Se graficaron las descargas diarias en un diagrama tiempo en 11 años – tiempo en días en un año, para conocer la evolución diaria de las descargas a lo largo de los años y de esta forma identificar cambios temporales o cambios de fase en las oscilaciones de las descargas. Por ejemplo, se considera para la región sur del Golfo de México que el máximo de las lluvias ocurre a principios de octubre y que el máximo de las descargas es a finales de octubre, este tipo de gráficas nos permitirán ver si los máximos de las descargas ocurren a fines de octubre todos los años, o si tienen variaciones interanuales.

2.8 Promedio, desviaciones estándar, varianzas anuales y anomalías estandarizadas redondeadas o años anómalos

Con el objeto de resaltar eventos anuales importantes se construyó una serie de “anomalías estandarizadas redondeadas” de las descargas de los ríos. Lo anterior se hace de la siguiente manera; se obtiene el promedio y la desviación estándar de todas las descargas y los promedios por años de la serie, al promedio de cada año se le resta el promedio de toda la serie y se divide entre la desviación estándar de la serie, el resultado se redondea al entero quitando la fracción correspondiente. Por ejemplo, si se tiene 1.7 se tendrá 1 o si el resultado es -0.9 se obtendrá 0. Los valores diferentes a cero se consideran eventos extraordinarios (Reyes Coca y Troncoso Gaytan, 2006).

2.9 Años normales

Por años normales se entiende el comportamiento promedio diario de una variable climática en cuando menos diez años y se obtiene promediando el valor de esta variable para cada día de todos los años; esto es, se promedian todos los días uno de los n años analizados, todos los días dos, los días tres y así sucesivamente, con lo cual se obtiene un año promedio o “año normal”, el número mínimo de años que debe de usarse es diez (Maunder, 1994). La serie del río Papaloapan es de sólo 8 años, el resto de las series cumple con la condición de los diez años, pero se incluyó la serie del Papaloapan por ser uno de los ríos de mayor descarga en el sur del Golfo de México.

2.10 Espectros de potencia

Para obtener los periodos característicos de las oscilaciones de las descargas de los ríos, se aplicó una transformada rápida de Fourier a las series (FFT por sus siglas en inglés). Mediante la FFT se pasa de una representación en un espacio tiempo a un espacio de frecuencias (Salas de León *et al.*, 1992; Brigham, 1974). Los resultados permiten elaborar una tabla de las principales frecuencias de oscilación de las descargas y comparar la forma de oscilación de las descargas de los diferentes ríos.

2.11 Cambios de fase de las oscilaciones a diferentes frecuencias

Los cambios de fase o traslocaciones en las oscilaciones de las descargas se manifiestan como cambios en las pendientes de los espectros de potencia cuando son graficados en figuras log-log (Zhang y Schilling, 2004). Por lo que, cambios de pendiente de los espectros en una figura log-log indican cambios en la tendencia de las oscilaciones a diferentes frecuencias y por tanto cambios de fase en las descargas de los ríos en periodos largos. Los resultados de las transformadas rápidas de Fourier de las series de descargas se graficaron en figuras log-log, se calculó la regresión lineal y se obtuvo la pendiente de la recta la cual se comparó con la tendencia a diferentes frecuencias para identificar cambios en las fases.

2.12 Dimensión fractal (D) de las descargas de los ríos

Se ha observado que los ríos tienden a presentar rasgos comunes dependiendo de las características geológicas y climáticas de las regiones en las cuales se encuentren. Mandelbrot en 1982 calculó la similitud que tienen los ríos de los EUA con ellos mismos a diferentes escalas; esto es, que tanto se parece una parte del río con todo el río, o con partes más grandes o más pequeñas y encontró que existe una parte fundamental a partir de la cual se puede reconstruir la totalidad de la forma geométrica del río. Nombró a los objetos que tienen esta propiedad “objetos fractales”. A la parte más pequeña la nombró “dimensión fractal”. Al final de su estudio se dio cuenta que los ríos se podían agrupar de acuerdo a su

dimensión fractal y que dicha agrupación respondía a las características geológicas y climáticas en las cuales se encontraban los ríos, de forma tal que ríos que tenían dimensiones fractales similares tenían características naturales similares; por lo que, el estudio de los ríos podía hacerse mediante un estudio de las condiciones naturales en las cuales se encontraban o simplemente calculando sus dimensiones fractales, viendo a cuales se parecían y analizando, de la bibliografía de los ríos ya estudiados, las características naturales que los identificaban. En este estudio se efectuó un análisis de la dimensión fractal de las descargas de los ríos.

Por otro lado, la densidad espectral (D_s) en los espectros de potencia de las descargas de los ríos en representación log – log tiene un decrecimiento con respecto a la frecuencia (f), esto implica que D_s se puede aproximar mediante un modelo inversamente proporcional a la frecuencia de la descarga f , elevada a una potencia β . Donde β es la pendiente de la recta de ajuste; de tal forma que se tiene (Turcotte y Greene, 1993):

$$D_s \propto \frac{1}{f^\beta}$$

La dimensión fractal esta dada como una función de la pendiente (β) de la tendencia del espectro de potencia log – log, mediante (Turcotte y Greene, 1993):

$$D = \frac{5 - \beta}{2}$$

CAPITULO III

RESULTADOS

Los resultados están organizados de la siguiente forma, se presenta el resumen del análisis exploratorio, las descargas diarias, la evolución de las descargas diarias por años, los resultados del análisis por años con descargas extraordinarias, los años normales, los espectros de potencia y el resultado del cálculo de la dimensión fractal.

3.1 Análisis estadístico exploratorio

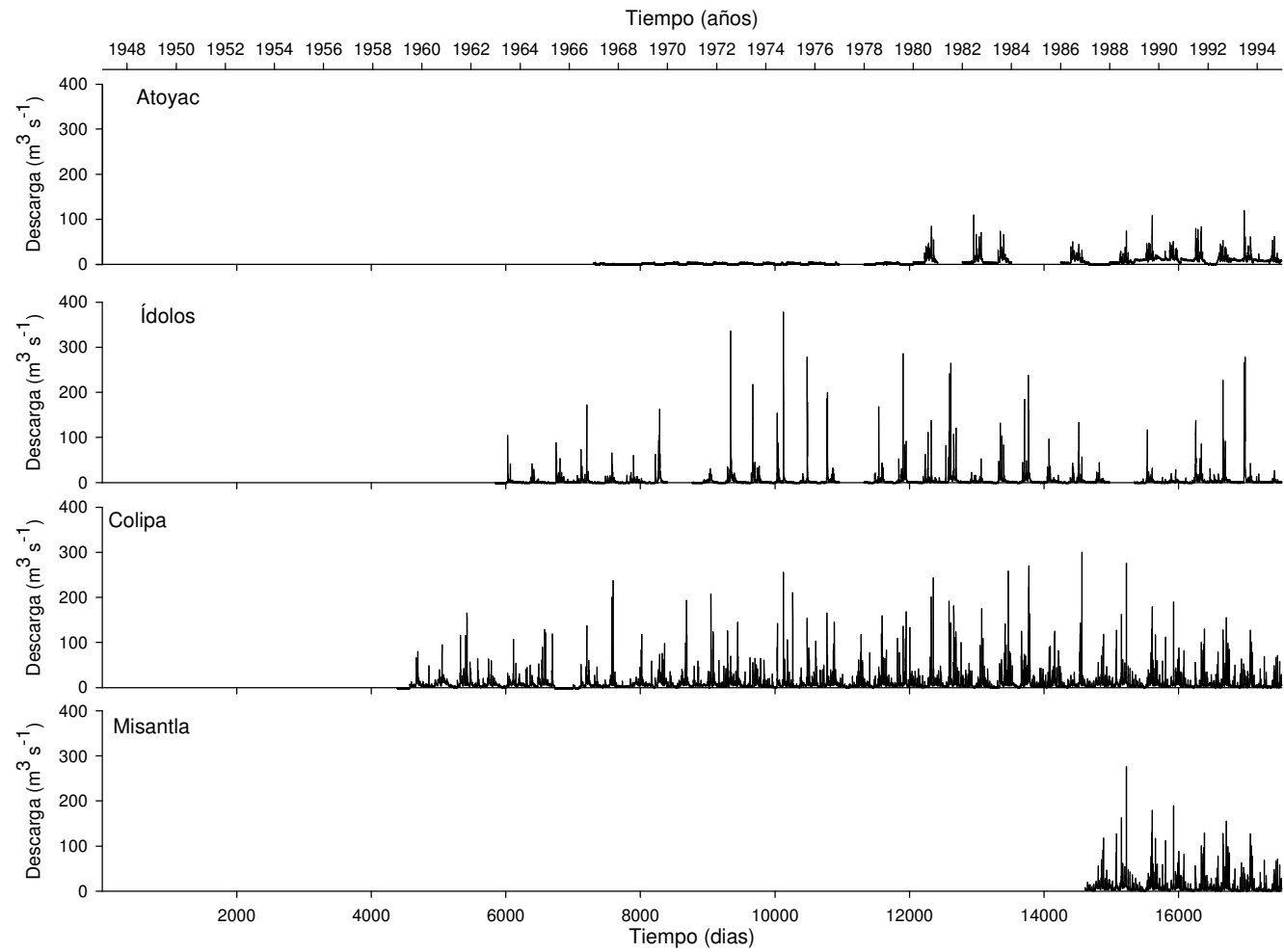
El resultado del análisis estadístico exploratorio (tabla 2) muestra que los tres ríos con más altas descargas son el río Grijalva ($8140 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), el río Coatzacoalcos ($6737 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y el río Papaloapan ($3284 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Los ríos con valores promedios más elevados de la descarga son el río Grijalva ($651 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), el río Papaloapan ($537 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y el río Coatzacoalcos ($493 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), nótese que en este caso el río Papaloapan queda por arriba del río Coatzacoalcos, indicando que tiene una descarga más constante y un intervalo menor de variación, como se puede ver de los resultados del cálculo de las varianzas.

Tabla 2
Resultados del análisis estadístico exploratorio.

	Actopan	La Antigua	Atoyac	Blanco	Bobos	Candelaria	Cazones	Coatzacoalcos	Colipa	Champoton	De la Sierra	Grijalva	Ídolos	Misantla	Papaloapan
Núm. de datos válidos	12055	10599	8766	4748	15259	14974	14949	11595	13138	12414	4017	13515	10591	2922	2922
Promedio	15	43	6	46	54	49	53	493	9	12	187	651	4	9	537
Límite inferior de 95%	14	43	5	45	52	48	52	483	9	11	182	640	4	9	523
Límite superior de 95%	15	44	6	47	55	50	55	503	9	12	192	661	4	10	550
Mediana	9	27	3	37	37	32	37	303	5	3	122	497	1	5	393
Varianza	1057	2238	63	1162	4809	2494	4830	318791	263	1334	29562	398876	213	239	140316
Desviación estandar	32	47	7	34	69	49	69	664	16	36	171	631	14	15	374
Mínimo	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	157
Máximo	650	1083	119	447	2653	406	2653	6737	300	450	919	8140	377	276	3284
Intervalo	650	1083	119	438	2653	406	2653	6737	300	450	900	8140	377	275	3126
Intervalo entre cuartiles	13	33	8	25	30	33	30	479	6	3	196	536	2	6	302
Sesgo	9	5	3	4	10	2	10	3	6	5	1	2	11	6	2
Curtosis	122	76	26	32	211	9	213	16	69	37	1	13	185	61	7

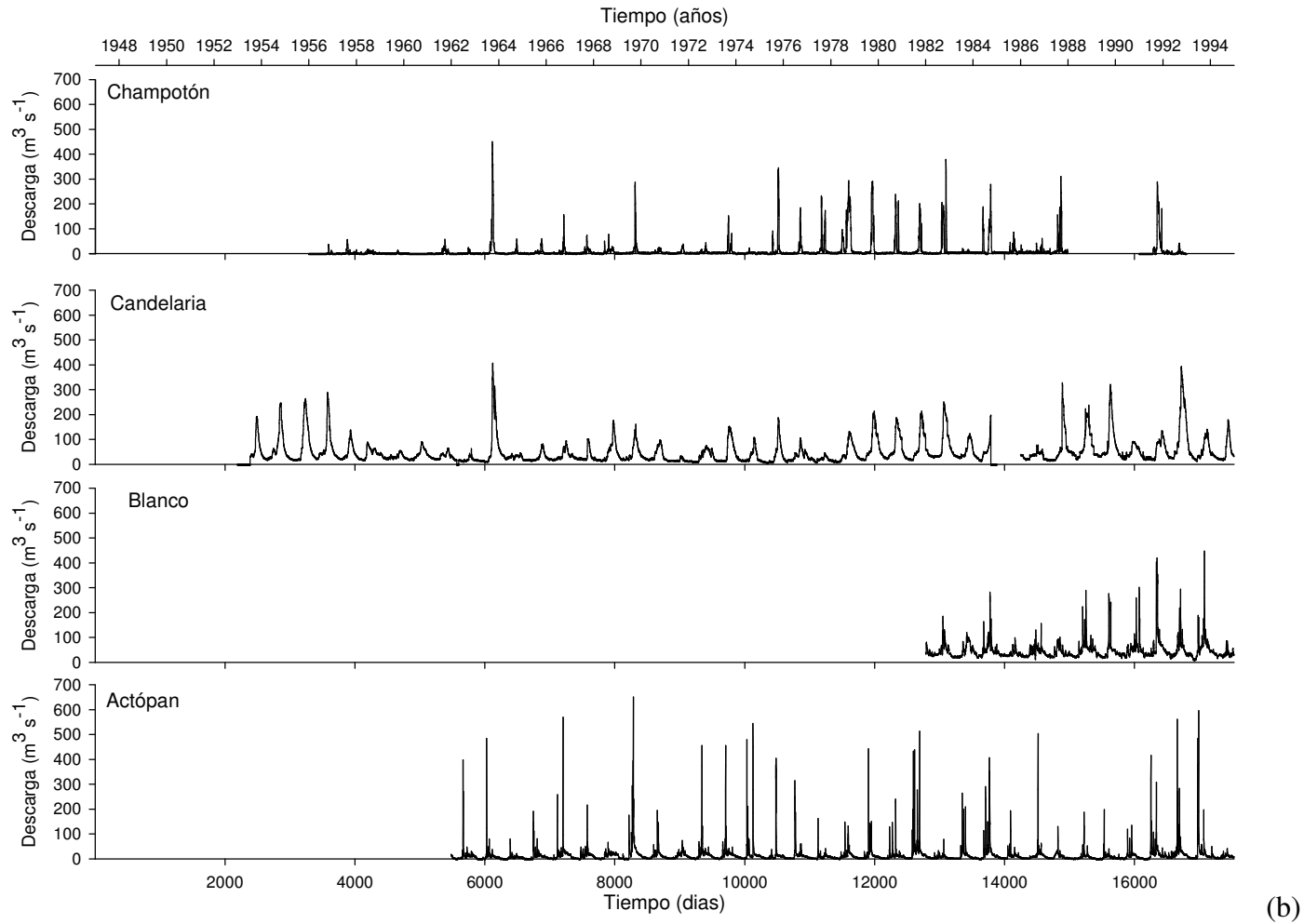
3.2 Descargas Diarias

Las figuras de descargas diarias para cada río se congregaron en cinco grupos dependiendo de los máximos de cada río, con un total de cinco figuras agrupadas en una sola (Fig. 2 a-e). El primer grupo corresponde a los ríos Atoyac, Misantla, Colipa e Ídolos, cuyos máximos no rebasan los $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; el segundo esta compuesto por los ríos Candelaria, Champotón, Blanco y Actópan, en este grupo el máximo esta en $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El tercero esta compuesto por los ríos De La Sierra y La Antigua cuyo límite superior de descargas es de $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el cuarto por los ríos Bobos y Cazonos con descargas máximas de $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y finalmente el quinto grupo, que son los más caudalosos, esta formado por los ríos Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva cuyas descargas llegan hasta un poco más de $8000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$



(a)

Fig. 2 Evolución de las descargas para los diferentes ríos analizados. (a) Atoyac, Ídolos, Colipa y Misantla, (b) ríos Champotón, Candelaria, Blanco y Actópan, (c) ríos De La Sierra y La Antigua, (d) ríos Bobos y Cazones, (e) ríos Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva.



(b)

Fig. 2 Continuación.
Tiempo (años)

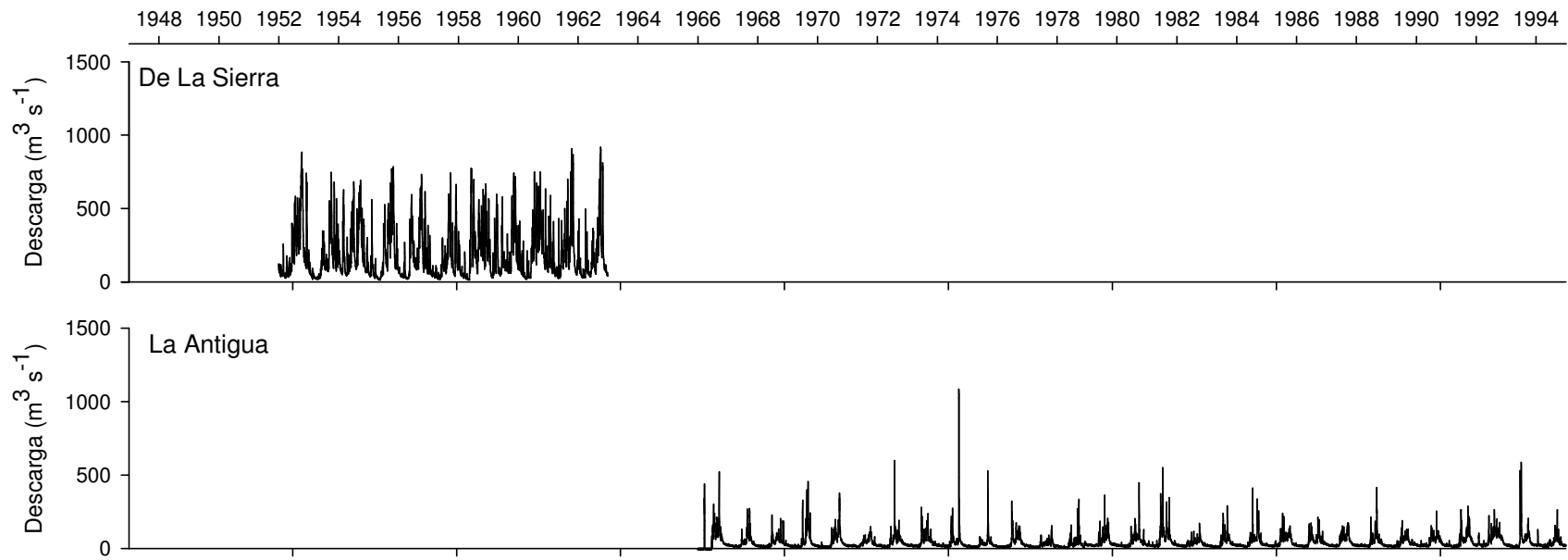
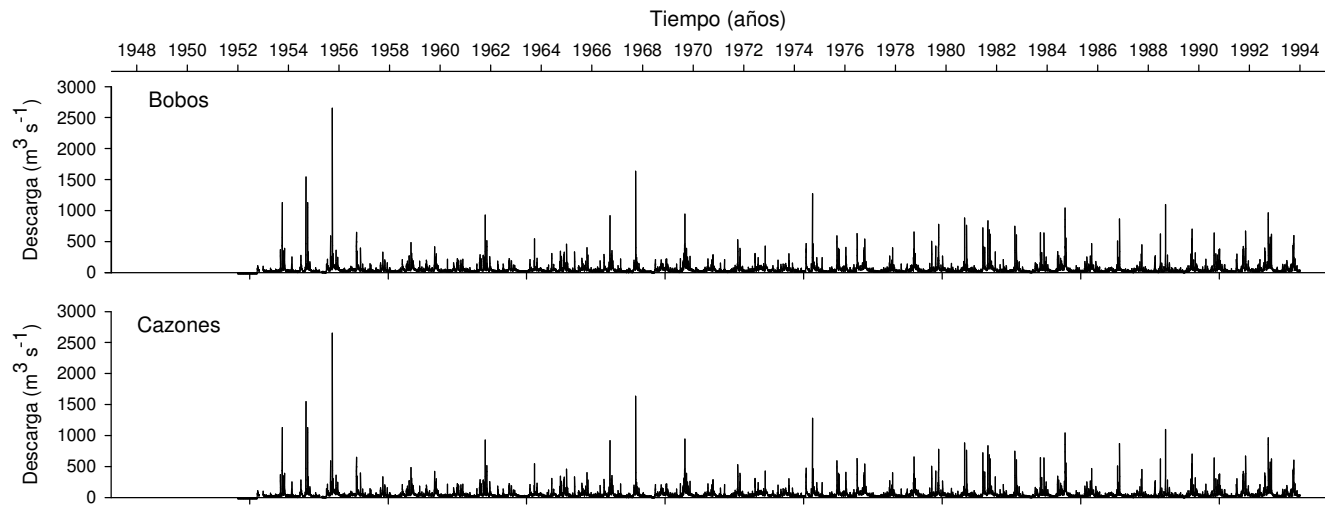


Fig. 2 Continuación.

(c)



(d)

Fig. 2 Continuación.

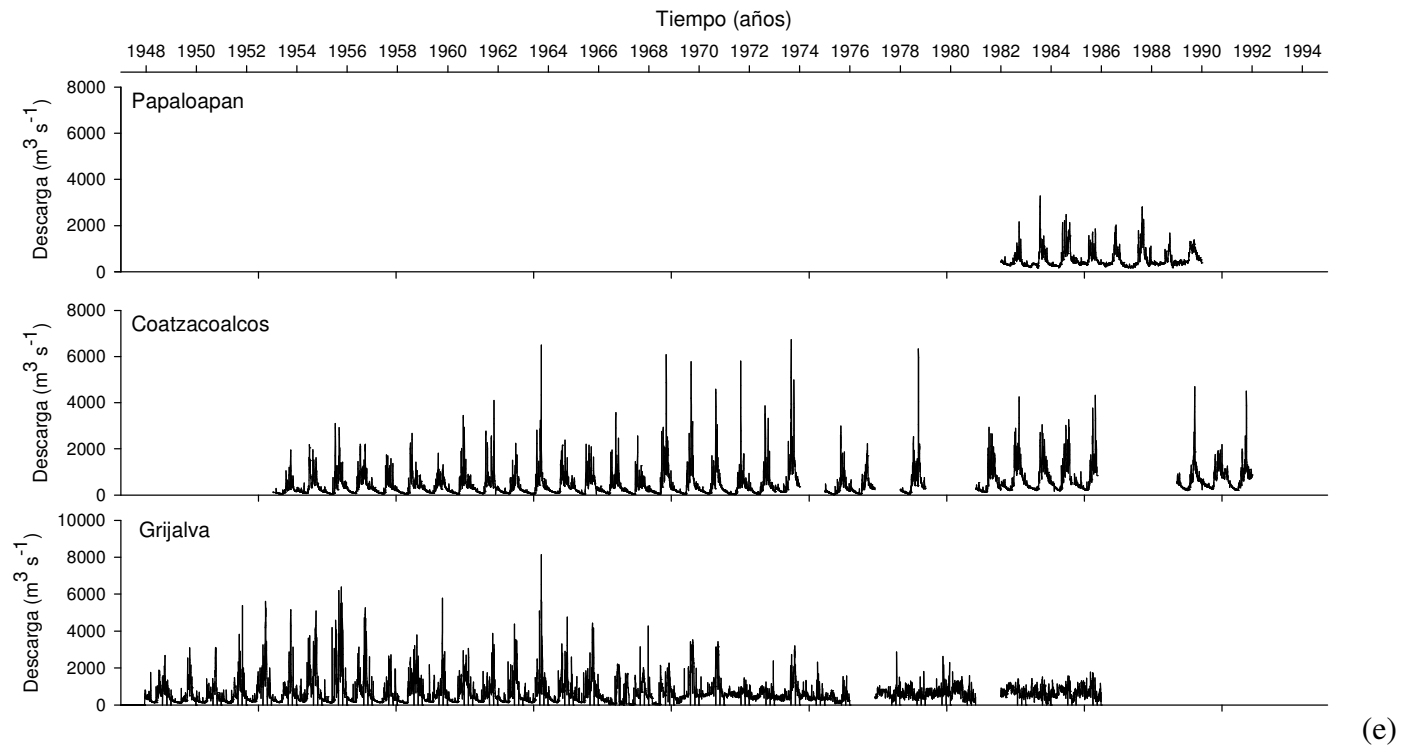


Fig. 2 Continuación.

La oscilación dominante en todos los ríos es la que tiene frecuencia anual, la cual corresponde a los eventos anuales de lluvias. Sin embargo, se alcanza a ver una oscilación mayor sobre la oscilación anual marcada por la envolvente de los máximos anuales, cuya amplitud y longitud no está bien definida, el aparente período es de aproximadamente 22 años y podría ser atribuido a la oscilación en la radiación del Sol, cuyo período principal es de 22 años.

Se puede observar un incremento en las descargas de los ríos Bobos y Cazones iniciándose en 1952 que dura hasta 1958, este aumento marcó los máximos históricos de las descargas de estos ríos. El río Grijalva muestra el inicio de la época de mayores descargas anuales en 1948 y se continúa hasta 1974, con una ligera disminución en los volúmenes entre 1958 y 1964, esta disminución es más evidente en las series de los ríos Bobos y Cazones. La serie del río Coatzacoalcos muestra una evolución muy similar a la del río Grijalva. Los ríos Champotón y Candelaria, muestran la misma tendencia pero con menor intensidad. El río De la Sierra presenta un comportamiento inverso; en el tiempo en que se observa un incremento en las descargas de los otros ríos, para este río se tiene una disminución. Las series de los otros ríos no tienen datos para las mismas fechas.

Un año de descargas importantes es 1957, el cual se refleja en todas las series, 1963 muestra descargas intensas en los ríos Champotón, Candelaria, Coatzacoalcos y Grijalva. Para ese año se observan descargas importantes en el resto de los ríos. Como se puede ver, este evento de altas descargas se presentó en los ríos que se encuentran en la parte sur de la cuenca del golfo. Otro año con descargas intensas fue 1970, los ríos que muestran este efecto son: Ídolos, Actópan, Bobos, Champotón y Cazones.

En 1975 se tienen descargas importantes en los ríos Ídolos, Colipa, Actópan y Coatzacoalcos. Un pico de altas descargas se observa durante 1992 en el río Blanco.

La tabla 3 muestra las fechas de las máximas descargas históricas encontradas en las series.

Tabla 3

Máximas descargas históricas. Los valores de las descargas se muestran en la tabla 2.

Río	Día	Mes	Año
Atoyac	22	Junio	1993
Ídolos	22	Septiembre	1974
Colipa	14	Noviembre	1986
Misantla	7	Septiembre	1988
Champotón	30	Septiembre	1963
Candelaria	5	Octubre	1963
Blanco	30	Octubre	1993
Actópan	19	Febrero	1969
De la Sierra	6	Octubre	1962
La Antigua	22	Septiembre	1974
Bobos	30	Septiembre	1956
Cazones	30	Septiembre	1956
Papaloapan	25	Julio	1983
Coatzacoalcos	2	Septiembre	1973
Grijalva	24	Septiembre	1963

Los máximos históricos se presentaron en septiembre, octubre y noviembre, que corresponden a la temporada de lluvias en el sur del Golfo de México. Sólo en dos ríos, Papaloapan y Atoyac, el máximo histórico se presentó fuera de la temporada de lluvias y esto fue por efectos de huracanes tempranos.

3.3 Evolución de las descargas diarias por años

La evolución de las descargas diarias por años se muestran en las figura 3. Se conservó el orden de agrupamiento observado dependiendo de los máximos de cada río para una fácil comparación.

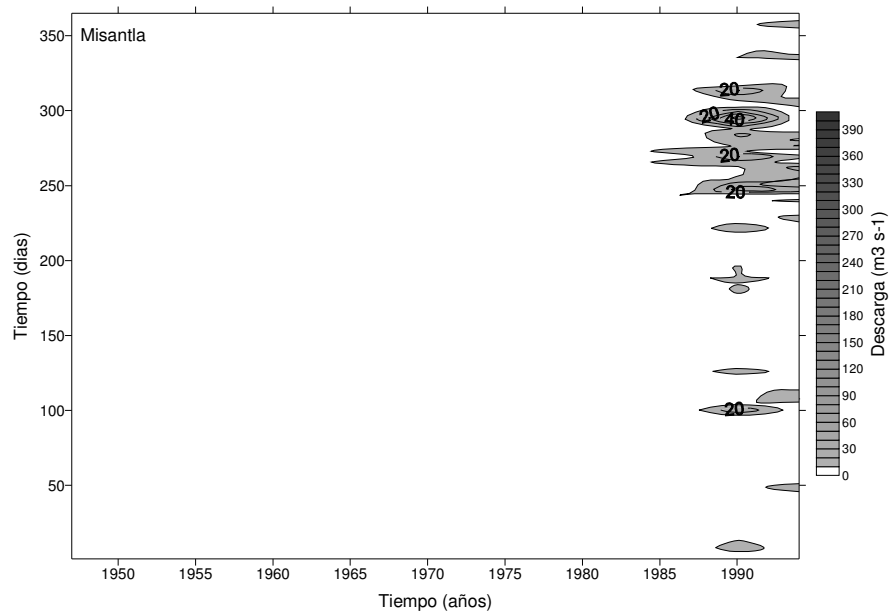
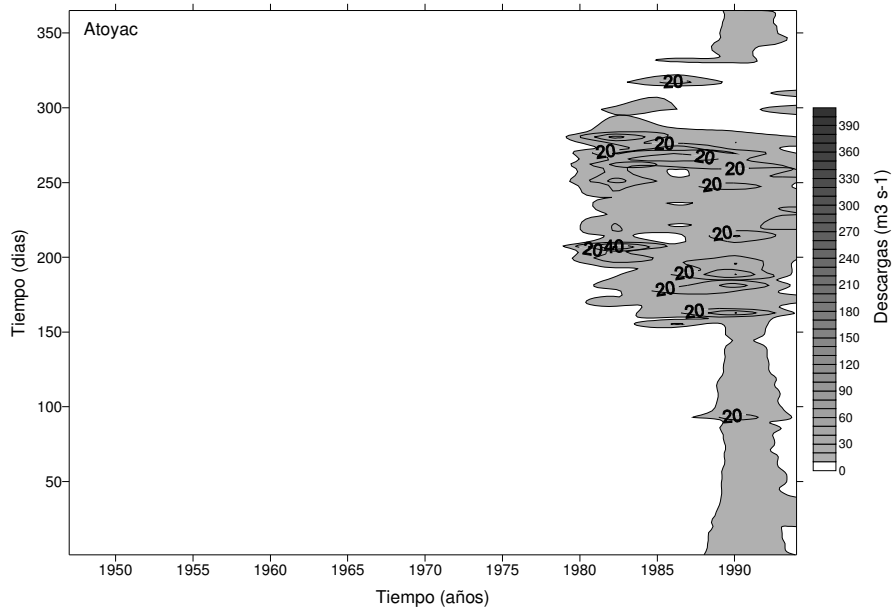


Fig. 3 Diagramas tiempo-tiempo-descarga en los diferentes ríos analizados.

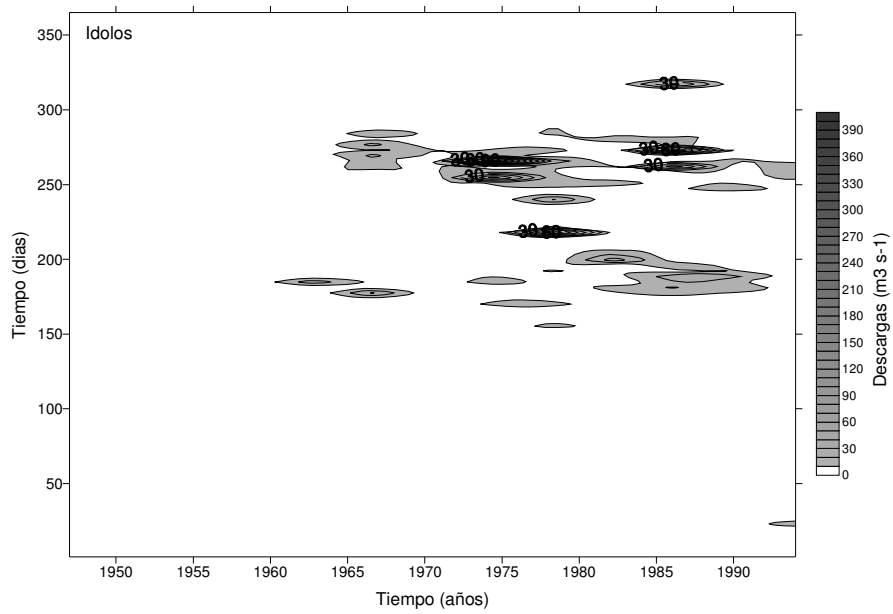
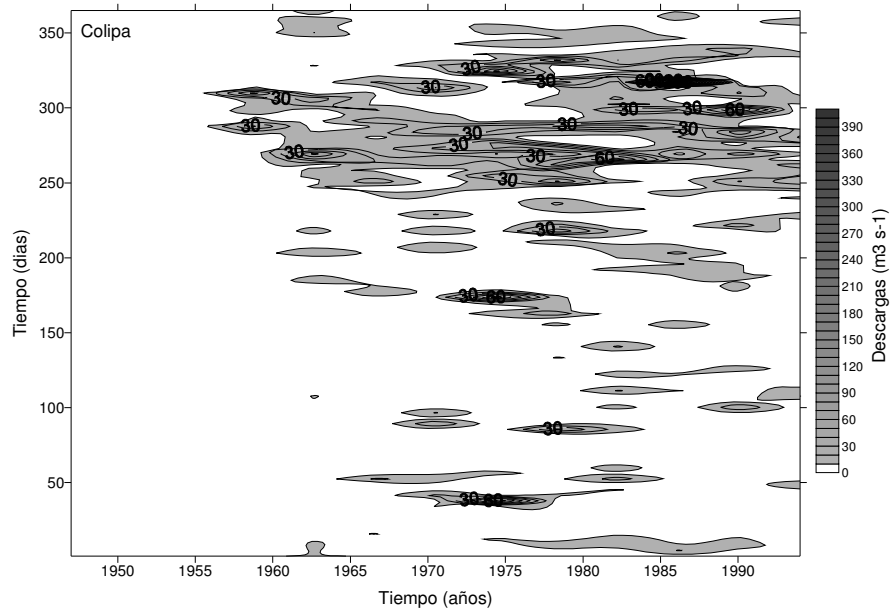


Fig. 3 Continuación

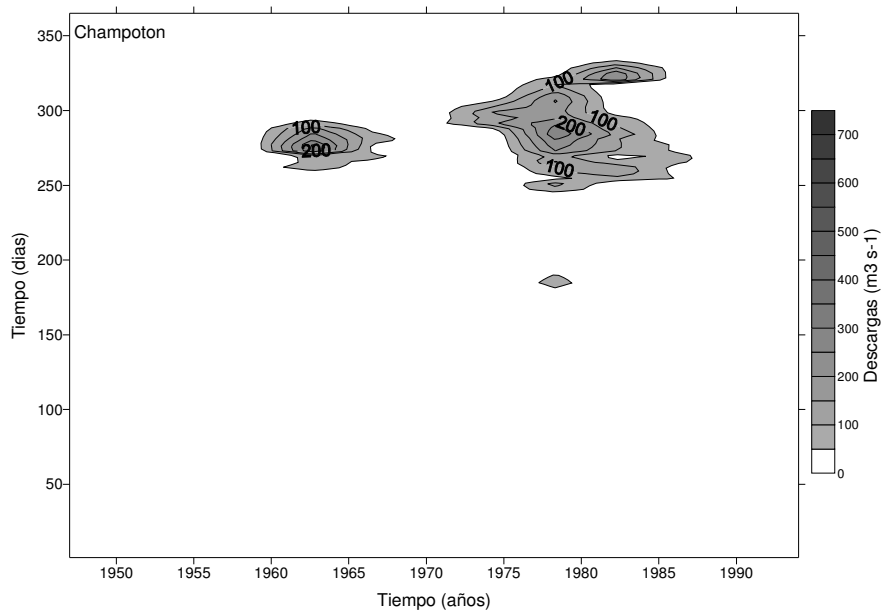
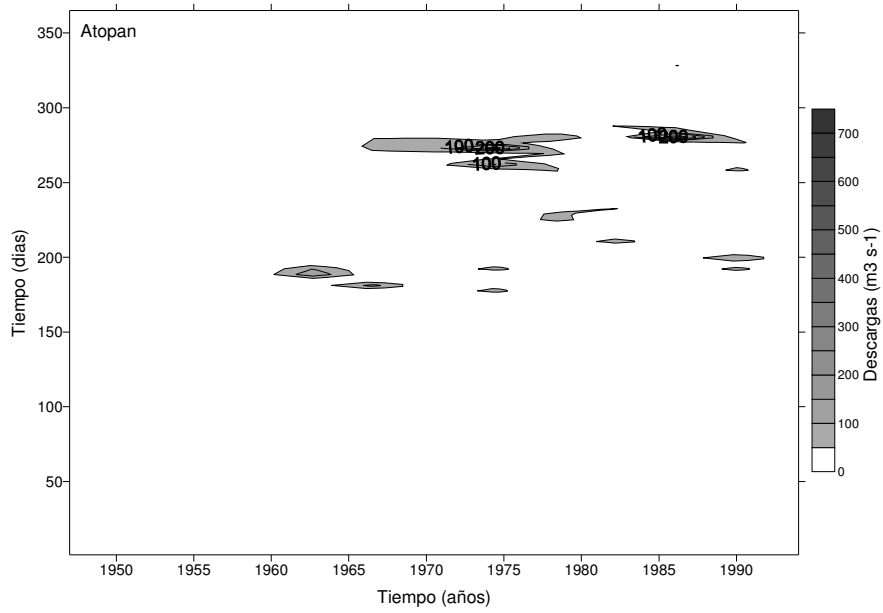


Fig. 3 Continuación

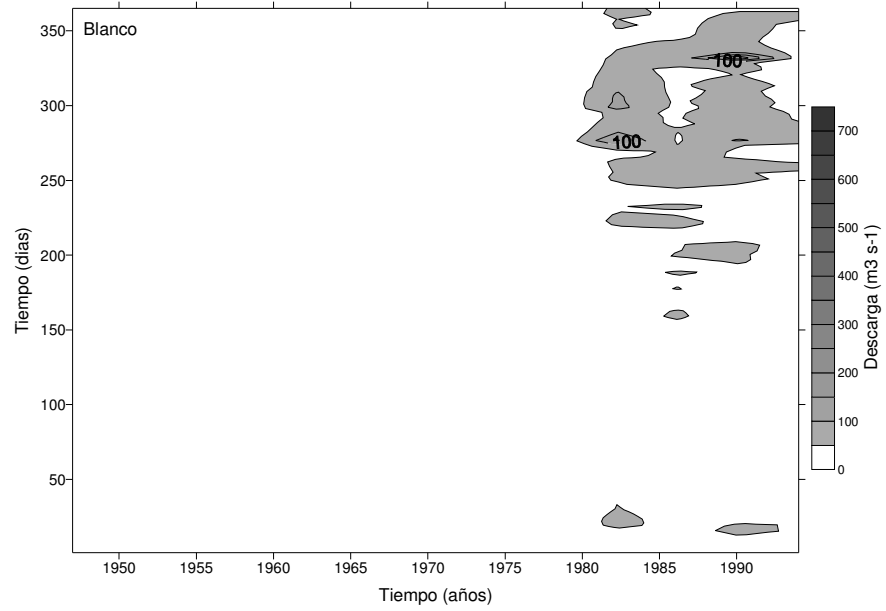
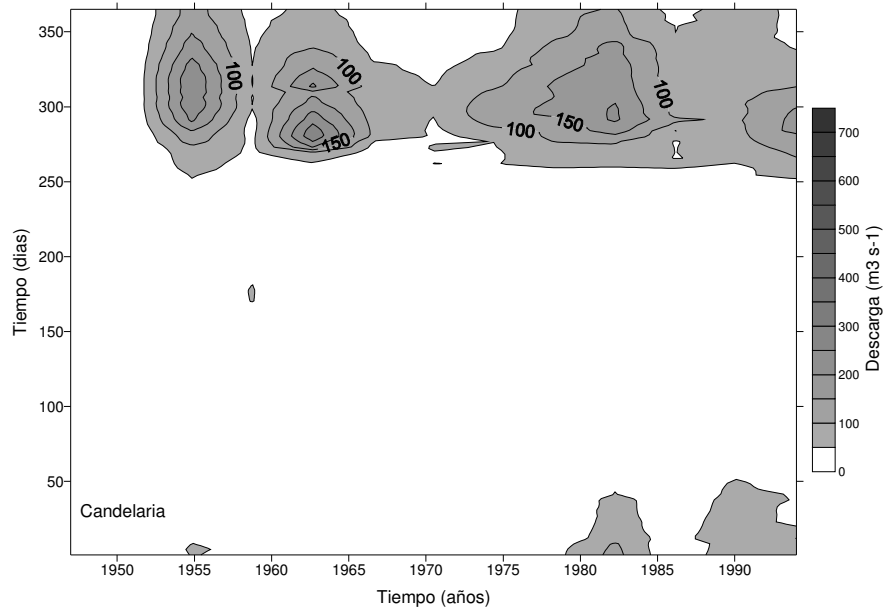


Fig. 3 Continuación

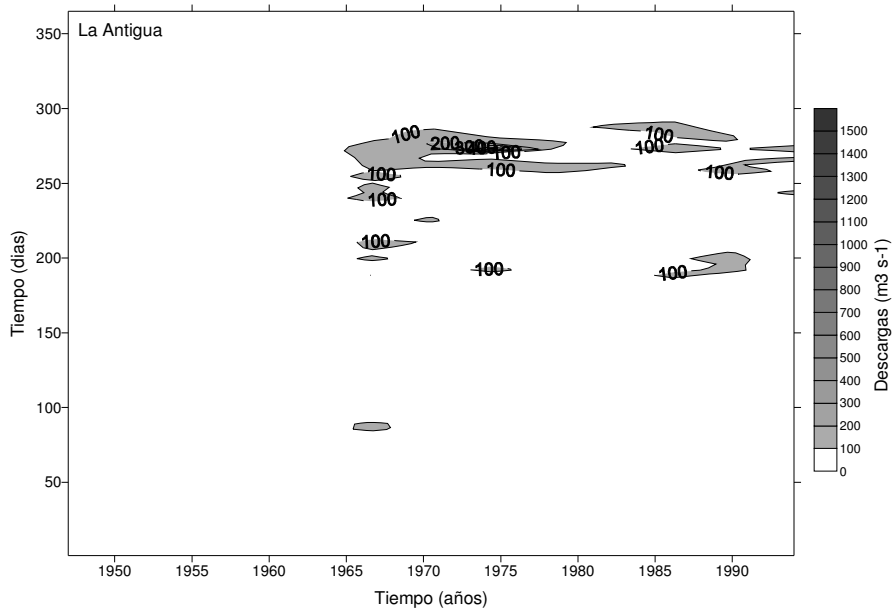
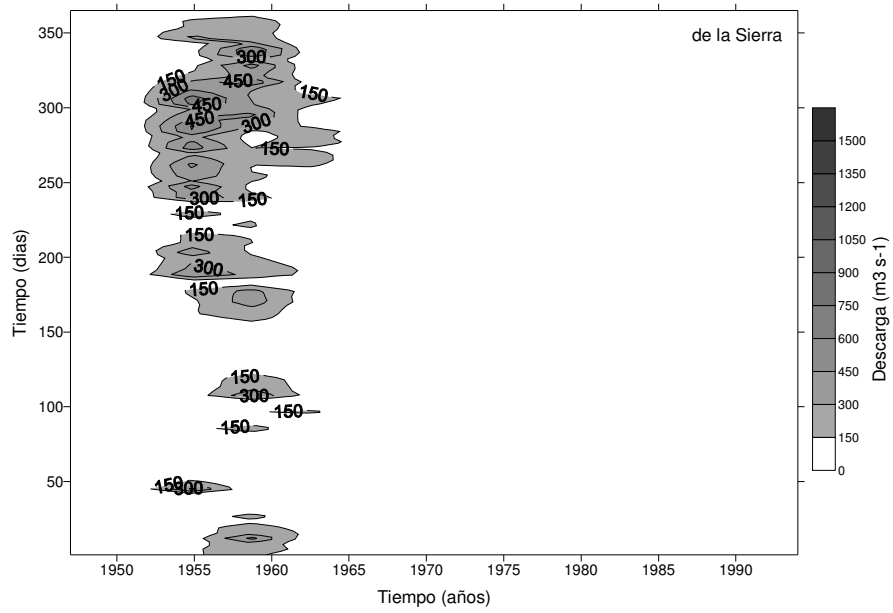


Fig. 3 Continuación

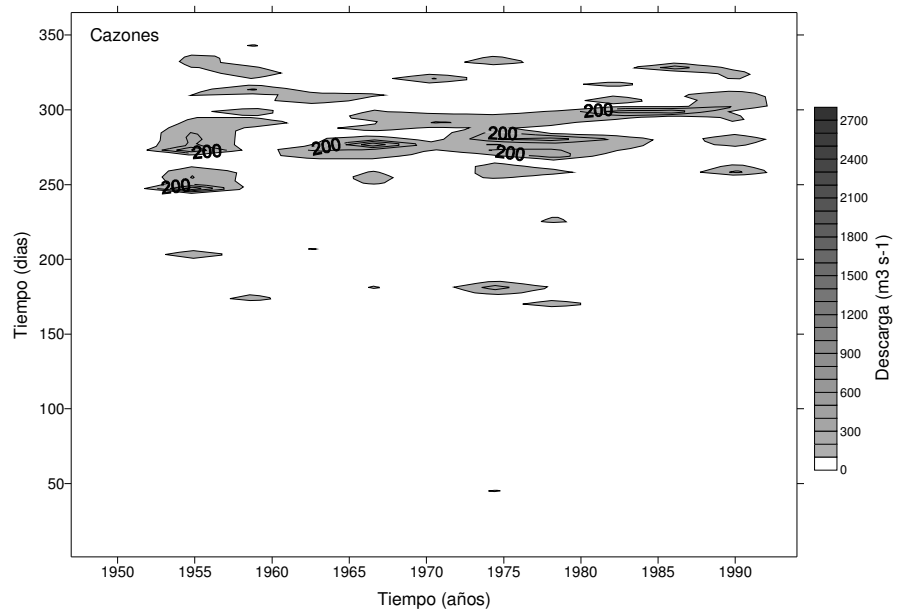
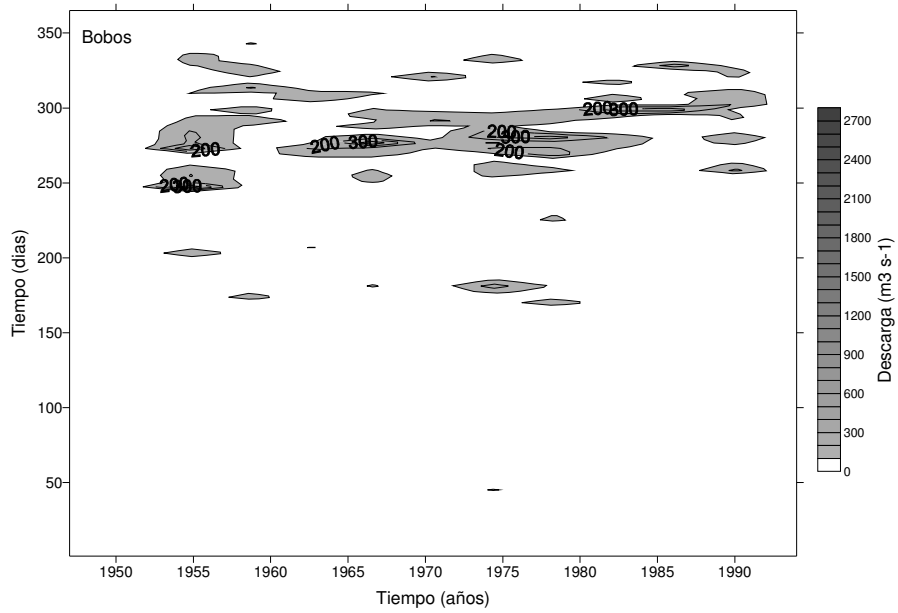


Fig. 3 Continuación

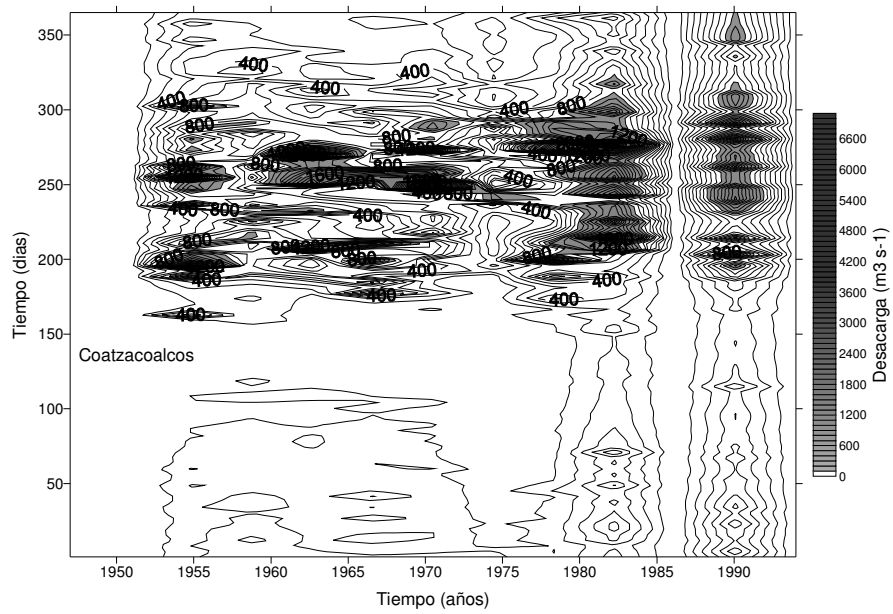
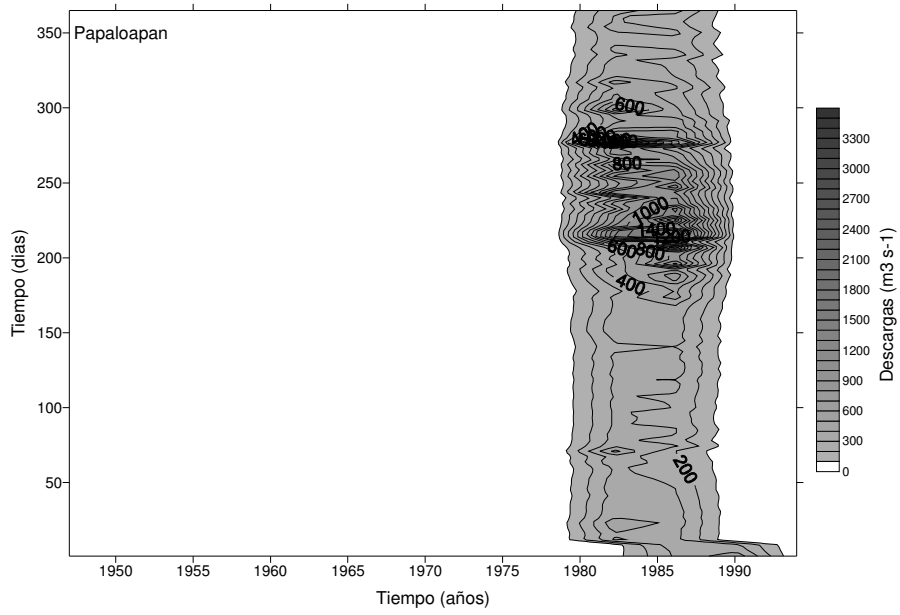


Fig. 3 Continuación

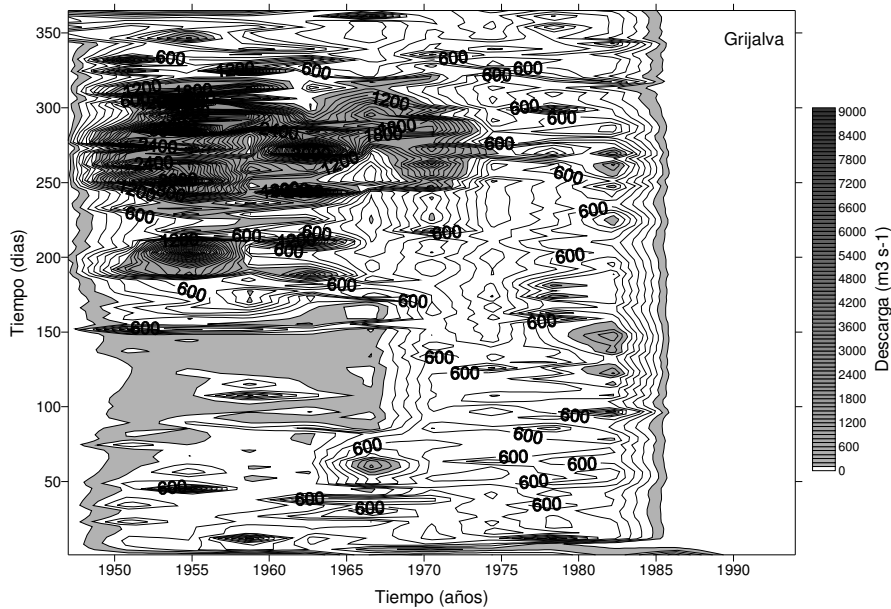


Fig. 3 Continuación

El río Atoyac muestra descargas relativamente constantes durante los años 1989 a 1995, con máximos en los meses de septiembre a noviembre. De 1985 a 1987 se presentó una disminución considerable en las descargas de agua y durante 1983 y 1984 las descargas a fines de septiembre - principios de octubre son casi el doble que en los años posteriores. El río Misantla presenta máximos a fines de octubre a partir de 1990 y descargas de regular intensidad, pero puntuales, desde enero. La mayor intensidad de las descargas del río Colipa se ha ido corriendo de fines de septiembre de 1980 hacia mediados de octubre en 1989. A principios de octubre de 1960 se puede observar el principio de una temporada de bajas descargas, la cual se intensifica de 1965 hasta 1979, a partir de 1979 se corre hacia fines de septiembre y dura así hasta 1985. A partir de 1984 y hasta 1987 se presentan fuertes descargas a fines de octubre que se alternan con intervalos cortos de bajas descargas a fines de septiembre. El río Ídolos muestra sus máximas descargas a mediados de octubre y bien marcadas desde 1970 hasta 1977, interrumpidas por un intervalo de bajas descargas de 1979 hasta 1983, recuperando su nivel de descargas a partir de 1984, pero defasadas hacia mediados de octubre.

El río Actopan presenta máximas descargas muy uniformes durante fines de octubre, con una interrupción de 1979 a 1983. El río Champotón presenta un patrón similar,

pero a diferencia del río Actopan, se observa un alargamiento en la temporada de altas descargas de inicios de septiembre hasta fines de octubre. La temporada intermedia de bajas descargas en este río fue de 1965 hasta 1971. El río Candelaria muestra descargas más uniformes con marcadas disminuciones de 1957 a 1960 y de 1966 a 1972. A partir de 1972 incrementa sus descargas y el tiempo en que ocurren. Es interesante hacer notar que a partir de 1980 se empiezan a registrar descargas significativas durante enero y febrero y que cada vez se extienden más.

El río Blanco muestra claramente un corrimiento en la fase de las fechas de mayor descarga. De 1980 y hasta 1983 se presentaba a fines de septiembre – principios de octubre y a partir de 1986 se corre hacia fines de octubre. En este río se observa también, una disminución considerable en la intensidad de las descargas de 1984 hasta 1985. El río De la Sierra muestra descargas importantes desde principios de septiembre hasta mediados de noviembre.

El río La Antigua presenta flujos considerables de 1970 hasta 1975 con una temporada de disminución de 1975 hasta 1985 y una recuperación incipiente a partir de 1985. Los ríos Bobos y Czones presenta una evolución similar entre sí, con intervalos de bajas descargas que van de 1959 hasta 1965 y de 1985 hasta 1988.

La evolución del río Papaloapan muestra descargas importantes todo el año, con máximos uno a mediados de septiembre y otro más intenso pero de menor duración a principios de octubre.

La serie del río Coatzacoalcos presenta cuatro intervalos de altas descargas, el primero va de 1953 a 1957, el segundo de 1958 a 1974, el tercero de 1976 a 1983 y finalmente el cuarto de 1988 a 1992. Entre cada intervalo de altas descargas se observan disminuciones considerables en las descargas, en particular es importante mencionar las disminuciones que van de 1984 hasta 1987 y de 1977 a 1980 durante principios de septiembre. El río Grijalva muestra una caída considerable en sus descargas a partir de 1974 y un corrimiento en las fases de los máximos, de principios de septiembre hacia fines

de octubre. Por otro lado, se puede ver que a partir de 1970, se presentan descargas importantes durante los primeros días del año.

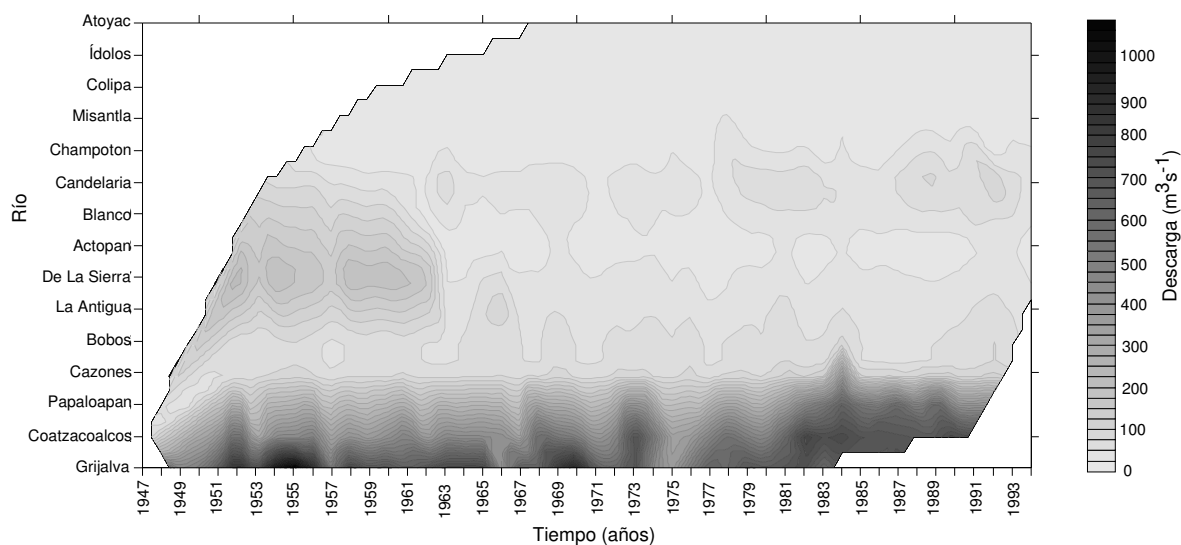


Fig. 4 Promedio anual de las descargas de los ríos.

Los promedios anuales de las descargas de los ríos (Fig. 4) muestran una tendencia a incrementar los flujos en los últimos años. Los ríos Candelaria, Blanco, Actopan, De la Sierra, La Antigua, Bobos y Cazones presentan descargas significativas de 1951 a 1962; los ríos Champoton, Candelaria y Blanco muestran descargas importantes de 1978 en adelante. Los ríos Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva tienen descargas de agua considerables en los años: 1952, 1954-1956, 1958, 1963-1965, 1969-1970, 1973, 1977-1979, 1982, 1984, 1987 y 1990.

3.4 Promedios, desviaciones estándar, varianzas anuales y anomalías estandarizadas redondeadas

Las figuras correspondientes a los promedios, desviaciones estándar, varianzas anuales y anomalías estandarizadas redondeadas de las descargas diarias para cada río se muestran en la figura 5. Se conservó el orden de agrupamiento observado dependiendo de los máximos de cada río para una fácil comparación.

Las desviaciones estándar y las varianzas reproducen el comportamiento de los promedios anuales. La tendencia de los promedios anuales para los ríos Atoyac muestra un aumento considerable a principios de 1978, con una disminución significativa durante 1978, las anomalías estandarizadas para este río muestran eventos anómalos desde antes de 1970 hasta 1980 y en 1987. Para el río Misantla la tendencia general muestra una disminución de las descargas, las anomalías estandarizadas no muestran eventos especiales. De igual forma para el río Colipa, no se observan anomalías diferentes a cero; sin embargo, la serie de descargas anuales promediadas presenta un incremento desde mediados de la década de 1980 hasta 1990. Para el río Ídolos es durante la década que va de 1970 a 1980 que se observa el incremento en las descargas, mientras que a finales de los 80's se presenta una disminución significativa de las descargas; para este río las anomalías estandarizadas no muestran eventos importantes. El río Actopan muestra dos eventos importantes en sus anomalías estandarizadas, uno en 1963 y el otro en 1983; los promedios anuales no muestran una tendencia clara. La anomalía estandarizada del río Blanco presenta un evento diferente a cero a mediados de 1985, mientras que la serie de promedios muestra una disminución en las descargas a mediados de la década que va de 1980 a 1990, con un aumento en las descargas durante 1990.

La tendencia de los promedios anuales en el río Champotón es ascendente con una marcada anomalía durante 1960. El río Bobos no presenta anomalía alguna y la serie de promedios anuales no muestra una tendencia ascendente o descendente. Una situación similar se puede ver para los ríos Cazones, La Antigua, De la Sierra y Papaloapan.

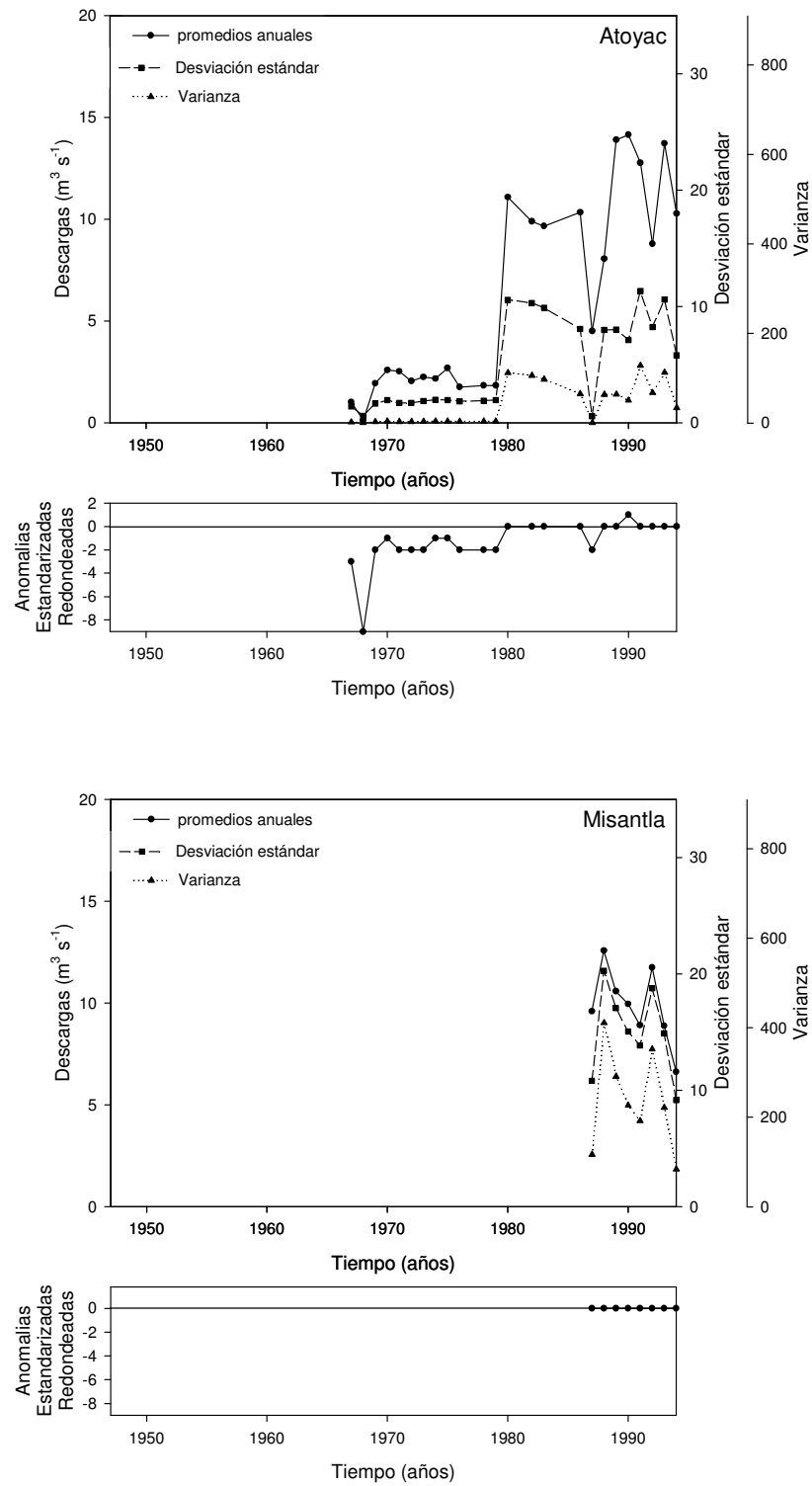


Fig. 5. Promedios, desviaciones estándar, varianzas anuales y anomalías estandarizadas redondeadas.

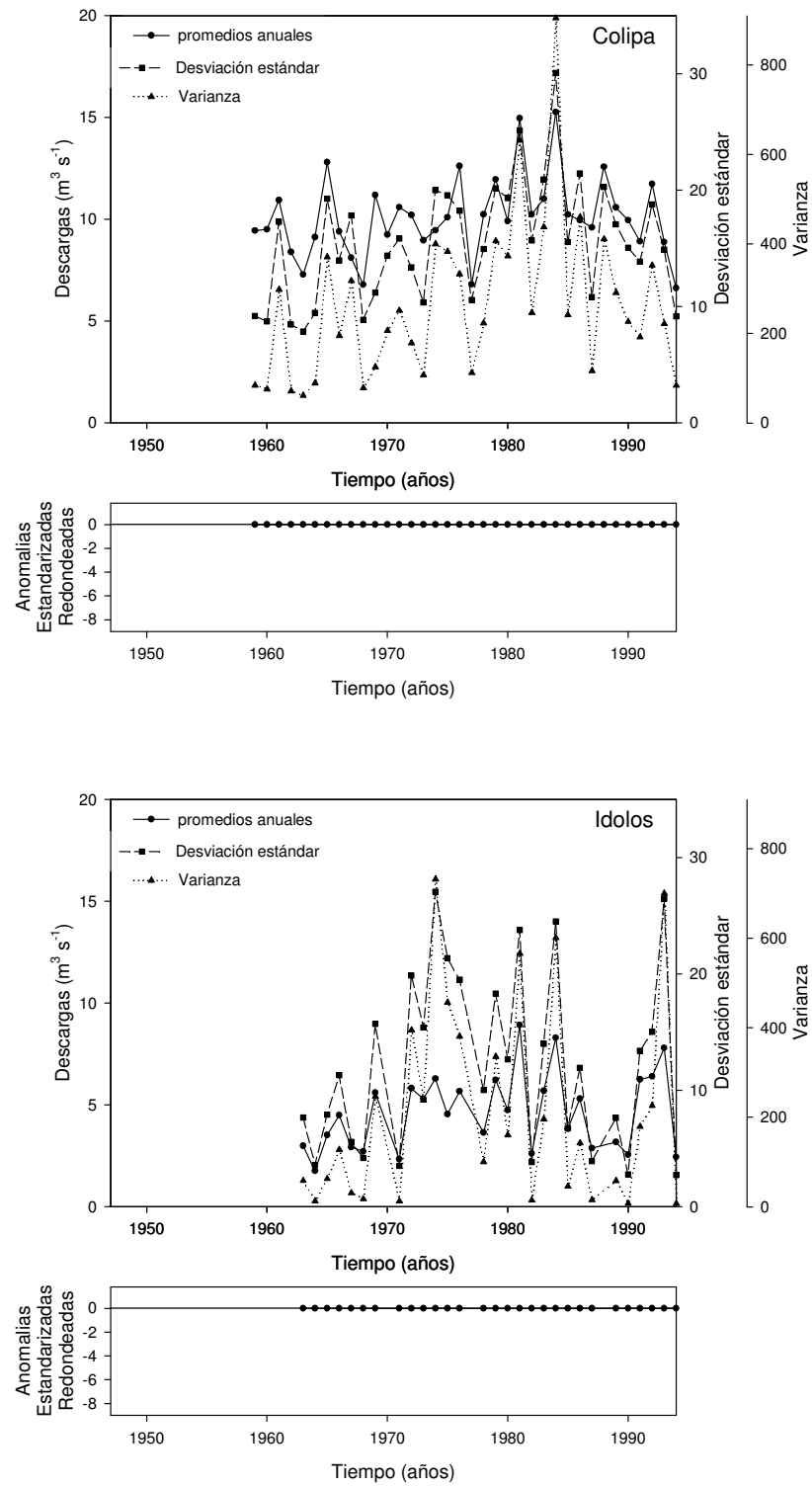


Fig. 5. Continuación.

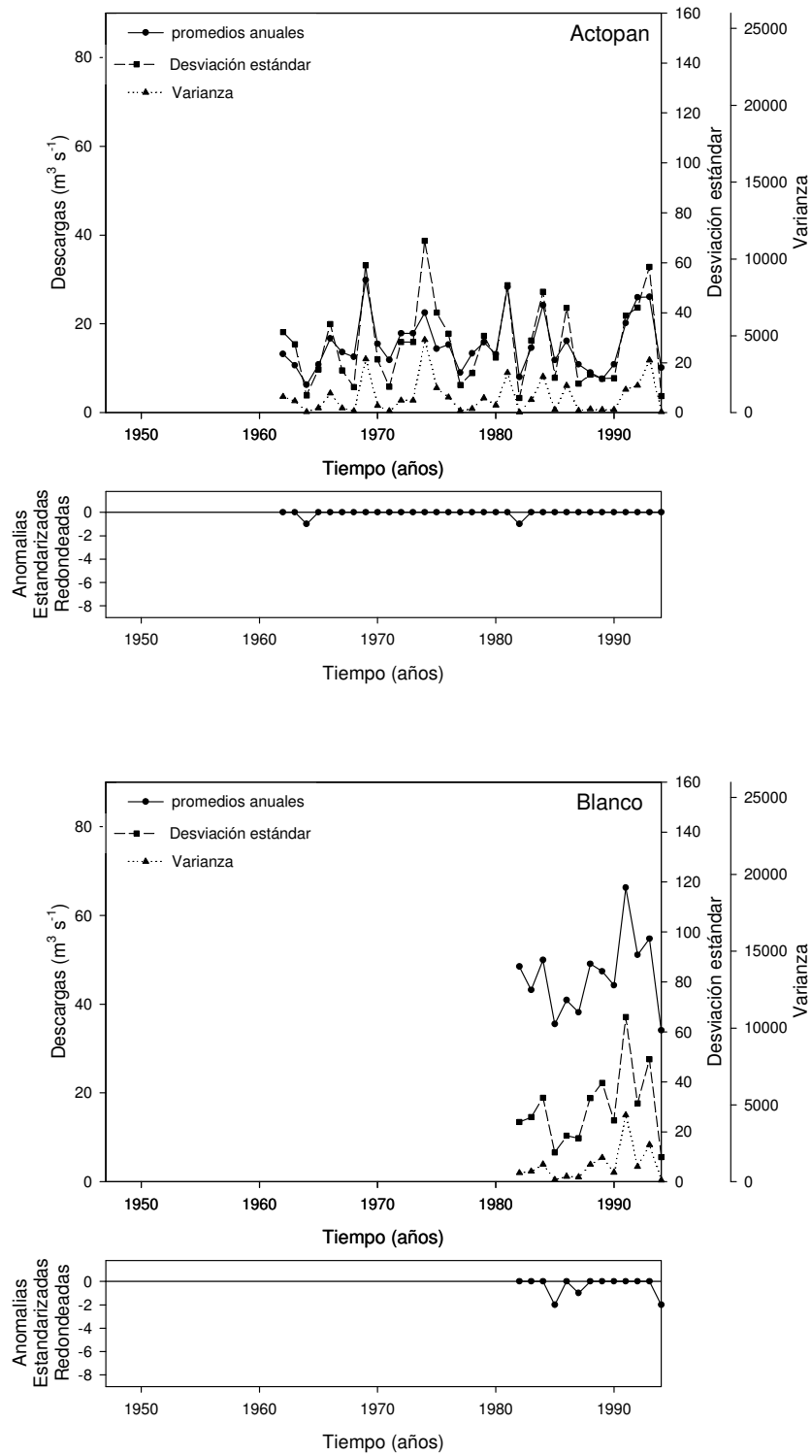


Fig. 5. Continuación.

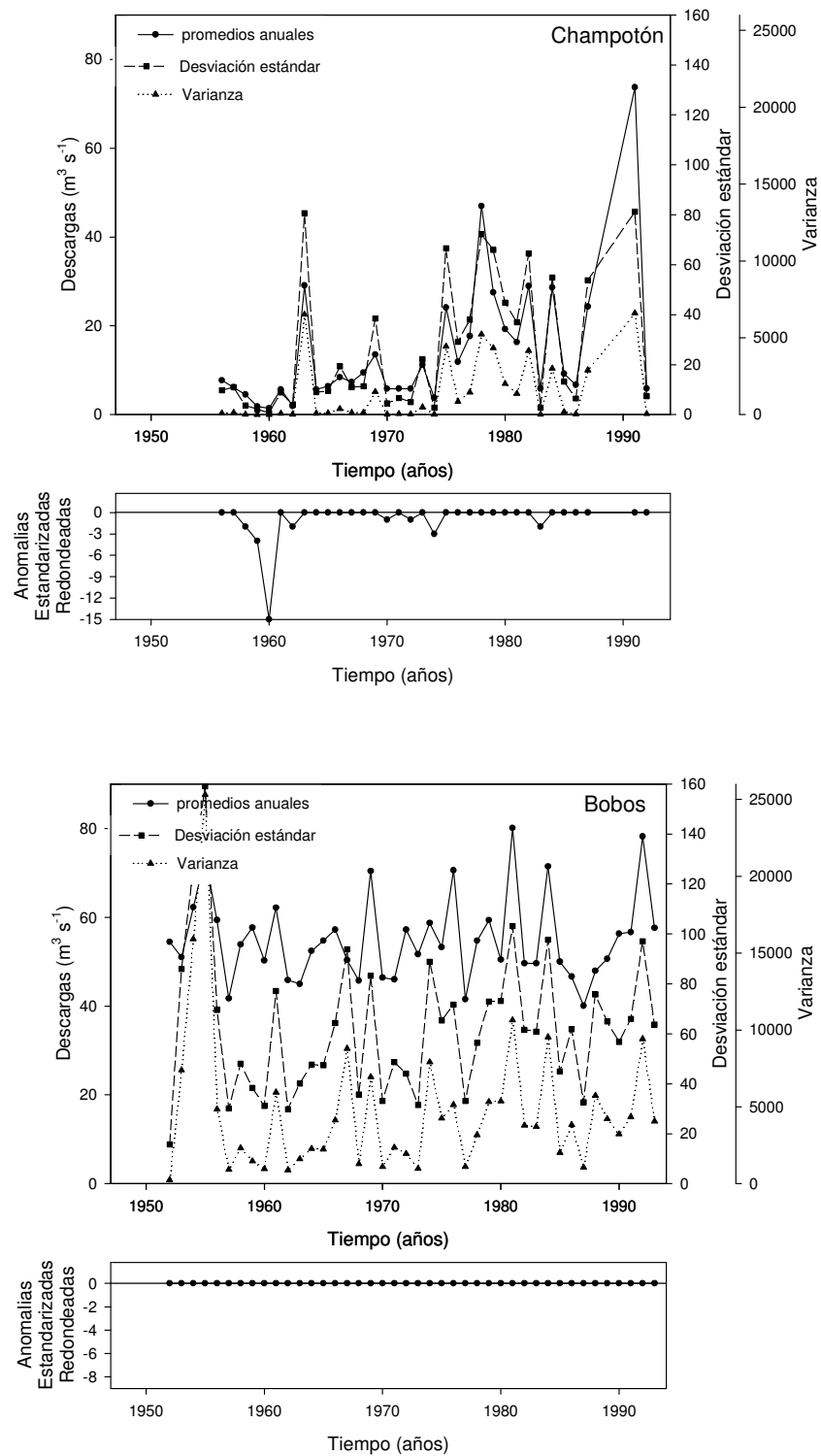


Fig. 5. Continuación.

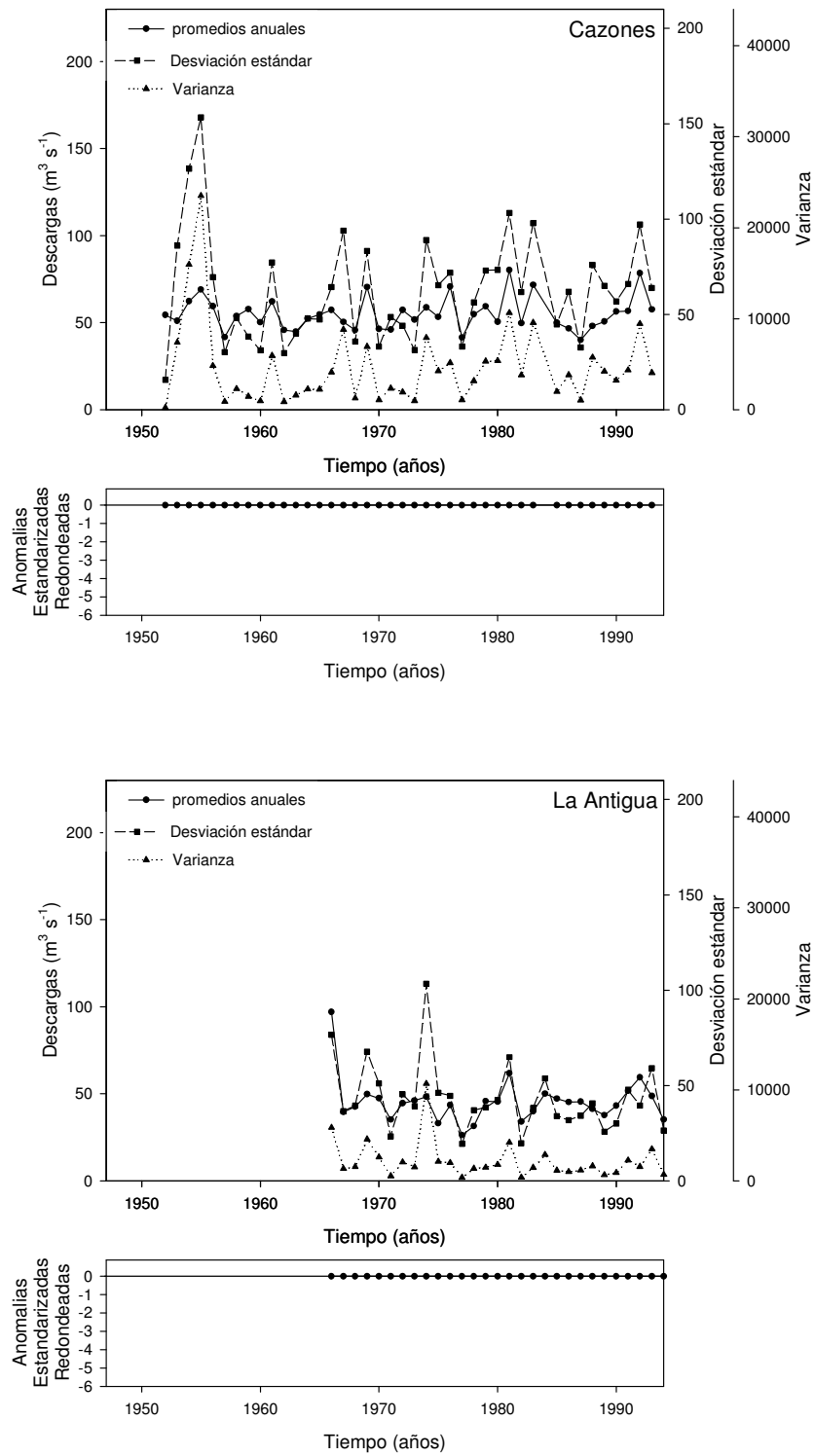


Fig. 5. Continuación.

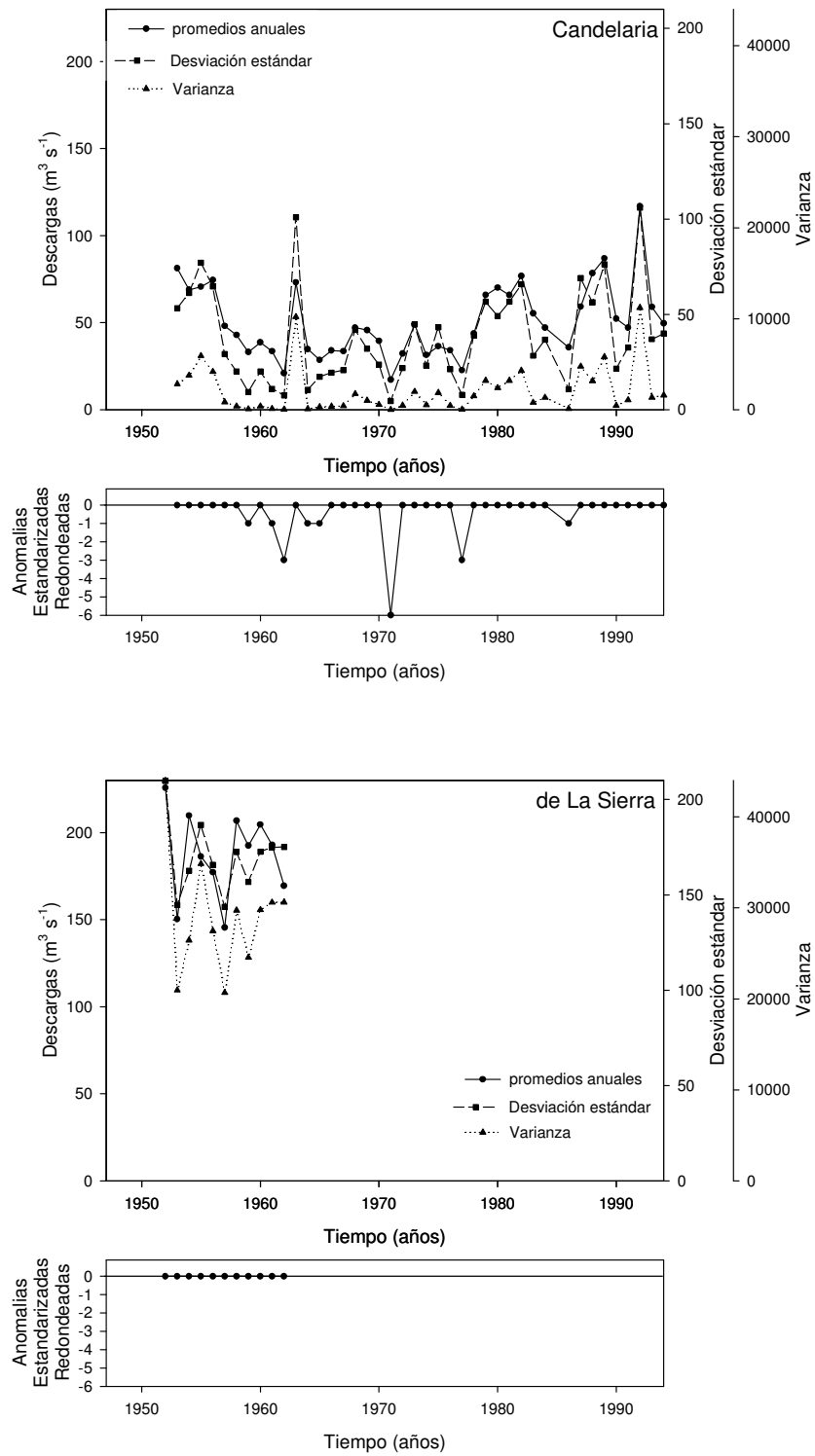


Fig. 5. Continuación.

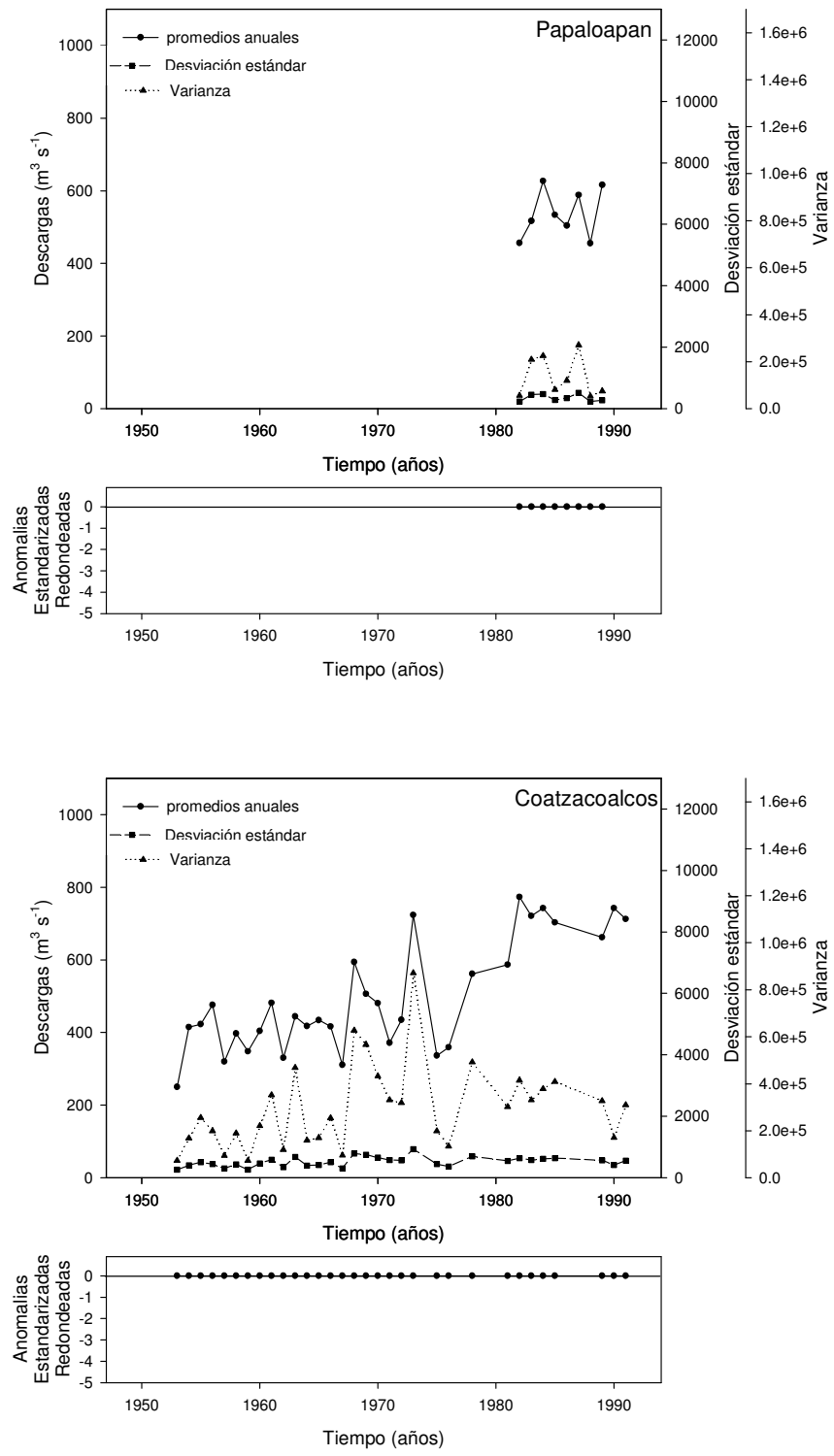


Fig. 5. Continuación.

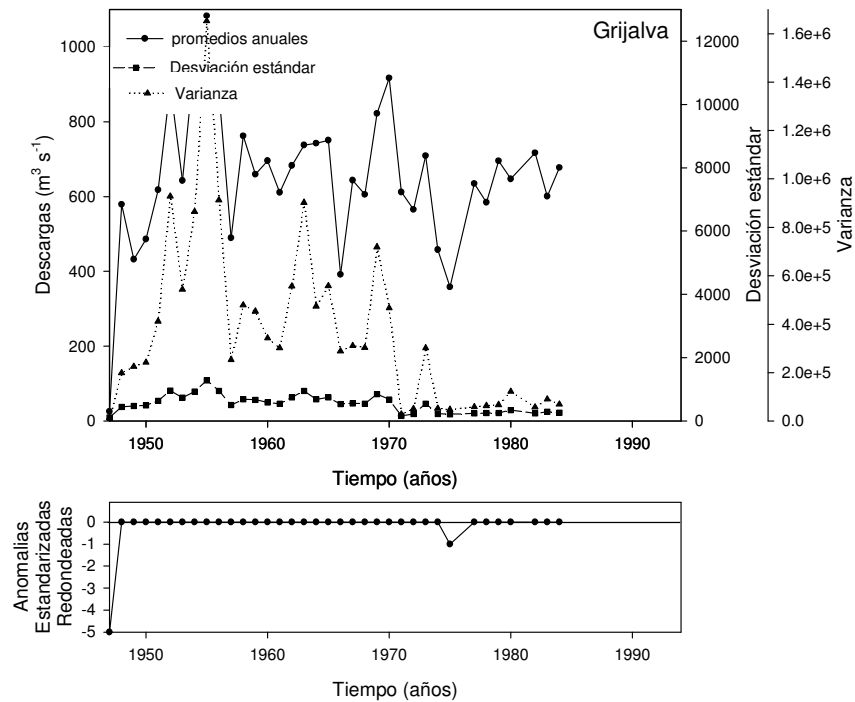


Fig. 5. Continuación.

En el caso del río Candelaria la tendencia de las descargas promedio anuales muestra una disminución de 1960 hasta fines de 1970, con un incremento en las descargas a partir de fines de 1970. Para este río se pueden ver intervalos con anomalías estandarizadas diferentes de cero, el primero, muy largo, va de 1959 hasta 1962, el segundo muy intenso durante 1971 y los otros dos restantes en 1977 y 1985. El río Coatzacoalcos no muestra anomalías diferentes a cero pero si una tendencia ascendente de las descargas promedio.

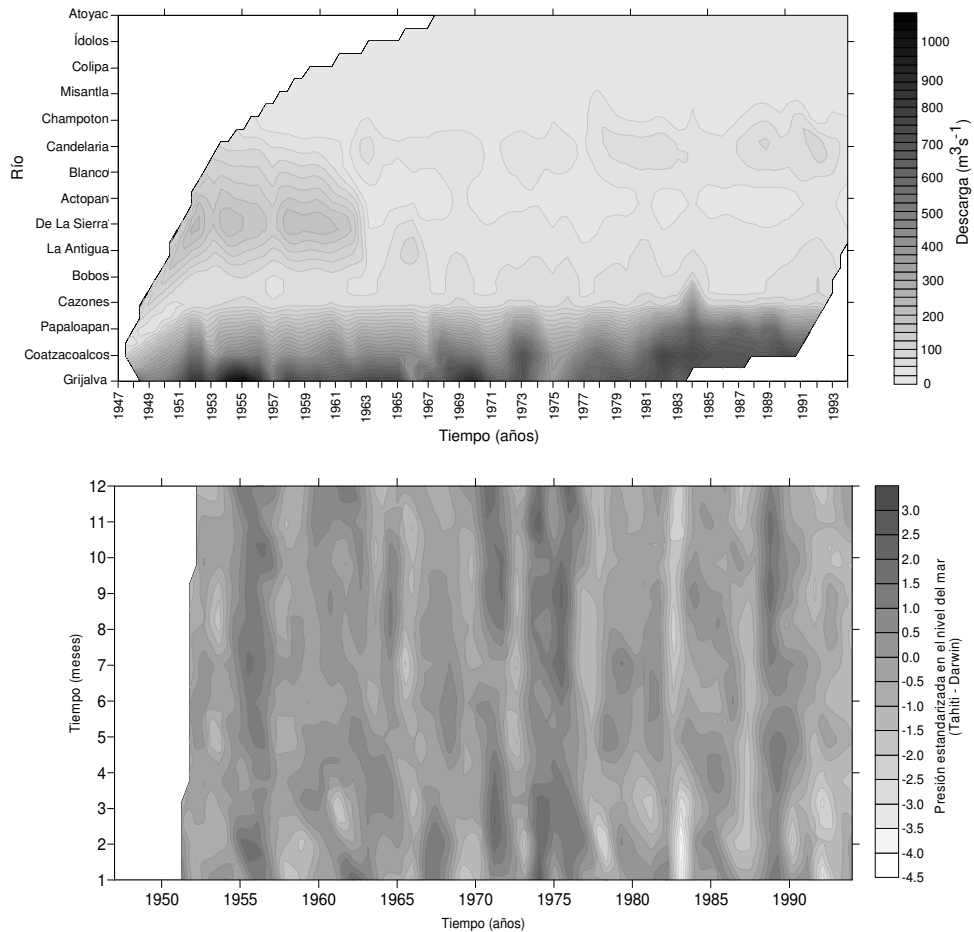


Fig. 6 Descargas promedio anuales de los principales ríos de la cuenca del Golfo de México e índice de la Oscilación del Pacífico Sur - El Niño.

Las descargas promedio de los ríos, comparadas con el Índice de oscilación del Océano Pacífico Sur - El Niño, calculada esta última como la diferencia de las presiones atmosféricas medidas en Tahití menos las medidas en Darwin, muestra que las mayores descargas ocurren cuando el índice es negativo; esto es, cuando se tienen eventos de La Niña, que es cuando el Pacífico Tropical Mexicano está más frío y el Golfo de México está más caliente (Caso *et al.*, 2007).

3.5 Años normales

Las figuras correspondientes a los valores promedios diarios (promedio de todos los días uno, dos, tres, etc., en todos los años) llamados “valores normales” se muestran en la figura 7. Se presentan en el mismo orden de agrupamiento que en el caso de los máximos

de cada río para una fácil comparación, nótese que las escalas de las descargas son diferentes en cada caso.

Las descargas “normales” muestran un pico pequeño durante el mes de enero para los ríos Atoyac, Misantla, Colipa, Ídolos, Actopan y La Antigua, resultado de las tormentas de invierno, localmente llamadas “nortes”. Otro pico mejor definido, se presenta a fines de marzo – principios de abril, también inducido por los nortes, en los ríos Atoyac, Misantla, Colipa, Blanco, Bobos y La Antigua.

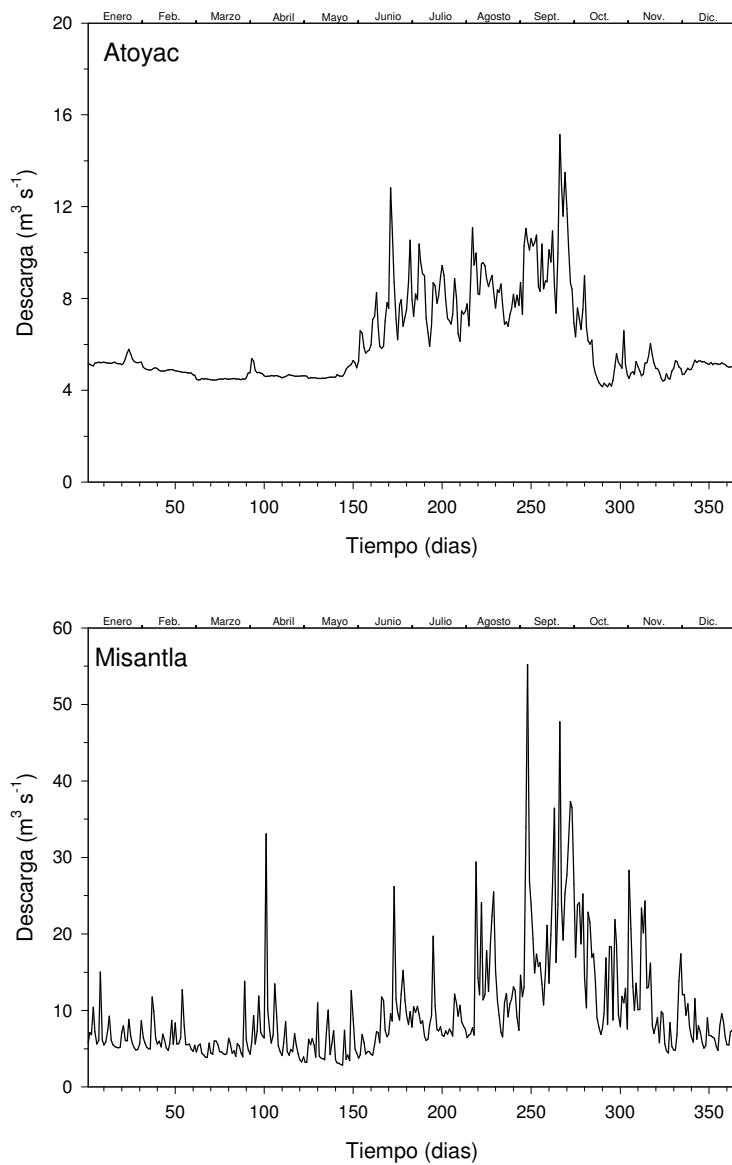


Fig. 7. Descarga en un “año normal”.

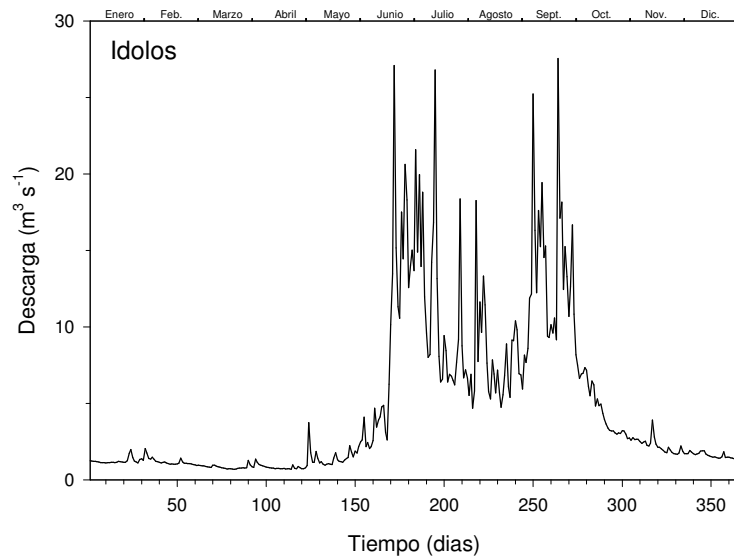
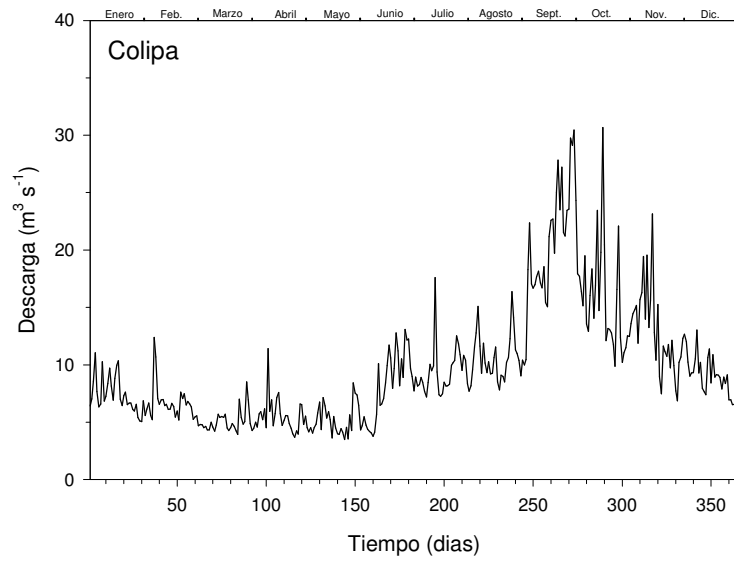


Fig. 7. Continuación

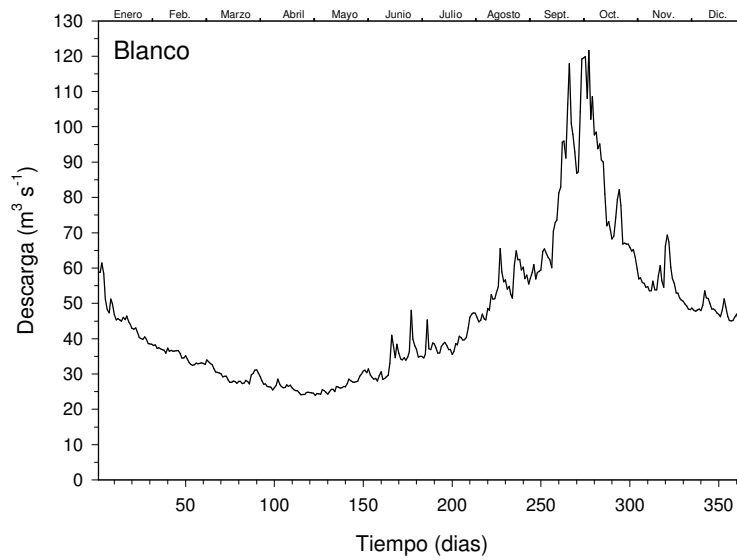
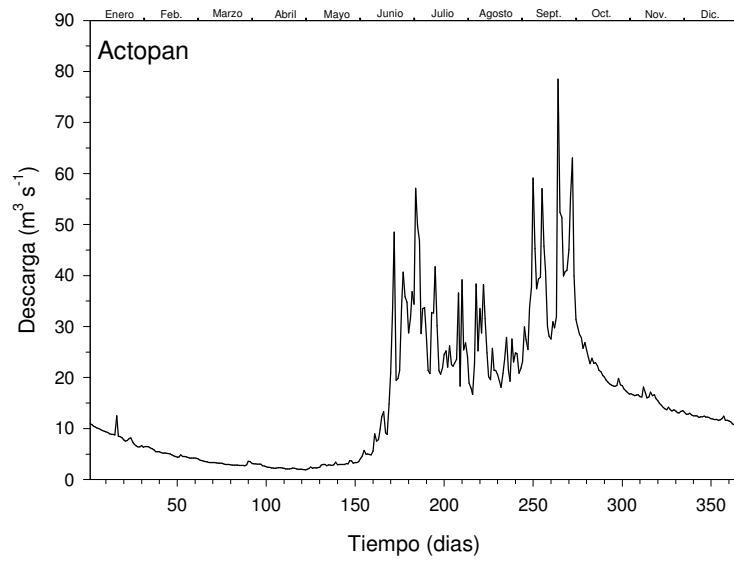


Fig. 7. Continuación

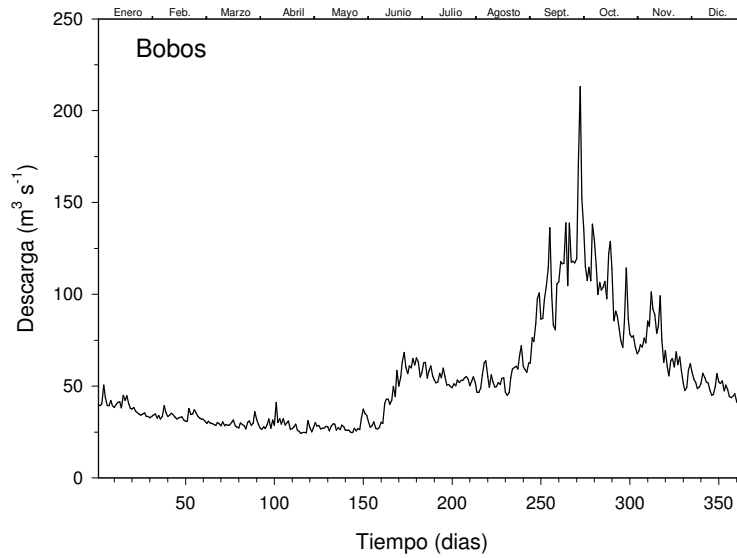
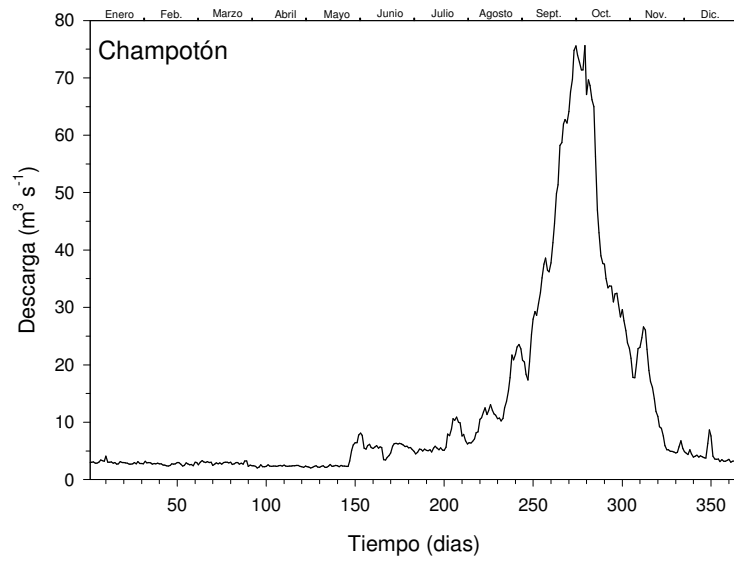


Fig. 7. Continuación

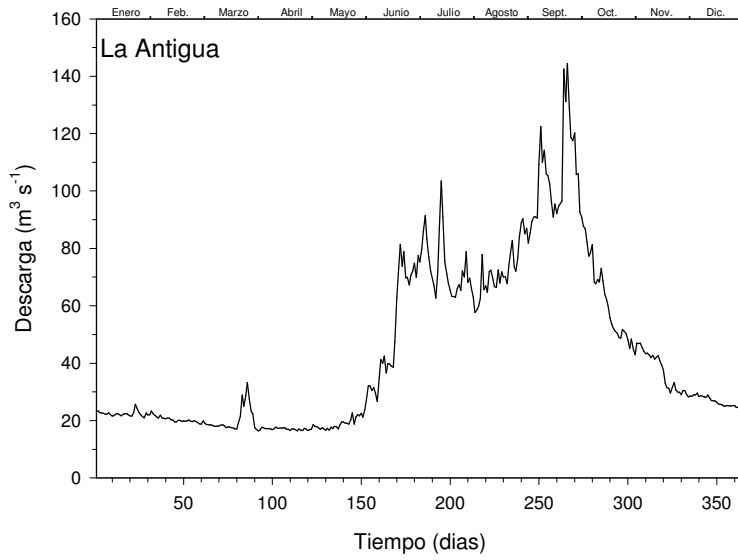
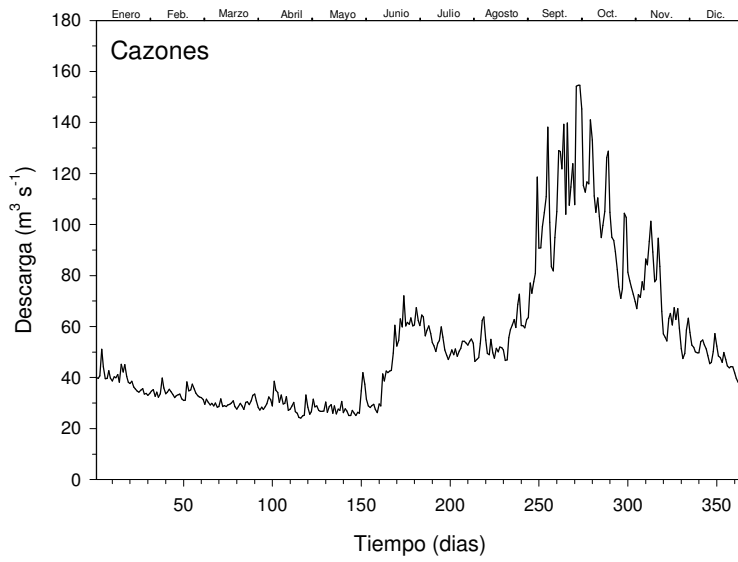


Fig. 7. Continuación

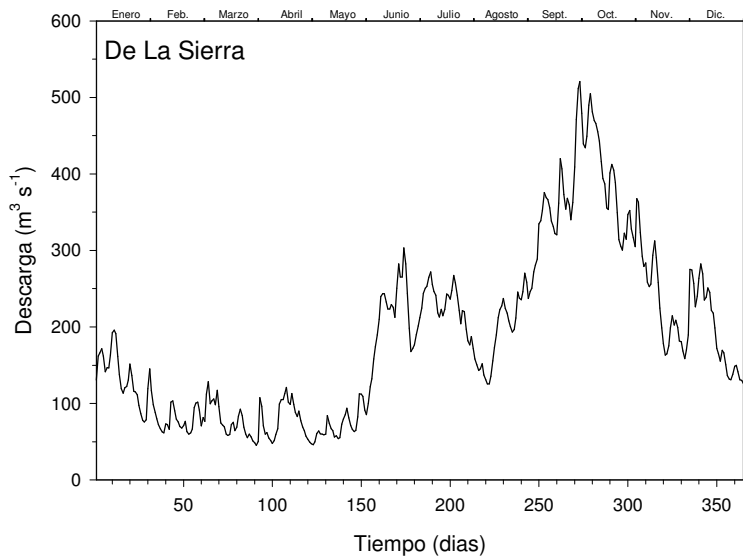
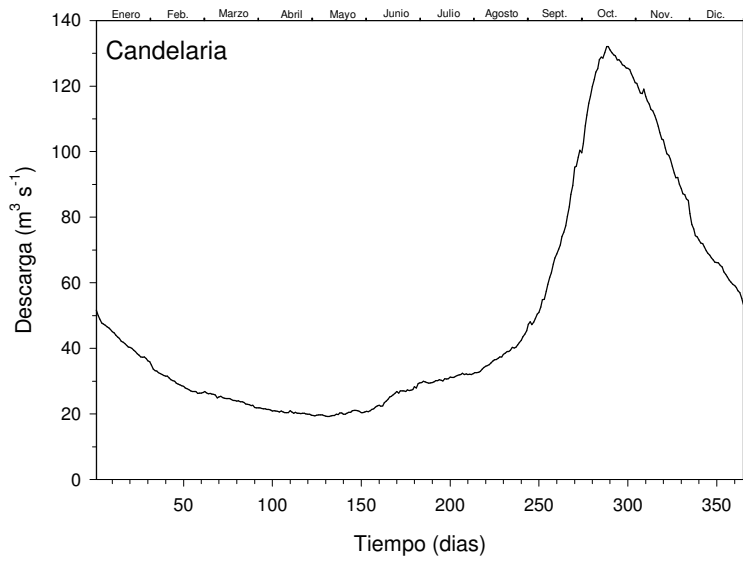


Fig. 7. Continuación

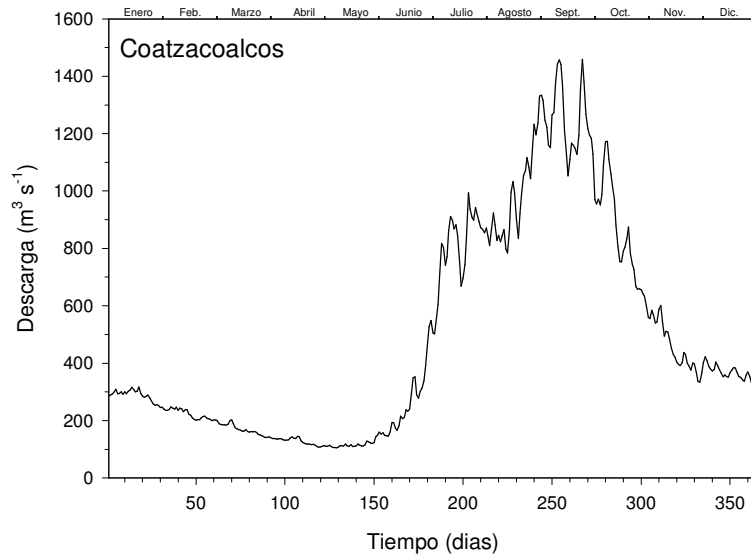
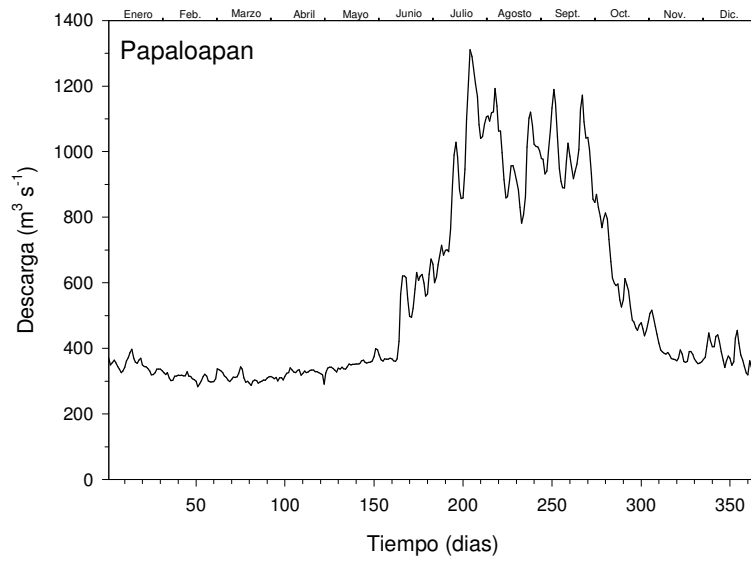


Fig. 7. Continuación

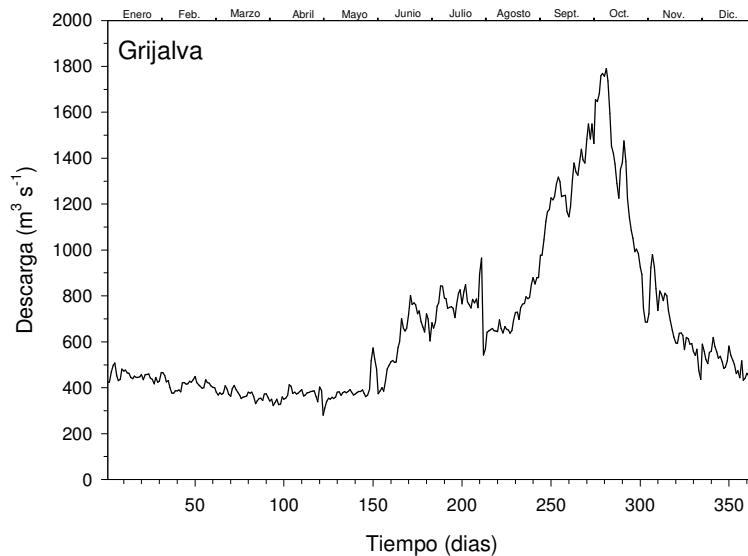


Fig. 7. Continuación

En todos los casos, las descargas máximas se presentan de junio a fines de octubre. En los ríos Atoyac, Colipa, Ídolos, Actopan, Bobos, Cazonos, La Antigua, De la Sierra, Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva, el comportamiento es ligeramente bimodal. Se tiene una disminución de las descargas de fines de julio hasta mediados de agosto para reiniciar los incrementos a fines de agosto. Esta disminución se puede atribuir al efecto de la canícula que produce una disminución en las lluvias y por consecuencia en las descargas de los ríos.

Para los ríos Ídolos y Papaloapan el máximo de las descargas se presenta entre junio y julio y para el resto de los ríos el máximo ocurre a partir de fines de septiembre hasta octubre.

Las descargas totales que vierten al Golfo de México los ríos estudiados, en un año normal se muestra en la tabla 4. Notece que en este caso algunos no coincide con el patrón de descargas máximas que se uso para agruparlos, como en los casos del Candelaria, Balnco y De la Sierra, que tienen descargas anuales normales mayores que los de su correspondientes grupos.

Tabla 4

Descarga total en millones de metros cúbicos, que descargan los ríos en un año normal al Golfo de México

Río	Descarga $\times 10^6 \text{ m}^3$
Atoyac	192
Misantla	311
Colipa	305
Ídolos	145
Candelaria	1559
Champotón	383
Blanco	1463
Actópan	482
De la Sierra	5913
La Antigua	1387
Bobos	1696
Cazones	1698
Papaloapan	16957
Coatzacoalcos	15446
Grijalva	20548
Total	68485

3.6 Espectros de potencia

Las figuras correspondientes a los resultados de los espectros de potencia mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), se muestran en la figura 8. Se conservó el orden de agrupamiento observado dependiendo de los máximos de cada río. En algunas de las figuras se introdujo un rompimiento de escala en el eje de la densidad espectral para resaltar los picos de menor amplitud. Sólo se marcan los picos que están dentro del 95% del límite de confianza del espectro.

Los espectros de potencia muestran que los períodos de mayor amplitud espectral son: 1 año y 6 y 3 meses. No obstante la aparente existencia de oscilaciones con períodos de 22

años en las figuras de las series de tiempo de las descargas y de 4 y 8 años en las figuras de los promedios anuales, no se observan picos espectrales significativos de dichos períodos en los espectros.

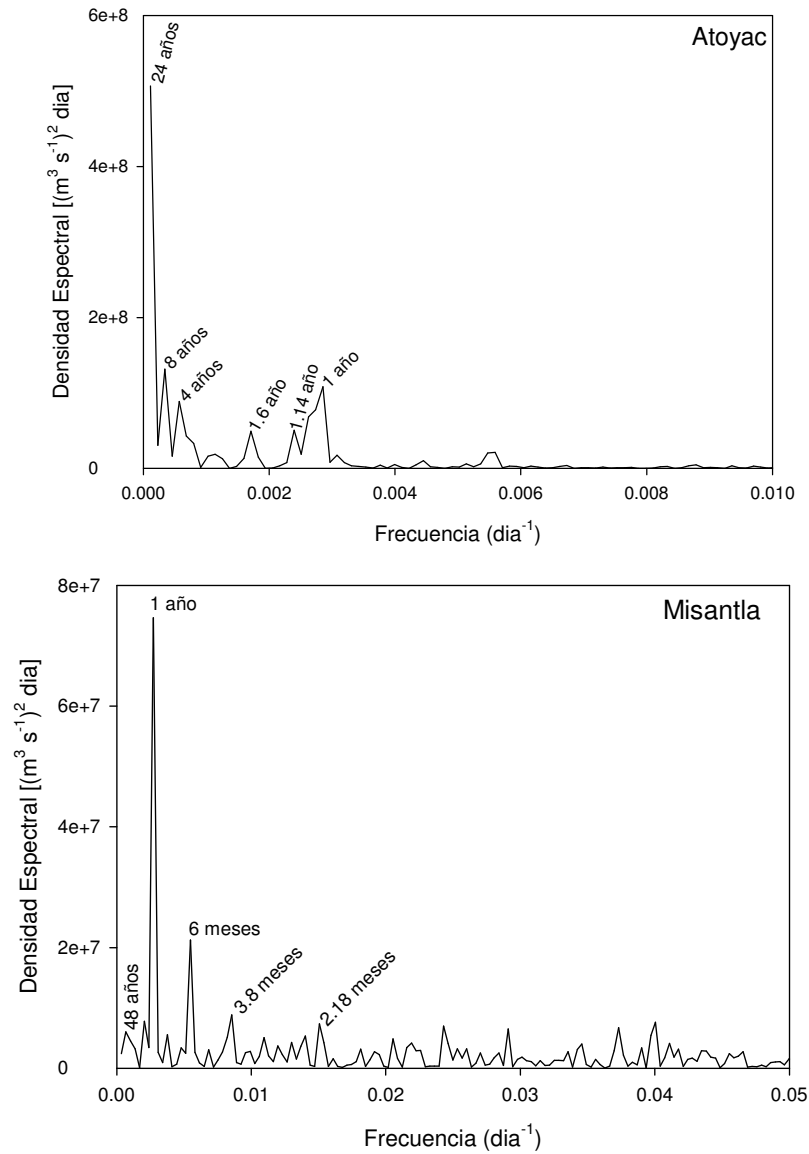


Fig. 8. Espectros de potencia de las series de descarga diaria de los ríos.

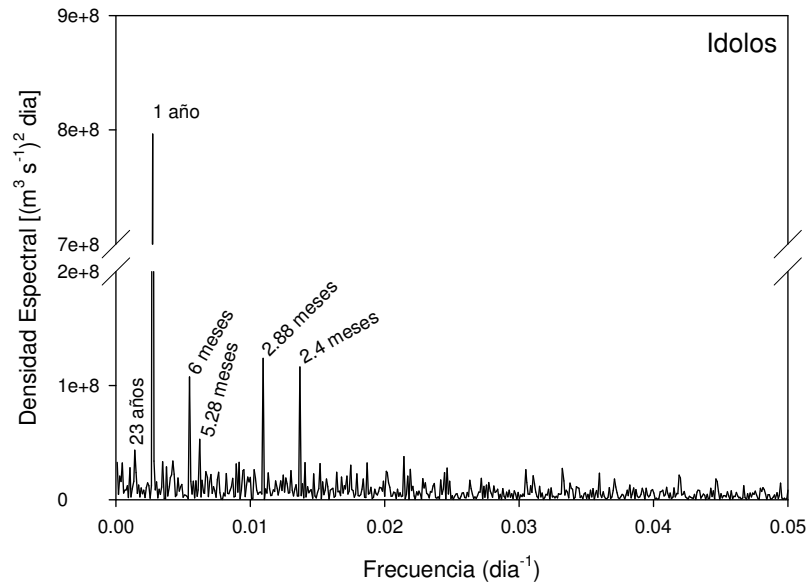
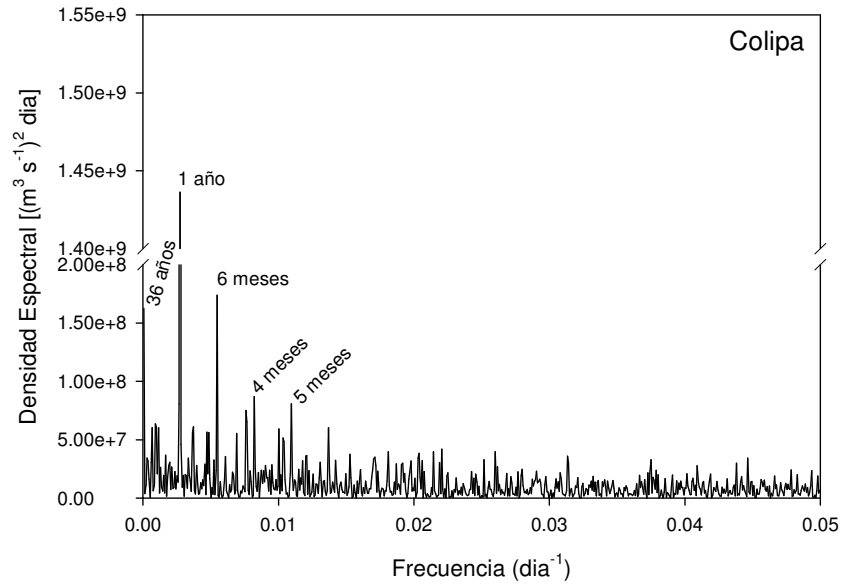


Fig. 8. Continuación.

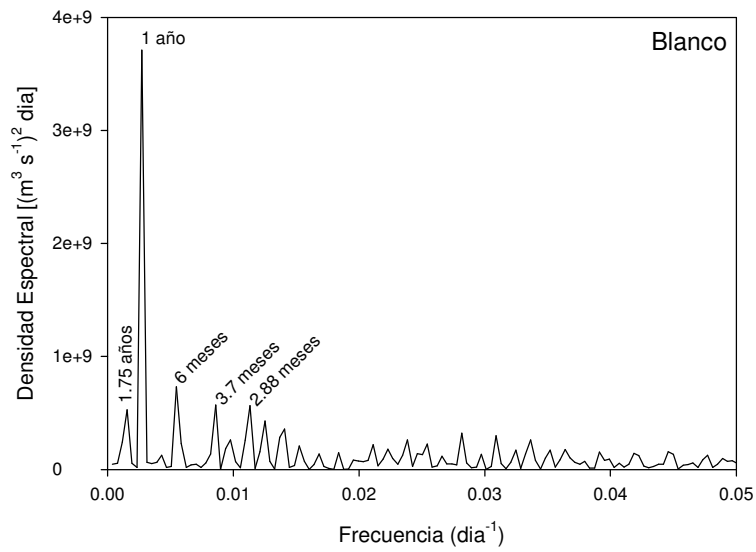
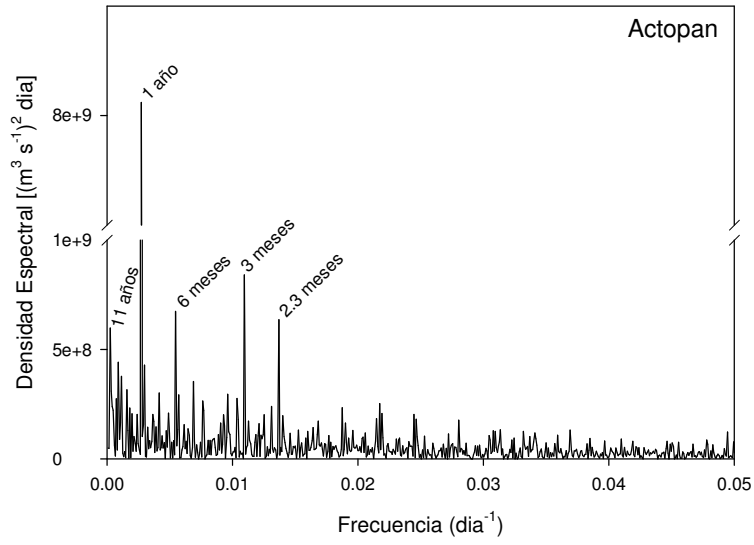


Fig. 8. Continuación.

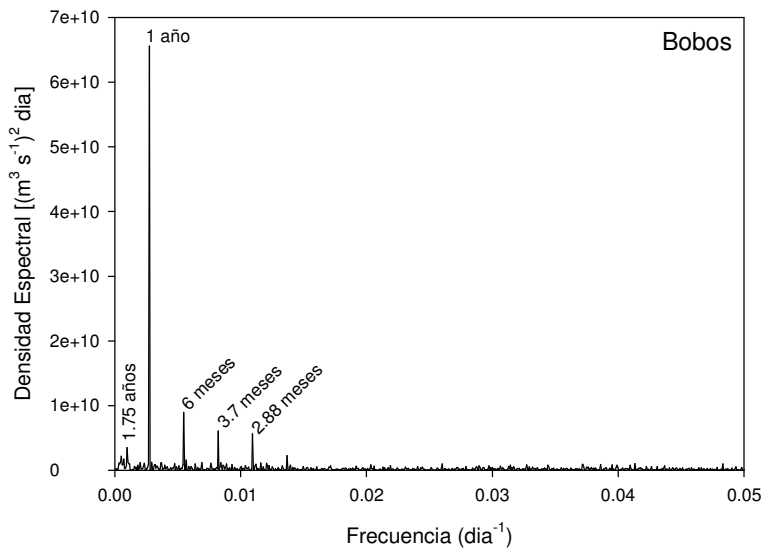
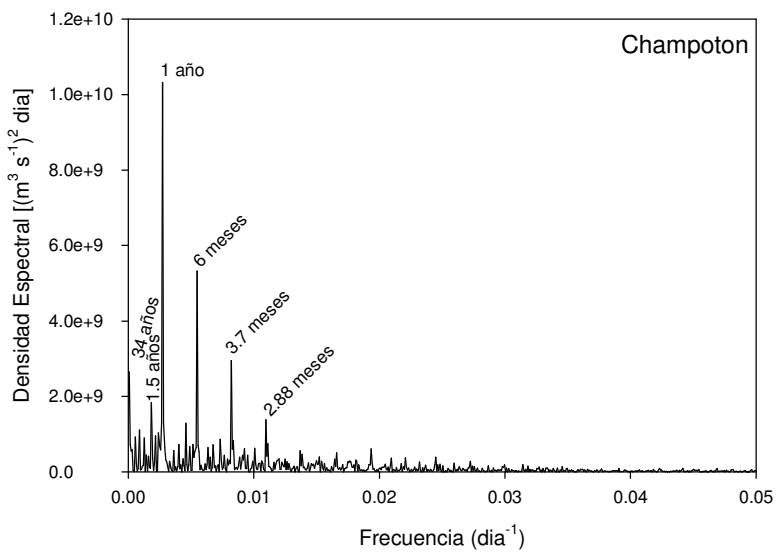


Fig. 8. Continuación.

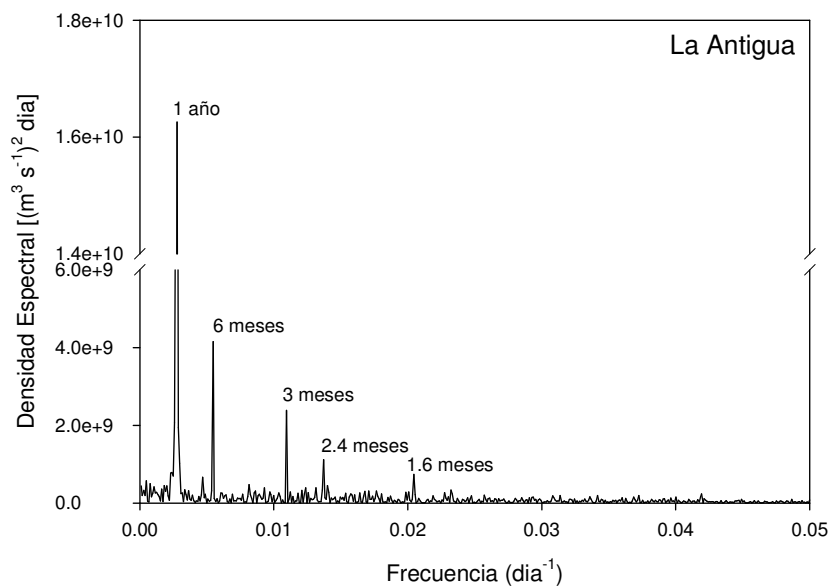
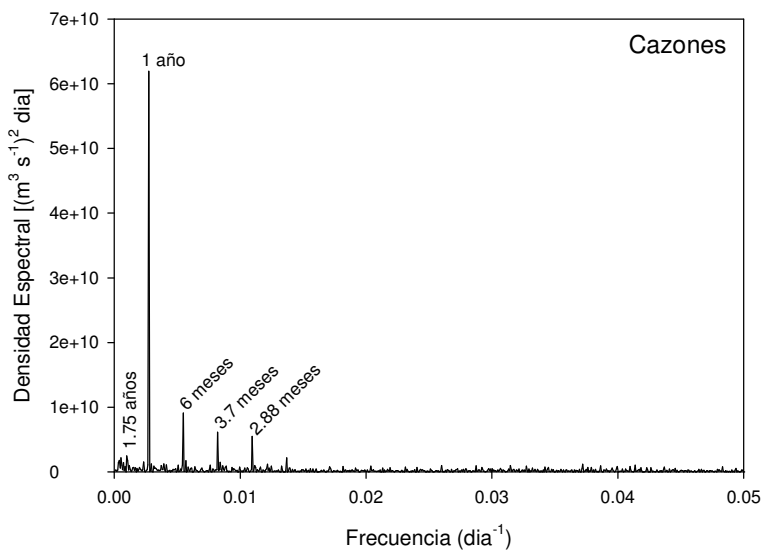


Fig. 8. Continuación.

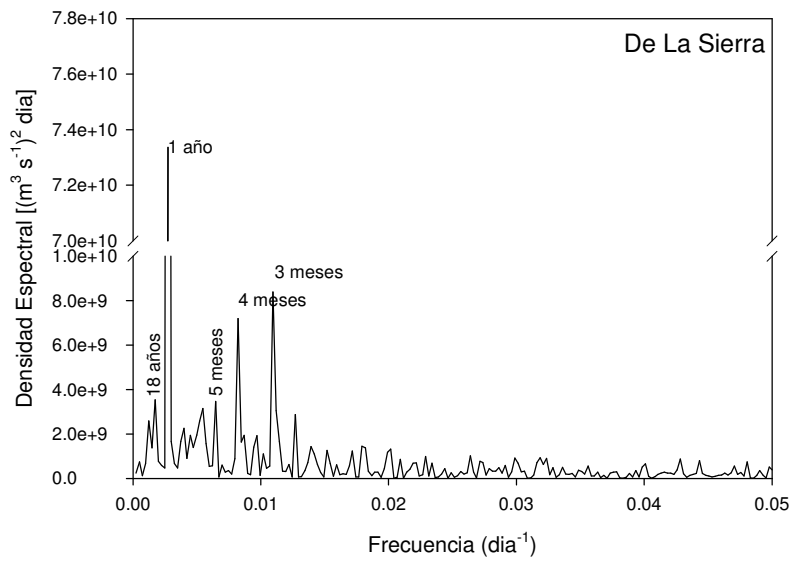
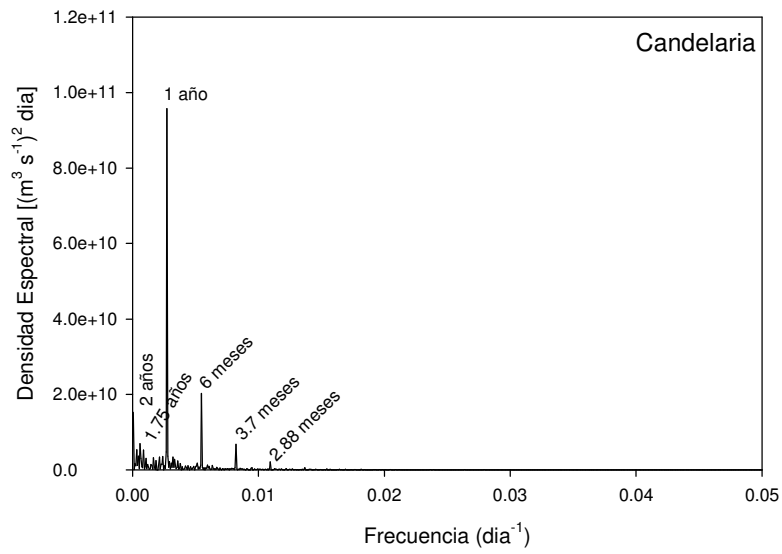


Fig. 8. Continuación.

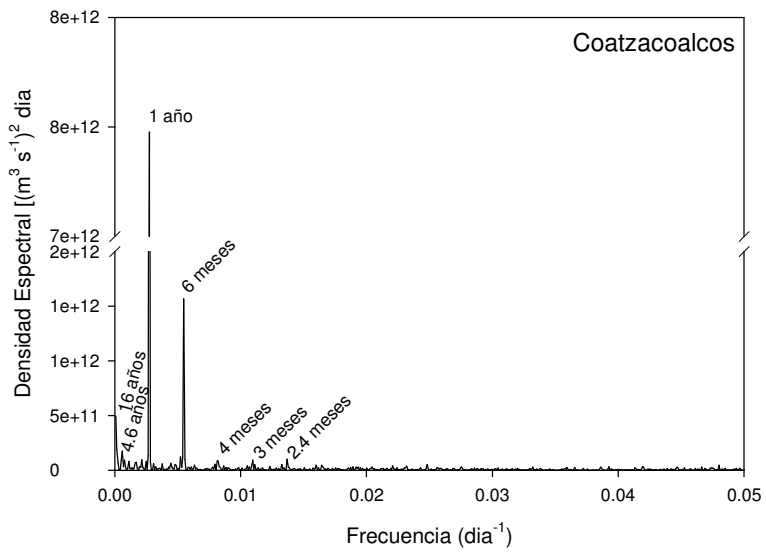
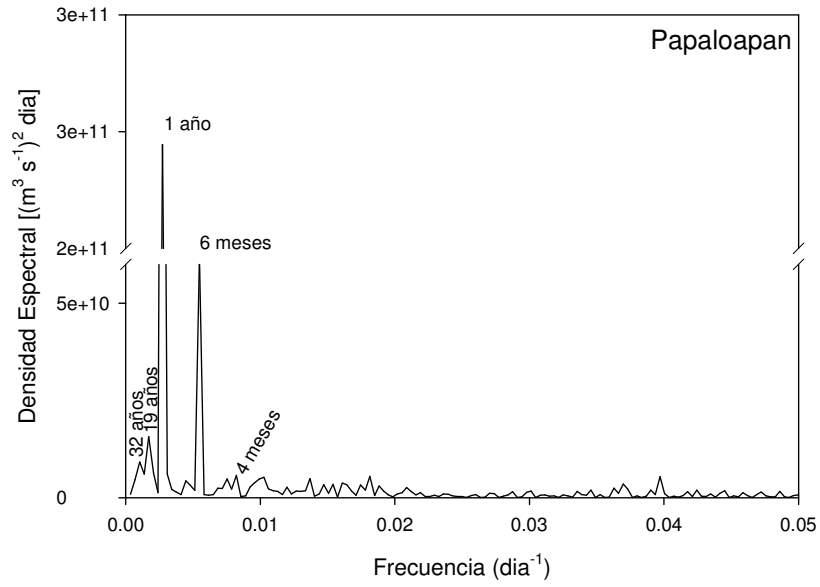


Fig. 8. Continuación.

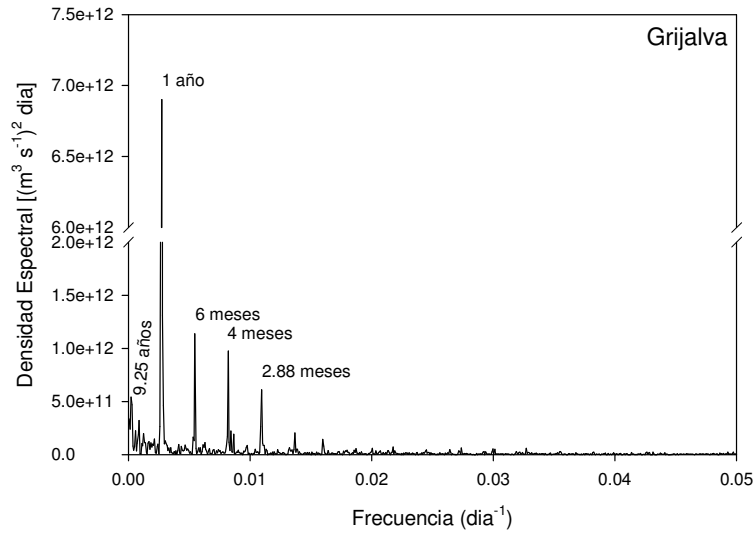


Fig. 8. Continuación.

3.7 Principales periodos de oscilación

Los principales períodos de oscilación de los espectros, observados en la figura 8, se resumieron en la tabla 5.

Tabla 5
Principales periodos de oscilación (años)

Río	Periodos por orden de importancia				
	1	2	3	4	5
Atoyac	8	1	4	1.6	1.4
Misantla	1	0.41	0.31	0.18	48
Colipa	1	0.50	0.33	0.41	38
Idolos	1	0.24	0.50	0.20	0.44
Actopan	1	0.25	0.50	0.19	11
Blanco	1	0.50	0.30	1.75	0.24
Champtoton	1	0.50	0.30	34	1.5
Bobos	1	0.50	0.30	0.24	1.75
Cazones	1	0.50	0.30	0.24	1.75
La Antigua	1	0.50	0.25	0.20	0.13
Candelaria	1	0.50	0.30	2	1.75
De La Sierra	1	0.25	0.33	0.50	18
Papaloapan	1	0.50	19	32	0.33
Coatzacoalcos	1	0.50	16	4.6	0.25
Grijalva	1	0.50	0.33	0.24	9.25

3.8 Cambios de fase de las oscilaciones a diferentes frecuencias

La figura 9 muestra los espectros en una representación log-log y la recta resultante del ajuste de los valores.

Los ríos Atoyac, Misantla, Blanco y Cazones, no muestran cambio alguno en la pendiente del espectro. Mientras que los ríos Colipa, Ídolos, Candelaria, De la Sierra, Champotón, Papaloapan y Coatzacoalcos, muestran un cambio en la pendiente entre las bajas frecuencias, períodos de decenas de años y las frecuencias altas. El resto de los ríos no muestra cambios notorios.

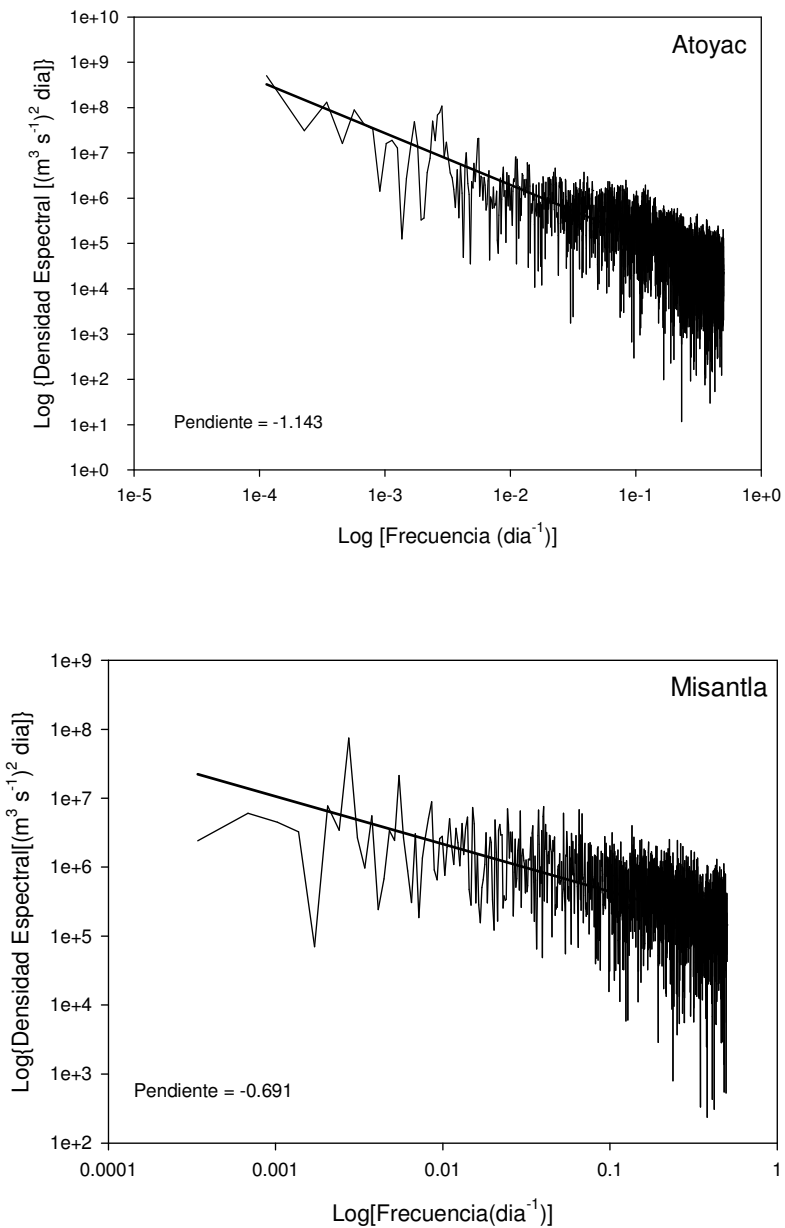


Fig. 9. Cambios en las fases en las descargas de los ríos a diferentes frecuencias o traslocaciones temporales. Los cambios en las pendientes de los espectros graficados log-log, nos indican cambios de fase o variabilidad climática.

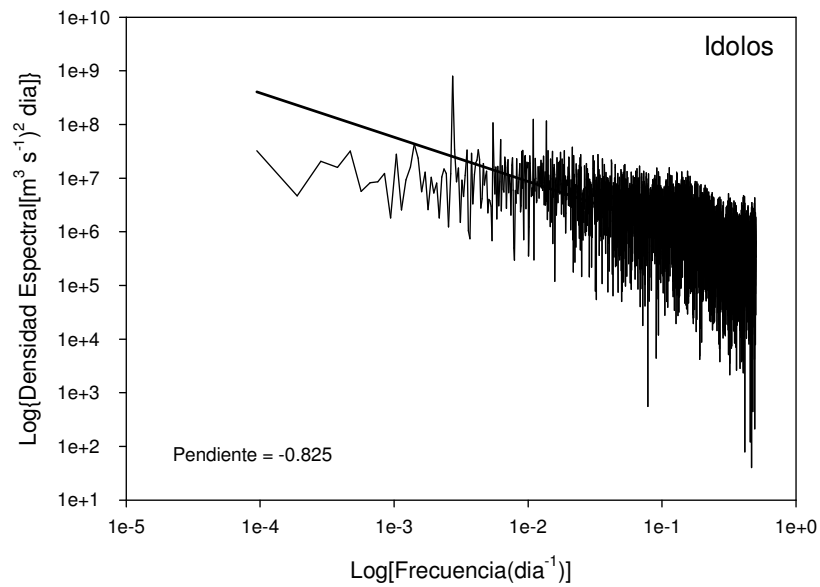
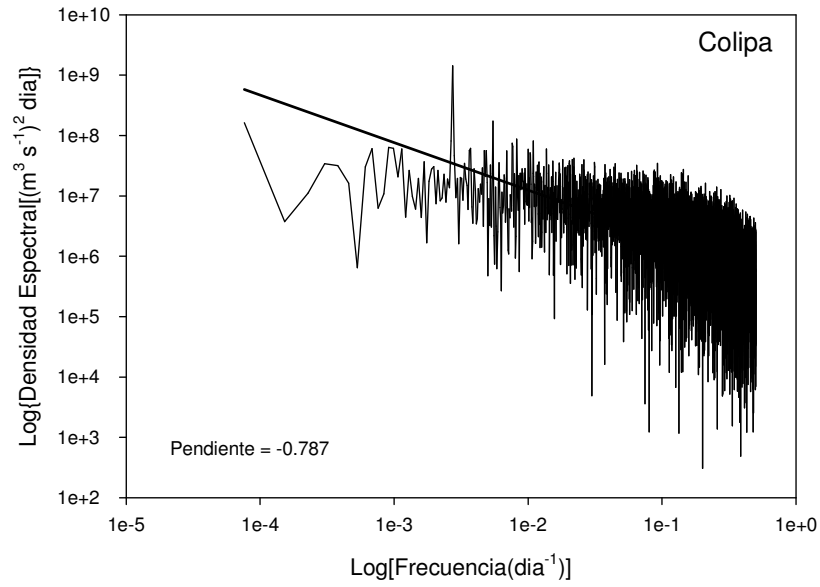


Fig. 9. Continuación.

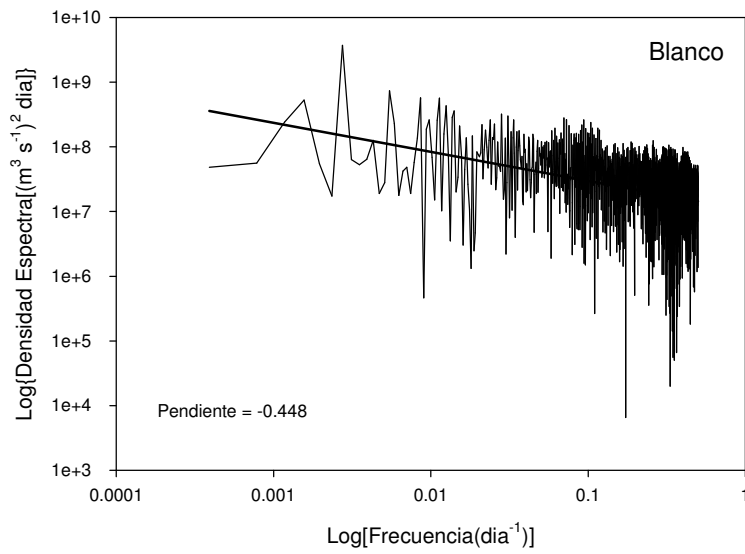
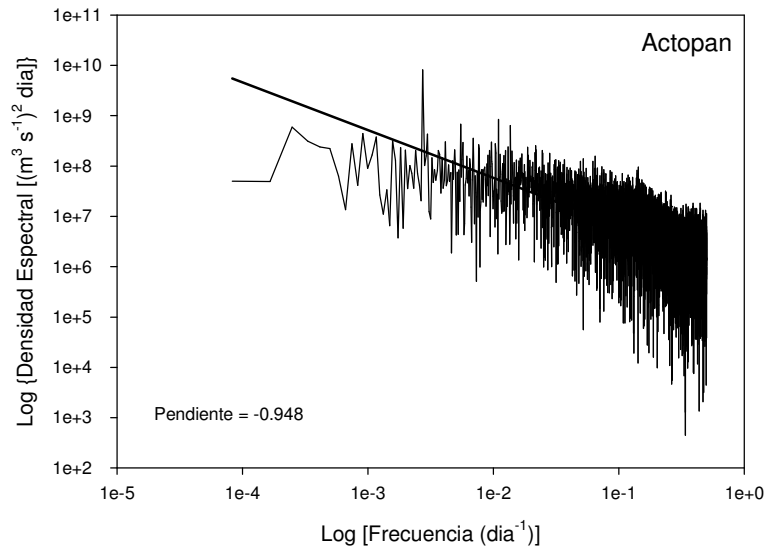


Fig. 9. Continuación.

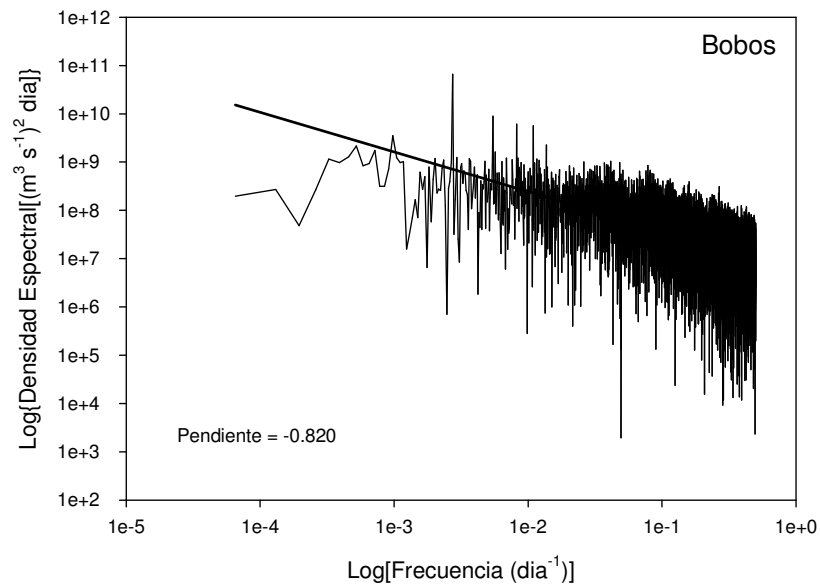
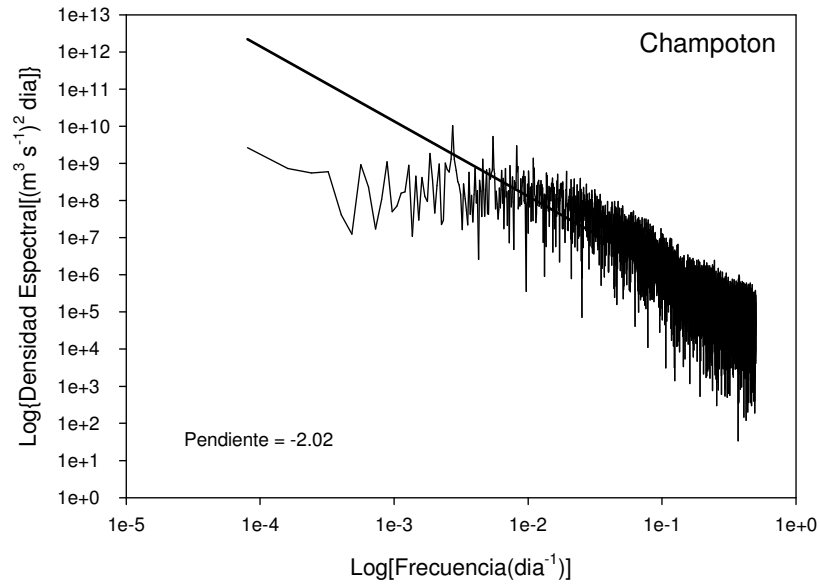


Fig. 9. Continuación.

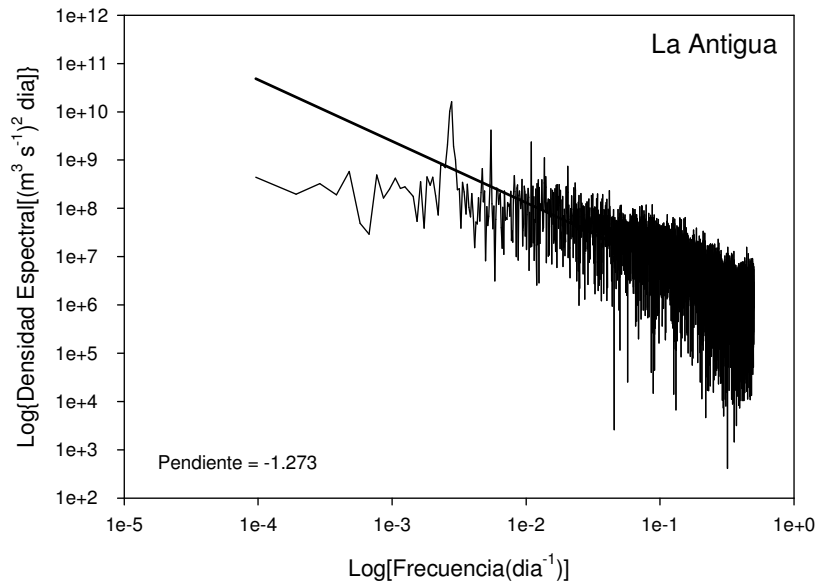
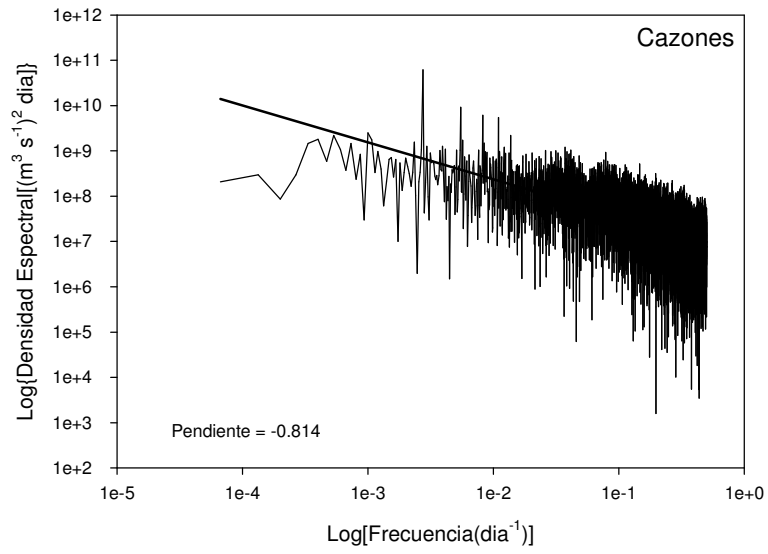


Fig. 9. Continuación.

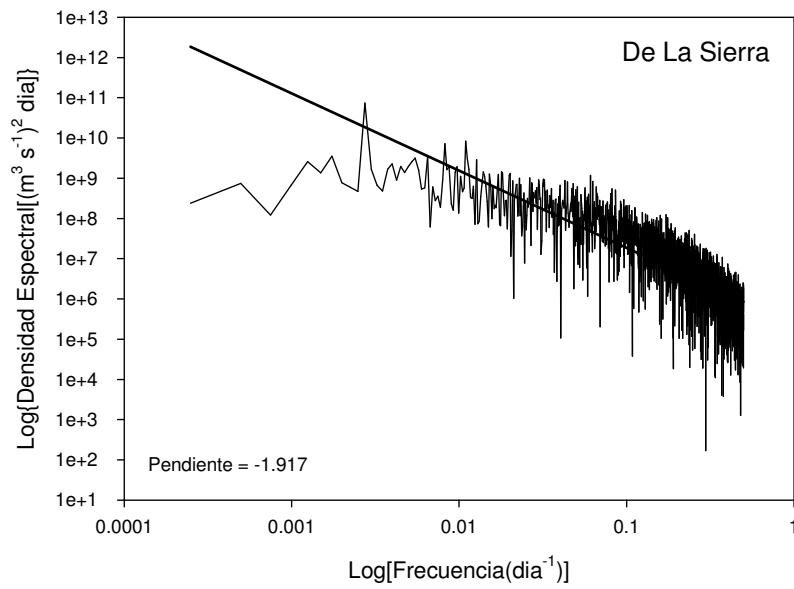
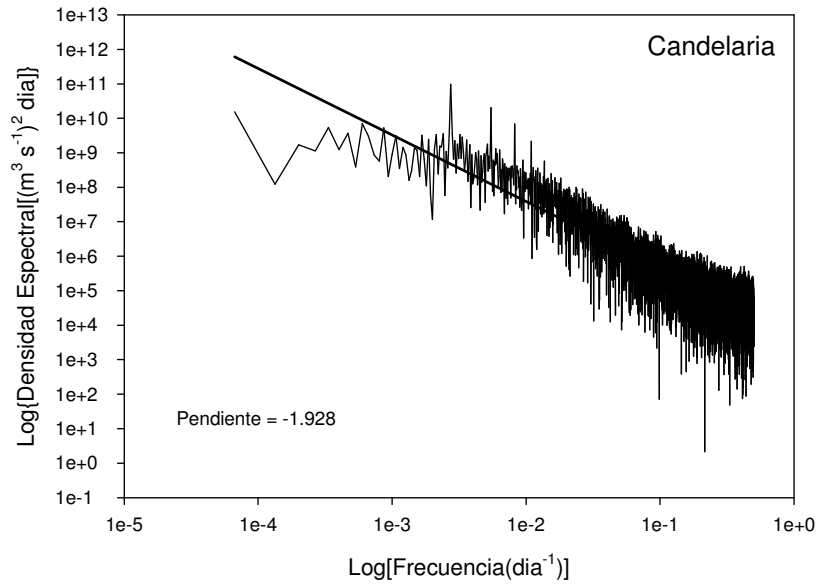


Fig. 9. Continuación.

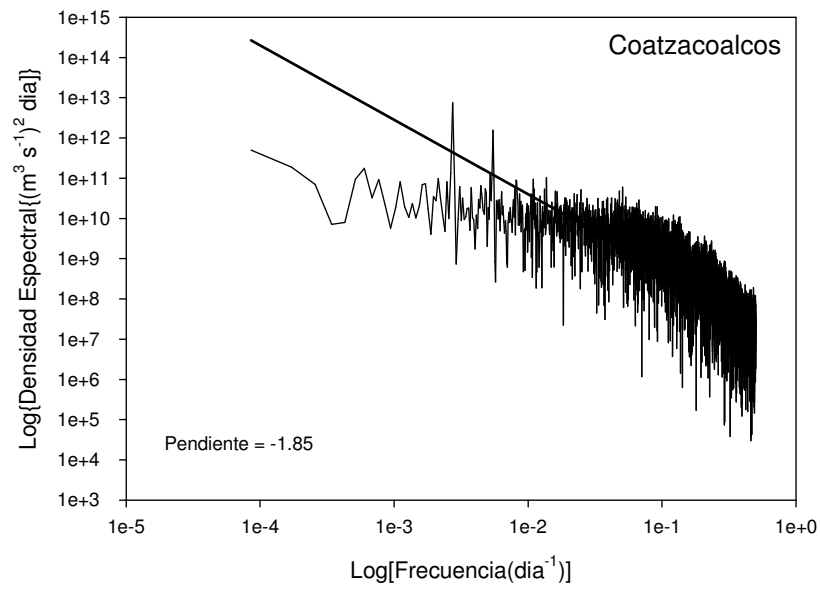
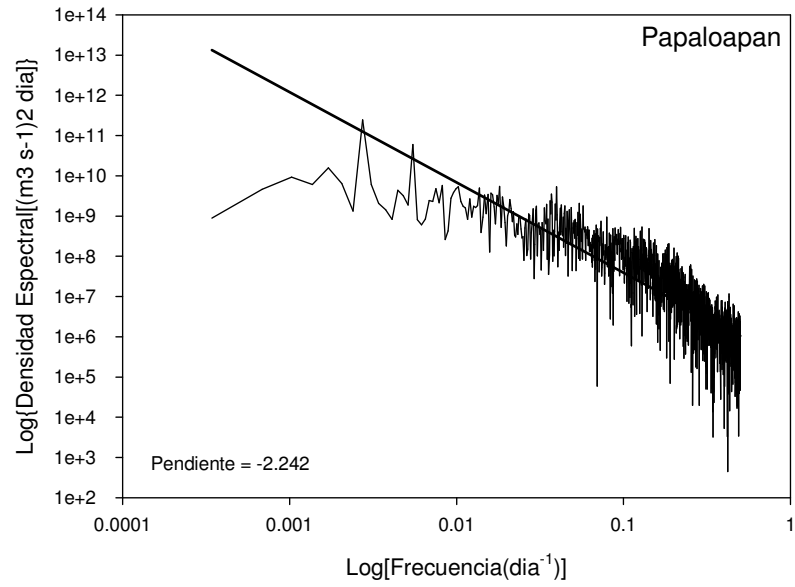


Fig. 9. Continuación.

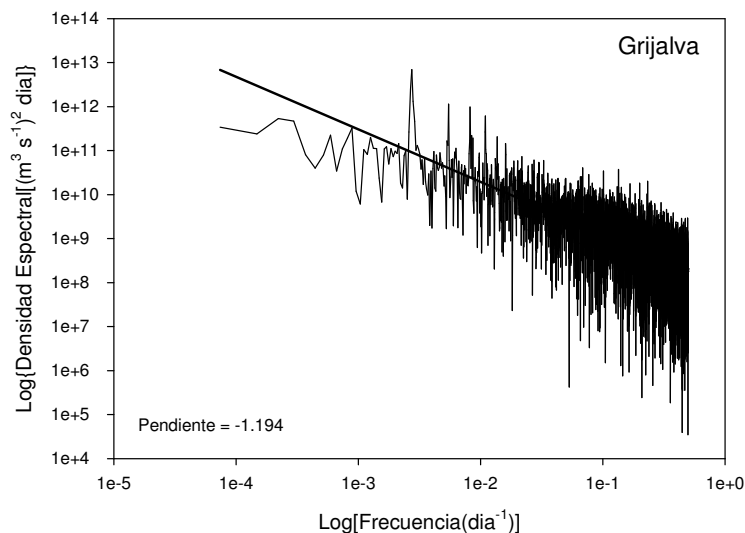


Fig. 9. Continuación.

3.9 Dimensión fractal (D) de las descargas de los ríos

Los valores de las pendientes (β) de las tendencias de los espectro log – log y de las dimensiones fractales (D), se muestran en la tabla 6.

Tabla 6
Pendiente de la tendencia (β) del espectro log – log y dimensión fractal (D).

Río	β	D
Atoyac	-1.143	3.072
Misantla	-0.691	2.846
Colipa	-0.787	2.894
Ídolos	-0.825	2.913
Actopan	-0.948	2.974
Blanco	-0.448	2.724
Champoton	-2.020	3.510
Bobos	-0.820	2.910
Cazones	-0.814	2.907
La Antigua	-1.273	3.137
Candelaria	-1.928	3.464
De La Sierra	-1.917	3.459
Papaloapan	-2.242	3.621
Coatzacoalcos	-1.850	3.425
Grijalva	-1.194	3.097

La distribución de los ríos en términos de su dimensión fractal (Figs. 10 y 11) muestra tres posibles agrupaciones. Analizando la distribución geográfica de los ríos se puede observar que responden a agrupamientos de tres regiones con condiciones hidrometeorológicas y geográficas similares. Es interesante hacer notar que el río Grijalva se ubica, por su dimensión fractal, en el grupo 2.

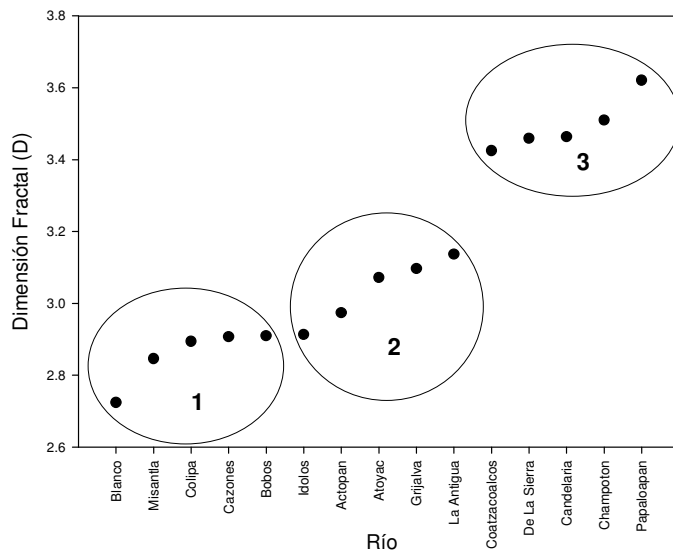


Fig. 10. Dimensión fractal de la descarga de los ríos. Los círculos engloban ríos por intervalos de valor de dimensión fractal similar.

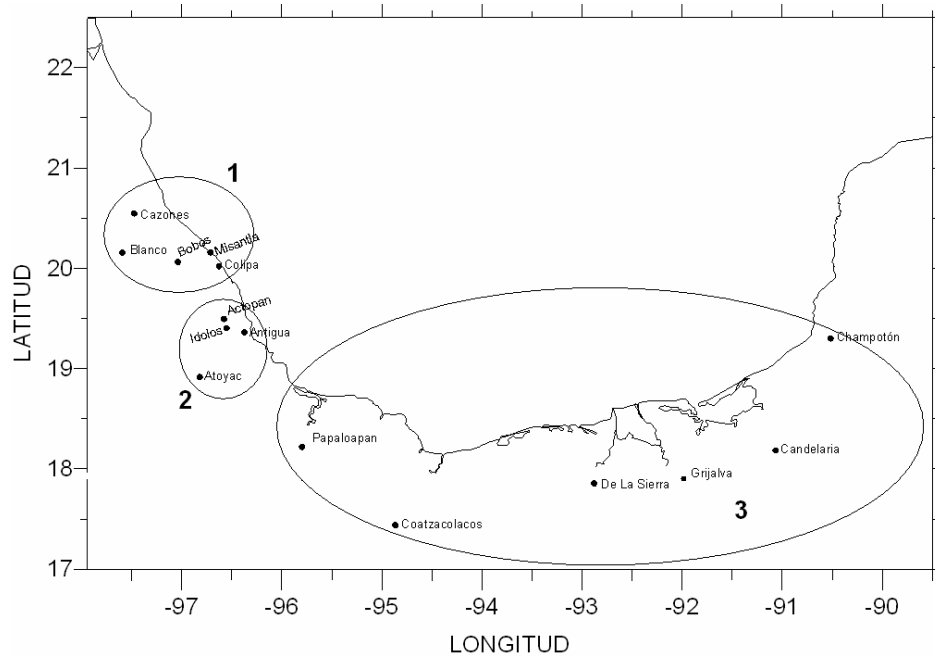


Fig. 11. Distribución de estaciones de aforo de los ríos. Los círculos engloban ríos por intervalos de valor de dimensión fractal similar de acuerdo con la figura 8. El río Grijalva quedó dentro de la región 3 por problemas de dibujo, pero está en la zona 2.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN

Los ríos más caudalosos: Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva, se encuentran en la parte sur de la cuenca del golfo; estos ríos se benefician del arrastre, por los vientos, hacia el sur del aire húmedo que se forma sobre el Golfo de México. El aire húmedo al chocar con las montañas por efectos convectivos transforma la humedad en lluvia, la cual escurre hacia las cuencas hidrológicas y alimenta el caudal de los ríos. Por otro lado, parte de la humedad que se forma en la costa sur del pacífico tropical mexicano llega a las montañas en donde se descarga en forma de lluvia y una parte escurre hacia la cuenca del Golfo de México (Monreal Gómez *et al.*, 2004).

El análisis estadístico exploratorio muestra para casi todos los ríos que en las estaciones de aforo, el mínimo ha llegado a ser cero en algún momento de su historia, los únicos ríos con mínimos diferentes a cero son: Actopan, Blanco, De la Sierra, Misantla y Papaloapan; de éstos, el Papaloapan es el que tiene la mayor descarga mínima. La mayoría de los ríos más caudalosos muestran mínimos de cero, lo cual es poco probable. Esto nos inclina a pensar que los equipos de medición del nivel del agua o limnógrafos no están colocados hasta el fondo, por lo que cuando el río disminuye su caudal considerablemente los sensores quedan descubiertos y marcan descargas de cero. La mayoría de los ríos analizados tiene descargas promedio del orden de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; sólo los ríos Coatzacoalcos, De la Sierra, Grijalva y Papaloapan tiene descargas promedio del orden de $10^2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Los ríos de las zonas templadas y tropicales tienen descargas del orden de $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Dai y Trenberth, 2002), lo cual muestra que si bien los ríos estudiados son ríos importantes, sus descargas no son significativamente altas.

Las diferencias entre las descargas máximas y las descargas promedios son grandes, lo cual indica que las descargas de estos ríos están fuertemente influenciadas por las temporadas de lluvias y no tienen un aporte relativamente constante. Lo anterior es característico de los ríos de las zonas subtropicales (Campagnucci *et al.*, 2000; Robertson y Mechoso, 1998). En las regiones tropicales y templadas, las lluvias son relativamente

constantes, con un ligero aumento en sus caudales durante las temporadas de lluvias. En las zonas de latitudes subtropicales las descargas de agua que llevan los ríos depende fuertemente de las oscilaciones estacionales de los vientos, los cuales al cambiar arrastran cantidades significativas de humedad, a este proceso se le conoce como monzón. En latitudes altas, los ríos tienen descargas relativamente constantes, con variaciones inducidas por el congelamiento de las cuencas hidrológicas y aumentos en sus flujos cuando se descongelan.

Las anomalías estandarizadas muestran eventos extraordinarios sólo para los ríos Atoyac, Actopan, Blanco, Champotón, Candelaria y Grijalva, siendo los ríos Candelaria y Champotón los que tienen el mayor número de eventos y los eventos más extremos.

La variabilidad presentada por los ríos de la cuenca del sur del Golfo de México y su dependencia en la estacionalidad muestra la dependencia que tienen estos ríos de zonas subtropicales ante eventos de variabilidad climática global como son El Niño o La Niña (Campagnucci *et al.*, 2000; Robertson y Mechoso, 1998). Las máximas descargas históricas ocurrieron en su mayoría en septiembre y octubre, en 1956, 1962-1963, 1969, 1974, 1985-1988 y 1993, coincidiendo con eventos de La Niña. Los mínimos no presentan una información confiable como para ser asociados a eventos de El Niño; sin embargo, los promedios muestran valores bajos en épocas de Niños. Los máximos históricos de descargas coinciden con índices negativos de El Niño - Oscilación del Sur (ENSO), lo cual se conoce como La Niña. Durante los eventos de La Niña el pacífico tropical mexicano se encuentra más frío de lo normal, pero el atlántico tropical y en consecuencia el Golfo de México, tiene temperaturas más elevadas lo que favorece la formación de humedad y de huracanes sobre el golfo. Por otro lado, los máximos ocurren en su mayoría, en los últimos días de septiembre, lo cual puede ser el resultado de la llegada de huracanes intensos.

La evolución temporal de las descargas en los diferentes años, muestra un corrimiento de sus máximos hacia fines de septiembre y valores de descargas aproximadamente constantes. Sólo los ríos más caudalosos presentan tendencias ascendentes, lo que difiere de las declaraciones efectuadas en diferentes medios de

comunicación, en los cuales se menciona constantemente que hay un decremento en las descargas de agua de los ríos inducido por el calentamiento global. El calentamiento global resulta en un aumento de la temperatura superficial de los océanos en uno o dos grados centígrados, con lo cual se requeriría una menor cantidad de calor para producir evaporación. Los modelos desarrollados para el estudio del cambio climático teniendo en cuenta un aumento de la temperatura de los océanos, predicen un aumento de las lluvias en las regiones subtropicales (Keller *et al.*, 1999).

Los valores normales de las descargas de los ríos muestran que la temporada de mayores descargas inicia en junio para todos los ríos, pero termina en diferentes meses. Para los ríos Atoyac, Misantla, Ídolos, Actopan, Blanco y La Antigua termina en octubre, mientras que para los ríos Colipa, Champotón, Bobos, Cazonas, Candelaria, De la Sierra, Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva termina en noviembre. Excepto por los ríos Cazonas, Colipa y Bobos, se podría decir que se agrupan en función de las características geomorfológicas de las cuencas hidrográficas. La parte norte del estado de Veracruz se caracteriza por ser montañosa y con una planicie muy angosta entre las montañas y la costa, por lo que el tiempo de escurrimiento será menor que el de las cuencas hidrológicas del sur, donde la planicie es mucho más amplia. Los ríos Cazonas, Colipa y Bobos probablemente tienen tiempos de escurrimientos mayores por lo sinuoso de sus causas. Las descargas normales de los ríos muestran una disminución de las descargas entre julio y agosto debido probablemente al efecto de la canícula. La canícula es una disminución en la temperatura de verano, ésta se produce como resultado de las lluvias que se generan por la formación de vapor a principios del verano, lo que ocasiona una disminución de la temperatura y una disminución de las lluvias, posteriormente la temperatura vuelve a subir y con ello se incrementan las lluvias (Salas Monreal, 2000). Es importante hacer notar que las descargas normales del río Candelaria son muy suavizadas, mientras que el resto de los ríos presenta descargas normales con ciertas variaciones, esto nos inclina a pensar que el río Candelaria puede tener alguna presa o derivadora, río arriba que induce un filtrado en las descargas, siendo en realidad un sistema no prístino. Sin embargo, esto no se pudo comprobar durante la elaboración de esta tesis.

La contribución total de agua de los ríos estudiados es de $68485 \times 10^6 \text{ m}^3$ en un año, estos es por los principales ríos del sur del Golfo de México, pero no para todos y representa la mayoría del aporte de agua al golfo después del sistema de ríos del delta del Mississippi.

Los espectros de potencia muestran picos a un año, seis y tres meses, estos picos son el resultado de las temporadas de lluvias, de las tormentas invernales, localmente llamadas nortes y de las tormentas de verano conocidas en el sur del Golfo de México como turbonadas (Salas de León *et al.*, 1992; Fuentes Yaco *et al.*, 2001), estos picos tienen la mayor amplitud espectral y no permiten ver picos espectrales a frecuencias menores. Los ríos más caudalosos, aparte de la oscilación anual y semi-anual, presentan oscilaciones a 4.6, 16, 19 y 32 años. Los picos espectrales con frecuencias mayores a un año no muestran coincidencia con eventos como las manchas solares (11 y 22 años), la oscilación del Océano Atlántico (2 años), la del Pacífico Sur (2 años) o las de los giros de alta presión en la atmósfera (4 años) a quienes se les atribuyen las variaciones en el patrón de lluvias. Esto puede deberse a que el pico espectral de un año es demasiado intenso y enmascara las otras oscilaciones.

Los ríos Atoyac, Misantla, Blanco y Cazones no muestran cambios en las pendientes de sus espectros en las gráficas log-log, por lo que se puede decir que las oscilaciones de sus descargas a bajas y altas frecuencias están en fase, el resto de los ríos muestran cambios en sus pendientes indicando un defasamiento entre las oscilaciones a baja y alta frecuencia. Lo anterior podría ser importante ya que un incremento en las descargas a diferentes frecuencias tendería a sumarse cuando están en fase, haciendo que sea más fácil que ocurran desbordamientos de los ríos, para esto se tendrían que comparar los desbordamientos históricos de los ríos con los que no muestran cambios en sus pendientes.

La asociación de los ríos mediante similitud en la dimensión fractal responde a las características geomorfológicas de las cuencas hidrológicas, como mostró Mandelbrot (1982). Es importante mencionar que en nuestro caso se calculó la dimensión fractal de las

curvas de descarga de agua de los ríos y que Mandelbrot calculó la dimensión fractal de la forma del ramal más largo de los ríos. Lo interesante es que en ambos casos la similitud en la dimensión fractal puede estar asociada a la forma de la cuenca hidrológica. Mandelbrot (1982) mostró que existe una relación exponencial entre la longitud del ramal más largo del río y la superficie de la cuenca, dado por:

$$Sc = l^D$$

Donde Sc es la superficie de la cuenca hidrológica, l la longitud del ramal más largo y D la dimensión fractal. De lo anterior, por similitud, podemos esperar una relación exponencial entre la descarga promedio del río (Q) y la superficie de la cuenca (Sc), tal que:

$$Sc = f(Q^D)$$

Donde el exponente D es la dimensión fractal de la descarga del río. Esta parte es un tema a investigar.

CONCLUSIONES

De lo anterior podemos decir que no hay una disminución significativa en las descargas de los ríos del sur de la cuenca hidrológica del Golfo de México, por lo que la disminución en el abasto de agua se debe fundamentalmente al incremento en la demanda de dicho recurso, resultado del crecimiento de la población y de los procesos agrícolas, ganaderos e industriales. Un recurso de alta demanda y que no crece tiende a aumentar su precio, esto es algo que ya se está viendo; por otro lado, un recurso que puede generar altas ganancias se vuelve atractivo para el sector industrial privado. En México el mercado del agua está creciendo a ritmo acelerado; sin embargo, el recurso no crece al mismo ritmo y no tiene opciones de incrementarse, por lo que es previsible un incremento sustancial del precio del agua.

La alta dependencia de las descargas de agua de los ríos estudiados, de los procesos océano - atmósfera como El Niño y La Niña, nos permitirán en un futuro establecer modelos de comportamiento de las oscilaciones del recurso, por lo que es importante tener presente los eventos derivados de la interacción entre el océano y la atmósfera para estar preparados ante casos de sequías o descargas extremas que puedan resultar en inundaciones.

Los ríos estudiados aportan $68485 \times 10^6 \text{ m}^3$ en un año normal al Golfo de México, esta descarga mantiene el balance de sedimento en la costa y la mayoría de las pesquerías de importación comercial del sur del golfo, una modificación en su descarga cambiaría la forma de la costa y el volumen de captura de las pesquerías.

Un resultado importante de esta tesis es la asociación que se puede hacer de los ríos en función de la dimensión fractal de sus descargas y el que sus dimensiones fractales no son mayores a 3.8, esto nos permitiría, en principio, conocer y predecir las características fundamentales de las descargas de los ríos en el año siguiente con solo tener 4 años de descargas diarias previas.

Por último, en México no se cuenta con una cultura de conservación del agua. El hecho de que el recurso no este disminuyendo no implica que exista en abundancia para todos. Mientras que en otros países se hacen esfuerzos importantes por almacenar agua y estudiarla de forma integral y no solo su calidad; en México los programas de estudio del agua se enfocan básicamente a aspectos de contaminación o de los organismos que en ella habitan, dejando por un lado aspectos como su cantidad y distribución natural.

REFERENCIAS

- Baumgartner, A. y E. Reichel (1975) *The world water balance*. Elsevier, New York, 179 p.
- Brigham, E.O. (1974) *The Fast Fourier Transform*. Prentice Hall Inc., Engelwood Cliffs, New Jersey, 252 p.
- Brookshire, D.S. y P.T. Ganderston (2004) Introduction to special section on water markets and banking: Institutional evolution and empirical perspectives. *Water Resources Research*, Vol. 40, W09301, doi: 10.1029/2004WR003394.
- Caso, M., C. González-Abraham y E. Ezcurra (2007) Divergente ecological effects of oceanographic anomalies on terrestrial ecosystems of the Mexican Pacific coast. *Procidings of the National Academy of Sciences*, Vol. 25, No. 104, 10530-10535.
- Campagnucci, R.H., S.A. Blanco, M.A. Figliola y P.M. Jacovkis (2000) Variability in subtropical Andean Argentinean Atuel River: A wavelet approach. *Environmetrics*, Vol. 11, Núm. 3, 251-269.
- Dai, A. y K.E. Trenberth (2002) Estimates of freshwater discharges from continents: Latitudinal and seasonal variations. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 3, 660-687.
- Fuentes Yaco, C., D.A. Salas de León, M.A. Monreal Gómez y F. Vera Herrera. 2001. Environmental forcing in a tropical estuarine ecosystem: the Palizada River in the southern Gulf of México. *Marine Freshwater Research* Vol. 52, 735-744.
- Keller, A.A., C.A. Oviatt, H.A. Walker y J.D. Hawk (1999) Predicted impacts of elevated temperature on the magnitude of the winter-spring phytoplankton bloom in temperated coastal waters: A mesocosm study. *Limnology and Oceanography*, Vol. 44, Núm. 2, 344-356.
- Mandelbrot, B. (1982) *The fractal geometry of nature*. W.H. Freeman Co., New York, 480 p.
- Maunder, W.J. (1994) *Dictionary of global climate changes*. UCL Press LTD, Londres, 283 p.
- Maurer, E.P., D.P. Lettenmaier y N.J. Mantua (2004) Variability and potential sources of predictability of North America runoff. *Water Resources Research*, Vol. 40, W09306, doi: 10.1029/2003WR002798.
- Mirre, J.C. (2004) Oro líquido. *Quo*, Núm. 79, 66-67.
- Monreal Gómez, M.A., D.A. Salas de León y H. Velasco Mendoza (2004) Hidrodinámica del Golfo de México. En: *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México*. Instituto

Nacional de Ecología A.C. y Harte Research Institute for the Gulf of Mexico Studies, México, D.F., 47-68.

Pulido Velázquez, M., M.W. Jenkins y J.R. Lund (2004) Economic values for conjunctive use and water banking in Southern California. *Water Resources Research*, Vol. 40, W03401, doi: 10.1029/2003WR00262.

Quinion, M. (2006) Water banking. En *World Wide Words*.
<http://www.worldwidewords.org/turnsofphrase/tp-wat2.htm>

Reyes Coca, S. y R. Troncoso Gaytán (2004) Modelación multidecenal de la lluvia invernal en el noroeste de Baja California. *Ciencias Marinas*, Vol. 30, 109-118.

Robertson, A.W. y C.R. Mechoso (1998) Interannual and decadal cycles in river flows of Southeastern South America. *Journal of Climate*, Vol. 11, Núm. 10, 2570-2581.

Salas de León, D.A., M.A. Monreal Gómez y J. Aldeco Ramírez (1992) Períodos característicos en las oscilaciones de parámetros meteorológicos en Cayo Arcas, México. *Atmósfera*, Vol. 5, 193-205.

Salas Monreal, D. (2000) *Experimento numérico de circulación atmosférica en el valle de México*. Tesis de licenciatura en física, Facultad de Ciencias, UNAM, México D.F., 66 p.

Turcotte, D.L. y L. Greene (1993) A scale-invariant approach to flood-frequency analysis. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 7, Núm. 1, 33-40.

Twilley, R. (2006) The gulf coast's most precious resource: freshwater. En: *Selected findings from confronting climate changes in the gulf coast region*.
http://www.UCSUSA.org/assets/documents/global_warning/ACFZAYvUL.pdf

USCCSP (2006) *US climate changes science program*.
<http://www.climate-science.gov/default.htm>

Zhang, Y.K. y K. Schilling (2004) Temporal scaling of hydraulic head and river base flow and its implications for groundwater recharge. *Water Resources Research*, vol. 40, W03504, doi: 1029/2003WR002094.