



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Instituto Universitario de Xeoloxía

Tesis Doctoral

MODELOS PROBABILÍSTICOS Y ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN PROCESOS HIDROLÓGICOS

Rafael Santiago Seoane Moretón

Septiembre 2015



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Instituto Universitario de Xeoloxía

Tesis Doctoral

**MODELOS PROBABILÍSTICOS Y ESTIMACIÓN DE LA
INCERTIDUMBRE EN PROCESOS HIDROLÓGICOS**

Rafael Santiago Seoane Moretón

Septiembre 2015



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

D. Francisco DÍAZ-FIERROS VIQUEIRA, Catedrático de Edafología y Química Agrícola de la Universidade de Santiago de Compostela (USC) y **D. Antonio PAZ GONZÁLEZ**, Catedrático de Edafología y Química Agrícola de la Universidade da Coruña (UDC),

CERTIFICAN:

Que la presente Memoria titulada “***Modelos Probabilísticos y Estimación de la Incertidumbre en Procesos Hidrológicos***” que para optar al grado de Doctor por la Universidade da Coruña presenta **D. Rafael Santiago SEOANE MORETÓN**, ha sido realizada bajo nuestra dirección y supervisión dentro del Programa Oficial de Doctorado *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente* de la UDC.

Considerando que constituye trabajo de *Tesis Doctoral*, autorizamos su presentación.

Y para que así conste, firmamos el presente certificado en A Coruña, a 31 de Agosto de 2015

Fdo.: Francisco Díaz-Fierros Viqueira

Fdo.: Antonio Paz González

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo lo pude realizar a partir de la colaboración y afecto de muchas personas que me han ayudado. A todos ellos mi más sincero agradecimiento.

En particular:

Al Dr Antonio Paz Gonzalez por darme la oportunidad de cumplir con esta meta.

Al Dr. Jose Miranda por transmitirme todo su interés en los modelos fractales.

Al Dr. Raúl Lopardo por su ayuda, colaboración y amistad.

A la Dra Marta García Ben por su ayuda de siempre y sus enseñanzas que van más allá de la teoría de las probabilidades.

Al Dr Luis Raúl Pericchi por su amistad y por ayudarme a comprender el sentido de la investigación.

Al Dr. Wolfgang Volkheimer por las horas compartidas y confianza en mi labor profesional.

Al Instituto Nacional del Agua (INA), CONICET, la FIUBA y la UNCPBA por haber contribuido en el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros del INA por las horas compartidas a lo largo de todos estos años.

A mis padres por haberme querido tanto.

A mi esposa por ser la compañera de mi vida y justificar con su presencia este trabajo.

Corto y hábil; es el sendero de la especulación, pero no conduce a ninguna parte; largo y penoso es el campo del experimento, pero nos lleva a conocer la verdad.

Galeno, 210 D.C.

RESUMEN

Esta Tesis tiene como objetivos estudiar los posibles efectos de la variabilidad climática natural y el cambio climático global sobre los caudales máximos y medios. Estos caudales son estimados para resolver problemas de planificación y diseño en sistemas hídricos complejos de cuencas de gran extensión. Por esta razón, fueron seleccionadas la cuenca del río Neuquén y la cuenca del río Paraná.

Las obras de ingeniería hidráulica se construyen para controlar los excesos y déficit hídricos y lograr una mejor distribución espacial y temporal del escurrimiento superficial, especialmente en un país, como la Argentina, que presenta dos tercios de su superficie con climas áridos y semiáridos.

El núcleo de este estudio se relaciona con la aplicación de modelos probabilísticos para la detección de puntos de cambio múltiples, asociados con la variabilidad climática natural. Se definió la presencia de distintos periodos con caudales que presentan diferentes propiedades estadísticas y se evaluó su influencia sobre los parámetros de diseño hidrológico.

La identificación de puntos de cambio en las series de caudales máximos se realizó aplicando pruebas estadísticas de dos tipos: paramétricas y no paramétricas. Las primeras implican conocer el o los punto de cambios y por lo tanto se utilizó la prueba de razón de verosimilitud (modelo Gamma) y el modelo de regresión. Entre las segundas se aplicaron, las pruebas de Mann-Kendal y Pettitt.

La posibilidad de detectar puntos de cambio múltiples fue realizada con un método basado en un nuevo estadístico y permitió validar la asociación entre variabilidad climática natural con los cambios observados en los caudales máximos de los sistemas seleccionados a partir de la década de los años 70. Esta identificación de los periodos de caudales con distintas propiedades estadísticas permite orientar una segunda mirada sobre la infraestructura para evaluar la vulnerabilidad asociada con la variabilidad climática natural y cambio climático antropogénico.

El cambio climático antropogénico y sus efectos sobre el ciclo hidrológico es un tema de investigación científica que implicó el desarrollo de nuevos modelos matemáticos de circulación general de la atmósfera para la estimación de los efectos sobre variables hidrológicas, en valores medios aplicables en la planificación de sistemas hidrológicos en grandes cuencas. Se aplicó un modelo de regresión para evaluar los efectos de dos escenarios precipitaciones medias sobre los caudales medios en cuencas de la Patagonía.

El análisis de la persistencia de largo plazo en series hidrológicas es un tema que se conecta con la identificación de relaciones entre el clima y los caudales en distintas escalas. Se estudió la multifractalidad de series hidrológicas y se estimó el parámetro de Hurst dada su influencia en pruebas de detección y los análisis de valores extremos. Se presentan resultados de experimentos numéricos para estudiar los orígenes de la multifractalidad, la asimetría del espectro multifractal y la variación en un indicador de la predictibilidad para distintos periodos de tiempo para series extensas.

RESUMO

Esta Tese ten como obxectivos estudar os posibles efectos da variabilidade climática natural e mais do cambio climático global sobre los caudais máximos y medios. Estes caudais son estimados para resolver problemas de planificación y deseño en sistemas hídricos complexos de concas hidrográfica de moita extensión. Por esta razón, foron seleccionadas as concas do río Neuquén e do río Paraná.

As obras de enxeñaría hidráulica constrúense para controlar os excesos e os déficits hídricos, e tamén para lograr unha mellor distribución espacial e temporal do desaugue superficial ou enxurrada, especialmente nun país, como a Arxentina, que presenta dous terzos da su superficie con climas áridos e semiáridos.

O núcleo do estudio levado a cabo relacionase ca aplicación de modelos probabilísticos para detectar puntos de cambio múltiples, asociados a variabilidade climática natural. Definiuse a presenza de distintos períodos con caudais que presentan diferentes propiedades estatísticas y avaliouese a su influencia sobre os parámetros do deseño hidrolóxico.

A identificación de puntos de cambio nas series de caudais máximos realizouse aplicando probas estatísticas de dous tipos: paramétricas e non paramétricas. As primeiras implican coñecer o ou os punto de cambio y polo tanto utilizouse a proba de razón de verosimilitude (modelo Gamma) e o modelo de regresión. Entre as segundas aplicáronse, as probas de Mann-Kendal e de Pettitt.

A posibilidade de detectar puntos de cambio múltiples foi avaliada cun método baseado nun novo estatístico e permitiu validar a asociación entre variabilidade climática natural cos cambios observados nos caudais máximos dos sistemas seleccionados a partir da década dos anos 70. Esta identificación dos períodos de caudais con distintas propiedades estatísticas permite orientar unha segunda mirada sobre a infraestrutura para avaliar a vulnerabilidade hidrolóxica que vai asociada ca variabilidade climática natural e co cambio climático antropoxénico.

O cambio climático antropoxénico e os seus efectos sobre o ciclo hidrolóxico e un tema de investigación científica que implicou o desenvolvemento de novos modelos matemáticos de circulación xeral da atmosfera para a estimación dos efectos sobre as variables hidrolóxicas; estes modelos aplícanse de cotío os valores medios na planificación de sistemas hidrolóxicos en grandes concas. Por iso, neste traballo, aplicase

un modelo de regresión para avaliar os efectos de dous escenarios de precipitacións medias sobre os caudais medios en conchas da Patagonia.

O análises da persistencia de largo prazo en series hidrolóxicas e un tema que se conecta ca identificación de relacións entre o clima e os caudais a distintas escalas. Estudouse a multifractalidade de series hidrolóxicas e estimouse o parámetro de Hurst, debido a súa influencia en probas de detección e nos análises de valores extremos. En consecuencia, preséntanse resultados de experimentos numéricos para estudar os orixines da multifractalidade, da asimetría do espectro multifractal e da variación nun indicador de la predictibilidade para distintos períodos de tempo cando están dispoñibles series hidrolóxicas extensas.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to study the possible effects of natural climatic variation and global climatic change on maximum and average flows. These flows are estimated in order to solve problems related to the planning and design of complex hydric systems large basins in large extensions of land. For this reason, the Neuquén river basin, with a total area of 30,843 km² (Paso de los Indios, Neuquén province) and the Paraná river basin, with a total area of 1,950,000 km² (Corrientes, Corrientes province) have been selected.

Works of hydraulic energy are carried out so as to control both hydric excess and deficit, and to achieve a better distribution in time and space of the surface runoff, especially in a country like Argentina, which has arid and semiarid climates in two thirds of its total surface.

The nucleus of the present study is connected to the application of probabilistic methods for the detection of multiple points of change associated with a natural climatic variability. The presence of different periods with flows showing diverse statistic properties has been defined and their influence over hydrological design parameters has been evaluated.

The identification of points of change in the series of maximum flows has been performed through the application of two types of statistical tests: parametric and non-parametric. The former imply knowing the point or points of change and therefore both the likelihood ratio test (Gamma model) and the regression model have been used. The Mann-Kendal and Pettitt tests have been used for the latter.

The possibility of detecting multiple points of change was conducted with a method based on U-statistics, and it allowed for a validation of the association between natural climatic change and the changes observed in the maximum flows of the selected systems as from the 1970s. This identification of the flow periods with different statistical properties enable us to direct a second look over the infrastructure so as to evaluate the vulnerability associated with natural climatic variability and anthropogenic climatic change.

Anthropogenic climatic change and its effects on the hydrological system is a subject of scientific research which implies the development of new mathematical models of general atmospheric circulation for an estimation of its diverse effects on hydrological variables, in average values applicable to planning hydrological systems in large basins. A regression model has been applied to evaluate the effects of two scenarios of average rainfall over medium-sized basins in Patagonia.

The analysis of long-term persistence in hydrological series is an issue that connects to the identification of relationships between the climate and the flows in different scales. The multifractality of hydrological series has been studied and the Hurst parameter has been estimated given its influence in detection tests and the parameters of extreme value models. Results of numeric experiments are presented in order to study the origins of multifractality, the asymmetry of the spectrum, and the variation in an indicator of predictability for different periods of time for extended series.

ÍNDICE

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	1
CAPÍTULO I.....	2
VARIABILIDAD CLIMÁTICA NATURAL Y CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL: CONSECUENCIAS EN HIDROLOGÍA E INGENIERÍA.....	2
I.1 Introducción	2
I.2 Revisión bibliográfica	4
I.3 Importancia del tema	6
CAPÍTULO II.....	10
VARIABILIDAD CLIMATICA NATURAL Y CAMBIO CLIMATICO GLOBAL EN CUENCAS DE GRAN EXTENSION	10
II.1 Introducción y objetivos	10
II.2 Revisión bibliográfica	12
II.3 Metodología	17
II. 4 Cuencas hidrológicas seleccionadas	17
II.4.1 Características de la cuenca del río Neuquén.....	17
II.4.2 Hidrología de la cuenca del río Neuquén.....	18
II.4.3 Mecanismo meteorológico de formación de precipitaciones	21
II.4.4 Crecida observada en el río Neuquén en el año 2006	23
II.5 Cuenca del río Paraná	28
II.5.1 Ocurrencia de eventos hidrológicos extremos en el río Paraná	31
II. 6 Análisis de obras de infraestructura en la cuenca del río Paraná	36
II.6.1 Hidroelectricidad	36
II.6.2 Río Paraná, crecidas y variación de los parámetros de obras hidráulicas	39
II.6.3 Infraestructura de obras viales	41
II.6.4 Puertos en la ruta de navegación del río Paraná.....	42
II.6.5 Protecciones laterales en ciudades	43
CAPÍTULO III.....	50
DETECCION DE TENDENCIAS Y PUNTOS DE CAMBIOS MULTIPLES EN SERIES HIDROLOGICAS	50
III.1 Introducción y objetivos	50
III.2 Revisión bibliográfica	51
III.3 Metodología	55
III.3.1 Prueba no paramétrica de Mann-Kendall.....	56
III.3.2 Prueba no paramétrica de Pettitt	58
III.3.3 Razón de verosimilitud y puntos de cambio	60
III.3.4 Modelo de regresión lineal Gamma generalizado.....	63
III.4. Datos hidrológicos en las cuencas de los ríos Neuquén y Paraná	65
III.4.1 Indicadores de la variabilidad climática natural	65

III.4.2 Análisis de casos: ríos Neuquén y Paraná.....	67
III.4.2.1 Caudales máximos diarios anuales en la cuenca del río Neuquén.....	67
III.4.2.1.1 Aplicación de pruebas no paramétricas.....	68
<i>Prueba de Mann Kendall</i>	68
III.4.2.1.2 Cambios en la serie de los caudales máximos medios anuales.....	71
III.4.2.1.3 Variación temporal de la relación caudal máximo anual-periodo de retorno.....	77
III.4.2.1.4 Modelo MLGG aplicado a los caudales máximos del río Neuquén.....	78
III.4.2.1.5 Método de detección de puntos de cambio múltiples, río Neuquén.....	83
III.4.2.2 Análisis de los caudales máximos medios diarios en el río Paraná.....	84
III.4.3 Prueba de detección de puntos de cambio múltiples.....	94
III.4.3.1 Series temporales de indicadores de la variabilidad climática natural.....	97
CAPÍTULO IV	104
ESTIMACION DE CAUDALES MEDIOS ANUALES Y ESCENARIOS	104
DEL CAMBIO CLIMATICO GLOBAL	104
IV.1 Introducción y objetivos	104
IV.2 Revisión bibliográfica	105
IV.3 Metodología	110
IV.4 Datos utilizados	111
IV.5 Resultados	111
IV.5.1 Detección del cambio climático usando registros históricos.....	111
IV.5.2 Escenarios climáticos e incertidumbre.....	112
IV.5.3 Precipitaciones anuales medias para dos cuencas.....	115
IV.5.4 Modelo de regresión precipitación caudal medio anual.....	116
IV.5.5 Estimación del cambio de los caudales medios para escenarios futuros.....	120
IV.5.6 Precipitaciones anuales medias para las cuatro cuencas (agregadas).....	127
IV.5.7 Escenarios climáticos.....	128
IV.5.8 Modelo de regresión para estimar la relación precipitación-caudal medio.....	129
IV.5.9 Caudales medios anuales con la estimación areal de las precipitaciones.....	133
IV.6 Conclusiones	140
CAPÍTULO V	144
PERSISTENCIA DE LARZO PLAZO Y MULTIFRACTALIDAD EN SERIES DE HIDROLOGICAS	
EN DISTINTAS ESCALAS TEMPORALES	144
V.1 Introducción y objetivos	144
V.2 Revisión bibliográfica	145
V.3. Metodología	147
CAPÍTULO VI	171
BIBLIOGRAFÍA	184

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Los modelos matemáticos son desarrollados con el objetivo de estimar los parámetros hidrológicos necesarios para el dimensionamiento adecuados de obras hidráulicas.

Estos modelos han evolucionado incluyendo modelos explicativos que incorporan a indicadores del clima en sus formulaciones matemáticas. En el estudio de valores extremos y medios se ha incorporado la variabilidad natural climática para resolver problemas de diseño y planificación en cuencas extensas y el cambio climático global para el desarrollo de medidas de atenuación y mitigación de sus efectos.

Nuevos métodos de detección de puntos de cambio múltiples permiten mejorar la evaluación del riesgo de obras hidráulicas construidas ante la presencia de nuevas condiciones.

En Ingeniería, se ha comprendido la importancia de contar con modelos matemáticos para evaluar distintos escenario del clima futuro y mejorar las técnicas de estimación de parámetros de diseño para adaptar las obras de infraestructura a ese nuevo contexto.

En esta tesis los principales temas tratados se presentarán en el siguiente orden:

Capítulo I. Introducción y alcances. Variabilidad climática natural, cambio climático global y un análisis de sus consecuencias en Hidrología e Ingeniería.

Capítulo II. El impacto de la variabilidad climática natural y el cambio climático global en dos cuencas de gran extensión de Argentina. Resultados del análisis de casos observados. Incremento de la cantidad de inundaciones y vulnerabilidad de obras civiles.

Capítulo III. Análisis de la presencia de tendencias y puntos de cambios múltiples en series de caudales máximos observados en cuencas de Argentina. Aplicación de pruebas paramétricas y no paramétricas. Análisis de casos para series hidrológicas observadas.

Capítulo IV. Modelos de precipitación-caudal y cambio climático global. Análisis de los efectos de la aplicación de distintos escenarios de precipitaciones sobre la estimación de caudales medios anuales.

Capítulo V. Persistencia de largo plazo. Fenómeno de Hurst. Aplicación de medidas de multifractalidad. Estimación del espectro multifractal. Medidas de asimetría. Predictibilidad.

Capítulo VI. Conclusiones.

CAPÍTULO I

VARIABILIDAD CLIMÁTICA NATURAL Y CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL: CONSECUENCIAS EN HIDROLOGÍA E INGENIERÍA

I.1 Introducción

Desde una visión histórica, se puede afirmar que el principal objetivo de los métodos desarrollados en Hidrología desde principios del siglo XX hasta la década de los años ochenta fue contar con métodos más precisos para la estimación de los parámetros de diseño de obras hidráulicas en Ingeniería.

Este capítulo presenta un análisis de antecedentes que muestran la importancia de las investigaciones que en Hidrología tiene la modelación matemática de las componentes del ciclo hidrológico y su relación con la variabilidad climática natural y el cambio climático global.

En Ingeniería es necesario definir las propiedades estadísticas de procesos hidrológicos en valores medios y extremos. Las investigaciones realizadas proponen estudiar los resultados obtenidos con esas visiones. La primera, más asociada con la estimación de los caudales medios anuales y la segunda relacionada con la ocurrencia de caudales máximos extremos.

La primera, está asociada con la necesidad de la planificación bajo condiciones hidrológicas futuras en cuencas con una infraestructura en hidroelectricidad y para las cuales la disminución del escurrimiento anual medio influiría en la producción de energía hidroeléctrica.

La segunda, resulta importante para disminuir el riesgo de infraestructura hidráulica básica de una cuenca. Este riesgo depende de la precisión en la estimación de los caudales extremos de las obras hidráulicas para el control de eventos extremos (crecidas y sequías).

En esta línea de pensamiento los resultados anteriores serán aplicables para definir mejor las condiciones de vulnerabilidad de sistemas hidrológicos complejos en Argentina.

Los modelos matemáticos son desarrollados con el objetivo de estimar los parámetros hidrológicos necesarios para el dimensionamiento adecuados de obras hidráulicas. A partir de los años 60 se comenzó a trabajar en nuevos programas de investigación con

modelos explicativos orientados a comprender y representar la naturaleza subyacente de los procesos hidrológicos.

La evolución de la Hidrología tuvo un primer objetivo que fue ampliar los métodos disponibles para la estimación de obras hidráulicas. El nuevo paradigma se propuso avanzar en la comprensión de los procesos del ciclo hidrológico para mejorar las estimaciones y predicciones que se aplican en Ingeniería.

Los libros de Ven Te Chow (1964) y de Ray Linsley (1979) son el resultado de la visión orientada a resolver problemas de diseño en Ingeniería Civil.

Pero existe otra visión del tema y en ella se destaca el libro *Dynamic Hydrology* de Peter Eagleson (1972). Este investigador incorporó la idea de integrar, con una mirada basada en la matemática, la ecología y la hidrología.

Por lo tanto, su contribución clave fue redefinir la Hidrología desde una especialidad *ad hoc* de la Ingeniería a una Ciencia de la Tierra, en el que las características de los ecosistemas tienen un papel importante. También ha desarrollado nuevos modelos de hidrología dinámica, considerando al ciclo hidrológico como un proceso clave que permite vincular la Física, la Biología y la Química del sistema Tierra.

Este libro es un ejemplo de la incorporación de explicaciones con un enfoque probabilístico de las componentes del ciclo hidrológico. Este texto permitió avanzar en establecer con más precisión las ideas de la Hidrología para numerosas generaciones de ingenieros y fue completada en otros libros, por ejemplo, Bras (1990) y Bras y Rodríguez-Iturbe (1992).

El programa de la Universidad de Harvard desarrollado durante los años 60 fue una contribución a la optimización en planificación y diseño de sistemas hidráulicos de alta complejidad. En su propuesta estaba una hipótesis subyacente que se discutirá en varios capítulos de esta Tesis, la estacionariedad de los procesos hidrológicos.

En Europa, durante la década de los años ochenta, ocurrieron eventos extremos que definieron una línea de investigación sobre los impactos del cambio climático global y la variabilidad climática sobre las principales variables del ciclo hidrológico.

Este nuevo contexto puede explicar los avances realizados en la comprensión de los procesos hidrológicos y el mejor conocimiento de las relaciones entre los procesos climáticos y los hidrológicos.

En el marco de la variabilidad climática natural, la predicción de la ocurrencia de las fases del El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) han influido en sus indicadores se incluya en los métodos probabilísticos para estimar los parámetros de diseño de obras hidráulicas.

La teoría del Cambio Climático Global ha demostrado la importancia de los estudios de detección de tendencias de corto y largo plazo en las componentes del ciclo hidrológico vinculadas con las obras de Ingeniería. Se observó una nueva necesidad de estudiar los parámetros de las obras hidráulicas construidas ante posibles cambios en los regímenes hidrológicos que podrían afectar la infraestructura hidráulica de una cuenca.

Estos temas se relacionan directamente con esta investigación que consisten en seleccionar modelos y pruebas estadísticas para estudiar procesos hidrológicos complejos para condiciones no estacionarias en las respuestas hidrológicas de cuencas de la Argentina.

En esta línea de pensamiento se realizó la aplicación de pruebas estadísticas clásicas y se propuso nuevas técnicas para detectar la presencia de condiciones de no estacionariedad de los caudales observados en cuencas de gran extensión.

La Tesis continuó con el análisis de los efectos de las condiciones futuras del clima sobre las respuestas hidrológicas. Se estimaron caudales medios a partir precipitaciones definidas con un modelo de Circulación General de la Atmósfera.

En la parte final, se estimó el espectro multifractal de distintas series de variables hidrológicas y el parámetro de Hurst para estudiar el cambio en las condiciones de predictibilidad para dos periodos temporales asociados con distintas condiciones de un indicador de la variabilidad climática natural.

I.2 Revisión bibliográfica

Los trabajos del hidrólogo James Dooge, que incluyeron un estudio de la evolución del concepto de ciclo hidrológico, representaron un claro avance en la línea del desarrollo de nuevos modelos hidrológicos con una visión matemática; Dooge (2001). Las investigaciones de Ignacio Rodríguez-Iturbe relacionan la respuesta hidrológica de una cuenca con su geomorfología, con el clima y con la teoría de fractalidad.

Estos antecedentes definen una mirada científica para estudiar las componentes del ciclo hidrológico y que permitió avanzar en la comprensión de la ocurrencia de valores extremos de caudales y su relación con el clima.

Emil Gumbel (1941 y 1958) presentó una formulación rigurosa de la teoría de valores extremos para estimar, por ejemplo, la relación caudal máximo anual-período de retorno. Esta teoría incluyó dos hipótesis muy importantes para los estudios: la estacionariedad y la independencia entre las observaciones.

La idea de estacionariedad siempre estuvo subyacente en el diseño de las obras hidráulicas y significa que *'el futuro será igual o parecido al pasado'* y ha estado presente en las grandes obras de Ingeniería.

Los conocimientos de la importancia de la variabilidad climática natural y la teoría del cambio climático global sobre las componentes del ciclo hidrológico inducen el desarrollo de modelos para evaluar la validez de la hipótesis anterior dado los efectos que cambios tendrían sobre las obras construidas.

Arnell (1996) señalaba que el incremento de la producción de trabajos científicos entre los años 1980 y 1995 y otra idea que debe considerarse es la aparición de revistas científicas dedicadas exclusivamente al tema; por ejemplo: la revista *Climate Change*.

La aceptación de una nueva teoría científica genera una amplia discusión entre los integrantes de la comunidad científica y los modelos explicativos que validan esta teoría son un tema de la Metodología de la Ciencia.

El modelo de validación que se seleccione determinará los procedimientos que se usan para verificar científicamente una teoría científica. La importancia de las distintas fuentes de incertidumbre en la modelación de procesos climáticos e hidrológicos demostraron las dificultades de aplicar los resultados en la planificación de los recursos hídricos y en la definición de medidas de adaptación al cambio climático.

La propuesta de Kuhn (1971), permite comprender este momento histórico dado que señalaba que las etapas de la formación de un paradigma incluyen: a) la amplia discusión de los participantes de la comunidad científica, b) la presencia de nuevas publicaciones, c) definición de nuevos métodos que requiere el paradigma para consolidarse.

Una idea de esta Tesis consiste en proponer que existe un cambio en el paradigma aplicado en el análisis de los componentes del ciclo hidrológico. En la actualidad, se está estudiando la hipótesis de estacionariedad y resulta importante relacionar los resultados de las técnicas de detección con las posibilidades reales de su aplicación para evaluar la vulnerabilidad de los sistemas en cuencas de gran extensión.

Estas ideas muestran la necesidad de contar con nuevos modelos para definir las respuestas más adecuadas que serán aplicadas en Ingeniería para mejorar los diseños de las obras ya realizadas e incorporar cambios en las nuevas obras hidráulicas.

Se debe recordar, que la hipótesis de estacionariedad de las series temporales observadas ha sido fundamental para el desarrollo de los modelos aplicados en la predicción de valores extremos y en su posterior uso en Ingeniería para la estimación de los parámetros de diseño de obras hidráulicas.

En este tema aparece un claro ejemplo de la importancia de contar con metodologías de análisis para revisar los diseños de grandes presas que fueron diseñadas y construidas con observaciones de principios del siglo pasado.

Coles (2001) incorpora en la modelación matemática de valores extremos a la variabilidad climática natural y que era un tema que no se incorporaba al diseño antes de la década de los años noventa y de haber alcanzado mejores predicciones con indicadores de El Niño-Oscilación del Sur.

Dawdy (2002) señalaba que los modelos hidrológicos de regresión aplicados en el análisis de valores extremos fueron diseñados bajo la hipótesis de estacionariedad y por lo tanto era necesario cambiar el modelo explicativo para introducir variables que representen mejor a la precipitación.

En el aspecto de la variabilidad hidrológica se puede señalar la importancia del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y su impacto en Argentina. Durante los años 1982 y 1983 ocurrieron caudales máximos que produjeron importantes pérdidas económicas en las provincias del Litoral Argentino.

Estos eventos actuaron en una forma semejante ya señalada con el tema del cambio climático global. La predicción de caudales se convirtió en una línea de investigación de la importancia dada la necesidad de una adecuada protección de las poblaciones ante inundaciones en el Paraná.

1.3 Importancia del tema

Para mostrar resultados empíricos que muestran la importancia del tema se realizó un análisis de la cantidad de obras hidráulicas y de los volúmenes de los embalses construidos durante el siglo XX en Argentina. Se calcularon ambos indicadores para identificar los períodos de mayor actividad en la construcción y vincular la época de realización de la obra con los resultados del análisis histórico de la evolución de las teorías científicas.

Este análisis muestra la importancia de estudiar los avances en las técnicas de estimación de los parámetros de diseño de las obras hidráulicas y en la necesidad de incorporar la nueva información hidrológica observada desde la construcción, dado el tiempo transcurrido.

La ocurrencia de nuevos eventos de precipitación-caudal observados después de la finalización de las obras define la necesidad de la verificación de las crecidas de diseño

de obras importantes para obtener una nueva estimación de los parámetros hidráulicos de sus aliviaderos y obras de control.

La Figura N° I.1 muestra la cantidad de las presas construidas entre los años 1920-1990, y se observa un máximo durante la década de los setenta. La Figura N° I.2 presenta la las obras realizadas en ese período indicando los distintos climas de Argentina.

Esta figura es importante porque muestra la significativa cantidad de obras ubicadas en zonas áridas y semiáridas donde resulta necesario mejorar el aprovechamiento temporal del recurso agua.

Este análisis se relaciona con los resultados de investigaciones actuales que en Hidrología han demostrado que se observó una mayor incertidumbre para las estimaciones de los caudales máximos anuales en las regiones áridas y semi-áridas que en las regiones húmedas ubicadas en distintas regiones del mundo; Meigh et al. (1997).

Figura N° I.1. Cantidad total de embalses construidos entre 1920 y 1990 en Argentina

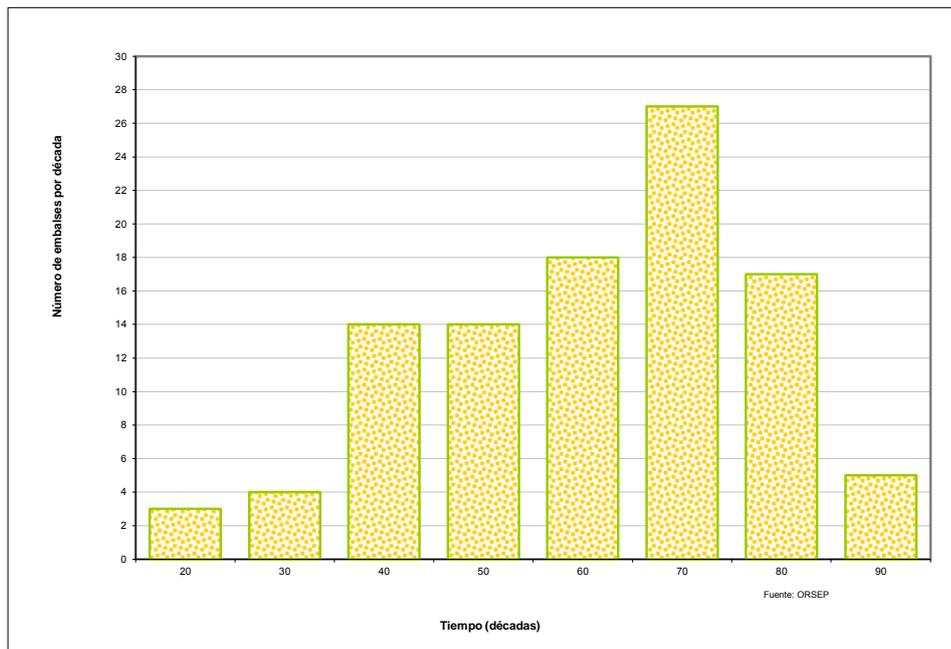
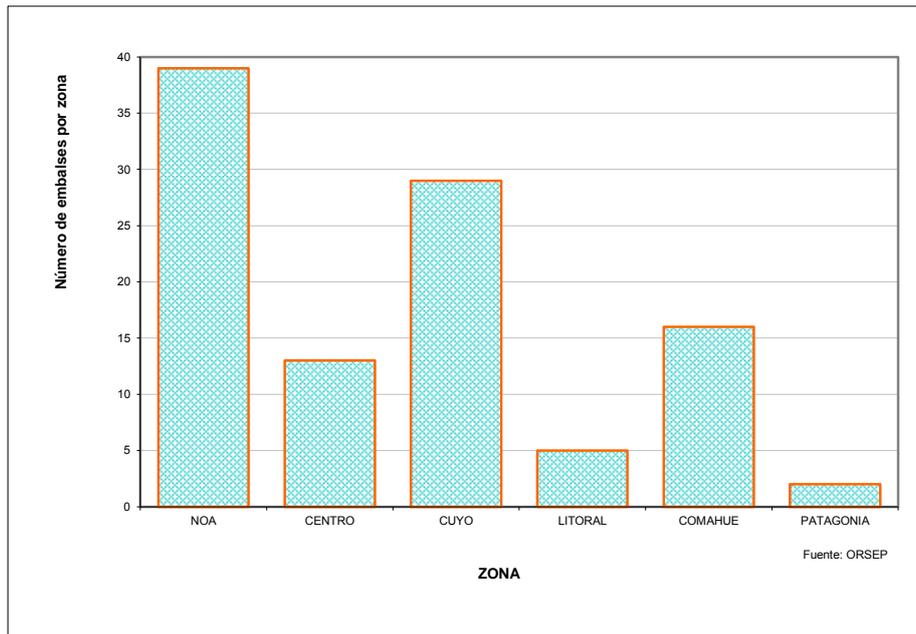


Figura N° I.2. Número de embalses indicando las regiones climáticas de Argentina.



Los resultados presentados son consistentes con los estudios hidrológicos que indican que la Argentina es un país con dos tercios de su superficie con clima árido o semiárido y la mayor cantidad de su población se encuentra ubicada en las zonas de mayor disponibilidad hídrica.

En las otras regiones se observa la necesidad de mejorar la disponibilidad del recurso agua que ha llevado a la construcción de numerosos embalses en las zonas áridas y semiáridas.

- 1) La importante cantidad de obras hidráulicas construidas con anterioridad al año 1960 muestra la posible necesidad de revisar los parámetros de diseño de obras que fueron estimados con métodos hidrológicos que podrían resultar obsoletos.
- 2) A principios del siglo XX, los métodos usados para la estimación de parámetros se basaban en modelos de transformación precipitación caudal simples. La aplicación de modelos de valores extremos a series de caudales máximos incorporó una base metodológica más coherente con la complejidad de los procesos a representar.

Las primeras formulaciones desarrolladas consideraban la hipótesis de estacionariedad (Gumbel, 1941). Los nuevos métodos de estimación de parámetros de modelos de valores

extremos avanzaron en relacionar la variación temporal de los parámetros con indicadores de la variabilidad climática natural. Estas nuevas soluciones conducen a resultados diferentes y se relacionan con la idea de realizar una *segunda mirada* a las obras importantes construidas en el pasado y posiblemente con técnicas obsoletas.

3) Los métodos de estimación de la precipitación, variable de entrada a los modelos hidrológicos, también han sufrido importantes cambios. Por ejemplo, la utilización de la técnica de la precipitación máxima probable para la determinación de la crecida máxima probable en la estimación de caudales de diseño.

En las estimaciones de los parámetros de diseño de las obras se incorpora otra fuente de incertidumbre que está asociada a los efectos asociados con el cambio climático global.

En una primera etapa, se define la necesidad de contar con pruebas estadísticas adecuadas para la detección de la presencia de cambios múltiples en series temporales. El conocimiento de la existencia de periodos de observaciones con propiedades estadísticas distintas se puede utilizar para calibrar y verificar los modelos hidrológicos determinísticos. En un contexto probabilístico, conducirían a una más precisa estimación de los parámetros de las funciones de densidad de probabilidades de los caudales máximos medios anuales.

En una segunda etapa, se debería evaluar el efecto que cambios en las propiedades estadísticas de las variables de entrada al sistema hidrológico tienen sobre las respuestas más importantes, por ejemplo, el caudal medio de una cuenca.

Finalmente, se debería estudiar los resultados de la combinación entre los modelos de circulación general de la atmosfera y los modelos hidrológicos de transformación precipitación -escorrentía que definen series de caudales en escala diaria. Dado el impacto de las diferencias entre las estimaciones obtenidas con los distintos modelos es necesario definir su campo real de aplicación para la adaptación y mitigación del efecto del cambio climático global.

La utilidad práctica de estos análisis está directamente asociada con las aplicaciones de modelos hidrológicos para la solución de problemas en Ingeniería que serán estudiados en los capítulos siguientes.

CAPÍTULO II

VARIABILIDAD CLIMÁTICA NATURAL Y CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL EN CUENCAS DE GRAN EXTENSION

II.1 Introducción y objetivos

El objetivo de este capítulo consiste en presentar los resultados de un análisis de la evidencia empírica de la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, asociados con la variabilidad climática natural y el cambio climático global, en cuencas hidrológicas de gran extensión de la Argentina.

Se presentan dos sistemas hidrológicos, el de los ríos Neuquén y Paraná, y se discuten los resultados de un análisis que demuestra la necesidad de contar con nuevos modelos matemáticos para estudiar, ante los últimos eventos hidrológicos observados, la vulnerabilidad de las obras de control de crecidas, inundaciones e infraestructuras hidráulicas.

La cuenca del río Neuquén resulta un interesante caso de estudio por la presencia de grandes obras hidráulicas y que además, contribuyen con un porcentaje significativo de la generación de energía hidroeléctrica del país. Aunque su principal objetivo es el control de crecidas, las que podrían afectar a importantes ciudades ubicadas en la cuenca.

También la cuenca del río Paraná es un interesante caso de estudio ya que las obras construidas aportan a la generación hidroeléctrica de la Argentina (Yacyretá y Salto Grande) y sino que también se han construido numerosos puertos sobre esa cuenca, siendo la principal ruta de navegación del país para las exportaciones de la producción básica.

En la actualidad, la ocurrencia de caudales extremos se está estudiando en forma asociada a las teorías de la variabilidad climática natural y del cambio climático antropogénico. Los resultados de estas teorías muestran la necesidad de revisar los diseños de obras hidráulicas construidas durante las primeras décadas del siglo pasado e incorporar la hipótesis de la no estacionariedad en la modelación de las variables hidrológicas utilizadas en el diseño de obras civiles de infraestructura.

El tema analizado, también está asociado con los resultados presentados por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) que ha mostrado la importancia de

estudiar la relación de los impactos del cambio climático global sobre los eventos hidrológicos extremos. Además, han señalado un incremento de la severidad de los eventos hidrometeorológicos observados en distintos lugares del mundo debido a una aceleración de las componentes del ciclo hidrológico.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o Panel Intergubernamental del Cambio Climático tiene como objetivo proveer con evaluaciones científicas comprensivas sobre la información científica, técnica y socioeconómica actual sobre el riesgo de cambio climático provocado por la actividad humana, sus potenciales consecuencias medioambientales y socioeconómicas, y las posibles opciones para adaptarse a esas consecuencias o mitigar sus efectos.

En consecuencia, se debe evaluar la importancia de modificar y/o construir nuevas obras que se adapten a las nuevas características del clima. Esta observación está sustentada en los estudios que evalúan la presencia de cambios en los procesos hidrológicos generadores de valores extremos (crecidas y sequías observadas) en distintas cuencas del mundo.

En la cuenca del río Neuquén, se observó durante el mes de junio del año 2006, un caudal máximo que demostró la necesidad de contar con una nueva estimación de la Crecida Máxima Probable. Este resultado fue sensiblemente diferente a las estimaciones de estudios hidrológicos anteriores. Se presentan resultados de un modelo de valores extremos para la estimación de la crecida de diseño y se demuestra la necesidad de la actualización de los parámetros hidrológicos de obras de control de inundaciones.

En la cuenca del río Paraná, se presentan los resultados de aplicar una clasificación de inundaciones y un conjunto de obras de infraestructura hidráulica construidas durante el siglo XX utilizando estimaciones de caudales máximos realizadas sin considerar la variabilidad climática natural.

Este capítulo está organizado considerando los siguientes aspectos asociados con la variabilidad climática natural y el cambio climático global: a) el incremento de la cantidad y severidad de las inundaciones observadas en las cuencas de Argentina; b) el estudio de dos eventos extremos y análisis de sus impactos sobre las infraestructuras construidas en las cuencas de los ríos Paraná y Neuquén; y c) la importancia del periodo de tiempo utilizado de las observaciones para una adecuada estimación de los parámetros de diseño de obras hidráulicas.

II.2 Revisión bibliográfica

La visión científica y técnica más actual considera que la mayor frecuencia en la ocurrencia de valores máximos de variables hidrológicas está asociada con la variabilidad climática natural y con el cambio climático global (calentamiento de origen antropogénico) que produce efectos sobre las componentes del ciclo hidrológico.

Estas nuevas observaciones pueden generar situaciones de mayor riesgo hidrológico para obras hidráulicas y de infraestructura básica que están diseñadas con series hidrometeorológicas observadas en las primeras décadas del siglo XX.

Las obras de Ingeniería presentan una vulnerabilidad vinculada con la variabilidad climática natural, y la naturaleza de estos fenómenos era escasamente conocida cuando se construyó una parte significativa de la infraestructura de obras civiles hidráulicas de Argentina.

Por ejemplo, el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) constituye la principal fuente de variabilidad en la circulación atmosférica conocida, e influye sobre las componentes del ciclo hidrológico responsables de la ocurrencia de eventos de crecidas y sequías, sin embargo no fue considerado en el diseño de numerosas obras hidráulicas de Argentina por una razón sencilla: no se conocían sus efectos cuantitativos ni su impacto sobre los caudales extremos.

La planificación de sistemas hídricos complejos y la verificación de obras hidráulicas implican estimar con precisión las relaciones de este fenómeno con las variables hidrológicas. Los resultados de los nuevos modelos aire-océano-tierra permiten la predicción de indicadores del ENSO y la estimación de los caudales de una cuenca para distintas escalas temporales.

Eltahir (1996) estudió la asociación entre la variabilidad natural del caudal medio anual del río Nilo y el ENSO. En este trabajo utilizó un modelo de regresión para vincular la variabilidad natural del caudal medio anual del río con las oscilaciones del ENSO, y concluyó que éstas explican alrededor del 25 % de la varianza de sus caudales medios anuales.

Este resultado muestra a la correlación entre los caudales medios anuales y los indicadores del ENSO como una variable independiente. Esta solución podría usarse para incrementar la predictibilidad de los caudales medios anuales utilizando las predicciones del ENSO.

En América Latina se destacan los trabajos de Richey *et al.* (1989) sobre la variabilidad climática natural y su influencia sobre los caudales del río Amazonas; Aceituno y

Garreaud (1994) analizan los impactos sobre los caudales en sistemas hidrológicos andinos; Poveda y Mesa (1996) presentan histogramas de frecuencia y un análisis cuantitativo de la influencia de los fenómenos extremos del ENSO sobre los caudales observados en distintas cuencas de Colombia.

En cuencas de la Argentina, Brigh (1991) realizó un análisis de los efectos de El Niño - Oscilación del Sur sobre los caudales máximos medios diarios; Compagnucci y Vargas (1993) un análisis de las series de la precipitación sobre cuencas andinas; Flamenco y Berri (1996) un análisis de la predicción de volúmenes en el río Diamante; Gietto y Berri (1996) el mismo análisis en los ríos Bermejo y Paraná.

En la cuenca del río Neuquén fueron realizados otros estudios para escalas de tiempo mayores (Seoane y Obertello, 1999; Valdés y Seoane, 2000). En la cuenca del río Paraná se estudiaron los efectos de la variabilidad climática natural sobre la respuesta hidrológica del río Iguazú y el impacto sobre la predicción de caudales (Chavasse y Seoane, 2009).

El otro tema analizado está asociado con los resultados presentados por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) que ha demostrado la importancia de estudiar la relación de los impactos del cambio climático global sobre los eventos hidrológicos extremos. Además, ha señalado un incremento de la severidad de los eventos hidrometeorológicos observados en distintos lugares del mundo debido a una aceleración de las componentes del ciclo hidrológico.

Arnell (1996), señaló que el cambio climático se convirtió en uno de los más importantes temas de investigación científica durante la década de los ochenta. Entre otros aspectos importantes señaló: 1) la ocurrencia de sequías en Europa durante los años 1988 y 1992 que aumentó el interés general del tema, 2) la necesidad de contar con información científica para la toma de decisiones en sistemas complejos expuestos a la variabilidad climática, 3) las conferencias organizadas por las Naciones Unidas con el objetivo de definir estrategias conjuntas para reducir o limitar el calentamiento global de origen antropogénico (Río de Janeiro, 1992).

En la reunión del IPCC (Nairobi, 2001) se señaló que el futuro calentamiento global sería más severo que el previsto para el año 1995, y que entre 1990 y 2001 las temperaturas subirían entre 1,4° y 5,8° C, con una media de 3,5° C, por encima de las estimaciones de entre 1° y 3,5° C del año 1995.

Estos informes, que fueron realizados por numerosos grupos de institutos internacionales, demostraron la necesidad de estudiar el cambio climático global, y sus efectos sobre las componentes del ciclo hidrológico más relacionadas con la Ingeniería.

Un aspecto importante consistió en el desarrollo de los nuevos modelos necesarios para evaluar los escenarios futuros del clima. Se ha logrado avanzar en el desarrollo de modelos climáticos basados en la física que pueden definir escenarios con características más precisas del clima a nivel regional.

El Cuarto Informe del IPCC (2007) formó parte de una serie de trabajos que evaluaron científica, técnica y socioeconómicamente la información conocida, hasta ese momento, acerca del cambio climático, sus efectos potenciales y las alternativas de mitigación y adaptación. Entre sus conclusiones se destaca que:

"El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados a nivel mundial de la temperatura del aire y el océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento promedio del nivel del mar".

"La mayoría de los incrementos en las temperaturas globales del planeta observados desde mediados del siglo XX, es muy probable que se deba al incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero observados en la atmósfera".

En el marco de la teoría del cambio climático global, las investigaciones se orientaron a la definición de métodos para la detección de la presencia de cambios en las series de observaciones de las componentes del ciclo hidrológico. Bodini y Cosuu (2010); Frish et al. (2010, 2002) y Petersen et al. (2001, 2002) proponen nuevos índices para detectar la presencia de cambios en series meteorológicas.

Frish et al. (2002) señalan la presencia de cambios en distintos índices de precipitaciones y temperaturas, para series temporales observadas en diferentes continentes. El análisis espacial de los índices, muestra la escasa información existente en América del Sur y África.

El estudio mostró distintas medidas cuantitativas definidas para evaluar la ocurrencia de precipitaciones intensas, que habían aumentado desde 1950, y el incremento de las temperaturas extremas, por ejemplo, las mínimas observadas superiores al percentil 90.

Petersen (2002) indica que los resultados de los análisis realizados en el Caribe muestran que el porcentaje de días con temperaturas máximas se ha incrementado a partir del año 1950 y el porcentaje de días con temperaturas muy frías ha decrecido. También observó que ha decrecido el número consecutivo de los días sin precipitación. Estos cambios son consistentes con los observados en otros lugares del mundo.

Los conceptos expuestos demuestran la necesidad de evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura hidráulica ya construida en una cuenca y la presencia de una definición sobre vulnerabilidad.

El IPCC, señala que: la vulnerabilidad es el grado en que un sistema natural o social podría resultar afectado por el cambio climático. La vulnerabilidad está en función de la sensibilidad del sistema a los cambios del clima (grado en que un sistema responderá a determinado cambio del clima, incluidos los efectos beneficiosos y perjudiciales), y de su capacidad para adaptarlo a dichos cambios (grado en que los ajustes introducidos en las prácticas, procesos o estructuras pueden moderar o contrarrestar los posibles daños o beneficiarse de las oportunidades creadas por efecto de determinado cambio climático).

En este contexto, un sistema muy vulnerable sería aquel que fuese muy sensible a pequeños cambios del clima, incluyéndose en el concepto de sensibilidad, a la posibilidad de sufrir efectos muy perjudiciales o cuando se hallara seriamente limitada la capacidad de adaptación.

En este contexto, Barros *et al.* (2003) señalaron que: *'los efectos del cambio climático fueron significativos en las descargas de los ríos de la cuenca Del Plata ya que la precipitación regional ya había tenido una tendencia positiva'*.

Además, indicaron que: *'las tendencias durante los últimos 40 años fueron causadas principalmente por la intensificación de la señal de El Niño en la precipitación, lo que lleva a un aumento de la frecuencia de grandes inundaciones en el río Paraná medio e inferior, donde cuatro de los cinco grandes inundaciones del siglo XX se produjeron durante los últimos 20 años de ese siglo.'*

En una mirada hidrológica, la evaluación de los efectos del cambio climático global muestra impactos sobre los escurrimientos medios (Milly *et al.* 2008). La información presentada en el trabajo indica que el escurrimiento medio anual mostraría una ligera disminución en la Argentina. Milly *et al.* (2008) señalaron que: *'los sistemas de gestión del agua en todo el mundo se han desarrollado, diseñado y operado bajo el supuesto de estacionariedad'*.

Pittock y Hartmann (2011) señalan que los embalses afectan a ríos y otros ecosistemas de agua dulce en todo el mundo. El estudio realizado, mostró que pocas veces se ha evaluado el desempeño estructural y los servicios de muchas presas. Señalan que muchas son inseguras y no producen los beneficios considerados en el diseño. La presencia de cambios en la hidrología requerirá la evaluación de su seguridad y de su funcionamiento.

Estos autores han examinado casos de re-evaluación de las presas de Australia, China, Francia y Estados Unidos, que muestran un desafío de la gestión en el proceso de obsolescencia (o envejecimiento); las oportunidades no alcanzadas para mejorar los

beneficios ambientales, sociales y económicos; y los beneficios de los sistemas ante el reciclamiento.

En este punto se debe incorporar otro concepto que orientará a esta investigación, que consiste en describir cuantitativamente la importancia de los cambios en la respuesta hidrológica en cuencas extensas y evaluar sus efectos sobre los parámetros de diseño de obras hidráulicas.

Por esta razón, fueron seleccionadas la cuenca del río Neuquén, que presenta un área total de 30843 km² (Paso de los Indios) y la cuenca del río Paraná, con un área total de 1.950.000 km² (Corrientes).

Los conceptos anteriores muestran la necesidad de estudiar fenómenos extremos, por ejemplo: las crecidas extraordinarias asociadas con nuevos eventos meteorológicos y la aplicación de modelación de sistemas complejos para evaluar los resultados de las estimaciones con la teoría de valores extremos en Ingeniería.

La ocurrencia de nuevos eventos extremos definió un nuevo programa de investigaciones centrado en la aplicación de métodos para la detección de la presencia de cambios en series temporales y su relación con la variabilidad climática natural. En particular, para valores extremos que se estudiarán más adelante.

En este capítulo se describirá la importancia del tema, desde la visión de la Ingeniería, y del interés por mostrar la amplitud de obras civiles involucradas en el análisis cuando se deben revisar proyectos construidos, y analizar su respuesta ante eventos más severos como los observados en la bibliografía internacional y en las dos cuencas de Argentina.

En resumen, se debe relacionar la presencia de distintas fuentes de incertidumbre en las estimaciones de las precipitaciones y caudales extremos, y considerar los nuevos conocimientos que se han incorporado sobre la variabilidad climática natural. La naturaleza y alcances espaciales y temporales de estos fenómenos eran poco conocidos a principios del siglo XX, cuando se planificaron, diseñaron y construyeron importantes obras de la infraestructura de Argentina. Por lo tanto, el interés por contar con conocimientos más precisos sobre los cambios en las respuestas hidrológicas y el escurrimiento superficial y utilizarlos para la revisión de los diseños de obras importantes.

II.3 Metodología

Se realiza un estudio comparativo de los efectos de la variabilidad climática natural y el cambio climático global en dos cuencas, estimando características de la ocurrencia de eventos asociados con el clima y la vulnerabilidad de la infraestructura hidráulica actual.

En la cuenca del río Neuquén, se describe el impacto de la crecida ocurrida durante el año 2006, que condujo a revisar la capacidad de regulación del sistema de control de crecidas que protege las ciudades de Neuquén y Cipolletti.

En la cuenca del río Paraná, se estudia la ocurrencia de fenómenos hidrológicos extremos y el impacto que la selección del periodo de observación de los valores extremos tiene sobre los caudales de diseño del vertedero de una nueva central hidroeléctrica (Corpus).

Para esta cuenca se presenta una descripción preliminar de las obras de ingeniería y sus fechas de finalización como un indicador de la vulnerabilidad ante posibles cambios en las propiedades estadísticas de las series hidrológicas usadas para su diseño original.

II. 4 Cuencas hidrológicas seleccionadas

Las cuencas de los ríos Neuquén y Paraná cumplen dos condiciones: la primera, asociada con la disponibilidad de series temporales extensas y la segunda relacionada con la importancia de la infraestructura construida que presentan cuencas de gran importancia para Argentina.

II.4.1 Características de la cuenca del río Neuquén

El río Neuquén tiene una cuenca de aporte con una escasa capacidad de regulación, asociada directamente con la carencia de lagos importantes que regulen el escurrimiento, y un clima árido que no permite la existencia de vegetación u otras fuentes de regulación.

En esta cuenca, los lagos son escasos y de pequeñas dimensiones, esta característica contribuye a que los hidrogramas presentan una forma particular que dificulta el control del escurrimiento durante la ocurrencia de las crecidas.

En una breve reseña histórica, los primeros estudios realizados en cuencas patagónicas comenzaron en el año 1898, siendo el Ministerio de Obras Públicas de la Nación el responsable de la construcción de canales de irrigación. Durante ese periodo el ingeniero italiano Cesar Cipolletti desarrolló el estudio de irrigación de los ríos Neuquén, Limay, Negro y Colorado.

El ingeniero Desio Severini proyectó las dos principales obras propuestas por el ingeniero Cipolletti: un azud de derivación (actual dique Ballester), y un gran canal de derivación de las crecidas del río Neuquén hacia el Lago Pellegrini. El dique Ballester se inició en 1910 y se inauguró en 1916. Estas obras fueron la respuesta de la Ingeniería de esa época a las necesidades de protección de la ciudad de Neuquén y su entorno, hecho que facilitó el desarrollo de actividades agrarias.

En la actualidad, el sistema de control de crecidas del río Neuquén incluye además a dos grandes embalses naturales (Los Barreales y Mari Menuco) que permiten regular crecidas importantes que tienen su origen en la cuenca activa, y que son derivadas por una obra denominada Portezuelo Grande.

La cuenca del río Neuquén presenta una de las obras hidráulicas más importantes de Patagonia: el complejo Cerros Colorados-Planicie Banderita. Esta obra tiene como principal objetivo la regulación de los caudales máximos que podrían afectar a la ciudad de Neuquén, y como objetivos secundarios, la generación hidroeléctrica y el riego, para lo cual cuenta con el azud Ballester. En la central de Planicie Banderita se restituyen los caudales al río Neuquén.

Por otra parte, en la cuenca del río Limay se han construido importantes obras hidroeléctricas como El Chocón, que es una presa de materiales sueltos con un embalse sobre el río Limay que presenta un lago de 816 km². Esta obra se completa con los aprovechamientos hidroeléctricos de Piedra del Águila y Alicurá.

II.4.2 Hidrología de la cuenca del río Neuquén

La cuenca del río Neuquén tiene un área de 32.450 km² hasta la sección de control ubicada en Paso de los Indios. Se encuentra comprendida entre los paralelos de latitud sur 36° 10' y 39° 10' y los meridianos de longitud oeste 68° 00' y 71° 10', comenzando el año hidrológico en abril y finalizando en marzo.

El caudal medio anual del río Neuquén es de 280 m³/s, y se genera en una cuenca ubicada en la zona oriental de la Cordillera de los Andes, en el norte de la provincia.

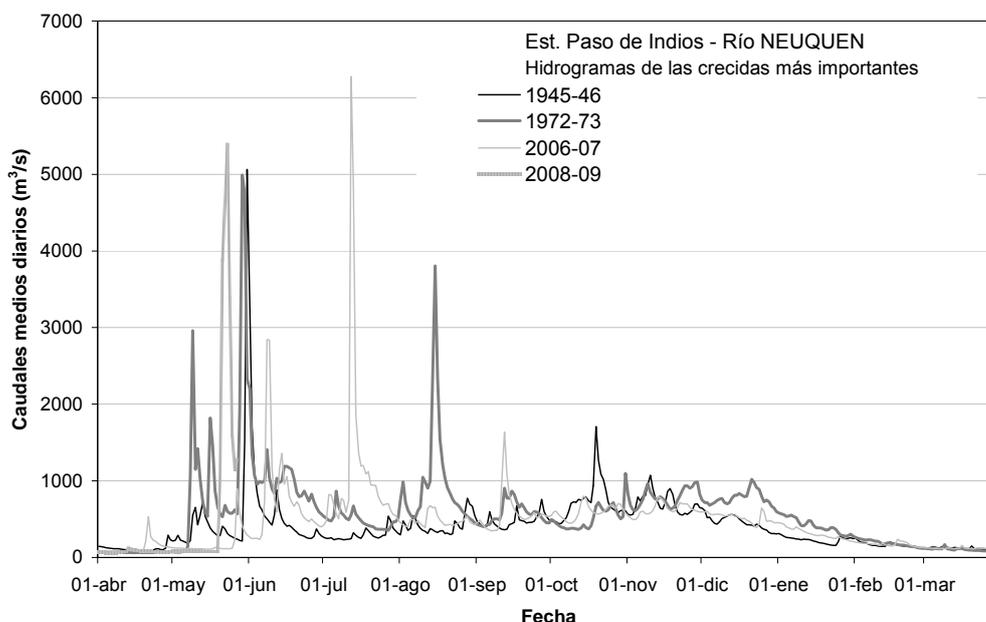
El régimen de alimentación de los ríos Neuquén y Limay es pluvio-nival, predominando en toda la región un máximo muy acentuado de precipitaciones en el período de invierno. El hidrograma anual de ambas cuencas presenta dos máximos, producidos por los procesos de precipitación, en el período junio-agosto, y por fusión en octubre-diciembre.

La distribución estacional de los escurrimientos, muestra que el mayor porcentaje se encuentra en el período de fusión octubre-diciembre (42.3 %). Los valores estimados

decrecen para los restantes trimestres: en julio-setiembre (27.5%), siendo aún menores los aportes para los períodos enero-marzo (12.1 %) y abril-junio (18.1 %). Además, el trimestre octubre-diciembre presenta el menor coeficiente de variación (0.38) seguido por julio-septiembre (0.44); los restantes coeficientes de variación son: enero-marzo (0.56) y abril-julio (0.60).

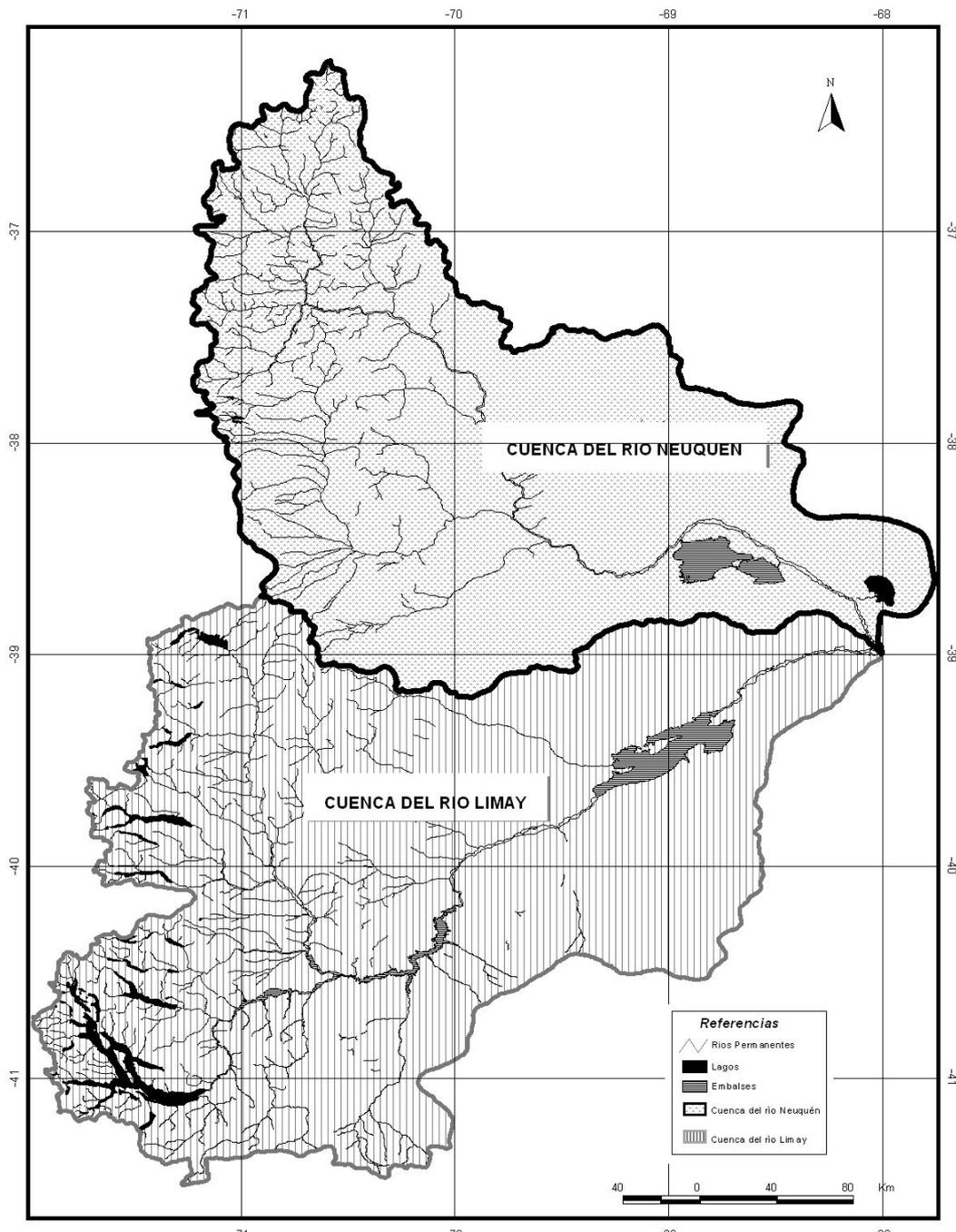
La Figura N° II.1 muestra una comparación de los hidrogramas correspondientes a algunas de las crecidas máximas registradas en la estación Paso de los Indios. En esta figura se muestran dos crecidas importantes ocurridas en los años 2006 y 2008 que condujeron a la decisión de realizar una nueva estimación de la Crecida Máxima Probable. Una discusión de la importancia de este tema se presenta más adelante.

Figura N° II.1. Hidrogramas de crecidas seleccionadas a nivel diario en el río Neuquén (Paso de los Indios).



Los hidrogramas presentados indican que las máximas crecidas fueron originadas por precipitaciones ocurridas durante el invierno. Las crecidas a nivel diario muestran una curva de ascenso pronunciada del hidrograma y los caudales máximos se alcanzan en pocos días. Esta característica está asociada con la carencia de lagos que actúen como embalses naturales regulando las crecidas que provienen de las precipitaciones que ocurren en la región más cercana a la Cordillera de los Andes, y a la aridez que caracteriza a esta cuenca. En la Figura N° II.2 se observa la descripción de las cuencas.

Figura N° II.2. Cuencas de los ríos Neuquén y Limay.



En el Capítulo III se presentarán los resultados de la aplicación de pruebas estadísticas utilizadas para la detección de la presencia de tendencias y de cambios

múltiples en las series de caudales máximos diarios que permiten comprender los efectos diferenciados señalados en los conceptos del párrafo anterior.

II.4.3 Mecanismo meteorológico de formación de precipitaciones

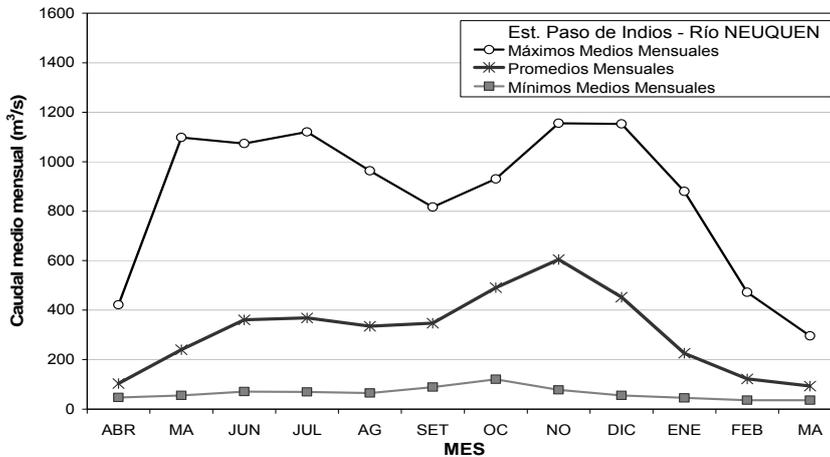
En esta parte de la cordillera de los Andes el mecanismo meteorológico que provoca las precipitaciones tiene como explicación el ingreso de masas de aire húmedo provenientes del océano Pacífico. Estas son obligadas a ascender por la cadena montañosa, se enfrían adiabáticamente por disminución de la presión atmosférica, se condensan y precipitan en forma de lluvia o nieve.

Las precipitaciones más importantes, del orden de 3.000 mm anuales, ocurren en la parte alta de la cordillera, en el límite con Chile, mientras que en la parte oriental de la cuenca, la precipitación media anual es sólo 200 mm. Esta fuerte variación es causada por la pérdida de gran parte de la humedad de las masas de aire en la barrera cordillerana, que se interponen entre uno y otro extremo de la cuenca.

Una parte importante de estas precipitaciones ocurre en forma de nieve y se acumula en la parte más alta de la cuenca. La componente de la precipitación que ocurre en la zona media y baja de la misma produce la onda invernal del hidrograma que se caracteriza por presentar un caudal máximo de gran magnitud con relación a su volumen. Las mayores precipitaciones ocurren en el invierno, donde se registran alrededor del 80 al 90% de las precipitaciones totales del año.

La Figura N° II.3 presenta una comparación entre los caudales medios mensuales promedios, y los máximos y mínimos mensuales promedios observados. Los caudales corresponden al promedio de los registrados en el período: 1903-04 /2006-07. En esta figura se puede observar la distribución de los caudales mensuales, la crecida invernal asociada con la ocurrencia de precipitaciones, la de primavera debida al proceso de fusión y los muy diferentes volúmenes escurridos para cada estación del año.

Figura N° II.3 Comparación de distintas series temporales de caudales en el río Neuquén.



Se observa que los promedios mensuales son máximos en primavera y éstos tienen el mismo orden de importancia para las crecidas en los meses de invierno.

Comentarios

El régimen hidrológico del río Neuquén presenta dos máximos asociados con distintos procesos de generación del caudal. El primero, relacionado con la precipitación y el segundo con el proceso de fusión nival.

La forma de los hidrogramas (curva de ascenso rápida) está directamente asociada con una escasa capacidad de regulación de los lagos y la aridez de la cuenca. Según la bibliografía internacional, estas condiciones incorporan más variabilidad a la relación período de retorno-caudales máximos que se estima con los modelos probabilísticos de valores extremos.

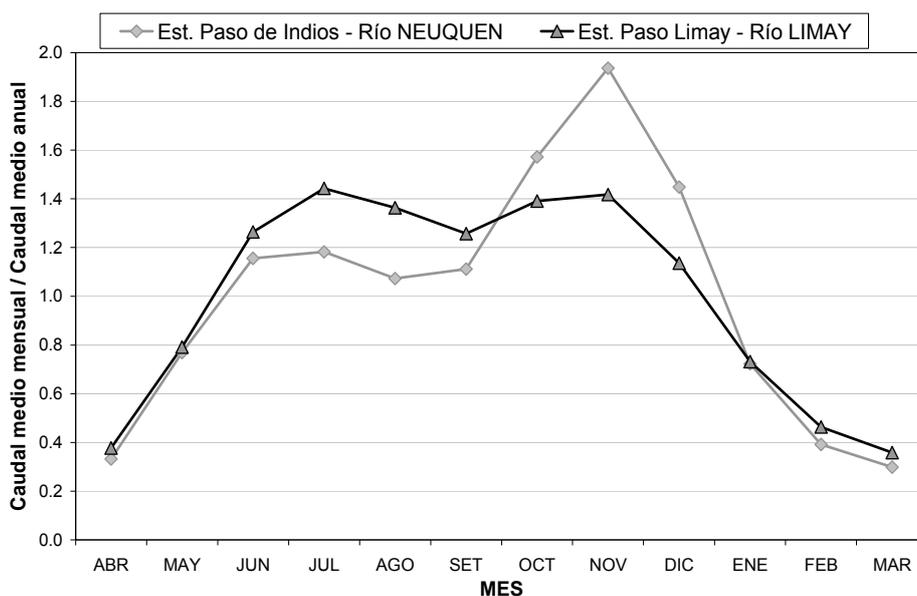
Los resultados de una comparación con los datos de los caudales observados en la cuenca del río Limay, que está ubicada al sur del río Neuquén y que presenta un área semejante, muestra el efecto regulador de los lagos sobre la forma de los hidrogramas y permite proponer una explicación a diferentes respuestas hidrológicas.

Comparación con la cuenca del río Limay

En este punto del análisis resulta conveniente incluir una comparación entre las dos cuencas. La Figura N° II.4 muestra la influencia de la capacidad de regulación de los lagos naturales ubicados en esta cuenca sobre la forma del hidrograma en Paso Limay.

La cuenca tiene treinta y siete lagos, que abarcan una superficie total aproximada de 1.149 km². El volumen promedio de estos lagos es de 18.000 hm³, mientras que el de los embalses es de 9.000 hm³ (CFI, 1962).

Figura N° II.4 Comparación de los hidrogramas mensuales promedio para los ríos Limay y Neuquén.



II.4.4 Crecida observada en el río Neuquén en el año 2006

Se ha seleccionado la crecida del río Neuquén ocurrida durante el mes de julio del 2006 debido a que la ocurrencia de este nuevo evento hizo necesario la estimación de una nueva crecida máxima probable para contar con la información necesaria para evaluar el riesgo de todo el sistema de control de la cuenca.

La crecida máxima probable (CMP) se define como la crecida que puede ser esperada a partir de la combinación más severa de condiciones hidrológicas y meteorológicas críticas que son razonablemente posibles en una cuenca de drenaje (FEMA, 1998).

En el año 1999 se realizó una primera estimación de la CMP definiendo un caudal de 14520 m³/s. La incorporación en la serie de eventos extremos de la crecida observada en el año 2006 condujo a revisar esa primera estimación y definió un caudal máximo de 25070 m³/s para la CMP.

Distintos antecedentes internacionales señalan que el método de la CMP presenta algunos problemas, ya que la misma puede cambiar con el tiempo, dada la ocurrencia de nuevas y más importantes crecidas.

Existe un grado de subjetividad en la estimación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) que es la entrada al modelo hidrológico utilizado para estimar la CMP. La Organización Meteorológica Mundial (1986) señaló las dificultades de la evaluación de la precisión de la PMP estimada.

La respuesta hidrológica se cuantifica con un modelo de transformación precipitación-caudal y la entrada es la PMP. La selección del modelo, calibración de los parámetros y evaluación del ajuste alcanzado presenta nuevas fuentes de incertidumbre.

El interés de desarrollar nuevos estudios se relaciona con algunos conceptos de Graham (2000) que indica que numerosas presas construidas podrían ser sobrepasadas por una nueva crecida: a) fueron diseñadas y construidas antes de que el concepto de CMP fuera totalmente desarrollado; b) fueron diseñadas usando una crecida menor que la CMP y c) algunas estimaciones de la CMP deben ser incrementadas al disponer de información más actual.

Este último caso se relaciona directamente con el análisis desarrollado sobre el estudio de la CMP del río Neuquén y que demostró la importancia de incorporar nuevos eventos extremos de precipitación en la estimación de la variable de entrada al modelo hidrológico, que en este caso es la PMP.

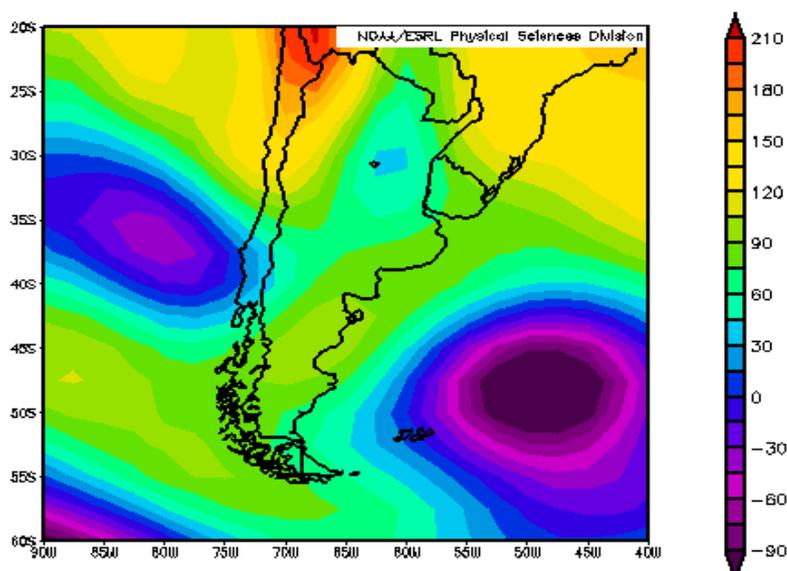
Mecanismos de generación de las precipitaciones máximas

Las tormentas que producen crecidas en la cuenca del río Neuquén tienen su origen a barlovento de la cordillera de los Andes. La particularidad es que el sistema sinóptico asociado a estas tormentas está representado generalmente por un sistema de baja presión que avanza desde el oeste por el océano Pacífico y que al llegar a la costa chilena a la latitud de aproximadamente 35° S en superficie, se detiene debido al importante obstáculo definido por la cordillera de los Andes.

Como un ejemplo de este sistema, en la Figura N° II.4, se presenta un mapa que corresponde a las anomalías de presión del 20 de mayo de 2008, el cual originalmente es un sistema de baja presión baroclínico. Cuando el sistema en superficie se ve impedido de seguir avanzando hacia el este, toda la columna de aire frío en altura sigue su desplazamiento normalmente hasta que en 24 horas aproximadamente se ubica en la vertical del sistema en superficie.

Al mismo tiempo, la posición del sistema en superficie permite la advección de aire cálido y húmedo hacia la base de la cordillera del lado chileno, y su persistencia de dos o tres días en ese lugar genera condiciones de inestabilidad que, sometidas a procesos de ascenso por la dinámica propia del sistema y por la orografía del lugar, producen condensación de vapor y liberación de energía que retroalimenta a este proceso. Se forman nubes, y éstas conducen a la precipitación principalmente en el lado oriental de la cordillera.

Figura N° II.5 Tormenta observada en el mes de junio del año 2008 en Argentina.



Los investigadores consultados del Servicio Meteorológico Nacional indicaron que no es muy común el desarrollo de estos sistemas.

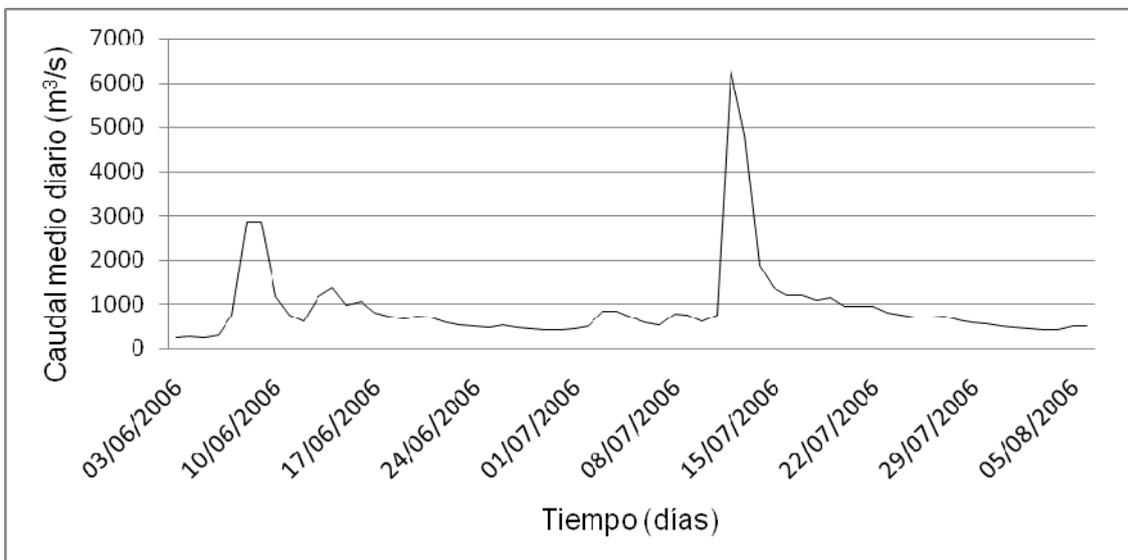
En los últimos diez años aproximadamente, las características meteorológicas en la región asociadas a precipitaciones intensas, algunas de las cuales coincidirían con los caudales máximos registrados, se pueden describir como sigue: a) durante los meses de mayo y junio se producen nevadas, b) durante fines de junio y primeros días de julio la región se ve afectada por una ola de calor que produce la fusión de la nieve y c) posteriormente se desarrolla un sistema de baja presión, dando lugar a precipitaciones

intensas, con fusión de nieve previamente y arrastrando también nieve al momento de las precipitaciones.

Relación caudal máximo - periodo de retorno con la nueva crecida máxima

En la Figura N° II.6 se presenta el hidrograma de la crecida observada en el año 2006, estación de Paso de los Indios. La ocurrencia de este evento mostró la necesidad de desarrollar estudios complementarios y de analizar su relación con la aplicación de modelos de caudales extremos; Seoane y Devoto (2008).

Figura N° II.6 Hidrograma de la crecida del año 2006 en escala diaria. Río Neuquén.



En este trabajo se estudiaron los siguientes temas:

- 1) Selección de modelos de valores extremos y aplicación del método de estimación de sus parámetros (máxima verosimilitud).
- 2) Criterios de selección para identificar el modelo de valores de extremos (Bayesian Information Criterion y Akaike Information Criterion).
- 3) Comparación de las estimaciones de los caudales máximos diarios anuales para un periodo de retorno de 10000 años y con modelos de extremos alternativos.
- 4) Aplicación del método de función de distribución acotada.

Para el análisis de valores extremos que permitiera incorporar a la crecida observada se utilizaron los modelos Generalizado de Valores Extremos (GEV), Gumbel, Log-Normal III, Pearson III y Log-Pearson III

El método de estimación de parámetros aplicado fue Máxima Verosimilitud (MV), aunque se realizaron pruebas con otros métodos de estimación, para precisar la importancia de la incertidumbre, y su impacto sobre la relación caudal máximo-periodo de retorno.

Como un ejemplo del proceso de selección del modelo se presenta la utilización del Akaike Information Criterion (AIC) y del Bayesian Information Criterion (BIC).

El Criterio de Información Bayesiano (BIC) contribuye a resolver el problema de la selección entre varios modelos alternativos. El Criterio de Información de Akaike (AIC) permite analizar la bondad del ajuste e incluye una penalización por el número de parámetros estimados para el modelo.

En la teoría de valores extremos, la aplicación de una función de densidad de probabilidades para representar una serie de caudales máximos, implica identificar un modelo entre varios posibles que presentan un determinado número de parámetros. El número de parámetros en un modelo tiene importancia dado que la verosimilitud se incrementa con su número.

Los dos criterios identifican como el mejor modelo al que presenta el menor valor de BIC o AIC. La Tabla N° II.1 presenta los valores estimados con ambos criterios y el modelo seleccionado que es la función de densidad de probabilidades Pearson III.

Tabla N° II.1 Resultados de la aplicación de los criterios de selección de modelos probabilísticos. Seoane y Devoto (2008).

Modelo	Cantidad de parámetros	BIC	AIC
Pearson III	3	<u>676.715</u>	<u>671.802</u>
Gumbel	2	677.659	674.384
Log-Pearson III	3	679.046	674.133
Log-Normal III	3	679.640	674.727
GEV	3	680.579	675.666

Los valores estimados del BIC y del AIC indican que el modelo Pearson III define el mejor ajuste, dado que presenta el menor valor de BIC y AIC comparado con los otros cuatro modelos propuestos (Gumbel, GEV, Log-Pearson III y Log-Normal III).¹

En la Argentina existe el Organismo de Regulación de Seguridad de Presas (ORSEP) que para la región del Comahue tiene un programa de fiscalización de la seguridad de presas que realiza auditorías técnicas periódicas a las obras concesionadas, a través de consultores independientes. Estas evaluaciones tienen como objetivo revisar todos los aspectos relacionados con la seguridad de las presas y particularmente la capacidad de las obras de alivio para la ocurrencia de eventos hidrológicos extraordinarios.

En distintos países la infraestructura está supervisada por una organización que define las decisiones de interés general a través de un proceso con la participación pública. Por ejemplo, para un embalse, la actualización debería minimizar los impactos climáticos actuales, mejorar la migración de la fauna acuática e incluso atenuar algunos impactos del clima en la biota de agua dulce.

En un próximo párrafo se analizará un caso en la cuenca del río Paraná que corresponde a la obra binacional de Corpus, que permite mostrar la posibilidad de cambios en las estimaciones de los caudales máximos y sus efectos sobre los parámetros hidráulicos de diseño del vertedero.

II.5 Cuenca del río Paraná

El río Paraná presenta tres cuencas importantes; Tietê, Paranapanema e Iguazú con sus fuentes de alimentación cercanas a la costa del Atlántico en el sureste de Brasil. A partir de su confluencia con el río Iguazú y hasta su confluencia con el río Paraguay, el Alto Paraná es la frontera entre Paraguay y Argentina. Se denomina como Paraná inferior

¹ *Artículo periodístico. El 13 de julio de 2006, el río Neuquén sufrió la crecida más importante de los últimos 100 años, el río bajó hacia Portezuelo Grande con un caudal tan alto que estuvo a punto de colapsarlo. El derivador soporta 11.500 metros cúbicos por segundo y el río creció hasta 10.300 ese día. Lo que se decidió fue largar por el cauce histórico del río 1.800 metros cúbicos por segundo cuando lo normal es 12 y el resto se desvió por el lago Los Barreales. Luego de esa histórica inundación de 2006 hubo otra, dos años después, de menor intensidad pero que también produjo grandes pérdidas en la población. El gobierno Provincial anunció en 2008 que iban a mudar el pueblo a un predio de 70 hectáreas a tres kilómetros del actual pero todavía no hubo avances sobre ese tema.*

al curso después de la confluencia con el río Paraguay donde comienza el escurrimiento sólo a través de territorio argentino.

Cerca de la ciudad de Santa Fé, el río Paraná recibe otro afluente, el río Salado. Entre esta ciudad y la de Rosario comienza a formarse el delta del Paraná, siendo su extremo superior de 18 km de ancho y su extremo inferior aproximadamente de 65 km. El delta del río se divide formando una serie de canales, siendo los dos más importantes el Paraná Guazú y el Paraná de las Palmas.

En el río Paraná, la obra hidráulica más importante está ubicada en Brasil y es el embalse de Itaipú que se completó en 1982 y presenta una capacidad de generación eléctrica de 12.600 MW. En Argentina, existe otra importante obra, el embalse de Yacyretá, en la parte baja del río Paraná el cual comenzó a funcionar en 1994. El equipo de esta central tiene una potencia instalada total de 3200 MW, abastece el 22% de la demanda de electricidad argentina y genera el 60% de la energía hidroeléctrica del país.

El embalse fue inaugurado durante el año 1998 cuando comenzaron a funcionar las 20 turbinas programadas. La Producción Bruta Anual de la central aumentó de 12.149 GWh a 16.738 GWh durante el período 2004-2009 y significó un crecimiento de la misma de un 37,7%.

La Figura N° II.7 presenta un esquema del sistema hidrológico de la cuenca del río Paraná

Cuenca del río Iguazú

La cuenca del río Iguazú posee un área de aproximadamente 72.000 km², 98% en la República Federativa de Brasil, y el 2% en la Argentina. Esta participación en el origen de las aguas del río es la que explica la importancia que el Brasil atribuye al estudio de esta cuenca.

El río presenta sus nacientes en la vertiente occidental de la Serra do Mar, muy cerca del Océano Atlántico y su desembocadura en el río Paraná. Este río presentaba, antes de la construcción de embalses en territorio brasileño, numerosos rápidos y cascadas: Salto Santiago de 40m, Salto Osorio de 30m y las grandes Cataratas del Iguazú, de 72 m.

En la región de las Cataratas, el curso es el límite entre los Parques Nacionales de Argentina y Brasil y presenta un ancho aproximado de 1200 m y un caudal medio de 1800 m³/seg. Entre los afluentes del último trecho se destacan las cuencas de los ríos Potinga (2320 km²), Jordán (4780 km²) y Cavernoso (2610 km²) en la margen derecha, y Negro (9580 km²), Iratim (1530 km²), Chopim (7120 km²) y Capanema (2140 km²) en la margen izquierda.

La cuenca del río Iguazú tiene clima subtropical húmedo, sin estación seca, siendo las lluvias superiores a los 1000 mm anuales, con el mes más seco excediendo en promedio los 60 mm.

II.5.1 Ocurrencia de eventos hidrológicos extremos en el río Paraná

En este párrafo se presentan los resultados de un análisis preliminar del relevamiento de inundaciones registradas en la zona de la cuenca Del Plata. Chamorro (2006) en su estudio sobre el cambio climático global muestra la necesidad de realizar estos análisis:

- La vulnerabilidad de los sistemas de distribución y transmisión de energía, los edificios, los servicios urbanos, los sistemas de transporte e industrias específicas como la agroindustria.
- La concentración de la población y su infraestructura en zonas urbanas que ponen en riesgo a un número mayor de personas y a un capital físico de mayor valor.
- El tamaño de los asentamientos urbanos que influye en la posible respuesta al cambio climático. Ciudades con grandes poblaciones tendrán distintas capacidades para elaborar las respuestas adecuadas que aquellas que presentan poblaciones de tamaño medio o pequeño.

Los conceptos anteriormente expuestos indican algunas causas importantes del proceso de generación de crecidas e inundaciones en una cuenca.

Con la información disponible en la cuenca del río Paraná se desarrolla un análisis cuantitativo de las inundaciones rurales y urbanas de acuerdo con la ubicación de los eventos, tiempos de duración y cobertura areal.

El objetivo del análisis fue mostrar, en forma numérica y gráfica, la evolución de la cantidad de casos observados de eventos extremos en el tiempo.

Se realizó una identificación de las inundaciones en las distintas estaciones del año para contribuir a la posible identificación de los diferentes mecanismos de producción de tormentas intensas y de sus caudales asociados.

Los casos analizados corresponden a la ocurrencia de eventos de periodos de retornos menores (del orden de dos o cinco años). En Ingeniería, estos valores están relacionados con el diseño de obras hidráulicas menores y son los utilizados para el control de inundaciones en ciudades pequeñas, obras en caminos secundarios y puentes de rutas provinciales.

Se debe destacar que aunque las obras hidráulicas hayan sido diseñadas con periodos de retorno, considerados en Ingeniería como menores, los cambios en los mecanismos de generación de las tormentas severas podrían haber modificado esta relación precipitación máxima-período de retorno original.

Esta situación puede ser la causa por la que poblaciones urbanas son afectadas por la ocurrencia de eventos con mayor frecuencia de la esperada debido a que las dimensiones de las obras están relacionadas con series de valores extremos con propiedades estadísticas que cambian con el tiempo (no estacionariedad).

La Tabla N° II.2 muestra los eventos que fueron clasificados como inundaciones rurales y urbanas en el periodo de estudio.

Tabla N° II.2. Cantidad de inundaciones identificadas en el periodo 1990-1999.
Cuenca del río Paraná.

Cantidad de inundaciones	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Urbanas por precipitación	6	7	2	0
Urbanas por desborde de un río	0	6	6	0
Rurales	5	12	9	0

Tabla N° II.3. Cantidad de inundaciones identificadas en la cuenca del río Paraná
(2000-2012).

Casos	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Urbanas por precipitación	13	18	10	1
Urbanas por desborde de un río	2	17	8	1
Rurales	5	16	10	1

Las siguientes figuras II.7 a II. 9. muestran la evolución de la cantidad de inundaciones ocurridas y se observa un mayor incremento en las urbanas por precipitación directa.

Figura N° II.7. Evolución temporal de la cantidad de inundaciones urbanas en la cuenca del río Paraná (1950-2012).

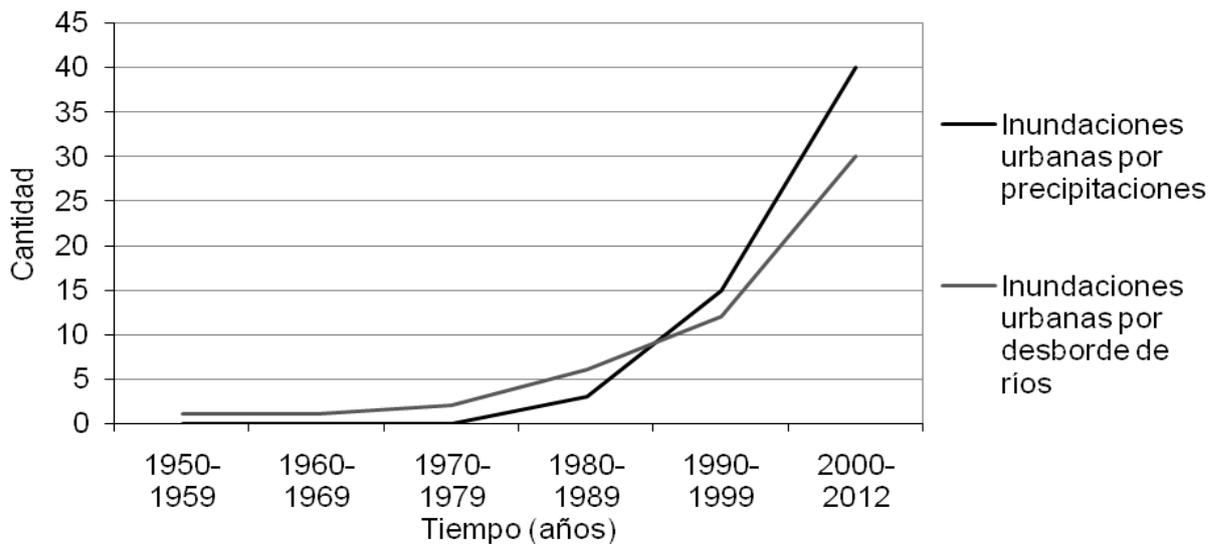


Figura N° II.8. Evolución temporal de la cantidad de inundaciones rurales en la cuenca del río Paraná (1950-2012).

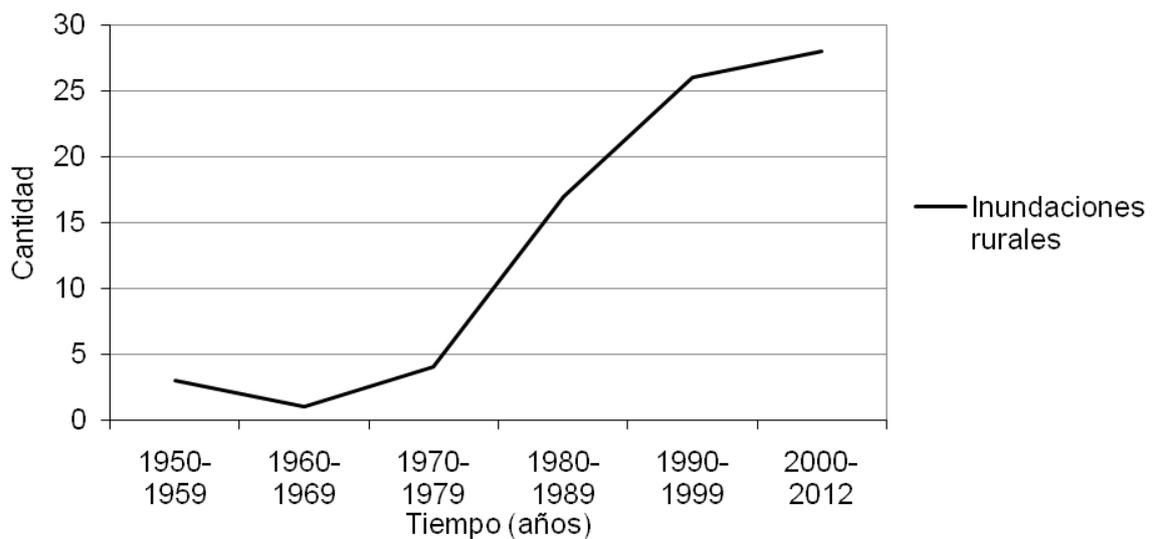
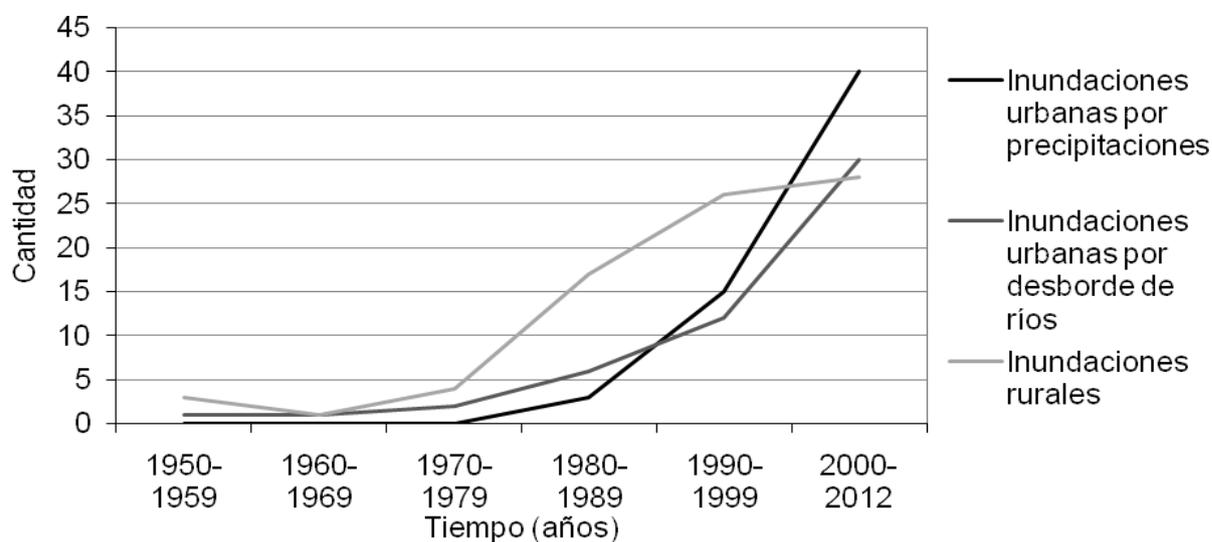


Figura N° II.9. Comparación de la evolución temporal de la cantidad de inundaciones en la cuenca del río Paraná (1950-2012).



Comentarios

En la cuenca del río Paraná, se ha observado que los periodos críticos del año para la ocurrencia de inundaciones son: verano y otoño. Las figuras anteriores muestran un incremento en la cantidad de inundaciones rurales y urbanas para la segunda parte del periodo de análisis (1970-2012).

En una cuenca tan extensa resulta difícil conseguir una identificación precisa de los cambios en los mecanismos generadores de crecidas, y conocer exactamente los orígenes o causas de la variabilidad de los caudales extremos. Otras causas importantes y posibles de los cambios son, la deforestación de extensas áreas de la cuenca y la construcción de numerosos embalses en Brasil.

Se ha observado que el problema de las inundaciones urbanas ha incrementado su importancia en las últimas décadas, posiblemente debido a la ocurrencia de eventos meteorológicos más severos.

En consecuencia, la mayor cantidad de inundaciones urbanas ocurridas muestra la necesidad de revisar las relaciones periodo de retorno-precipitaciones máximas utilizadas para el diseño de las obras de hidráulica urbana o de protección construidas.

La presencia de nuevas observaciones de eventos extremos de precipitaciones conduciría a la necesidad de estimar nuevamente las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia incorporando los eventos ocurridos en los últimos años.

II. 6 Análisis de obras de infraestructura en la cuenca del río Paraná

En esta parte del estudio se identifican un conjunto de obras de infraestructura importantes para las cuales, contar con nueva información hidrológica contribuirá a mejorar las estimaciones de los parámetros de diseño a nivel de planeamiento y de proyecto. Se presentarán las obras identificadas para evaluar las posibilidades de aplicación de los resultados generados por nuevos modelos hidrológicos.

Una cantidad importante de las obras hidráulicas se han diseñado considerando que la información hidrometeorológica verifica las hipótesis estadísticas de estacionariedad e independencia que utiliza la teoría de valores extremos clásica.

Las últimas investigaciones desarrolladas en el marco del análisis de valores extremos, han demostrado la necesidad de incorporar la variación en los parámetros de las funciones de densidad de probabilidades con el tiempo que se aplica para diseñar y verificar obras.

II.6.1 Hidroelectricidad

En Argentina, la cuenca Del Plata presenta una importante cantidad de proyectos y obras hidroeléctricas. Entre las segundas, se destacan: Yacyretá (tramo superior del río Paraná), Salto Grande (río Uruguay) y Uruguái (río Uruguái), construidas y operando, configuran un aporte sustancial a la matriz energética actual.

El diseño y ejecución de obras de Ingeniería para la mitigación de los efectos del cambio climático, podría ser más simple cuando se propone modificar los parámetros de diseño de obras en la etapa de planeamiento, que en los proyectos que se están desarrollando a las más severas condiciones hidrológicas.

En la cuenca Del Plata, entre las obras proyectadas se cuentan: Corpus Christi e Iratí – Itacorá (ambas en el tramo superior en el río Paraná,) Garabí y Panambí (río Uruguay) y Paraná Medio Sur y Norte (en el tramo medio del río Paraná).

Las obras del tramo superior del río Paraná, tienen una fuerte influencia el río Iguazú, en especial, asociada a sus importantes crecidas.

En este marco, el análisis del impacto del cambio climático sobre los caudales en distintas escalas temporales, se ha orientado a definir un conjunto de obras

hidroeléctricas que se encuentran en la etapa de planeamiento avanzado, o proyecto básico. Todas ellas son proyectos de gran magnitud y producirán un impacto positivo en la economía regional, con efectos ambientales de fácil mitigación.

El primer texto considerado para la selección de los proyectos hidroeléctricos fue: “*Reflexiones sobre una matriz energética sostenible*” publicado por la Academia Nacional de Ingeniería (2011) que ha identificado las obras en todo el país.

El análisis conjunto de las observaciones del trabajo citado y los nuevos resultados del proyecto CLARIS-LPB (*A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies in La Plata Basin*) muestra una oportunidad de identificar un conjunto de estudios avanzados de centrales hidroeléctricas, que entrarán en operación en el futuro cercano.

En estas obras, aún es posible incorporar cambios en el diseño de los proyectos, sin incrementar los costos con estas las modificaciones. Por ejemplo, realizar una nueva estimación de los caudales de diseño para la obra de desvío de un río durante su construcción utilizando la información más actual y compararla con la proyectada. También, se podría modificar la estimación de la energía generada sobre la base de la aplicación de una curva de duración estimada con los caudales futuros.

Entre los aprovechamientos citados debería orientarse el énfasis en: Corpus Christi, Garabí y Panambí. Otras ideas que fundamentan esta selección son:

- a) la mayoría de los estudios de hidrología para los proyectos de las obras hidroeléctricas se desarrollaron con observaciones que, en algunos casos, alcanzaban hasta la década de los setenta;
- b) en la actualidad existen nuevos criterios hidrológicos que permiten definir soluciones de Ingeniería de mayor precisión, y que mejoran claramente la asignación de recursos económicos y con una adecuada minimización de los riesgos;
- c) las nuevas investigaciones indican que la variabilidad climática natural es una fuente de incertidumbre para los análisis de valores extremos utilizados en el diseño hidrológico.
- d) las investigaciones que corroboran la importancia de la presencia de persistencia de largo plazo y que influye en las pruebas de detección de cambios y en el análisis de valores extremos.

Se puede señalar que la persistencia de largo plazo (fenómeno de Hurst), aún siendo un desarrollo que se origina en la Hidrología en la década de los años 50, no fue incorporado en la práctica normal para los cálculos de los parámetros de los diseños de las obras.

Proyectos identificados

1) El proyecto Corpus Christi, elaborado por la Comisión Mixta del río Paraná (COMIP), adoptó una Crecida Máxima Probable (CMP) de 95.000 m³/s (sobre la base de la crecida de Yacyretá) y se utilizó el modelo matemático de hidrograma unitario sintético de Snyder (1938) con la información hidrológica observada hasta la década de los años 70.

El proyecto del Tratado de Corpus Christi (en el emplazamiento Itacuí) fue presentado en los primeros años de la década del 80. El primer artículo de este tratado dice: "Las Altas Partes Contratantes realizarán, de acuerdo con lo previsto en el presente Tratado, el aprovechamiento de propósito múltiple de Corpus Christi (Itacuí), en el río Paraná, en las proximidades del kilómetro 1597, en el lugar denominado Itacuí".

Los principales temas de análisis son:

1) Disponibilidad del recurso hídrico: es un dato básico para la estimación de la energía media anual generada por la Central. El tema más importante consiste en cuantificar la generación y determinar las secuencias de años de baja hidráulidad. Es decir, determinar el funcionamiento de la central en cuanto a contribuir con la generación en la curva de carga nacional. En este aspecto es indispensable analizar el funcionamiento de las centrales ubicadas aguas arriba que, en el caso del tramo superior del río Paraná son, casi en exclusividad, construidas y operadas por Brasil.

2) Crecida de desvío: esta crecida (asociada con un periodo de retorno: 30 y 50 años) se estimó con datos del siglo XX. Por lo tanto, una actualización que incorporara la información observada y generada con los nuevos modelos hidrológicos, contribuiría a definir mejor importantes temas asociados, como la navegabilidad del río en la época de construcción de las obras.

3) Otros antecedentes del tema: se pueden señalar los estudios hidrológicos que fueron realizados en el marco del proyecto de Paraná Medio durante la década del 70 por la empresa Agua y Energía Eléctrica (AyEE). Este estudio utilizó datos básicos que no consideran, lógicamente, modificaciones del escurrimiento posteriores y que distintas investigaciones señalan como significativas.

El proyecto de Garabí, (obra binacional con Brasil) incluye un embalse a construirse en el río Uruguay, entre las provincias de Corrientes (Argentina) y Río Grande del Sur (Brasil). Los estudios originales para la construcción de la misma datan de marzo de 1972, según acuerdos firmados por Agua y Energía Eléctrica (AyEE) de Argentina y Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELECTROBRAS) de Brasil.

Durante el año 2008, ambos gobiernos, resolvieron actualizar los estudios existentes en el Proyecto Garabí, hasta llegar a la elaboración de un proyecto técnico básico, incluidos los estudios sobre los posibles efectos ambientales, su control y análisis económico sobre el desarrollo regional. Se incorporó la elaboración, al mismo nivel anterior, de la presa de Panambí, emplazada aguas arriba de Garabí, en la provincia de Misiones.

Para definir los parámetros hidráulicos de obras importantes, el principal método aplicado, consiste en estimar la Crecida Máxima Probable (CMP). Para la obra de Salto Grande este cálculo fue verificado hace unos pocos años. El método aplicado para estimar la Precipitación Máxima Probable incorporó, resultados de modelos de circulación general de la atmósfera. Así, se consideró al cambio climático global en la re-evaluación de la seguridad de la obra de evacuación.

Brasil tiene un sustancial poderío económico y dispone de una gran experiencia en el diseño, construcción y operación de aprovechamientos hidroeléctricos, situación que no presenta Argentina en el tramo superior del río Paraná.

II.6.2 Río Paraná, crecidas y variación de los parámetros de obras hidráulicas

En el mundo se han construido numerosas presas que cumplen las condiciones requeridas para ser denominadas *grandes presas*. Desde finales de los años sesenta la International Commission on Large Dams (ICOLD) ha desarrollado estudios importantes en temas como: seguridad de presas, monitoreo del desempeño, reanálisis de presas mayores y aliviaderos, los efectos del envejecimiento y el impacto ambiental.

En el Capítulo I, se ha señalado que en Argentina, un número muy significativo de las presas fueron construidas con datos hidrológicos observados desde principios del siglo XX y con la aplicación de métodos estadísticos que consideraban la hipótesis de estacionariedad en las series de caudales máximos anuales.

En el río Paraná, durante el siglo XX se han producido grandes inundaciones, por ejemplo los eventos observados en los años 1982–83 y 1997–98, asociados a la ocurrencia de eventos de fenómeno de El Niño (Camillioni y Barros, 2000).

Griffis y Stendinger (2007) proponen incorporar la variabilidad climática natural y el cambio climático global en la estimación de crecidas utilizando la función Log-Pearson III que resultaría en un cambio en el método clásico utilizado en Estados Unidos (Bulletin 17B LP3 model).

En el análisis hidrológico de crecidas e inundaciones se deberían incorporar los nuevos estudios sobre los efectos del ENSO y del Grupo Internacional sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), y evaluar la presencia de tendencias en las variables hidrológicas que se aplicarán en el diseño de medidas de adaptación y mitigación en las obras.

Una metodología que permita evaluar los efectos climáticos globales sobre las variables hidrológicas debería detectar la presencia de cambios en la serie temporales. Por ejemplo, de máximos anuales incluyéndose, las pruebas no paramétricas de Mann-Kendall y de Pettitt.

Entre los casos de embalses importantes en Argentina, se encuentra la citada presa de Corpus, que representará una importante contribución a la capacidad hidroeléctrica existente con la incorporación de una energía media anual de 20.175 GWh.

La presa se construirá en un sitio denominado "Pindo-I" y sus principales características son: altura de 21,40 m, área de embalse 13966 hm², capacidad instalada de 2.880 MW y estará equipada con 20 turbinas Kaplan de 144 MW.

Seoane *et al.* (2010) indicaron que la serie temporal de las crecidas máximas anuales del río Paraná (estación Posadas) tiene una tendencia positiva y significativa con un nivel del 10%. Este resultado se obtuvo con la aplicación de la prueba no paramétrica de Mann-Kendall.

En este trabajo se aplicaron distintos modelos de valores extremos para demostrar las diferencias en las estimaciones utilizando la serie de 1900-1999, y los caudales máximos observados en los últimos treinta años. Las estimaciones de los caudales correspondientes a un período de retorno de cincuenta años se utilizaron para estudiar los efectos sobre varios aspectos hidráulicos de la presa.

Los modelos de valores extremos aplicados fueron: función de densidad de probabilidades Generalizada de Valores Extremos (GEV), Gumbel, Pearson III y Log-Pearson III y los parámetros se estimaron con el método de verosimilitud. Se ha seleccionado el modelo de Gumbel aplicando dos criterios de información diferentes.

Desde el punto de vista hidráulico, algunos procesos críticos implicados en las características del diseño de los vertederos deberían ser adaptados al modificarse las condiciones extremas de flujo por la ocurrencia de caudales mayores.

Existen leyes empíricas obtenidas por medio del análisis estadístico para calcular las fluctuaciones de presión extrema en un salto hidráulico de amortiguación como una función del número de Froude. Seoane *et al.* (2010), concluyen que la detección de la presencia de tendencia en las series hidrológicas (caudales anuales máximos) y la

evaluación del cambio en las propiedades estadísticas de los eventos de crecidas, influye en distintos parámetros de la presa, mostrándose resultados obtenidos a través de la combinación de los análisis hidrológicos e hidráulicos.

II.6.3 Infraestructura de obras viales

Distintos estudios identificaron que un conjunto de obras viales importantes para las comunidades tendrían un impacto social negativo si fueran afectadas por eventos hidrológicos extremos diferentes a los utilizados para definir los parámetros de diseño en su construcción.

Dentro de estas obras de cuya seguridad dependen las comunicaciones entre provincias se pueden citar:

Puente Rosario-Victoria

Este puente forma parte de la conexión vial de la Ruta Nacional 174, de 60 km. de largo que comunica las ciudades de Rosario, en la provincia de Santa Fe, y Victoria, en la provincia de Entre Ríos. El caudal máximo utilizado en el diseño fue de aproximadamente 82000 m³/s. Siendo inaugurado en mayo de 2003.

La influencia de los nuevos datos generados (Proyecto CLARIS-LPB) permitirá estudiar la importancia de la variación futura de los caudales máximos. Además, permitirá analizar los niveles aguas arriba del puente mediante el cálculo de curva de remanso, la afectación de los pilares y estribos laterales, y los efectos sobre las protecciones vegetales de los accesos. El estudio de los futuros niveles hidrométricos establecerá posibles zonas de inundación que afectarán a las ciudades y poblaciones ribereñas.

Túnel subfluvial (Uranga-Sylvestre Begnis)

Este túnel vincula la ciudad de Santa Fe (Provincia de Santa Fe) con la ciudad de Paraná (Provincia de Entre Ríos). Se inauguró en diciembre de 1969 y la información hidrológica utilizada se ve afectada por las mismas condiciones anteriormente descritas.

El túnel ya fue sometido a una exigencia hidráulica importante durante la crecida observada en los años 1982-83, siendo en este tipo de obra, más importante la duración de la crecida que su magnitud, debido al movimiento del material de fondo.

Por lo tanto, es importante conocer con antelación la crecida del río Paraná con el objeto de determinar dicho movimiento, cuyo peso le da estabilidad a la estructura del túnel. La crecida que realmente interesa es la observada en el tramo superior de dicho río,

cuyo aporte sólido es muy bajo por la retención que se produce en las presas brasileñas, particularmente Itaipú, (que no tiene descargador de fondo) y Yacyretá en territorio de Argentina.

Las crecidas derivadas del sistema de los ríos Paraguay, Bermejo, Pescado e Iruya, en cambio, son las que aportan material sólido. Una situación como ésta se produjo en los primeros años de la década del 80, que obligó a reforzar el peso del túnel con bolsas de arena colocadas en forma transitoria en su interior. A partir de esta crecida se realizó un estudio para definir la factibilidad de una nueva obra que permita mejorar la estabilidad del túnel ante una nueva crecida.

En resumen, este túnel, superó exitosamente la crecida del Paraná de los años 1982-1983, sin embargo, parece una obra interesante para analizar su comportamiento futuro, aplicando los modelos hidrológicos que incorporan el cambio climático global.

Puente Zarate-Brazo Largo

El Complejo Ferroviario Zárate - Brazo Largo es la principal vía de comunicación entre el sur de la provincia de Entre Ríos y el norte de la Provincia de Buenos Aires. Presenta dos puentes atirantados que se encuentran a unos 30 km de distancia entre sí, y que cruzan los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú. Fue habilitado en diciembre de 1977.

La crecida del año 1983 afectó la ruta de acceso al puente, mientras que el mismo no presentó problemas estructurales, aunque la información utilizada para su diseño, fue de un periodo anterior (hasta 1970) a los cambios observados en las series de caudales máximos en el río Paraná y que serán analizados aplicando distintas pruebas de detección de tendencias y media (Capítulo III).

II.6.4 Puertos en la ruta de navegación del río Paraná

Los numerosos puertos ubicados en el río Paraná, que permiten las exportaciones de Argentina (alrededor del 52%) dependen de las alturas y caudales mínimos, como así también de la conformación del fondo. Así, la vulnerabilidad y el desarrollo de medidas de adaptación dependerán de la ocurrencia de caudales mínimos más extremos.

Dicha ocurrencia se ha visto afectada por la operación de los embalses ubicados aguas arriba de la ciudad de Rosario. Sin embargo, el análisis de los mínimos estimados para un futuro cercano contribuirá a lograr una mayor confiabilidad en el acceso a los puertos.

II.6.5 Protecciones laterales en ciudades

Distintas ciudades ubicadas sobre la ribera del río Paraná y con afectación directa de la variación de los niveles del mismo, presentan defensas para el control de inundaciones, por ejemplo la ciudad de Resistencia (provincia del Chaco). Por lo tanto, el conocimiento de los valores de caudales simulados con los nuevos modelos, permitirá estudiar los efectos sobre los niveles, la ocurrencia de nuevas secuencias de máximos, y el tiempo de permanencia sobre las estructuras de las defensas, que pueden producir su falla estructural.

Tabla N° II.4. Obras de infraestructura y características de los estudios de Ingeniería.

Obra de infraestructura	Caudales extremos máximos y mínimos	Definición de la Ingeniería.	Características de la posible afectación.
Puente Rosario-Victoria	Importancia asociada con la información básica	Nuevos niveles aguas de inundación. Análisis de las pilas y estribos.	Inundaciones y sobrepaso de obras de protección. Mayores superficies inundables. Rotura del puente.
Túnel subfluvial Uranga-Sylvestre Begnis	Máximos	Variación de las formas del fondo del río.	Pérdida de estabilidad.
Puente Zarate-Brazo Largo	Máximos	Nuevos niveles del aguas de inundación. Análisis de las pilas y estribos de las obras.	Inundaciones y sobrepaso de obras de protección. Mayores superficies inundables. Rotura del puente.
Puertos en la ruta de navegación del río Paraná	Mínimos y máximos	Estudios hidrodinámicos.	Dificultades de accesos a los puertos y sedimentación de canales.
Protecciones laterales en ciudades	Máximos y mínimos	Nuevas niveles aguas de inundación.	Rotura por sobrepaso y descalce de las estructuras de protección.

En la siguiente Tabla N° II.5 se presentan las características de diseño para los puentes, puertos y obras de defensa costera en ciudades: Los estudios sobre la presencia de comportamientos no estacionarios en los caudales constituyen un importante tema de análisis debido a los efectos sociales derivados de la interrupción de su uso o destrucción parcial o total, como así también las consecuencias por las inundaciones.

Tabla N° II.5. Obras de infraestructura y riesgo con un modelo probabilístico.

Tipo de obra de obra	Periodo de retorno	Componente	Variable de diseño	Escenario probables de análisis	Obras
Obra para control de crecida	> 100 años	Nivel de coronamiento de la defensa	Nivel máximo del río	Incremento de las precipitaciones	Sistema de defensas para ciudades
Presa	> 500 años	Vertedero	Caudal máximo	Incremento de las precipitaciones	Crecida obra de desvío del río
Puente	> 100 años	Pilas y estribos	Caudal máximo	Incremento de las precipitaciones	Puente provincial

***Definición:** período de retorno, es el tiempo esperado o medio entre dos sucesos de baja probabilidad. En Hidrología es el tiempo medio entre dos crecidas con caudales iguales o superiores a uno determinado.*

Las obras seleccionadas muestran la importancia de utilizar series generadas con nuevos modelos para estudiar el grado de vulnerabilidad a los caudales extremos.

Por lo tanto, se pueden definir dos temas:

- a) Identificación de obras de infraestructura vulnerables a la ocurrencia de nuevos valores extremos. Un relevamiento preliminar se presenta en la Figura N° II. 8.
- b) Análisis comparativo de la vulnerabilidad de las obras existentes ante cambios en las condiciones hidrológicas e hidráulicas utilizadas en el proyecto original.

Figura N° II. 8. Infraestructura general en la cuenca del río Paraná.

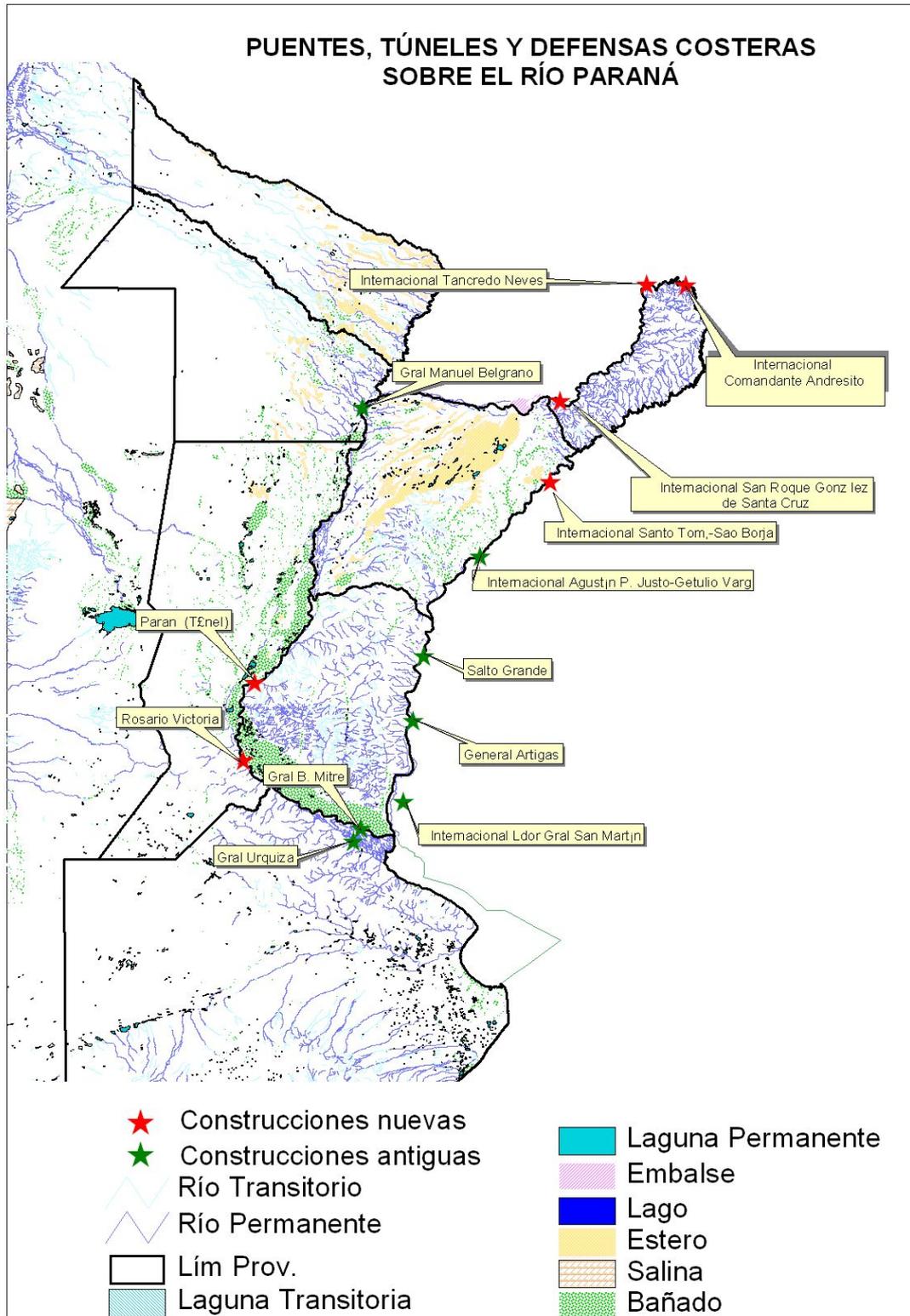


Tabla N° II.6. Obras de infraestructura vial en la cuenca del río Paraná.

Puente	Ubicación	Final de la obra
San Roque González de Santa Cruz	Posadas- Encarnación	1983-1990
Tancredo Neves	Puerto Iguazú y Foz do Iguazú	1983-1985
General Urquiza	Zárate-Brazo Largo	1972-1977
General B. Mitre	Zárate-Brazo Largo	1972-1977
Paraná (Túnel)	Paraná	1961-1969
Rosario Victoria	Rosario-Victoria	1997-2003
General Manuel Belgrano	Barranqueras- Corrientes	1967-1973

Conclusiones

En las últimas décadas la ocurrencia de nuevos eventos hidrológicos extremos ocurridos en distintos lugares del mundo ha definido la necesidad del desarrollo de indicadores y criterios para su evaluación y clasificación.

El cálculo de estos indicadores conduce a la necesidad de contar con información hidrológica precisa y de una metodología para el análisis de los eventos ocurridos en cuencas de gran extensión.

Las metodologías de cálculo de obras hidráulicas clásicas generalmente no consideraban la vulnerabilidad frente a los efectos de la variabilidad climática. Es cierto, que una inadecuada estimación de los parámetros de diseño no implica necesariamente el colapso de las obras, pero éstas pueden quedar fuera de servicio y no cumplir correctamente su función por importantes periodos de tiempo afectando el funcionamiento de la sociedad.

Esta razón definió el interés de realizar un primer análisis descriptivo de casos reales para mostrar la influencia de la variabilidad climática sobre obras diseñadas con otros métodos de cálculo e información de principios del siglo XX.

Para las cuencas de los ríos Neuquén y Paraná se han descripto la ocurrencia de eventos hidrológicos extremos recientemente observados que muestran la necesidad de

contar con métodos para estudiar la influencia de la variabilidad climática natural sobre la vulnerabilidad de obras de infraestructura hidráulica en cuencas de gran extensión.

En este tipo de cuencas existen desde un puente en una ruta nacional, cuyos parámetros de diseño fueron calculados para un periodo de retorno de cincuenta años a una crecida de desvío de una obra con un periodo de retorno de doscientos años a un vertedero con una crecida de periodo de retorno aún mayor.

El estudio de estos casos muestra una evidencia empírica de la ocurrencia de eventos hidrológicos más severos observados durante los últimos treinta años en Argentina y sus efectos sobre la infraestructura general de dos cuencas. La primera internacional y la segunda nacional.

Las grandes obras hidráulicas (embalses) y de infraestructura civil (puentes y defensas de ciudades) se calculan con diferentes métodos de estimación de caudales extremos aplicados, para definir los parámetros de diseño de sus componentes hidráulicas.

Las distintas metodologías que se aplican son claramente dependientes de la información hidrológica, del periodo de sus observaciones y del estado del conocimiento en que se desarrolló el estudio.

La importancia de la variabilidad climática natural sobre respuesta de los sistemas hidrológicos es un tema que muy recientemente fue incorporado a la práctica del diseño hidrológico así como los estudios de la vulnerabilidad ante nuevos escenarios de cambio climático global. En la bibliografía internacional se observa que éste es un tema abierto en cuanto a los métodos más adecuados y las implicancias económicas de las tareas de reevaluación de las obras, que como los grandes embalses implicarían inversiones muy significativas para las sociedades.

En el río Neuquén se describió un ejemplo del impacto de la ocurrencia de una crecida extrema, mostrando como la respuesta técnica fue la estimación de una nueva Crecida Máxima Probable que incorporó nueva información hidrometeorológica y mostró la necesidad de realizar nuevas obras para el sistema de control de crecidas.

Este importante ejemplo demuestra la necesidad de incorporar los nuevos eventos meteorológicos para incrementar la seguridad de sistemas constituidos con grandes embalses y que fueron estimados con datos de principios del siglo pasado.

En este caso, río Neuquén, es diferente a lo ocurrido en el río Limay, donde la incorporación de nueva información hidrometeorológica utilizada para la estimación de la Crecida Máxima Probable no influyó significativamente y definió una crecida semejante a la calculada y utilizada en la construcción de la obra.

Estos dos casos observados en cuencas vecinas han mostrado un comportamiento hidrológico diferente y por lo tanto la importancia de la aplicación de criterios de verificación internacionales sobre seguridad de presas como una forma de prevención ante la ocurrencia de nuevos eventos más extremos.

En la cuenca del río Paraná se ha presentado evidencia empírica de la ocurrencia de una mayor cantidad de eventos de inundación en áreas rurales y urbanas. En obras hidráulicas de mayor importancia, presa de Corpus, se observó una variación significativa en los caudales máximos anuales estimados, según el periodo de las observaciones, y posiblemente asociada con la variabilidad climática natural.

En esta misma cuenca, la presencia de tendencias, posiblemente asociadas al cambio climático global, la variabilidad climática natural y los posibles efectos de las normas de operación de los embalses construidas aguas arriba incorporan más incertidumbre sobre el origen de las variaciones en el régimen del caudal.

Para ambas cuencas los resultados de los modelos de Circulación General de la Atmósfera, y de transformación precipitación-caudal han generado nuevas series temporales de precipitaciones y caudales que podrían ser utilizadas para evaluar la vulnerabilidad de las obras de infraestructura y estudiar su comportamiento ante solicitaciones extremas que podrían ocurrir en el futuro.

La detección de cambios en las propiedades estadísticas de las series hidrológicas resulta un tema importante de estudio que se desarrollará en el siguiente capítulo dado que las características de las inundaciones es un tema complejo por la propia variabilidad natural de los sistemas hidrológicos. Las nuevas estimaciones de los efectos del cambio climático global sobre las componentes del ciclo hidrológico podrían ser muy útiles en Ingeniería para definir medidas de mitigación y atenuación de los efectos en grandes cuencas.

En Ingeniería las obras más importantes han sido históricamente diseñadas considerando que la información hidrometeorológica verifica las hipótesis estadísticas de estacionariedad e independencia. Las últimas investigaciones desarrolladas en el marco del análisis de valores extremos han demostrado la importancia de incorporar la variación con el tiempo en los parámetros de las funciones de densidad de probabilidades que se aplican para diseñar y verificar estas obras.

En resumen, los ejemplos presentados muestran la importancia de estudiar el campo de aplicación de los métodos estadísticos, para detectar la presencia de cambios

múltiples en series temporales de caudales extremos y su relación con la variabilidad climática natural.

CAPÍTULO III

DETECCION DE TENDENCIAS Y PUNTOS DE CAMBIOS MULTIPLES EN SERIES HIDROLOGICAS

III.1 Introducción y objetivos

En este capítulo se presentan los resultados de aplicar distintas pruebas estadísticas para detectar la presencia de tendencias y cambios en series de caudales máximos anuales observadas en cuencas de gran extensión de Argentina.

En series temporales hidrológicas la detección de comportamientos no estacionarios implica la selección de variables críticas para la verificación de los parámetros de diseño de grandes obras hidráulicas. Un objeto de estudio de utilidad práctica son las series de caudales máximos medios diarios y con registros extensos de observaciones

Para dos cuencas de gran extensión de Argentina se han seleccionado series de caudales máximos medios diarios para la detección de cambios en la media. La estimación de nuevas relaciones caudal máximo-periodo de retorno estimaciones afectarían directamente la evaluación del riesgo de obras de infraestructura hidráulica.

Este análisis considera que la verificación de la hipótesis de estacionariedad se relaciona con la variabilidad climática natural. Esta influye en la presencia de cambios en las series hidrológicas que describen la respuesta hidrológica de una cuenca.

Se propone un esquema de aplicación de pruebas estadísticas, se estudia la detección de puntos de cambio múltiples y sus efectos sobre los resultados de pruebas clásicas. Se aplica un método robusto para evaluar la presencia de tendencia y se estima los parámetros de un modelo de regresión.

Se aplican pruebas no paramétricas, Mann-Kendall para identificar la presencia de tendencias y Pettitt para detectar cambios en la media en series de valores máximos. Con un enfoque paramétrico se aplicó la prueba de la razón de verosimilitud, con un modelo Gamma, para verificar la presencia de los puntos que fueron identificados a partir de indicadores de la variabilidad climática natural.

Se propone la utilización de un método de detección de puntos de cambio múltiples para resolver la restricción de prueba estadísticas diseñadas para identificar un punto de cambio único. Este tema es importante dado que las series de indicadores de variabilidad

climática presentan más de un punto de cambio y esta condición se podrían reflejar en las series hidrológicas bajo estudio.

En los ríos Neuquén y Paraná, los resultados del análisis de la serie de caudales máximos anuales históricos, muestran la importancia práctica de la identificación de observaciones provenientes de distintos periodos para evaluar la vulnerabilidad de las obras hidráulicas construidas en la cuenca.

Este capítulo está organizado para permitir la comparación de resultados de pruebas paramétricas y no paramétricas de detección. La idea subyacente consiste en estudiar la asociación entre la variabilidad climática natural y la ocurrencia de cambios en las series de caudales máximos diarios anuales en las cuencas de los ríos Neuquén y Paraná.

III.2 Revisión bibliográfica

La teoría de valores extremos se convirtió, a partir de la década de los años 60 del siglo XX, en una importante disciplina. Esta teoría permite vincular la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia utilizando una función de densidad de probabilidades.

Una formulación rigurosa fue propuesta por Emil Gumbel (1958) quién desarrolló una expresión para estimar la relación entre valores máximos y sus probabilidades de ocurrencia. Esta fórmula, que aun se aplica en el diseño obras hidráulicas, asume que los datos son independientes, idénticamente distribuidos y provienen de única función de densidad de probabilidades.

Por lo tanto, incluye dos hipótesis importantes para los estudios hidrológicos actuales: independencia y estacionariedad entre las observaciones de series de las variables hidrológicas.

Emil Gumbel (1941) ya había señalado que al aplicar la teoría se supone que los datos son homogéneos, por ejemplo que no existe un cambio sistemático en el clima, en la cuenca no ha ocurrido cambios importantes en el periodo de observación y no ocurrirán cambios en el periodo de extrapolación.

Por lo tanto, la hipótesis de estacionariedad ha estado subyacente en el diseño y construcción de las obras hidráulicas desde los primeros trabajos relevados en la historia. En forma simple, significa que el futuro será igual o semejante al pasado y la estimación de los parámetros de diseño de obras de Ingeniería Hidráulica desde las primeras obras construidas depende de su verificación.

El programa desarrollado por la Universidad de Harvard durante los años 60 para la optimización y la planificación de sistemas hidráulicos de alta complejidad dado que utilizaba la hipótesis mencionada para los procesos hidrológicos.

Coles (2001) amplía la visión de la teoría de valores extremos al incorporar la variabilidad climática en la modelación de relaciones entre variables hidrológicas y el periodo de retorno. Los parámetros de los modelos de valores extremos pasan a relacionarse directamente con la variabilidad del clima.

En su libro se presenta un ejemplo que consiste en modelar los niveles máximos del mar con un modelo Generalizado de Valores Extremos que considera la variación de los parámetros con un indicador del fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

Villarini *et al.* (2009) presenta una interesante interpretación del origen de los cambios en series de caudales máximos en Estados Unidos. Estos autores evaluaron los efectos de la construcción de embalses y la relación de las componentes del ciclo hidrológico alterados por el cambio climático global. El trabajo demuestra que resulta muy compleja la identificación de casos de no estacionariedad mediante el análisis estadístico de los datos de crecidas históricas.

Este análisis utilizó cincuenta series de caudales con al menos cien años de observaciones y ciento noventa y seis con al menos setenta y cinco años de registros de caudales máximos anuales.

La estacionariedad de cada serie se evaluó con el análisis de cambio en la media, prueba de Pettitt y la presencia de tendencias lineales mediante Mann-Kendall. Algunos resultados son: se ha observado que la mayoría de los casos del rechazo de la hipótesis de estacionariedad están asociados con la construcción de presas y cambios en las prácticas agrícolas.

Otras conclusiones son: el análisis de los registros de crecidas históricas no muestran variaciones, asociadas al cambio climático antropogénico, de la función de densidad de probabilidades de los caudales máximos y la importancia, en un medio urbano, de la modelación de la componente no estacionaria de los máximos.

También, han observado que los ciclones tropicales originan inundaciones extremas en gran parte del Este de los Estados Unidos. Los análisis de la frecuencia de las tormentas tropicales en un clima más cálido no sugieren un aumento significativo de las cantidades de las tormentas en la cuenca del Atlántico Norte durante el siglo XXI.

La continuación de estos trabajos mostró un significativo cambio en el enfoque clásico de la teoría de valores extremos que consideraba que los parámetros son constantes en

el tiempo y por lo tanto no pueden representar variaciones asociadas con el clima; por ejemplo: fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur y variabilidades interdecadales.

En este sentido se conectan con la propuesta de Coles (2001) que analiza la importancia del estudio del origen climático de los cambios en series observadas de Geofísica. Labat *et al.* (2005) estudiaron la aplicación de Wavelett a cuatro caudales mensuales de grandes ríos con descargas en el Océano Atlántico (Amazonas, Paraná, Orinoco y Congo) y luego aplican dos índices climatológicas a largo plazo: la Oscilación del Sur y la Oscilación del Atlántico Norte. Este enfoque se basa en la idea de sugerir explicaciones físicas para las relaciones que son dependientes de la escala del tiempo.

En la cuenca del río Neuquén, Seoane *et al.* (2003), aplicaron pruebas no paramétricas MK para detectar la presencia de tendencias en series de caudales medios y máximos. Estos estudios se relacionan con la idea de la existencia de una relación causal entre la variabilidad climática y los cambios en las series de caudales.

Villarini *et al.* (2009, 2010) aplicaron nuevos métodos para incorporar la condición de la no estacionariedad en la estimación de los parámetros de funciones de densidad para caudales máximos. Estos autores analizaron la utilización de la covarianza para describir la relación entre la variabilidad estacional e interanual de forzantes climáticos utilizando índices de teleconexiones (por ejemplo la Oscilación Multidecadal del Atlántico Norte) y los caudales máximos.

Estos autores demostraron que las precipitaciones y las temperaturas estacionales observadas en Roma (Italia) están asociadas con un indicador de la Oscilación del Atlántico Norte. Este enfoque definió formas alternativas, que ya no están basadas en la estacionariedad de las series de las observaciones.

El problema también presenta otra visión que estaría más asociada con la detección de tendencias y la presencia de cambios en la media de series hidrológicas y que se relaciona con la aplicación directa de pruebas estadísticas.

Kundzewicz y Robson (2004) señalan que el tema de la detección de cambios es un problema complejo en las series de caudales de una cuenca. Dado que los caudales integran distintos factores, como son las precipitaciones, el almacenamiento de la cuenca las pérdidas por evaporación y por lo tanto la modificación en la señal debe ser superior a la variabilidad climática de base.

Fealy y Sweeney (2005) aplicaron el gráfico Cumulative Sum y la prueba no paramétrica de Pettitt para identificar la presencia de puntos de cambio en los glaciares en Europa. Este trabajo examina los efectos de un cambio de gran escala de la

circulación atmosférica sobre el Atlántico Norte que fue identificado a finales de los años 80 y es muy importante porque relaciona la búsqueda con orígenes en la variabilidad atmosférica.

Rybsky y Neuman (2011) estudiaron los problemas de la prueba de Pettitt fue analizada para su aplicación en la detección de puntos de cambio y la influencia de la persistencia de largo plazo en los resultados del tests, para veinte y tres series (23) de caudales mensuales de Alemania.

Esta investigación se relaciona con el estudio de Cohn y Lins (2005) que demuestra los efectos de la presencia de autocorrelaciones de largo plazo sobre la capacidad de detección de tendencias en variables geofísicas.

Killick y Eckley (2014) han desarrollado un software (change point bajo R) para estimar la presencia de puntos múltiples de cambio y detectar las modificaciones en la media y la varianza. Las pruebas estadísticas pueden ser aplicadas a series temporales que presenten cierto tipo de dependencia serial.

James y Matteson (2014) han desarrollado un software (ecp R) para la detección de múltiples puntos de cambio con pruebas no paramétricas en series de datos multivariados. El método propuesto permite detectar cualquier tipo de cambio en la distribución en una serie temporal e identifica la cantidad y la ubicación de los puntos de cambio. Las hipótesis son: la distribución tiene α momentos con algún $\alpha \in (0,2)$ y las observaciones son independientes en el tiempo.

Los métodos implementados son jerárquicos para encontrar múltiples puntos de cambio mediante el uso de estadísticos-U. Estos métodos presentan la característica de no hacer ninguna hipótesis sobre la distribución que no sean la existencia de momentos absolutos.

Este tipo de detección de un cambio se realiza en forma retrospectiva y entonces la decisión de si ha ocurrido un cambio, en un punto particular, de la secuencia se realizar utilizando toda la información disponible. El análisis es adecuado para la situación que se observa cuando existe un pequeño número de puntos de cambio.

Un primer esquema de aplicación de las pruebas es: Pettitt y verificación de la presencia de tendencia con Mann Kendall sobre las dos nuevas sub-series. Esta secuencia de pruebas no considera el efecto de la presencia de una tendencia lineal sobre la potencia de la prueba de Pettitt.

Los conceptos anteriores justifican la aplicación de las pruebas asociado con la siguiente idea. El caudal en distintas escalas temporales es una variable que integra

diferentes procesos hidrológicos y podría resultar difícil definir un esquema de tratamiento único adecuado a la posible presencia de puntos de cambio múltiples.

Las series hidrológicas presentan características particulares según la escala temporal de los procesos. Por ejemplo, en el caso de caudales extremos es muy diferente el análisis de máximos (crecidas) que de mínimos. En la bibliografía se acepta que en el primer caso, la hipótesis es la independencia y en el segundo las series presentan autocorrelaciones distintas de cero.

El enfoque aplicado es diferente al tradicionalmente utilizado que se centra en calcular los porcentajes de casos de cada variables observada con tendencias crecientes o decrecientes para una prueba estadística determinada y sin explicitar con precisión la hipótesis nula y la alternativa.

El motivo de esta decisión se justifica en que, para las series hidrológicas, las fuentes de no estacionariedad, son difíciles de precisar amplias y están asociadas con diferentes causas. Entre las principales se pueden citar: variabilidad climática natural, cambio climático global, cambios en el uso del suelo y en las condiciones del almacenamiento superficial por la construcción de obras de infraestructura en la cuenca.

Cada una de estas alteraciones define un cambio con ciertas características estadísticas particulares para la serie temporal bajo análisis. Por lo tanto, la aplicación de las pruebas debería considerar estas alternativas y en particular en cuencas hidrológicas de gran extensión que podrían presentarse efectos combinados.

En resumen, los temas analizados son: detección de cambios múltiples en la media, con pruebas paramétricas y no paramétricas y la presencia de tendencias lineales series de caudales máximos diarios medios anuales en las cuencas del ríos Neuquén y Paraná.

III.3 Metodología

Se aplican pruebas estadísticas no paramétricas: Mann-Kendall para la detección de tendencias y Pettitt para la identificación de cambios en la media de las series de caudales máximos medios diarios anuales.

En una segunda etapa se utiliza la prueba paramétrica de razón de verosimilitudes para estudiar la significación estadística de un cambio hidrológico observado en la década de los años setenta y que podría estar asociado con la variabilidad climática natural interdecadal.

En este caso se utiliza un conocimiento "a priori" de la ubicación de los posibles puntos de cambio en la serie de caudales máximos medios diarios y por lo tanto de los posibles cambios en la media ocurridos durante el siglo pasado.

Para la detección de puntos de cambio múltiples en series temporales se aplica un nuevo método diseñado para evaluar la ocurrencia de varios puntos y se relaciona los resultados con las modificaciones en dos indicadores de variabilidad climática natural.

En el caso del río Neuquén cuando se detecta la presencia de una tendencia se aplica un modelo lineal Gamma generalizado para la estimación de los parámetros de la función de densidad de probabilidades y que incluye la pendiente de la recta de regresión con el tiempo.

En secciones de la cuenca del río Paraná se aplican las pruebas mencionadas a series de caudales máximos medios anuales observadas.

III.3.1 Prueba no paramétrica de Mann-Kendall

La prueba no paramétrica de Mann-Kendall (MK) es utilizada para identificar la presencia de tendencia lineal en series temporales. Esta prueba estadística tiene como propósito detectar la existencia de tendencia monótona o cambio, gradual o súbito, durante un intervalo de tiempo, sin determinar el momento de ocurrencia del mismo.

Descripción de la prueba

H_0 : (x_1, \dots, x_N) son N variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas.

H_1 : las variables (x_1, \dots, x_N) presentan una tendencia creciente o decreciente.

El estadístico S de la prueba MK está definido como:

$$S = \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{j=k+1}^N \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{III. 1}$$

donde:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \text{si } \theta < 0 \end{cases} \quad \text{III. 2}$$

La distribución de S , bajo la H_0 , es asintóticamente normal y los valores teóricos de la media y la varianza son:

$$E(S) = 0 \quad \text{III. 3}$$

$$\sigma_S^2 = \frac{N(N-1)(2N+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18} \quad \text{III. 4}$$

donde: t representa la longitud de valores repetidos de la variable en la serie y \sum_t la suma sobre el número de valores iguales (repeticiones).

Se puede asociar el valor del estadístico S con una variable Z , con distribución normal estandarizada, según:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad \text{III. 5}$$

El nivel de significación de una prueba es la probabilidad de cometer el error de rechazar H_0 cuando esta hipótesis es cierta. El valor p de una prueba es la probabilidad que el estadístico tome el valor calculado en la muestra o un valor aún más extremo, si es cierta H_0 .

Para la prueba de MK, el valor p es la probabilidad de que una variable aleatoria normal estándar tome valores en módulo mayores que el valor calculado de $|Z|$. O sea es el área bajo la curva normal de las dos semirrectas $(-\infty, |Z|)$ y $(|Z|, +\infty)$.

Para que el nivel de significación de la prueba sea un valor dado α , la hipótesis nula H_0 se rechaza si $|Z| > z_{\alpha/2}$ o, lo que es equivalente, si $p < \alpha$.

El signo del estadístico S indica la dirección de la tendencia, si el estadístico es positivo la tendencia es creciente y si el estadístico es negativo, decreciente.

Al aplicar la prueba de MK u otras pruebas para la detección de tendencias en variables hidrometeorológicas, puede ocurrir que no se verifique la hipótesis de independencia por la presencia de autocorrelaciones significativas en la serie temporal.

Si existiera una autocorrelación positiva en los datos aumentaría la probabilidad de detectar tendencias cuando realmente no existen. Así, la probabilidad de cometer el error de rechazar H_0 cuando esta hipótesis es cierta sería mayor que el nivel α .

Hamed y Rao (1998) resolvieron este problema con una modificación de la prueba de MK, que utiliza la corrección de la varianza del estadístico S:

$$V^*(S) = \sigma_s^2 \frac{n}{n_s^*} \quad \text{III. 6}$$

$$\frac{n}{n_s^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2) \rho_s(i)$$

Donde: $\rho_s(i)$ es la función de autocorrelación del ranking de las observaciones.

En las series que presentan tendencia es importante estimar la magnitud de la misma y una forma de expresarla es mediante la pendiente, es decir, cambio por unidad de tiempo, lo que no implica suponer que la tendencia es lineal en la media del proceso.

Hirsch *et al.* (1982) propuso un estimador no-paramétrico de la pendiente, que es robusto y se define como:

$$B = \text{Mediana} \left\{ \frac{x_j - x_k}{j - k} \right\} \forall k < j \quad \text{III. 7}$$

y está relacionado, por su signo, con el estadístico de la prueba MK.

III.3.2 Prueba no paramétrica de Pettitt

La prueba no paramétrica de Pettitt (1979) fue desarrollada para detectar la presencia de un punto de cambio en la media de una serie temporal.

Esta prueba no requiere la verificación de ninguna hipótesis sobre la forma de la función de densidad de probabilidades de las observaciones y es una adaptación de del test de Mann-Whitney que permite identificar el momento en que se produce el cambio.

Pettitt propone como hipótesis nula que las variables aleatorias presentan la misma distribución. La hipótesis alternativa es: hay un cambio en la media en un tiempo t .

Descripción de la prueba

H₀: serie temporal de cantidad N de observaciones está compuesta por variables homogéneas con la misma media.

H₁: media de la sub-serie temporal antes del tiempo (t) es diferente a la media de la sub-serie después del tiempo.

Para cada tiempo t (t=1, ...,N-1) se consideran las muestras (x₁,...,x_t)y (x_{t+1},... x_N) y se calcula el estadístico U_{t,N}.

La expresión del estadístico es:

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N \text{sgn}(x_i - x_j) \tag{III. 8}$$

El punto de cambio más importante se encuentra donde:

$$K_T = \max_t |U_{t,N}| \tag{III. 9}$$

se calculan:

$$p(t) = \exp \left(\frac{-6U_{T,t}^2}{T^3 + T^2} \right) \tag{III. 10}$$

La probabilidad aproximada, para un punto de cambio t, se define como P(t) = 1-p(t). Esta última es la probabilidad que se grafica y es generalmente una expresión aproximada.

$$P(t) = 1 - \exp \left(\frac{-6U_{T,t}^2}{T^3 + T^2} \right) \tag{III. 11}$$

Pettitt (1979), propone la siguiente expresión:

$$p_{0A} \cong 2 * \left\{ \exp \left[\frac{-6 * k^2}{(T^3 + T^2)} \right] - \exp \left[\frac{-24 * k^2}{(T^3 + T^2)} \right] + \exp \left[\frac{-54 * k^2}{(T^3 + T^2)} \right] \right\} \tag{III. 12}$$

Estas ecuaciones son útiles para evaluar los siguientes dos casos: 1) existe información que permite suponer la existencia de un cambio en una dirección por causas externas bien definidas, 2) no existe la información suficiente y se debe analizar las dos posibilidades (cambios en la media que sean crecientes o decrecientes).

La aplicación de técnicas como Mann -Kendall están diseñadas para la detección de la presencia de tendencias lineales. Sin embargo, cuando se estudian variables, como las Geofísicas, existen otras tendencias, que son no lineales, y puede existir persistencia de largo plazo.

Este es un tema que vincula con la estimación de caudales medios anuales, que se analizan en el Capítulo IV, y la importancia del parámetro de Hurst en datos de caudales diarios que se discutirá en el Capítulo V. Este es un importante indicador de otro tipo de dependencia, la de largo plazo.

III.3.3 Razón de verosimilitud y puntos de cambio

Distintos métodos estadísticos se utilizan para la comparación entre modelos y su elección depende de si el problema se debe estudiar como modelos que se anidan.

En caso de dos modelos que son anidados, el modelo más simple (o con menos parámetros) es un caso especial del modelo más complicado (o con más parámetros). Si se puede convertir el modelo más complejo en uno más simple mediante la definición de uno o más parámetros iguales a una constante fija (normalmente cero), entonces se considera que se anidan los modelos.

Las etapas son:

- a) proponer un modelo paramétrico M con k parámetros.
- b) definir la hipótesis nula (H_0) que fija los valores de $k_1 > 0$ de los parámetros de modo que el modelo H_0 tiene $k_0 = k - k_1$ parámetros libres.

La prueba estadística de razón de verosimilitud se basa en la siguiente relación:

$$\Lambda = 2 \ln \left[\frac{H_A}{H_0} \right] = 2 \left[\ln(H_A) - \ln(H_0) \right] \quad \text{III. 13}$$

donde H_0 y H_A son las funciones de verosimilitudes asociadas con la hipótesis nula y la alternativa. Para el caso de los modelos anidados esta relación coincide con:

$$\Lambda = 2 \ln \left[\frac{M}{H_0} \right] = 2 \left[\ln(M) - \ln(H_0) \right] \quad \text{III. 14}$$

donde: se denota con M a la función de verosimilitud bajo el modelo M , es H_0 la verosimilitud bajo la hipótesis nula.

La distribución asintótica del estadístico, si H_0 es cierta, es una función Chi-Cuadrado con $k-k_0$ grados de libertad.

La prueba de la razón de verosimilitud puede ser utilizada para detectar la presencia de distintos modelos asociados a los diferentes periodos de tiempo de la serie definida por los puntos de corte.

La prueba tiene como objetivo estudiar las siguientes hipótesis:

M : los datos siguen una función de densidad de probabilidades Gamma en cada uno de los periodos

H_0 : los datos siguen una función de densidad de probabilidades Gamma con los mismos parámetros en todo el periodo.

En consecuencia, la hipótesis alternativa H_1 es:

H_1 : los datos siguen una función de densidad de probabilidades Gamma con distintos parámetros en los diferentes periodos.

La función de densidad de probabilidades Gamma utilizada tiene la siguiente expresión:

$$f_X(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad \text{si } x \geq 0$$
III. 15

donde los parámetros α y β son positivos.

La log-verosimilitud de una función de densidad de probabilidades Gamma de dos parámetros es:

$$l_G(\alpha, \beta, x) = (\alpha - 1) \sum_{i=1}^N \ln x_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{\beta} - N\alpha\beta - N \ln \Gamma(\alpha)$$
III. 16

En este caso, la prueba implica las siguientes hipótesis:

H_0 : los datos siguen una distribución Gamma con los mismos parámetros en todo el período estudiado.

H_1 : los datos siguen una distribución Gamma, pero los parámetros no son iguales en los distintos períodos considerados.

Por lo tanto, se supone que la forma de la función de densidad de probabilidades es la misma y los parámetros de la función varían con el tiempo.

Modelo de regresión lineal

El modelo de regresión lineal considera como hipótesis que la media de las observaciones es función lineal de las variables explicativas; que la varianza de los residuos es constante, que los residuos son independientes y presentan una distribución Normal.

Sea:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + \dots + \beta_p X_{pt} + \varepsilon_t \quad t = 1, \dots, T \tag{III. 17}$$

donde: Y_t es la observación en el tiempo t , $X_t=(X_{1t}, \dots, X_{pt})$ el vector de las variables explicativas en el tiempo t y ε_t el residuo, independiente de los X_t y que cumplen las siguientes hipótesis:

$E(\varepsilon_t)=0$

$Var(\varepsilon_t) = \sigma_\varepsilon^2$

$\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_T$ independientes

$\varepsilon_t \sim \text{Normal}$.

Una forma equivalente de escribir este modelo es suponer que, condicionalmente a los valores de las variables explicativas $X_t=(X_{1t}, \dots, X_{pt})$, los Y_t son independientes y con distribución normal con varianza constante:

$$Y_t \sim N(\mu_t; \sigma_\varepsilon^2) \tag{III. 18}$$

y con media:

$$\mu_t = \beta_0 + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + \dots + \beta_p X_{pt} \tag{III. 19}$$

La normalidad y la homogeneidad de varianza de los errores son dos hipótesis muy restrictivas en la modelación de variables en Hidrología. Por lo tanto se necesita definir modelos más generales que consideren estos dos aspectos.

III.3.4 Modelo de regresión lineal Gamma generalizado

Se aplica un modelo lineal generalizado Gamma (MLGG) con función de ligadura logarítmica y con un método de estimación robusta para estimar la pendiente de la recta de regresión en series hidrológicas.

La aplicación del modelo lineal generalizado Gamma (MLGG) para estimar la pendiente implica estudiar el tema con diferentes hipótesis a la del modelo de regresión lineal clásico. En el nuevo modelo no se supone constante a la varianza de las observaciones, sino que resulta una función de la media.

La utilización de un método robusto de estimación de los parámetros del modelo permite contar con resultados que se adaptan mejor a pequeños apartamientos del Gamma original, y permite considerar mejor las características de las series observadas en la naturaleza que generalmente se apartan de los modelos estadísticos.

Se propone comparar los resultados del modelo MLGG con los estimados utilizando el modelo de regresión lineal, muy aplicado para estudiar la presencia de tendencias en series hidrológicas, y que generalmente, no cumplen las hipótesis básicas.

El modelo lineal generalizado (MLG) es un modelo más flexible que el de regresión lineal permite extender la suposición de distribución Normal (III.18) a familias de distribuciones exponenciales, que tienen función de densidad de la forma:

$$f(y; \theta, \phi) = \exp\left[\frac{y\theta - b(\theta)}{a(\phi)} + c(y, \phi)\right] \quad \text{III. 20}$$

Estas familias incluyen a la distribución Normal, pero también a las distribuciones como la Gamma y la Gumbel. La suposición (III.19) se la reemplaza por la suposición más flexible:

$$h(\mu_t) = \beta_0 + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + \dots + \beta_p X_{pt} \quad \text{III. 21}$$

La función h se denomina función de ligadura (función "link"). La elección de la función de ligadura permite modelar la relación entre la media de las observaciones y el predictor

lineal (función lineal de las variables explicativas). La varianza de las observaciones no se la supone constante, sino que es una función de la media de las observaciones.

Modelo de regresión lineal generalizado Gamma (MLGG)

En este estudio se aplicó un MLG eligiendo la familia de distribuciones Gamma y la función logaritmo como ligadura y se *denominará MLGG* a este modelo. La familia de distribuciones Gamma es una familia de distribuciones a dos parámetros y los parámetros α y β son positivos.

La esperanza y la varianza son $\alpha\beta$ y $\alpha\beta^2$ respectivamente, por lo que su coeficiente de variación es $1/\alpha$.

El MLGG está definido por:

Condicionando a los valores de las variables explicativa $X_t=(X_{1t},\dots,X_{pt})$ las observaciones Y_t son independientes y con distribución:

$$Y_t \sim \Gamma(\alpha; \beta_t) \tag{III. 22}$$

La relación entre la media de la observación Y_t y las variables explicativas es:

$$\log(\mu_t) = \log(\alpha\beta_t) = \beta_0 + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + \dots + \beta_p X_{pt} \tag{III. 23}$$

Como el parámetro α de la distribución Gamma es constante, en este modelo no se supone varianza constante, sino coeficiente de variación constante.

Método de detección de múltiple puntos de cambios

El método realizar la estimación con división jerárquica de los puntos de cambio múltiples. Estos puntos de cambio múltiples se estiman mediante la aplicación iterativa de un procedimiento para la localización de un único punto de cambio.

En cada iteración se calcula una nueva ubicación del punto de cambio para que se divide un segmento existente. Como resultado, la progresión de este método puede ser diagramado como un árbol binario. En este árbol, el nodo raíz se corresponde con el caso de no hay puntos de cambio, y por lo tanto contiene toda la serie temporal.

La significación estadística de un punto de cambio estimado se determina a través de una permutación prueba, ya que la distribución de la prueba estadística depende de la distribución de las observaciones, que es desconocido en general.

III.4. Datos hidrológicos en las cuencas de los ríos Neuquén y Paraná

La información utilizada corresponde a los caudales observados en las cuencas de los ríos Neuquén (Paso de los Indios) y Paraná (Posadas y Corrientes).

Las series seleccionadas cumplen los criterios de selección convencionales y propuestos en Kundzewicz *et al.* (2005) que indican: la utilización de series de caudales máximos anuales de una longitud igual o superior a cuarenta años y que incluyan la década de los años noventa del siglo pasado.

La tarea de recopilación de información se centró en estas cuencas por su mayor nivel de aprovechamiento de los recursos hídricos, por lo tanto la presencia de un cambio en la distribución de los caudales podría afectar los distintos usos del agua.

III.4.1 Indicadores de la variabilidad climática natural

Se presenta un indicador de la variabilidad natural del sistema climático y que podría estar relacionadas con los cambios observados en las series de caudales que se analizan en esta Tesis.

Una posible causa de la variabilidad de los caudales es la *Oscilación Decadal del Pacífico* (Pacific Decadal Oscillation, PDO) que es un patrón de cambio en el clima del Océano Pacífico y se detecta cuando varía la temperatura de sus aguas superficiales, al norte de 20° N.

En una fase "positiva", el Pacífico occidental se enfría y se calienta la parte del mar del durante una fase negativa, se presenta el comportamiento opuesto y se observa cambios de fases en la escala interdecadal del orden de los veinte a treinta años.

En los caudales medios de los ríos de la cuenca del Plata ya se analizó la posible presencia de un cambio en las características estadísticas. Los caudales mostraron un incremento del escurrimiento, del orden de un 35%, entre los siguientes dos periodos: 1951-1970 y 1980-1999; Barros (2013).

Collischonn *et al.* (2001) habían estudiado las posibles evidencias de cambios en el régimen hidrológico del río Paraguay, que es el mayor tributario del sistema de drenaje de la cuenca Del Plata. Estos autores, señalaron que el origen podría ser climático y no asociado con el cambio en el uso de los suelos.

Con la idea de la influencia de la variabilidad climática, en Nueva Gales del Sur (Australia) se han realizado investigaciones sobre los efectos que la persistencia de escalas multidecadales implican un mayor o menor riesgo de ocurrencia de inundaciones.

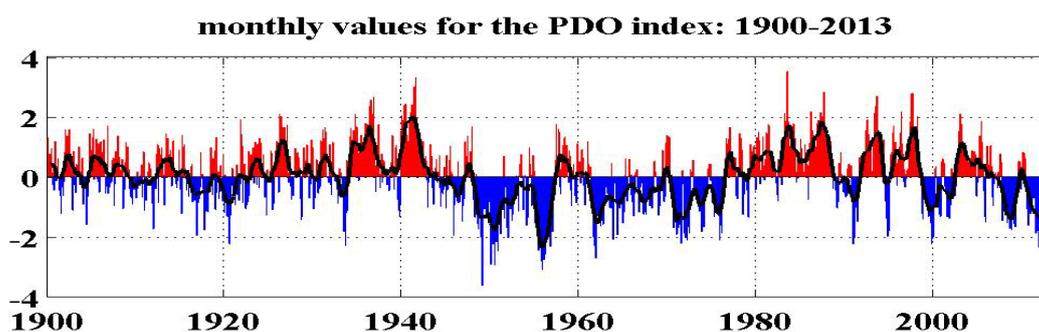
Estudios climatológicos recientes han puesto de manifiesto la variabilidad multi-decadal en la modulación de la magnitud de los impactos de El Niño / Oscilación del Sur (ENOS).

En Australia (Nueva Gales del Sur), la variabilidad de los riesgos de inundación se analizó con respecto a la modulación observada de la magnitud de evento ENOS. Esto se logra mediante el uso de un índice simple de riesgo de inundación regional. Los resultados indican que los eventos ENOS fríos (La Niña) son los principales impulsores de los riesgos de inundación elevada.

Un análisis de la modulación multidecadal de riesgo de inundación se consigue utilizando el índice Interdecadal de la Oscilación del Pacífico (IPO). Según el College of the Environment at the University of Washington: *"el análisis revela que IPO modula los eventos ENOS y conduce a periodos de mayor riesgo de inundación, sin embargo esta modulación parece afectar no sólo la magnitud de los eventos ENOS individuales, sino también la frecuencia de su aparición. Esta doble modulación de procesos ENOS tiene el efecto de reducir o elevar el riesgo de inundaciones en escalas de tiempo multidecadales."*

Estos resultados han definido la necesidad de realizar un análisis de la frecuencia de inundaciones y proporciona un ejemplo del impacto de la variabilidad natural del clima sobre variables hidrológicas.

Figura N° III.1 Serie temporal de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO. College of the Environment at the University of Washington.



En el análisis de los caudales máximos diarios anuales en río Neuquén se han considerados los siguientes periodos: 1922-1946, 1947-1971, 1972-1996. Se presenta en el parágrafo III.4.1.1.2 la aplicación del test de la razón de verosimilitud para analizar este cambio.

La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) es un patrón de variabilidad climática del Pacífico similar a ENOS, pero que varía en una escala de tiempo mucho más largo.

La PDO puede permanecer en la misma fase de 20 a 30 años, mientras que los ciclos ENOS normalmente sólo duran de 6 a 18 meses. La PDO, como ENSO, consiste en una fase cálida y fresca que altera los vientos atmosféricos de nivel superior. Los cambios en la fase pueden tener importantes consecuencias para el clima mundial, que afecta a la actividad de huracanes en el Atlántico y el Pacífico, las sequías y las inundaciones en la cuenca del Pacífico, la productividad de los ecosistemas marinos, y los patrones de la temperatura global de la tierra. Los expertos también creen que la PDO puede intensificar o disminuir los impactos de ENOS en función de su fase. Si tanto el ENSO y la PDO están en la misma fase, se cree que los impactos de El Niño / La Niña pueden ser magnificados.

III.4.2 Análisis de casos: ríos Neuquén y Paraná

En la cuenca del río Neuquén y con la serie de caudales máximos de Paso de los Indios se aplicaron las pruebas estadísticas MK y Pettitt para considerar las siguientes particularidades de la hidrología de la cuenca: 1) serie de caudales máximos diarios anuales, 2) análisis de la existencia de dos procesos generadores de caudales (precipitación y fusión nival) y 3) estudio del impacto de una señal interdecadal y sobre los caudales máximos diarios anuales.

Con la información de los periodos identificados en la Interdecadal Pacific Oscillation (IPO) se aplicó la prueba de la razón de verosimilitudes para la función de densidad de probabilidades Gamma de dos parámetros.

Luego, se utilizó un modelo de regresión generalizado Gamma para estudiar los efectos de la identificación de dos periodos sobre las pendientes estimadas. La importancia de la separación en periodos aplicando un modelo Gamma y estudiando la variación de la relación caudal máximo medio anual- periodo de retorno.

En la cuenca del río Paraná, se aplicaron las mismas pruebas: Mann-Kendal y Pettitt. Luego se identificaron puntos de cambio utilizando la prueba de detección de puntos múltiples y se evaluó las posibilidades de identificar los cambios en la serie del indicador de la variabilidad climática.

III.4.2.1 Caudales máximos diarios anuales en la cuenca del río Neuquén

La serie completa de caudales observada en Paso de los Indios (1903-2009) permitió identificar tres series para analizar dos series de caudales máximos estacionales: la

primera de invierno, que está asociada con los máximos registrados entre el 1 de mayo y el 31 de agosto de cada año y la serie complementaria asociada con la fusión nival.

En la Tabla III.1 se presentan los estadísticos de la serie de caudales máximos diarios.

Tabla N° III.1. Estadísticos de los caudales máximos diarios medios anuales (m^3/s) en el río Neuquén (1903-2013).

Estadístico	Media (m^3/s)	Desvío estándar (m^3/s)	Q_{50} (m^3/s)	Q_{95} (m^3/s)
Serie total	1914.0	1239.8	1701.0	4541.7

III.4.2.1.1 Aplicación de pruebas no paramétricas

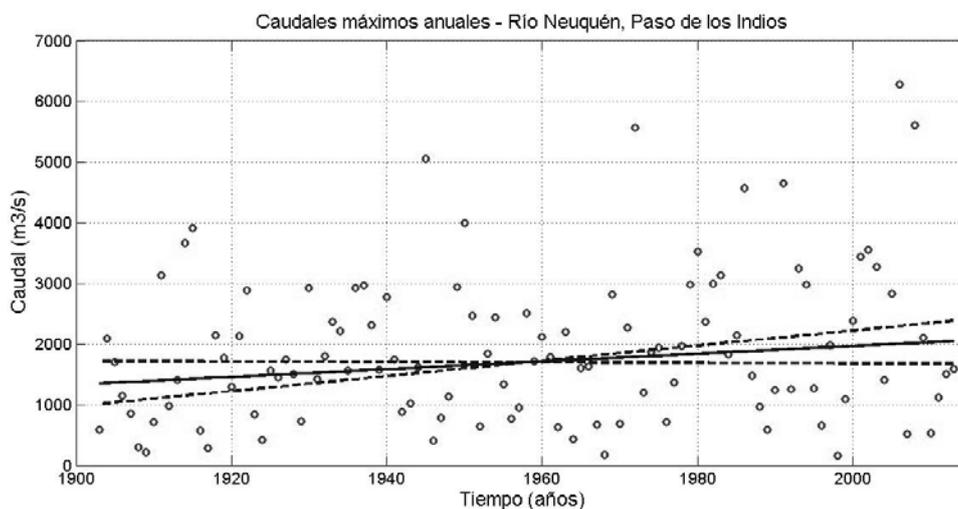
Prueba de Mann Kendall

La Tabla N° III.2 presenta el valor obtenido del estadístico S de la prueba de MK, el valor Z , su valor p y el estimador de la pendiente B . Se resalta el valor (valor- p , pendiente y para indicar cuándo se rechaza la hipótesis nula (no hay tendencia y con un nivel de significación de $\alpha = 0.10$).

Tabla N° III.2. Resultados de la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para la serie de caudales máximos diarios en el río Neuquén (1903-2013).

Río	S	Var S	Z	Valor p	$B(m^3/s \cdot \text{año})$
Neuquén	729	153980	1.855	0.064	6.333

Figura N° III.2 Caudales máximos medios anuales y pendiente estimada Mann-Kendall.
Río Neuquén (1903-2009).



La pendiente B de la prueba de MK fue estimada con el programa desarrollado por Burkey, Jeff. May 2006. "A non-parametric monotonic trend test computing Mann-Kendall Tau, Tau-b, and Sen's Slope". Mathworks-MATLAB.

El intervalo de confianza de la pendiente (en $m^3/s \cdot \text{año}$) es: -0.430; 12.842 e incluye la pendiente nula.

Series de caudales máximos identificadas por proceso

La Tabla N° III.3 presenta los dos primeros momentos estadísticos (media y desvío estándar) para la serie temporal de caudales máximos separada en dos sub-series y según los dos procesos identificados.

Tabla N° III.3 Características estadísticas de las series de caudales máximos diarios separadas por proceso en el río Neuquén. (1903-2009).

Estadístico	Media (m^3/s)	Desvío estándar (m^3/s)	Q_{50} (m^3/s)	Q_{95} (m^3/s)
Precipitación	1812	1310	1609	4288
Nieve	988	468	917	1938

Prueba de Mann Kendall

La Tabla III.4. presenta los resultados de la prueba de Mann-Kendall, se han separando los procesos hidrológicos (precipitación y fusión) y se observa que se rechaza la H_0 para los caudales máximos diarios medios del año y del periodo asociado con la ocurrencia de la precipitación (mayo-julio).

Tabla N° III.4. Estadísticos comparativos y Mann -Kendall. Río Neuquén (Paso de los Indios, 1903-2013).

Estadístico	Anual	Invierno	Verano
Media (m ³ /s)	1914.0	1812.3	988
Desvío (m ³ /s)	1239.8	1310.1	468
Q _{5%} (m ³ /s)	415.4	276.5	333,1
Q _{25%} (m ³ /s)	969.2	750.2	687,5
Q _{50%} (m ³ /s)	1701	1609	917
Q _{75%} (m ³ /s)	2499.2	2499.2	1227
Q _{95%} (m ³ /s)	4541.7	4541.7	1938
MK (valor p)	0.064	0.077	0.966

La Tabla N° III 5, incorpora los valores de los estadísticos y las pendientes (B) de la prueba de Mann Kendall.

Tabla N° III.5. Prueba de Mann-Kendall, río Neuquén (Paso de los Indios, 1903-2013).

Estadístico	S	Z	Valor-p	B(m ³ /s*año)
Precipitación	693	1.764	0.078	5.868
Nieve	17	0.043	0.966	0.026

La estimación realizada con la prueba de Mann-Kendal depende de la presencia autocorrelación y por lo tanto en se estimó la función de autocorrelación en la serie de caudales máximos anuales en la estación Paso de los Indios. No se encontraron valores significativos de los coeficientes de autocorrelación estimados.

Siendo el límite: $\pm 0,1961$, los diez primeros valores ordenados son: 0,1302; -0,1188; 0,0758; 0,0172; 0,00421; -0,0347; -0,0590; 0,0398; 0,0734 y -0,0510.

Conclusión parcial

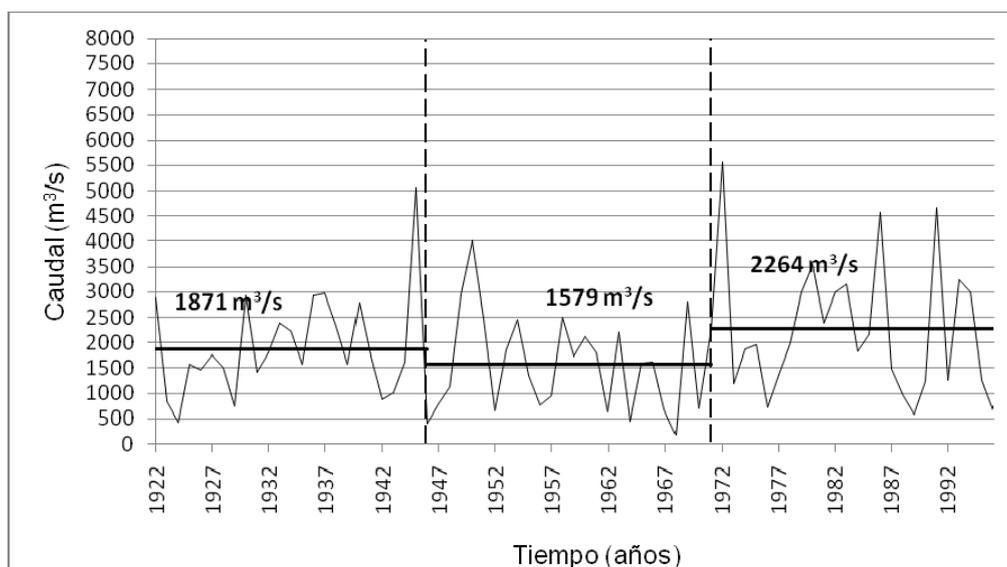
La observación de los resultados muestra que la presencia de una tendencia se podría considerar significativa a un nivel cercano al 10%. Un resultado importante es el valor del *valor -p* (7.8%) para los caudales máximos medios anuales que ocurren en los meses de invierno. En el Capítulo II se presentó un evento posiblemente asociado con este resultado, la crecida ocurrida en junio-julio del año 2006 y que cuya importancia hizo necesario el cálculo de una nueva Crecida Máxima Probable para la cuenca del río Neuquén.

III.4.2.1.2 Cambios en la serie de los caudales máximos medios anuales

Se presenta un análisis de los cambios observados en las medias de la serie de los caudales máximos diarios para los distintos periodos. En el caso del río Neuquén se observan dos cambios en los caudales máximos y el más importante ocurrió a partir de la década de los años 70.

La Figura III.3 muestra las medias estimadas para los tres periodos considerados y relacionados con la presencia de dos puntos de cambios. Estos están asociados con las dos fases del fenómeno de la PDO ocurridas en el periodo 1922-1996.

Figura N° III.3 Cambios en la media de la serie de caudales máximos diarios, río Neuquén



La siguiente Tabla N° III.6 muestra las características estadísticas (media y desvío estándar) de la serie de caudales máximos diarios anuales. Además, se presenta la variación temporal de los parámetros estimados por Máxima Verosimilitud (MV) de una función de densidad de probabilidades Gamma para tres periodos de la serie.

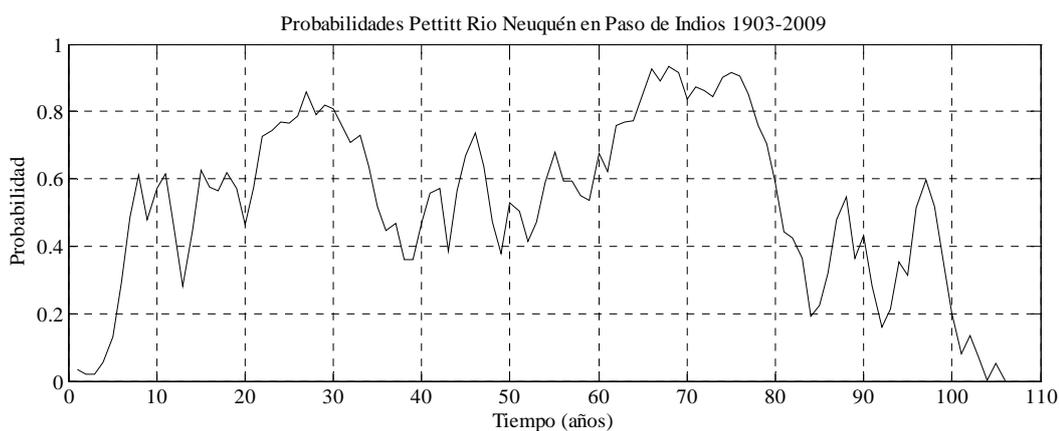
Tabla N° III.6. Series parciales de los caudales máximos diarios separadas en periodos, Río Neuquén. (1922-1996).

Periodo	1922-1946	1947-1971	1972-1996	1922-1996
Media (m ³ /s)	1940.5	1551.8	2328.7	1940.3
Desvío Estándar (m ³ /s)	980.20	967.01	1287.7	1120.1
Parámetro 1	4.13	2.32	3.47	2.89
Parámetro 2	469.52	667.66	669.63	670.26

Prueba no paramétrica de Pettitt

La Figura III.4 muestra los resultados de aplicar la prueba no paramétrica de Pettitt para los caudales máximos medios diarios y se observa la ocurrencia de un punto de cambio único significativo a principios de las décadas de los años 60-70.

Figura N° III.4. Prueba de Pettitt para los caudales máximos medios diarios, río Neuquén (1903-2009).



En el gráfico anterior se observa la ocurrencia de dos puntos de cambios, el primero en la década de los años 20 (valor de probabilidad 0.86 en el año hidrológico 1926-27) y el

más significativo en la década de los años 60-70 (valor de probabilidad 0.927 en el año hidrológico 1966-67 y 0.9005 en el año 1972-73).

La Tabla N° III.7 muestra una comparación entre resultados de Pettitt con la prueba de Mann-Witney (MW) y permite precisar la ubicación del punto de cambio.

Tabla N° III.7. Resultados de las pruebas de Pettitt y Mann-Witney MW

Año	Probabilidad	Valor p Pettitt	Valor p Mann-Witney
1946	0.4574	0.5426	0.2157
1971	0.8398	0.1601	0.0281

La prueba de Pettitt fue diseñada para la detección de un único punto de cambio y por lo tanto para verificar la posible presencia de otros puntos se estudian los caudales para los dos sub-periodos identificados. Es interesante evaluar la presencia de puntos interiores y las Figuras III.5 y 6 muestran que no se observa otros puntos de cambio en las series parciales identificadas.

Figura N° III.6. Prueba de Pettitt en los caudales máximos diarios, río Neuquén (1903-1970).

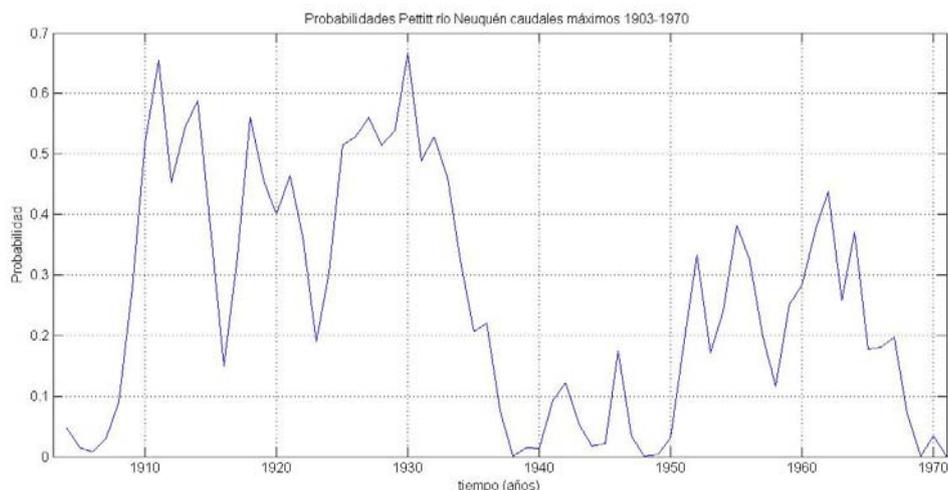
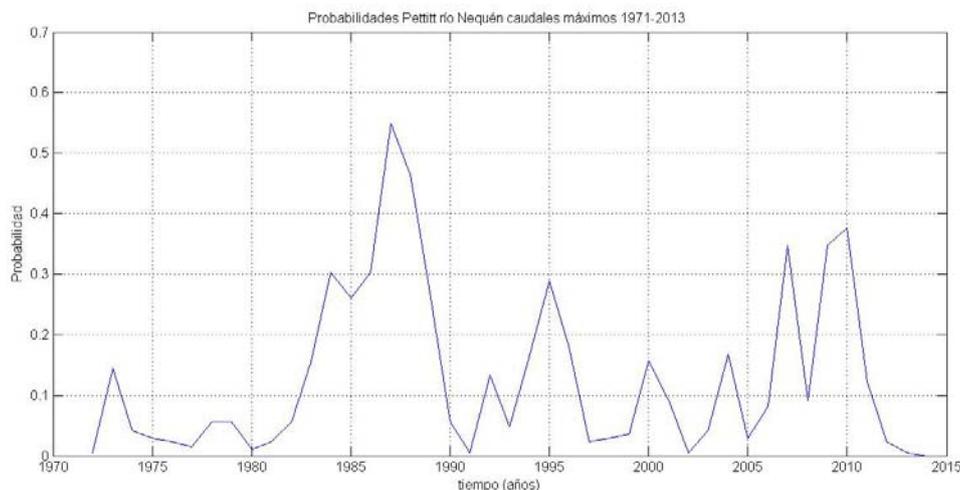


Figura N° III. 7. Prueba de Pettitt en los caudales máximos diarios, río Neuquén (1971-2009).



Otro análisis, no presentado aquí, fue realizado con la serie de caudales de invierno, y muestra que el valor de probabilidades P más alto se observa en un punto ubicado durante el periodo de los años 70.

Este valor coincide con los valores estimados para la serie de caudales máximos diarios total. Para la serie de caudales máximos asociada con la fusión de la nieve la mayor indicación de un posible cambios en la pendiente se observa durante la década de los años 20 (valor P de 0.75) que es un valor demasiado bajo para ser considerado para el rechazo de la hipótesis nula.

Razón de verosimilitud y puntos de cambio

La prueba de la razón de verosimilitudes se utiliza para analizar la posible influencia de la variabilidad asociada con la Oscilación Decadal del Pacífico sobre la serie de caudales máximos diarios anuales en el río Neuquén.

La prueba de la razón de verosimilitudes se aplicó con una función de densidad de probabilidades Gamma de dos parámetros. La idea de utilizar la prueba de la razón de las verosimilitudes se debe a que se está estudiando el cambio de la forma de la función de densidad de probabilidades.

La siguiente es la expresión de la prueba de la razón de verosimilitud permite estudiar la presencia de diferentes modelos asociados a la presencia de tres periodos con observaciones distintas.

$$\Lambda = 2 \left\{ \left[\sum_{i=1922}^{1946} L(\alpha_1, \beta_1, x_i) + \sum_{i=1947}^{1970} L(\alpha_2, \beta_2, x_i) + \sum_{i=1971}^{1996} L(\alpha_3, \beta_3, x_i) \right] - \sum_{i=1922}^{1996} L(\alpha_0, \beta_0, x_i) \right\} \quad \text{III. 24}$$

La prueba implica la siguiente hipótesis:

H_0 : existe un único modelo Gamma para todo el periodo (los parámetros de los modelos son los mismos, M_0).

H_1 : existen tres modelos Gamma con distintos parámetros para los periodos 1922-1946, 1947-1971 y 1972-1996. Esta separación se relaciona con la idea que existen dos puntos de quiebre localizados en los años 1946 y 1971.

En este análisis se supone que la forma de la función de densidad de probabilidades es la misma pero los parámetros cambian según el periodo. La expresión presentada considera el caso de tres modelos versus un modelo.

Tabla N° III.8 Razón de verosimilitudes (tres modelos vs uno) para la funciones de densidad de probabilidades Gamma. 1922-1944-1971-1996.

Periodo	1922-1946	1947-1971	1972-1996	1922-1996	Razón	Valor p
Log Verosimilitud Gamma	-204.862	-204.624	-211.147	-624.949	8.630	0.071

La H_1 considerada establece que hay cambios pero no indica el año en que se produce la variación de la características de la serie de. Por lo tanto, se analiza, por separado, los dos posibles puntos de cambio para los años. 1946 y 1971.

Caso año 1946

La prueba paramétrica implica la siguiente hipótesis:

H_0 : existe un único modelo (M_0) para representar la serie de caudales para todo el periodo (los parámetros del modelo son los mismos).

H_1 : existen dos modelos Gamma con parámetros distintos para los periodos 1922-1946 y 1947-1996.

$$\Lambda = 2 \left\{ \left[\sum_{i=1922}^{1946} L(\alpha_1, \beta_1, x_i) + \sum_{i=1947}^{1996} L(\alpha_2, \beta_2, x_i) \right] - \sum_{i=1922}^{1996} L(\alpha_0, \beta_0, x_i) \right\} \quad \text{III. 25}$$

Tabla N° III.9 Razón de verosimilitudes (dos modelos vs uno) para la función de densidad de probabilidades Gamma. 1922-1946-1996 vs 1922-1996.

Periodo	1922-1946	1947-1996	1922-1996	Razón	Valor p
Log Verosimilitud Gamma	-204.862	-204.624	-411.524	4.075	0.130

Nota: se estima el valor p, con una función de densidad Chi Cuadrado con 2 grados de libertad y 0.05. **Caso año 1971**

La prueba paramétrica implica la siguiente hipótesis:

H₀: existe un único modelo (M₀) para representar la serie de caudales para todo el periodo (los parámetros del modelo son los mismos).

H₁: existen dos modelos Gamma con parámetros distintos para los periodos 1922-1971 y 1972-1996.

$$\Lambda = 2 \left\{ \left[\sum_{i=1922}^{1971} L(\alpha_1, \beta_1, x_i) + \sum_{i=1972}^{1996} L(\alpha_2, \beta_2, x_i) \right] - \sum_{i=1922}^{1996} L(\alpha_0, \beta_0, x_i) \right\} \quad \text{III. 26}$$

Tabla N° III. 10 Razón de verosimilitudes (dos modelos vs uno) para las función de densidad de probabilidades Gamma. 1922-1971-1996 vs 1922-1996.

Periodo	1922-1971	1972-1996	1922-1996	Razón	Valor p
Log Verosimilitud	-411.524	-211.147	-624.949	4.554	0.102

Los resultados anteriores muestran un 'posible punto de cambio' en el entorno de los años 1971. Este punto detectado coincide con el resultado de la aplicación de la prueba de Pettitt (Tabla III.7). El otro punto de cambio, ocurrido en el año 1946, presenta un valor de probabilidades alto como para resultar significativo.

A continuación se presenta los resultados obtenidos para el punto de corte definido en el año 1971.

Caso año 1971

La prueba paramétrica implica la siguiente hipótesis:

H_0 : existe un único modelo (M_0) para representar la serie de caudales para todo el periodo (los parámetros del modelo son los mismos).

H_1 : existen dos modelos Gamma con parámetros distintos para los periodos 1946-1971 y 1972-1996.

$$\Lambda = 2 \left\{ \left[\sum_{i=1946}^{1971} L(\alpha_1, \beta_1, x_i) + \sum_{i=1972}^{1996} L(\alpha_2, \beta_2, x_i) \right] - \sum_{i=1946}^{1996} L(\alpha_0, \beta_0, x_i) \right\} \quad \text{III. 27}$$

Tabla N° III. 11 Razón de verosimilitudes (dos modelos vs uno) para las función de densidad de probabilidades Gamma. 1946-1971-1996 vs 1946-1996. Segundo periodo 1947-1996 (Neuquén)

Periodo	1947-1971	1972-1996	1947-1996	Relación	Valor p (p-value)
Log Verosimilitud	-204.62488	-211.1472	-419.04258	6.540995	0.037987

III.4.2.1.3 Variación temporal de la relación caudal máximo anual-periodo de retorno

Los resultados anteriores demuestran el interés de cuantificar el efecto que utilizar información que proviene de diferentes periodos tiene sobre la variación de la relación caudal-periodo de retorno.

En este experimento numérico la relación fue estimada con la función de densidad de probabilidades Gamma y los resultados se presentan en la Tabla III.12.

Tabla N° III.12 Caudales máximos diarios anuales (m^3/s) para distintos periodos de retorno. Modelo Gamma.

Periodo de retorno (años)	Sub-periodo 1 1922-1946	Sub-periodo 2 1947-1971	Sub-periodo 3 1972-1996	Periodo completo 1922-1996	Diferencia porcentuales 1947-1971vs 1972-1996(%)
5	2670	2280	3260	2780	42.9
20	3730	3510	4690	4110	33.6
50	4360	4270	5540	4920	29.7
100	4820	4830	6160	5510	27.5

Los resultados anteriores muestran la significación que para el diseño de una obra hidráulica tiene la identificación de los distintos periodos de los datos. Los valores de las diferencias alcanzan diferencias del orden del 38% para periodos de retorno utilizados en obras hidráulicas menores (periodo de retorno 10 años).

Se puede señalar que no se ha desarrollado ninguna obra hidráulica importante que modifique los caudales máximos y por lo tanto los cambios se relacionarían con la presencia de cambios en los forzantes como son la precipitación y la temperatura.

III.4.2.1.4 Modelo MLGG aplicado a los caudales máximos del río Neuquén

Se aplica el nuevo modelo MLGG para estudiar la presencia de cambios en las series de caudales máximos (totales, precipitación y nieve) para analizar las series con un modelo con estimación robusta de sus parámetros y evaluar el efecto que la presencia de observaciones atípicas tienen sobre la pendiente de la recta de regresión caudal máximo anual vs tiempo.

Ajuste de los modelos de regresión con Gamma

Se utilizan los gráficos $Q-Q_{plot}$ de los residuos para comparar el apartamiento de la recta de 45 grados en los valores extremos de la distribución con un modelo lineal y un log-lineal, respecto al modelo MLGG. La Figura N° III.8 muestra el apartamiento de los residuos estimados con el nuevo modelo Gamma (método robusto).

Figura N° III.8 Gráfico de los residuos del modelo Gamma robusto de los caudales máximos diarios en el río Neuquén 1903-2009.

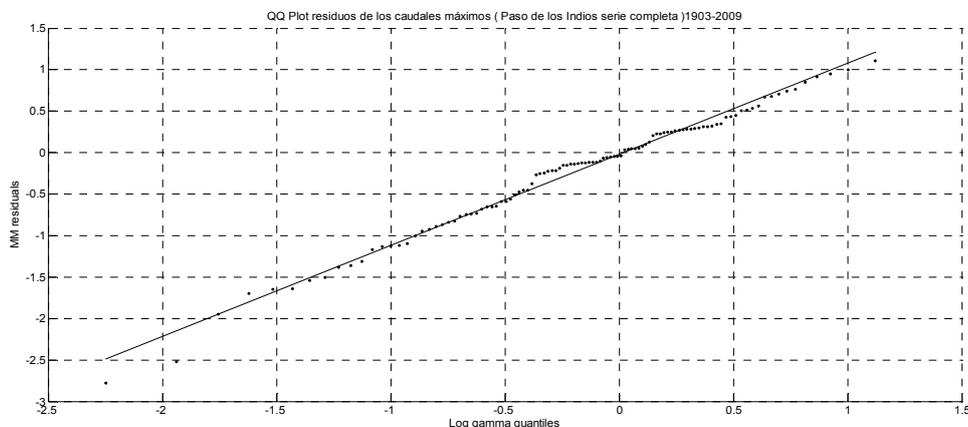


Figura N° III.9 Gráfico de los residuos del modelo Log-lineal de los caudales máximos diarios en el río Neuquén.

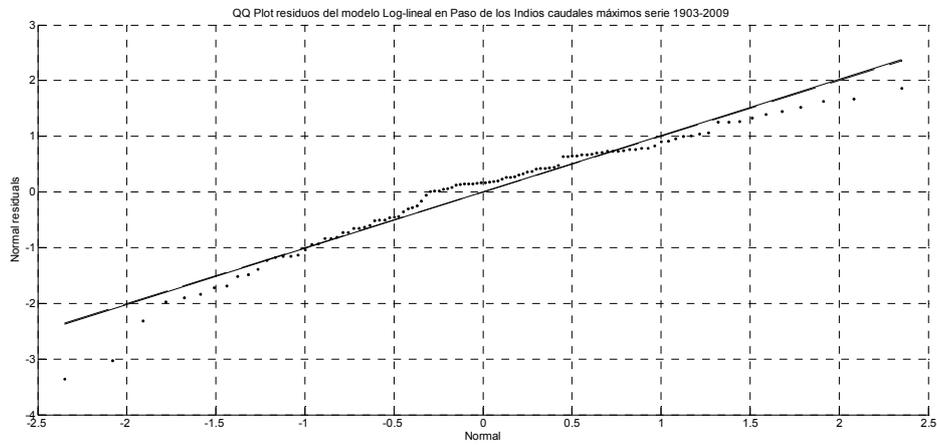


Figura N° III.10 Gráfico de los residuos del modelo Gamma robusto de los caudales máximos diarios en el río Neuquén (1901-1970).

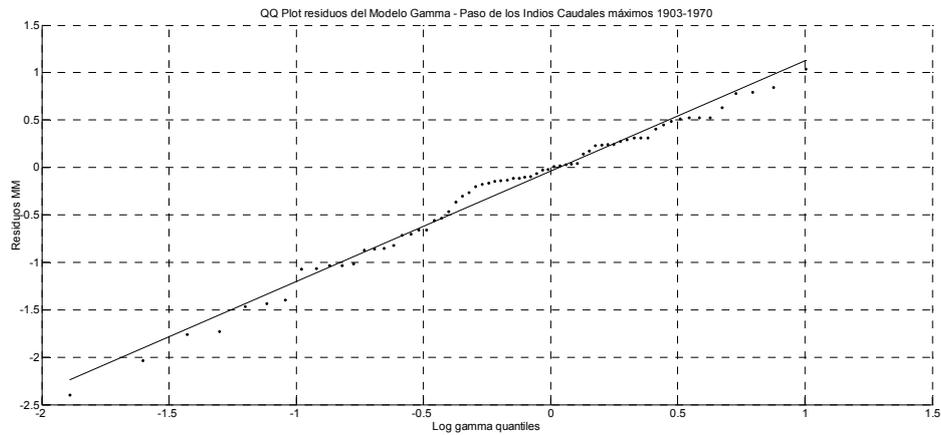


Figura N° III.11 Gráfico de los residuos del modelo Gamma robusto de los caudales máximos diarios en el río Neuquén (1971-2009).

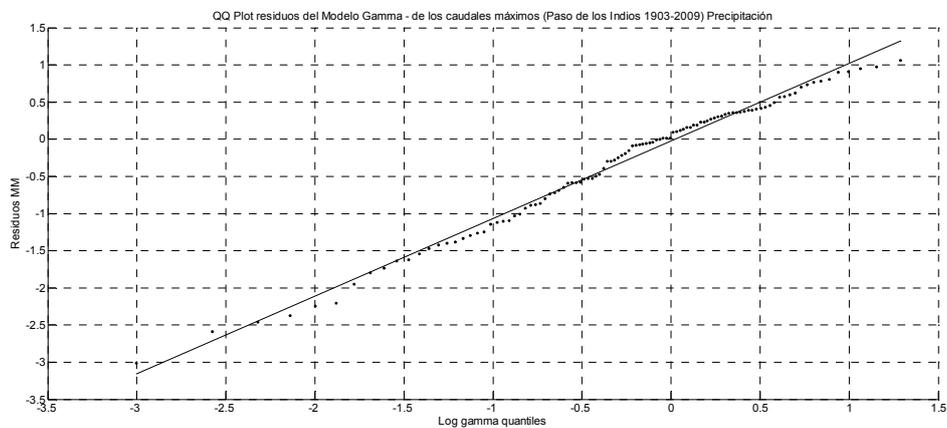
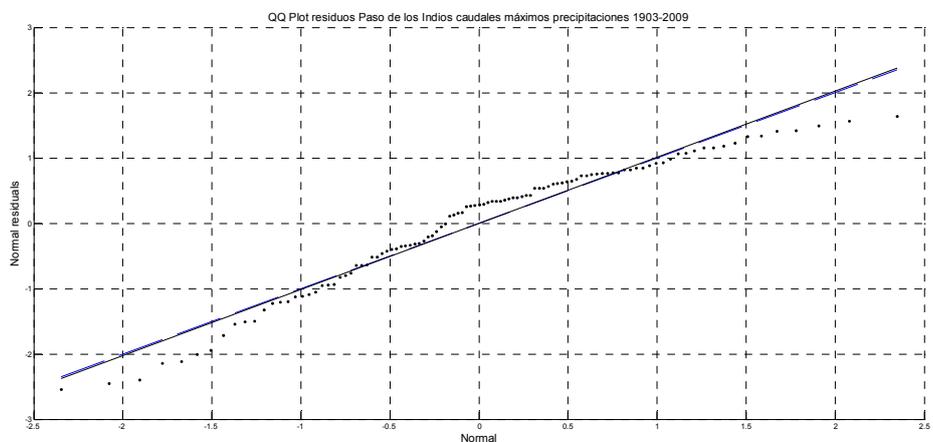


Figura N° III.12 Gráfico de los residuos del modelo Gamma robusto de los caudales máximos diarios en el río Neuquén (precipitación).



La separación de las crecidas de acuerdo con el proceso de generación define la presencia de cambios en los caudales máximos diarios de los hidrogramas de origen pluvial y en el nival.

Figura N° III.13 Gráfico de los residuos del modelo Gamma de los caudales máximos diarios en el río Neuquén (precipitación).

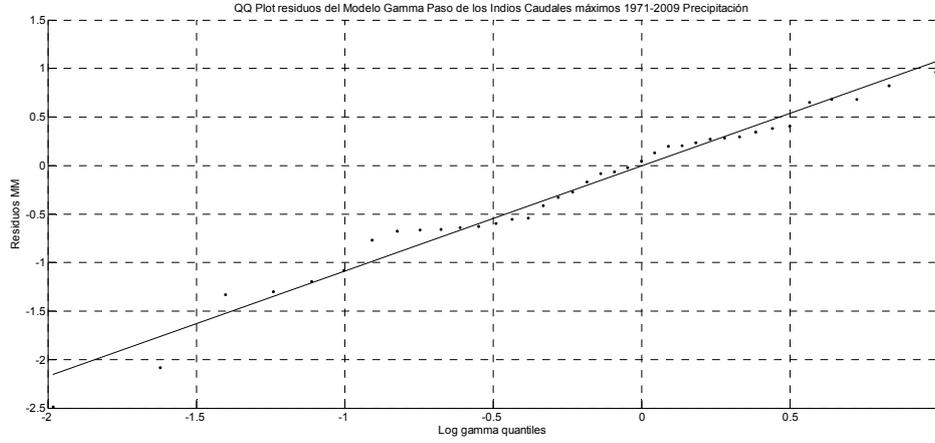


Figura N° III.14 Residuos del modelo Gamma de los caudales máximos diarios en el río Neuquén (nieve). 1903-2009.

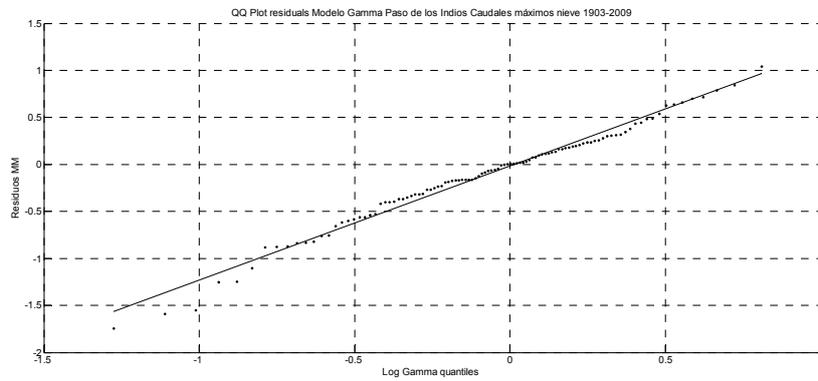
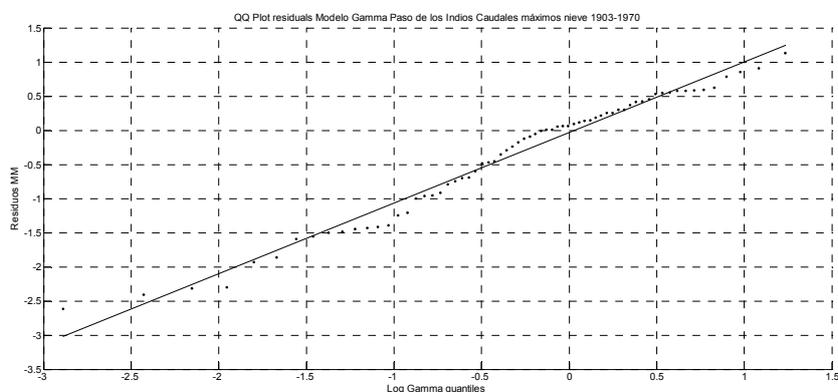


Figura N° III.15 Gráfico de los residuos del modelo Gamma de los caudales máximos diarios en el río Neuquén (nieve). 1903-1970.



Conclusiones parciales

Las pendientes estimadas con el modelo MLG resultaron positivas y significativamente distinta de cero para el proceso asociado con la ocurrencia de la precipitación en otoño-invierno y negativa para el proceso de fusión.

Los gráficos Q-Q_{plot} indican la importancia del apartamiento de la recta de 45 en los valores extremos de la distribución con un modelo lineal y log-lineal, respecto al modelo MLG. Este apartamiento disminuye claramente con el nuevo modelo.

La separación de las crecidas de acuerdo con el proceso de generación muestra la importancia de identificar la presencia de un cambio (creciente) en los caudales máximos diarios del hidrograma de crecidas de origen pluvial y uno decreciente en el nival.

De esta forma analizó la presencia de cambios en los dos procesos generadores de los caudales (precipitación y fusión) y definir su impacto en la forma final del hidrograma de caudales mensuales.

La importancia de la variabilidad climática el proceso de generación de caudales muestra que se debe analizar la presencia de efectos de la variabilidad interdecadica. En el siguiente párrafo se presenta un análisis de la posibilidad de identificar más de dos períodos diferentes.

Resultados obtenidos

Los resultados muestran la presencia de cambios en los dos procesos generadores de los caudales (precipitación y fusión) y su influencia final sobre la forma del hidrograma

estacional. Los cambios también fueron analizados para dos períodos temporales identificados como de posible variación de las características hidrológicas.

Tabla N° III.13 Pendientes estimadas con el modelo MLGG para las series de caudales máximos diarios en el río Neuquén.

Variable	Pendiente (1903-2009)	Pendiente (1903-1970)	Pendiente (1971-2009)
Caudal máximo anual	0.0055 DE 0.0023	0.0020 DE 0.0039	0.0127 DE 0.0096
Caudal máximo (precipitación)	0.0054 DE 0.0023	-0.000911 DE 0.004711	0.01117 DE 0.00991
Caudal máximo (fusión)	-0.000815 DE 0.001549	0.00226 DE 0.00290	-0.007676 DE 0.007578

Conclusiones parciales

Las pendientes estimadas con el modelo MLG resultaron positiva y significativamente distinta de cero para el proceso asociado con la ocurrencia de la precipitación en otoño-invierno y negativa para el proceso de fusión.

Los gráficos Q-Q_{plot} indican la importancia del apartamiento de la recta de 45 en los valores extremos de la distribución con un modelo lineal y log-lineal, respecto al modelo MLG. Este apartamiento disminuye claramente con el nuevo modelo.

La separación de las crecidas de acuerdo con el proceso de generación muestra la importancia de identificar la presencia de un cambio (creciente) en los caudales máximos diarios del hidrograma de crecidas de origen pluvial y uno decreciente en el nival.

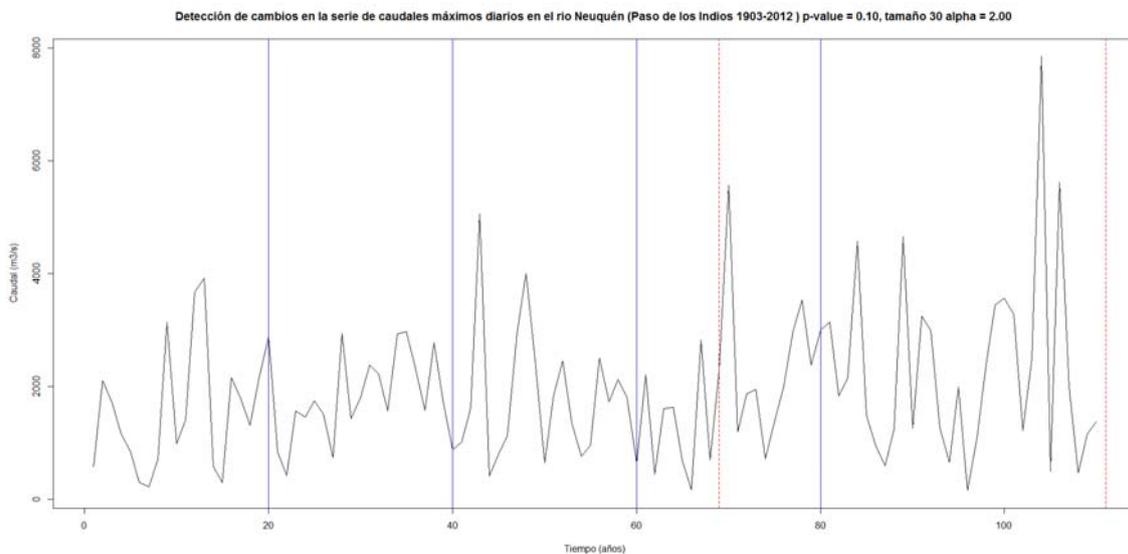
III.4.2.1.5 Método de detección de puntos de cambio múltiples, río Neuquén

La idea que existen varios puntos de cambio, asociados con la variabilidad climática natural, implica la necesidad de estudiar la consistencia de los resultados anteriores aplicando un nuevo método; Tabla N° III.14.

Tabla N° III.14 Resultados de experimentos numéricos α en el río Neuquén.

Experimento	α	Valor -p	Punto detectado valor p	Año
1	2.0	0.10	69 (0.077)	1971-72
2	1.0	0.10	69 (0.115)	1971-72

Figura N° III.16 Gráfico de la detección de puntos de cambio (software R ecp)
Río Neuquén 1903-2012.



Conclusiones parciales

La utilización del método para puntos múltiples definió una única identificación de la ubicación, muy aproximada, a la detectada por los métodos anteriores. La década de los años 70 fue importante para los cambios observados en la respuesta hidrológica de la cuenca y en los siguientes análisis se estudiará los efectos sobre cuencas de mayor extensión y ubicadas en otra región climática de Argentina.

III.4.2.2 Análisis de los caudales máximos medios diarios en el río Paraná

En este párrafo se desarrolla un análisis de los datos de los caudales máximos medios diarios observados en la cuenca del río Paraná. Este análisis tiene como objetivo

dilucidar si existen cambios múltiples detectables en las series utilizadas para el diseño de las obras de infraestructura construidas o que actualmente se encuentran en planificación.

Esta cuenca se caracteriza por su gran extensión y por la existencia de obras de infraestructura muy importantes algunas de las cuales fueron identificadas en el Capítulo II. Desde luego, existen otras obras hidráulicas menores, que están ubicadas en las subcuencas de ríos más significativos y que también son susceptibles de ser afectadas por los cambios en las condiciones del escurrimiento detectadas en los cursos de mayor orden.

Se presentan, a continuación, las figuras (III.17 a III.21) con los caudales máximos diarios anuales y sus medias estimadas para los distintos periodos considerados.

Figura N° III.17 Gráfico de los caudales máximos diarios anuales - Río Paraná (Posadas).

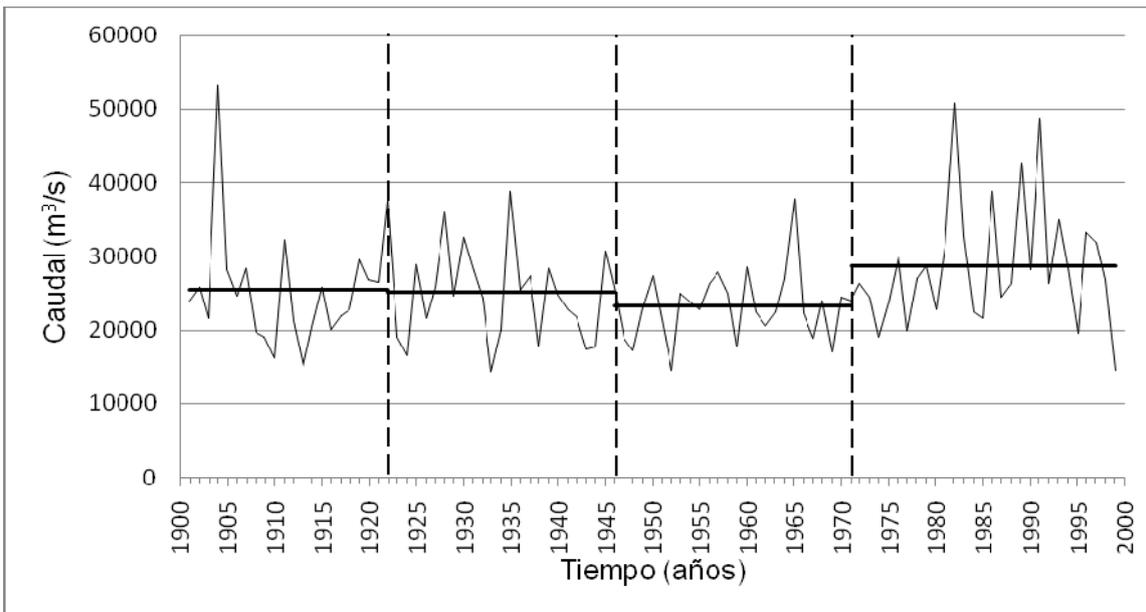


Figura N° III.18 Gráfico de los caudales máximos diarios anuales - Río Parana (Corrientes).

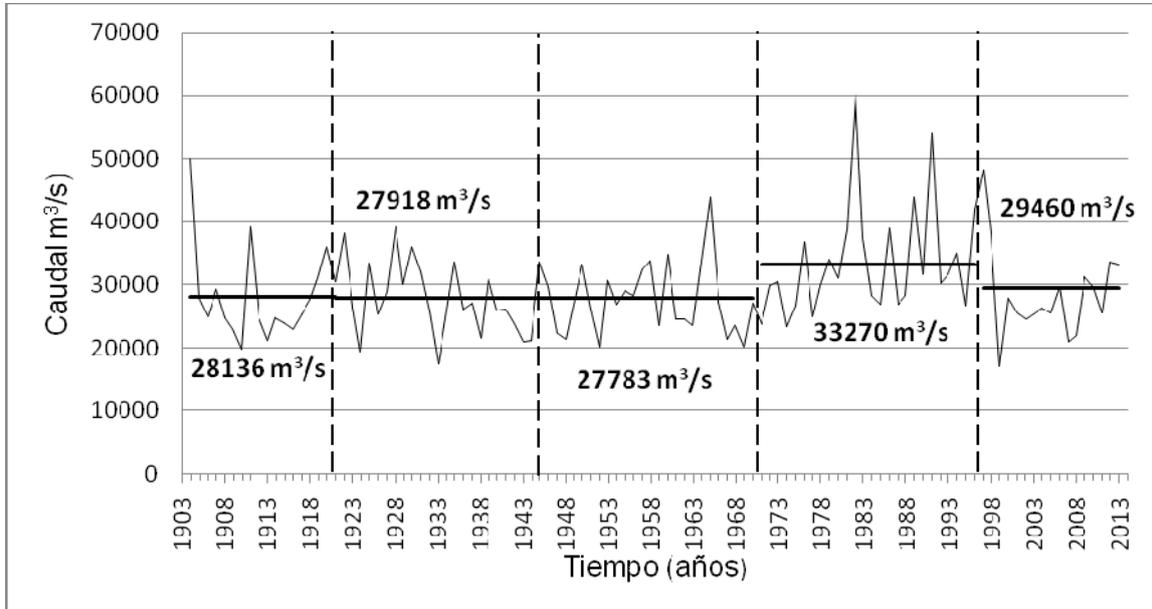


Figura N° III.19 Gráfico de los caudales máximos diarios anuales Río Bermejo (Pozo Sarmiento).

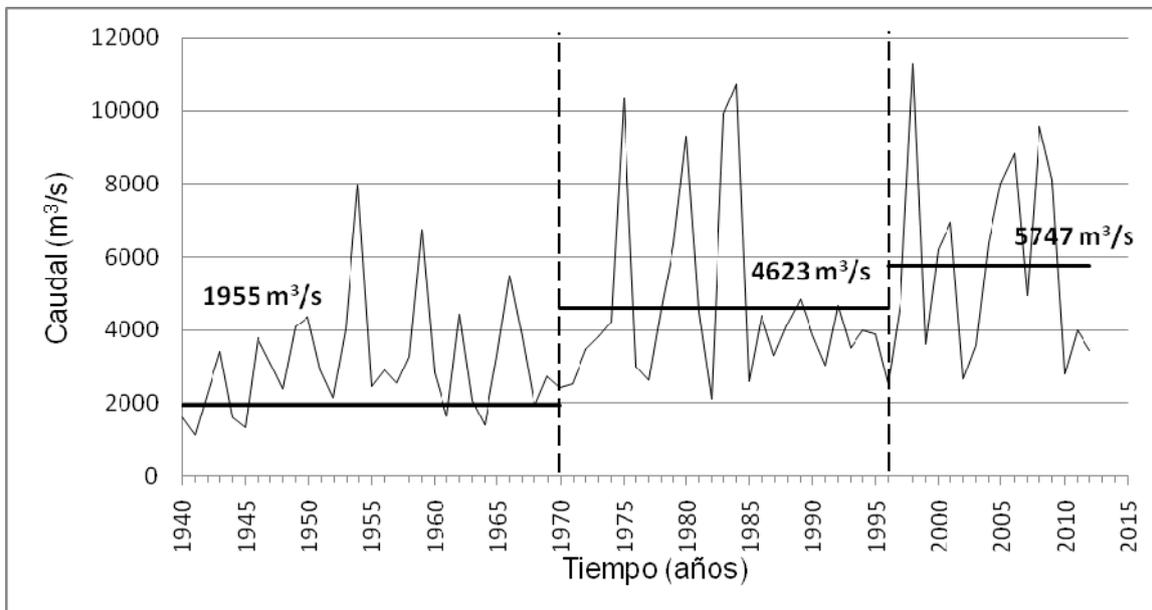


Figura N° III.20 Gráfico de los caudales máximos diarios anuales -caudales máximos medios anuales. Río Pilcomayo (La Paz).

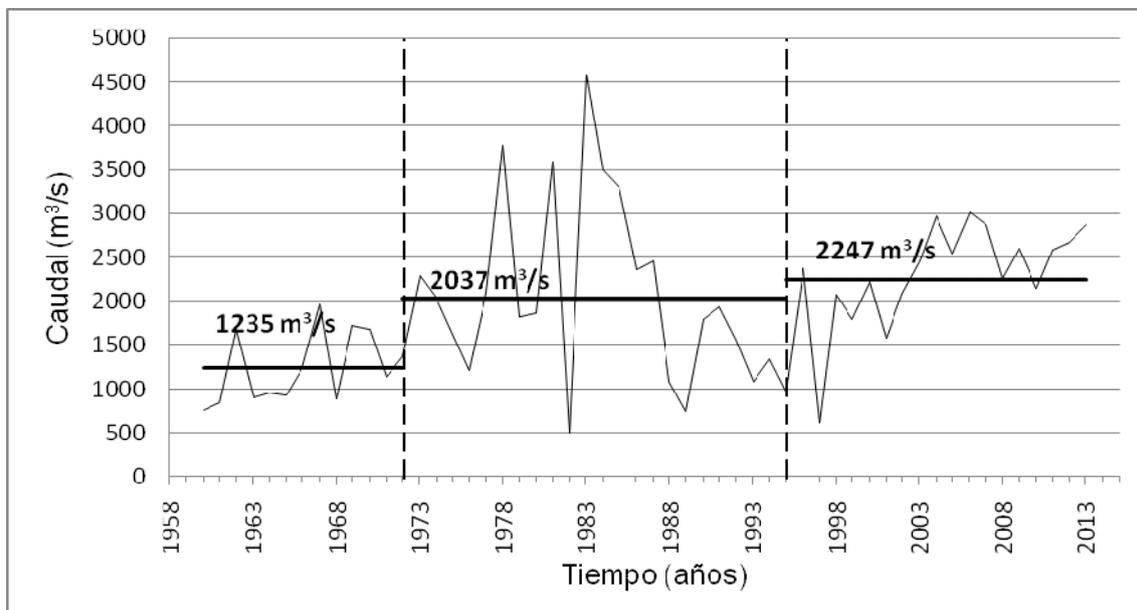
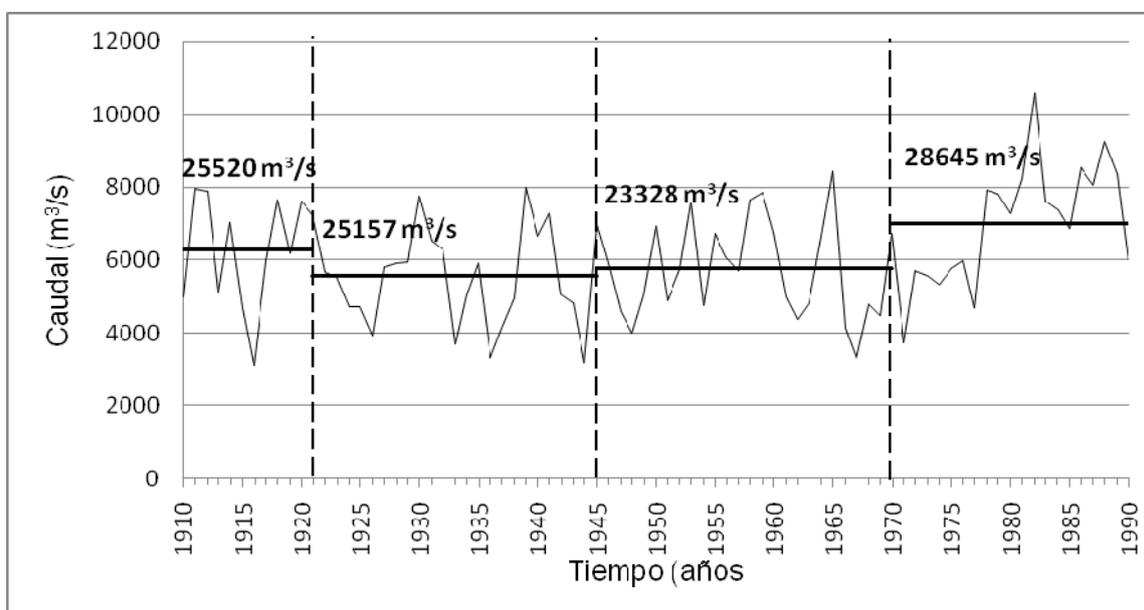


Figura N° III.21 Gráfico de los caudales máximos diarios anuales Río Paraguay (Puerto Bermejo).



Prueba de Mann Kendall

Para las series de caudales máximos observadas se aplicó prueba de Mann-Kendall y el análisis se completó con la aplicación de la prueba de Pettitt.

Tabla N° III.16. Prueba de Mann-Kendall para distintas series de caudales máximos diarios anuales (1903-2010).

Lugar	S	Var S	Z	Valor-p
Corrientes	623	145830	1.629	0.103
Posadas	588	109394	1.775	0.076
Pozo Sarmiento	907	40588	4.497	6.89E-06
La Paz	474		3.628	2.85E-04

Tabla N° III.17. Resultados de la prueba de Mann-Kendall para distintas series de caudales máximos diarios anuales (1903-2010).

Río/lugar	B(m ³ /s*año)	Int. B -	Int. B+
Paraná (Corrientes)	30.126	-6.14	67.024
Paraná (Posadas)	40.143	-2.994	83.846
Bermejo (Pozo Sarmiento)	45.316	24.419	67.676
Pilcomayo (La Paz)	25.861	14.158	36.606

Figura N° III.22 Caudales máximos medios anuales y pendiente estimada, Mann-Kendall.
Río Paraná (Posadas).

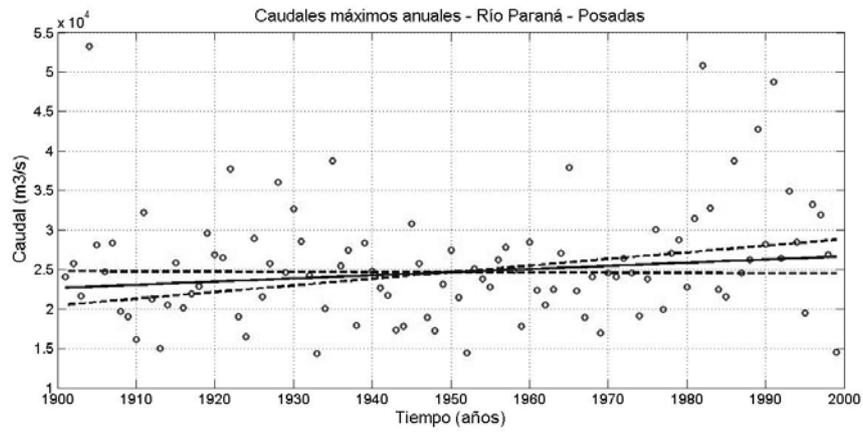


Figura N° III.23 Caudales máximos medios anuales y pendiente estimada, Mann-Kendall.
Río Paraná (Corrientes).

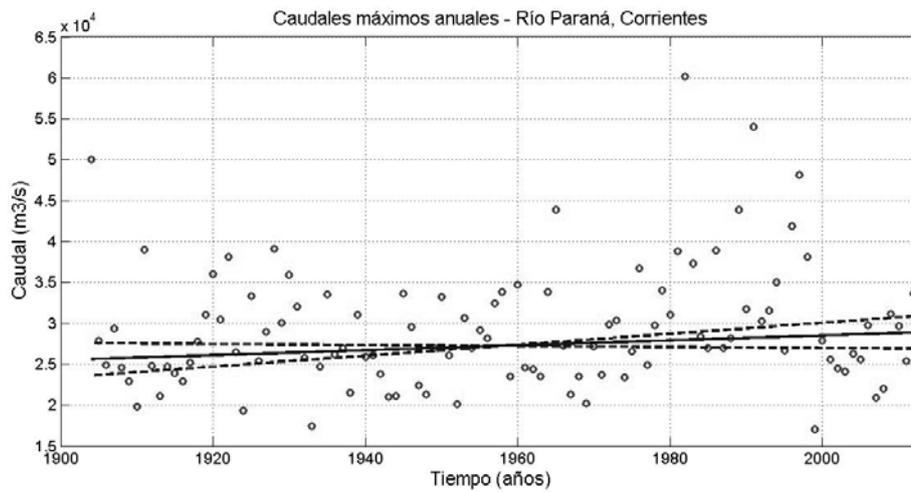


Figura N° III.24 Caudales máximos medios anuales y pendiente estimada, Mann-Kendall.
Río Bermejo (Pozo Sarmiento).

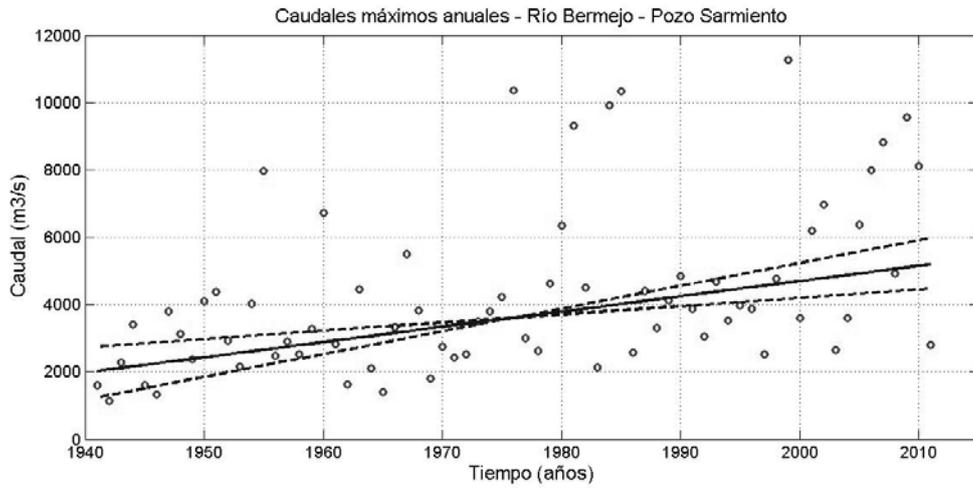


Figura N° III.25 Caudales máximos medios anuales y pendiente estimada, Mann-Kendall.
Río Pilcomayo (La Paz).

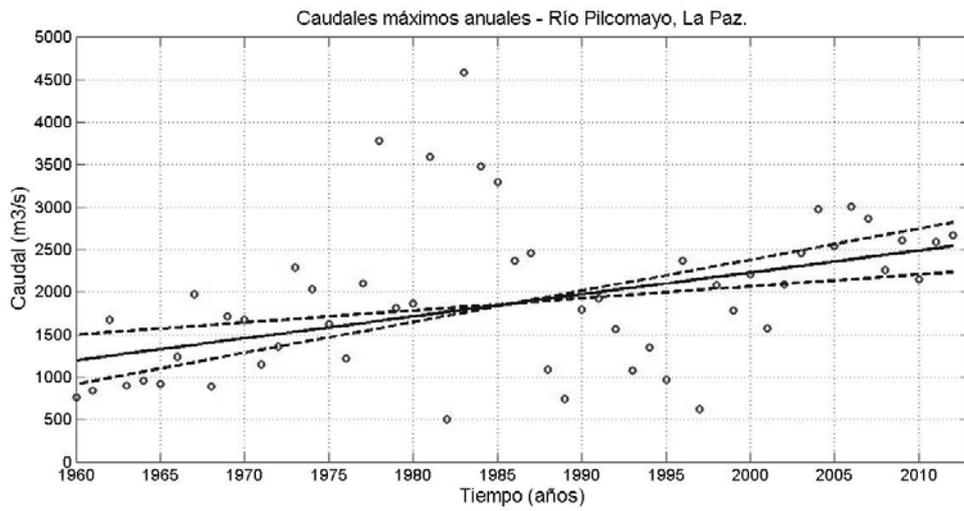
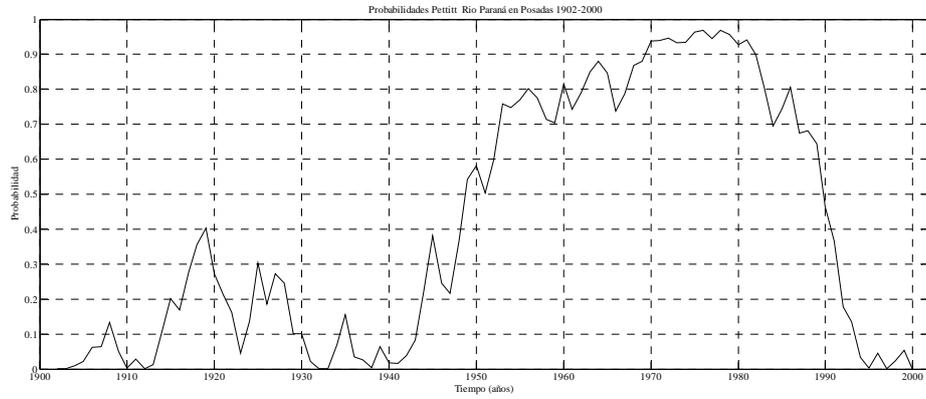


Figura N° III.26 Prueba de Pettitt para los caudales diarios máximos, río Paraná (Posadas). Serie total 1902-2000.



Se presentan a continuación Figuras III.27 y III. 28 que no muestran la presencia de puntos de cambio interiores en las sub-series : 1902-1975 y 1976-2000.

Figura N° III.27 Prueba de Pettitt en los caudales diarios máximos, río Paraná (Posadas). Serie parcial 1902-1975.

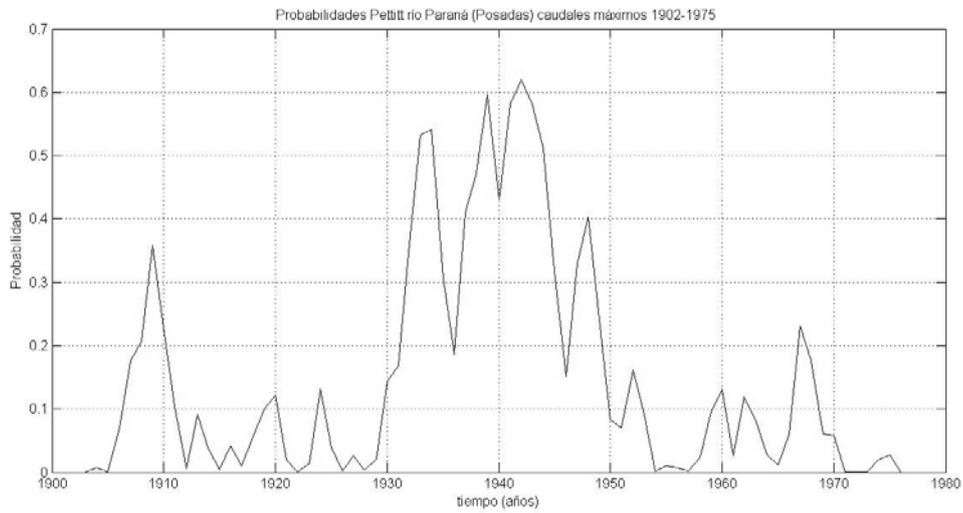
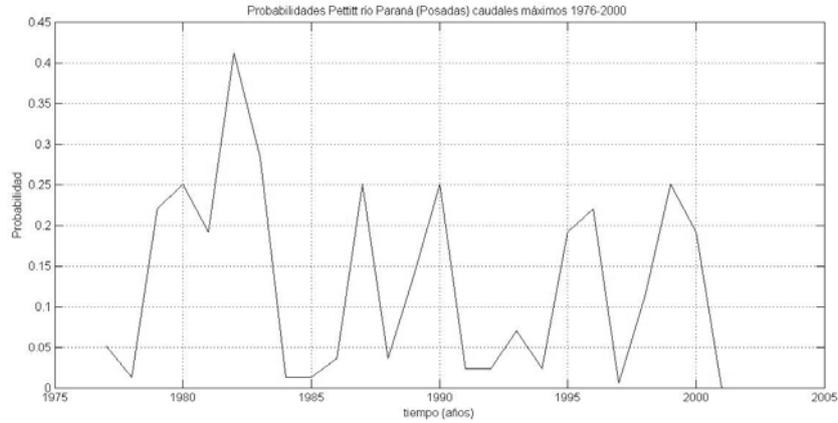


Figura N° III.28 Prueba de Pettitt en los caudales diarios máximos, río Paraná (Posadas).
Serie parcial 1976-2000.



A continuación se presentan los resultados de la prueba de Pettitt para las series de los caudales máximos diarios del río Paraná en Corrientes, Pilcomayo; Bermejo. Figuras N° III.29 a III.31.

Figura N° III.29 Prueba de Pettitt en los caudales máximos diarios, río Paraná
(Corrientes). Serie total 1904-2005.

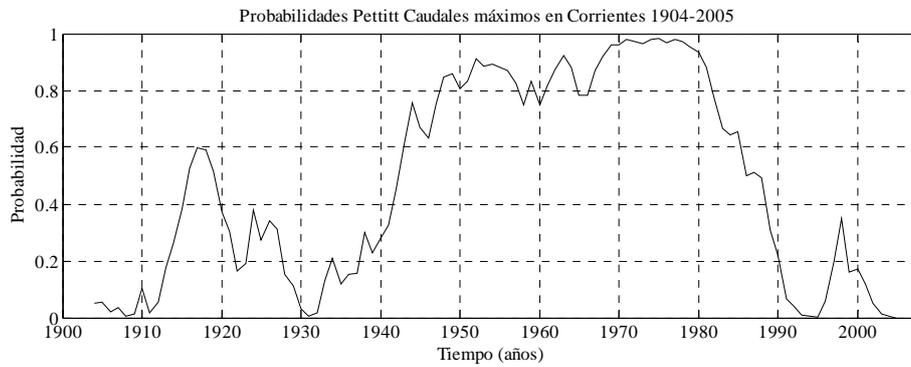


Figura N° III.30 Prueba de Pettitt en los caudales máximos diarios, río Pilcomayo. Serie total 1960-2012.

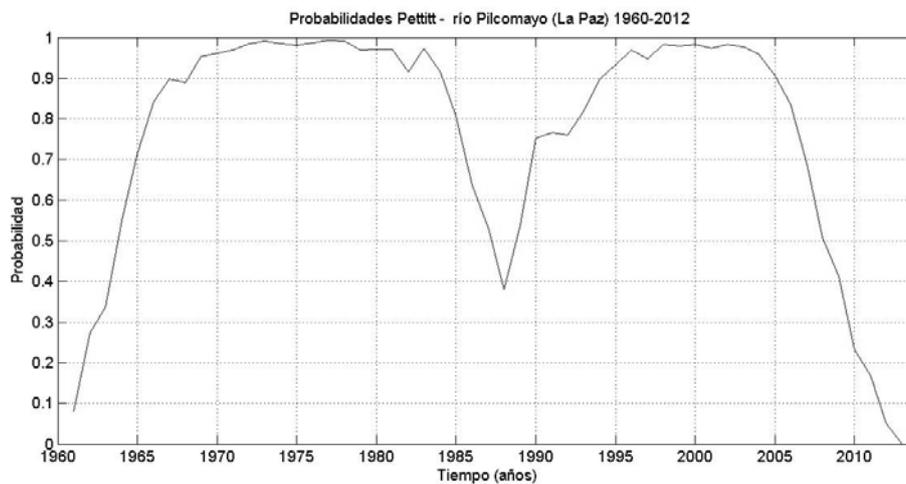
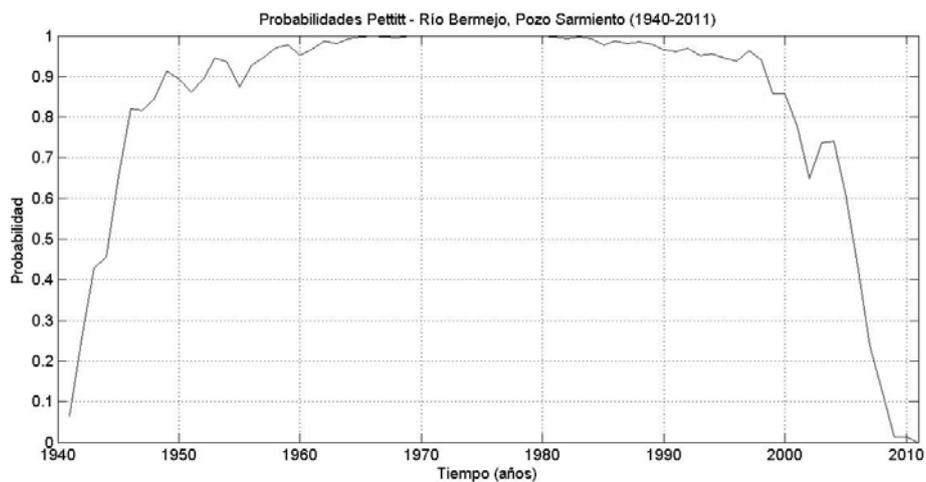


Figura N° III.31 Prueba no paramétrica de Pettitt para los caudales máximos diarios, río Bermejo. Serie total 1940-2011.



Comentario

Los resultados de la aplicación de la prueba de Mann-Kendal indican la presencia de tendencias en las cuatro series de caudales máximos diarios anuales.

Para los casos de las dos series observadas en el río Paraná (Posadas y Corrientes) la construcción de grandes obras hidráulicas podría haber influido en estos resultados. Sin embargo, distintas investigaciones indican también como los posibles orígenes las alteraciones en el clima y en distintos usos del suelo.

En el río Paraná (Posadas y Corrientes) y en las otras dos cuencas, la prueba no paramétrica de Pettitt mostró la presencia de cambios significativos durante la década de los años 70.

Este resultado coincide con los trabajos de otros investigadores (Barros, 2013) y muestra el posible interés de realizar estudios en diferentes tramos del río Paraná.

Con el nuevo método de detección de puntos de cambio múltiple se observa que los otros casos analizados, ríos Bermejo y Pilcomayo, presentan valores del valor de probabilidad más bajos.

Esta indicación de una tendencia podría ser una causa de los resultados de la prueba de Pettitt que muestran valores muy altos del valor de probabilidad $1-p$.

III.4.3 Prueba de detección de puntos de cambio múltiples

A continuación se presentan los resultados de la aplicación de una prueba del software ecp (software R)

Figura N° III.24 Gráfico detección de puntos de cambio múltiples, río Paraná Corrientes 1904-2013.

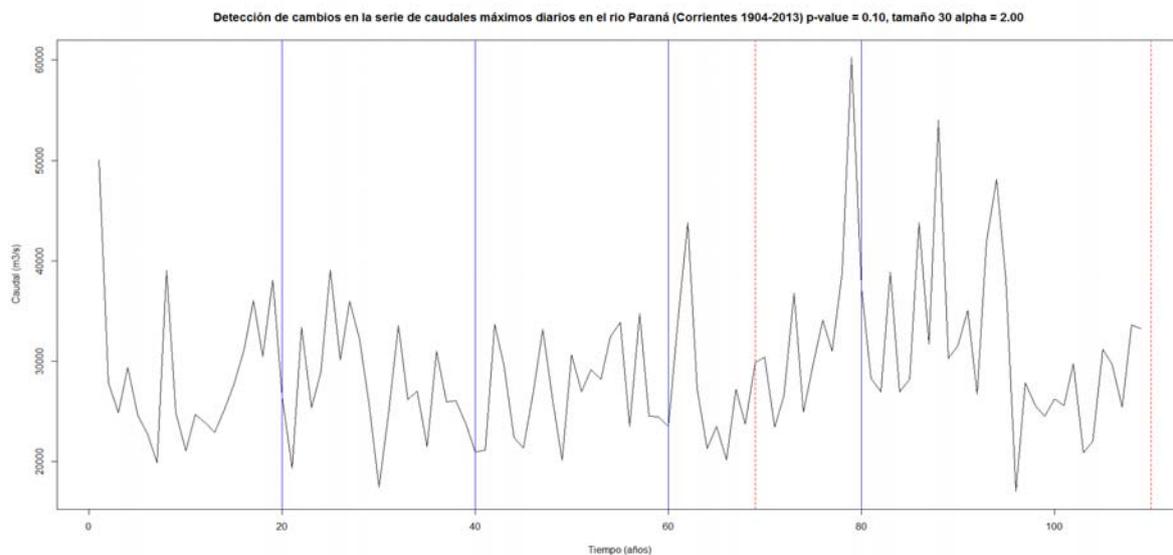


Figura N° III. 25 Gráfico detección de puntos de cambio múltiples, río Paraná Corrientes 1904-2013.

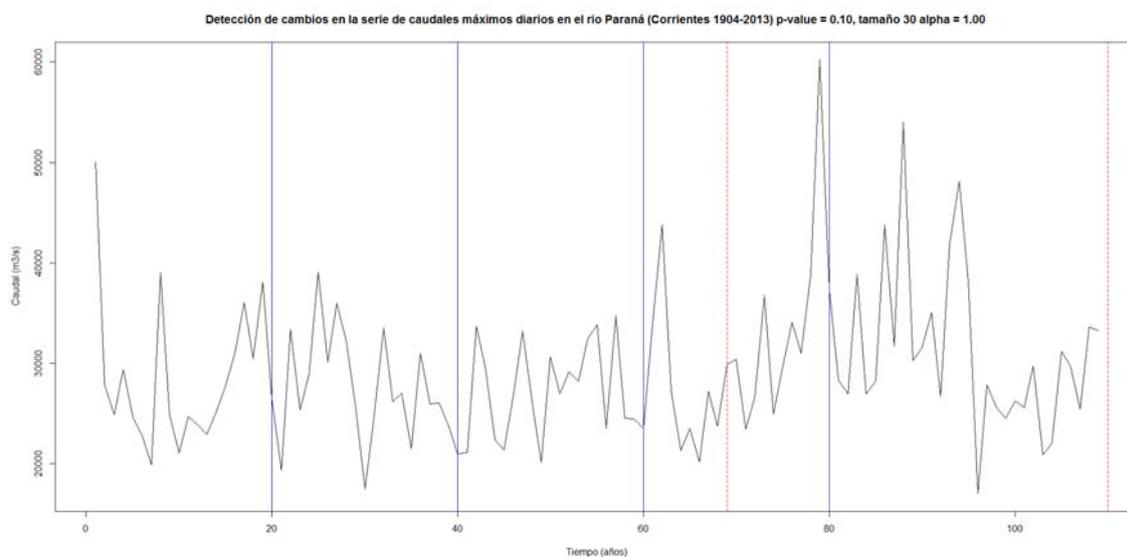


Figura N° III.26 Gráfico de detección de puntos de cambio múltiples, río Pilcomayo.

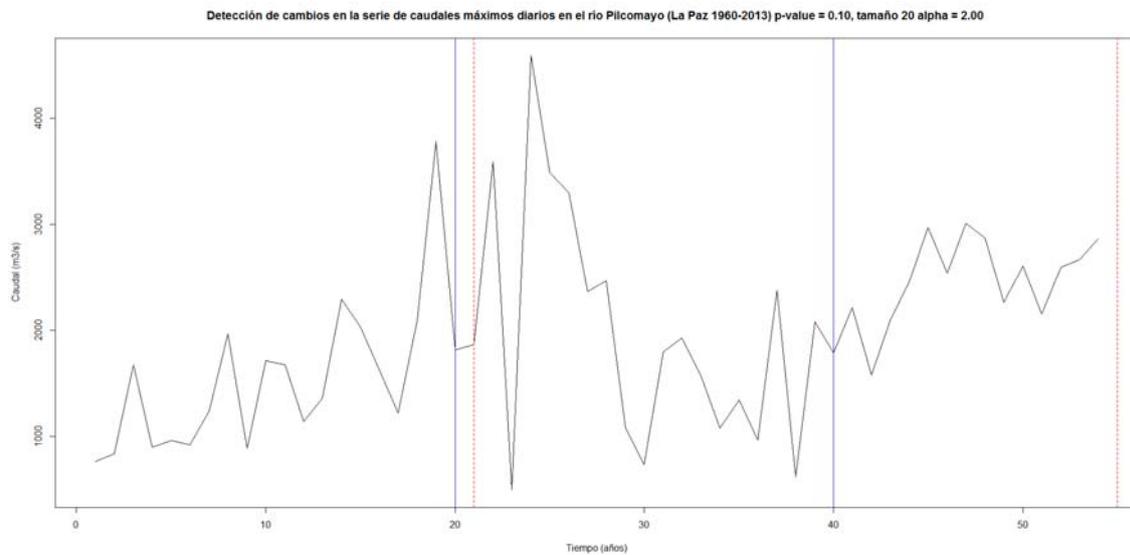
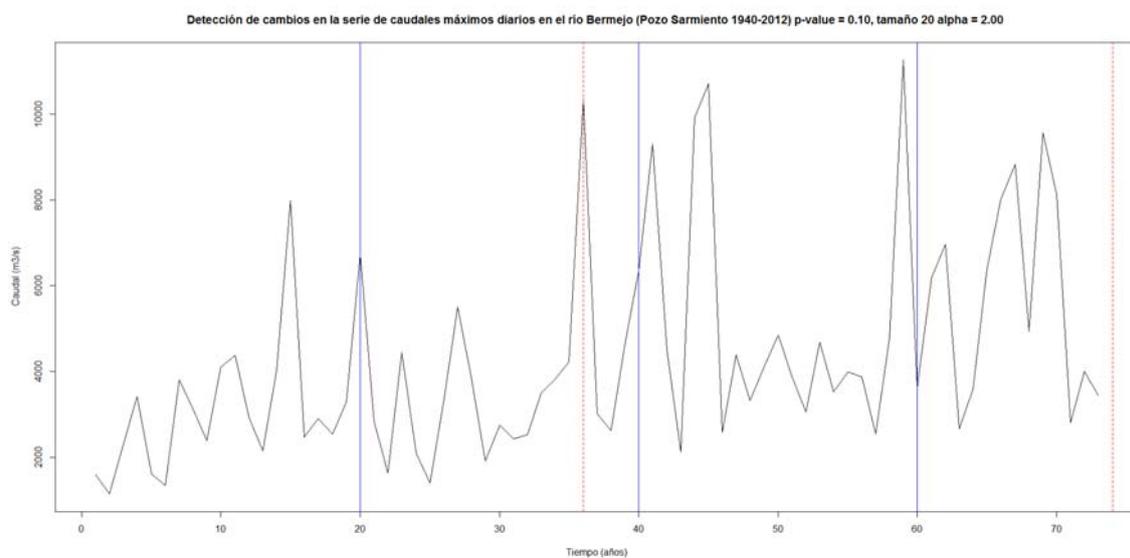


Figura N° III.27 Gráfico detección de puntos de cambio múltiples, río Bermejo.



En la Tabla N° III.18. se muestra un análisis realizado modificando dos parámetros del programa: el valor p inicial y el α . Se observa que los años detectados coinciden con las pruebas anteriores.

Tabla N° III.18. Resultados comparativo de la prueba de puntos de cambio múltiples

Río	α	Valor -p	Punto detectado valor p	Año
Neuquén	2.0	0.10	69 (0.077)	1972
2	1.0	0.10	0.115	1972
3	2.0	0.20	69 (0.087)	1972
Corrientes 1	2.0	0.10	69(0.020)	1971
2	1.0	0.10	69(0.025)	1971
Bermejo Pozo Sarmiento	2.0	0.10	36 (0.00166)	1976
Pilcomayo La Paz	2.0	0.10	21 (0.06833)	1980

III.4.3.1 Series temporales de indicadores de la variabilidad climática natural

En este párrafo se presentan los resultados de aplicar la prueba de Pettitt y la de detección múltiple a las series del Índice de Oscilación del Sur, Oscilación Décadal del Pacífico (PDO) para diferentes parámetros.

Figura N° III.28 Prueba no paramétrica de Pettitt para la serie temporal media a nivel anual del Índice de Oscilación del Sur. 1900-2014.

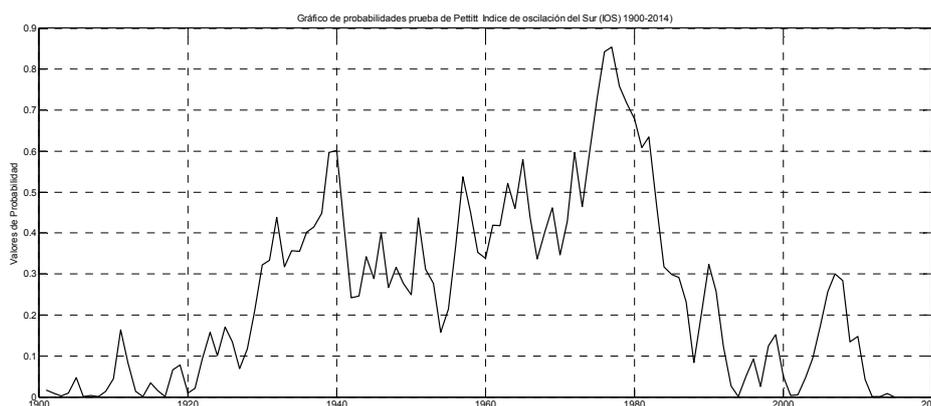


Figura N° III.29 Gráfico detección de puntos de cambio múltiples de la serie temporal media a nivel anual del Índice de la Oscilación del Sur. 1900-2014.

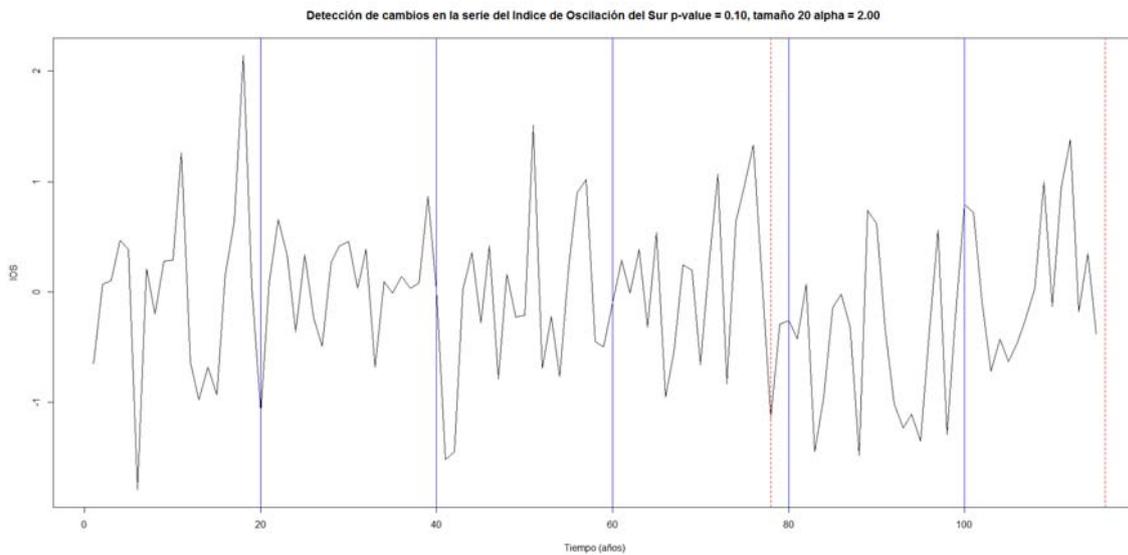


Figura N° III. 30 Prueba no paramétrica de Pettitt para la serie temporal media a nivel anual de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) .1900-2014.

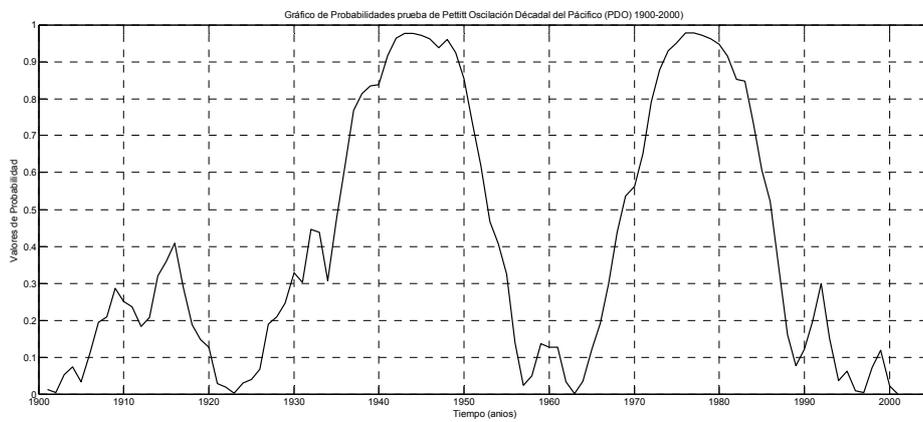


Figura N° III.31 Gráfico detección de puntos de cambio múltiples de la serie temporal media a nivel anual de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). 1900-2014.

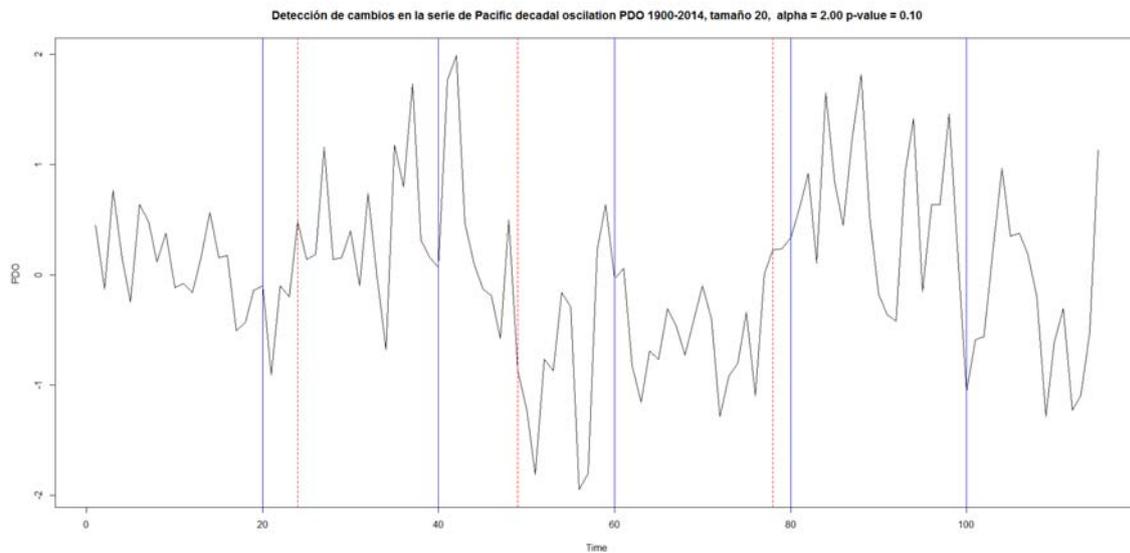


Figura N° III.32 Gráfico detección de puntos de cambio múltiples de la serie temporal de media a nivel anual de la Oscilación Decadal del Pacífico . 1900-2014.

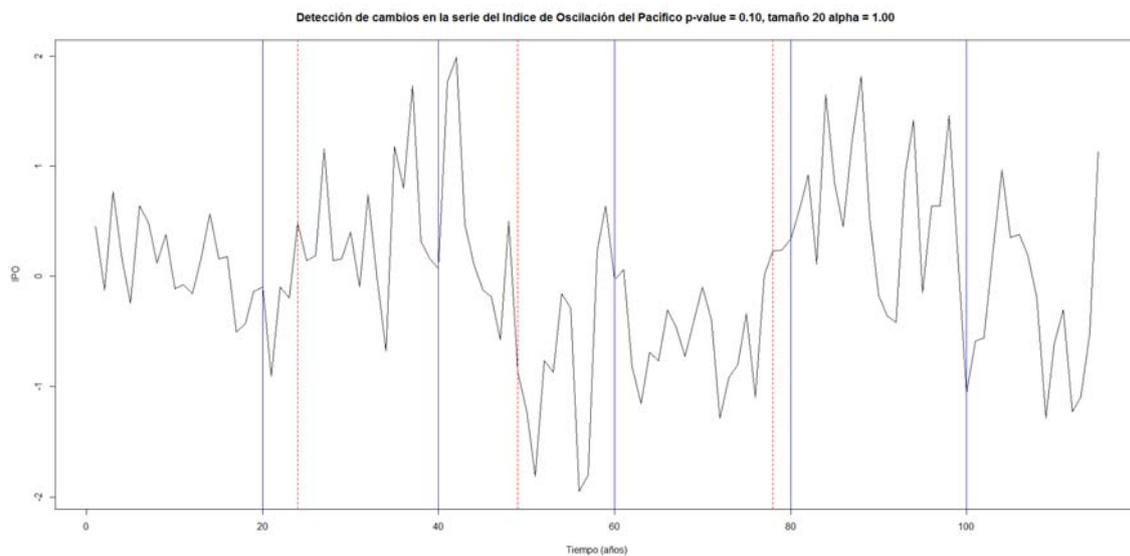


Tabla N° III.19. Resultados comparativo de la prueba de puntos de cambio múltiples

Indicador	α	Valor p	Tamaño	Punto detectado valor p	Año
Índice de Oscilación del Sur	2.0	0.10	30	78 (0.0711)	1972
Oscilación Décadal del Pacífico (PDO)	2.0	0.10	20	(0.0011) (0.00111) (0.03777)	1924 1949 1978

Comentario

El método de detección múltiple identifica para la serie temporal media a nivel anual de la Oscilación Décadal del Pacífico un primer punto, año 1924, que la prueba no paramétrica de Pettitt no había detectado.

Este resultado, con un valor p de 0.0011, es un ejemplo de la importancia de utilizar pruebas estadísticas consistentes con la posibilidad de que la serie temporal presente más de un punto de cambio y que alguno no sea identificado por los métodos clásicos.

III.4.3.2. Discusión de resultados

El problema de la identificación de puntos de cambios en series hidrológicas se puede enmarcar en un caso estudio más general: *puntos de cambios múltiples*. Este enfoque explica mejor los resultados de distintos estudios de series geofísicas donde se observó que existían más de un punto de cambio asociados con la variabilidad climática natural.

Un ejemplo es la identificación de un primer punto de cambio detectado en la serie temporal de la Oscilación Décadal del Pacífico (PDO). Este primer punto de cambio, año 1924, no había sido detectado con la aplicación de la prueba no paramétrica de Pettitt, que es un estándar de detección utilizado en numerosos estudios de los efectos del cambio climático global sobre variables hidrológicas.

La selección de las pruebas de detección de puntos de cambio más adecuadas a las características de las series hidrológicas presenta distintos problemas. Entre ellos se pueden mencionar: la existencia de más de un punto de cambio, la presencia de autocorrelación de corto y largo plazo que alteran la potencia de la prueba. Ejemplo de las soluciones desarrolladas para el segundo problema son los trabajos de Hamed y Rao.

Fealy y Swweney (2005) estudian la relación entre la variabilidad atmosférica, en el Atlántico Norte y con los glaciares en Noruega. Estos investigadores detectan varios

puntos de cambio con valores de la probabilidad de la prueba de Pettitt ligeramente menores a los estimados en este Capítulo. El año 1980 se identifica con una probabilidad de 0.87 y el segundo con probabilidad de 0.86.

Labat *et al.* (2005) indican que se observó en una escala de tiempo de 20 años alrededor del año 1970, más importante en los caudales de las cuencas de los ríos Amazonas y Paraná y un cambio de 30 años entre 1940 y 1970.

Un resultado que permite comprender mejor el origen de los cambios en las series hidrológicas fue la identificación obtenida con la prueba del algoritmo jerárquico que utiliza el programa ecp. Se consiguió detectar más puntos de cambio en la serie geofísica analizada, Oscilación Décadal del Pacífico que los identificados con la prueba de Pettitt.

La búsqueda utilizando pruebas de detección de puntos múltiple podría conducir encontrar numerosos valores y posiblemente sin una causa común. Los casos estudiados muestran un resultado diferente: se relacionó los puntos de cambio con una causa climática para dos sistemas hidrológicos y que son habitualmente asociados con causas climáticas.

III.5 Conclusiones

En este capítulo se estudiaron casos reales registrados en las cuencas seleccionadas donde el problema de la detección de puntos de cambios en series de caudales máximos medios anuales tiene una influencia directa en los parámetros de diseño de obras de Ingeniería.

El problema se estudió ubicando el núcleo de la investigación en las relaciones entre el cambio en los indicadores de la variabilidad climática natural y los caudales máximos que es la variable hidrológica utilizada en Ingeniería.

La idea considera la hipótesis que el origen del cambio en la serie hidrológica está relacionado con la variabilidad climática natural y es necesario aplicar métodos de detección de puntos de cambio múltiples. Dado que en numerosas series geofísicas de indicadores de variabilidad climática natural pueden existir varios puntos de cambio.

Este enfoque mostró la posibilidad de relacionar los resultados del análisis estadístico con una interpretación del origen vinculando el clima y sus variaciones. Para los sistemas se ha considerado de una menor significación las alteraciones de origen antropogénico y entonces es lógico pensar en aplicar técnicas que permitan encontrar puntos de cambio múltiples en la respuesta dado que el fenómeno climático presenta esas características.

Para los dos sistemas analizados, el conocimiento de cambios en la variabilidad climática natural se consideró *como una información 'a priori'* se aplicó la prueba de la razón de verosimilitudes que mostró resultados que indican una posible separación de la serie de caudales máximos en dos periodos (anterior y posterior a la década de los 70).

Otro resultado mostró la relación entre la ocurrencia de periodos diferentes del PDO y la significación del segundo, entre los años 1970-1996, sobre los caudales máximos diarios del río Neuquén.

En este, la ocurrencia del hidrograma de crecidas observado durante el año 2006, demostró la necesidad de estudiar las nuevas condiciones meteorológicas y orientó la decisión de realizar una nueva estimación de la crecida máxima probable para definir un embalse de control de crecidas e hidroelectricidad, ubicada aguas arriba de las obras construidas durante la década de los años 70.

Para los dos casos de análisis, las pruebas no paramétricas (Mann Kendall y Pettitt) identificaron un cambio a partir de la década de los años 70. Se debe señalar que la prueba de Pettitt fue diseñada para la identificación de un único punto de cambio y por lo tanto resulta conveniente complementar su aplicación con otros tests que permitan resolver el problema del caso múltiple.

El modelo de regresión Gamma permitió estudiar, con una estimación robusta, la posibilidad de identificar la presencia de pendiente en la serie de los caudales máximos anuales a partir de la década de los años 70. Se observó resultados que indican un mejor ajuste de sus residuos al compararlos con los otros dos modelos de regresión aplicados en la bibliografía (lineal y logarítmica).

Los casos analizados, Neuquén y Paraná, son muy diferentes por la escala areal y los niveles de utilización del recurso agua, pero comparten ciertas características como son las observaciones de los caudales que comenzaron a principios del siglo XX y permiten contar en la actualidad con series de caudales extensas y la ocurrencia de crecidas severas observadas a partir e la década de los años 70.

Los análisis estadísticos realizados corroboran la hipótesis que durante la década de los años 70 se produjo un cambio significativo en las características de los caudales de ambas cuencas y muestran la importancia de la actualización de los parámetros de diseño iniciales que fueron estimados con modelos probabilísticos clásicos.

El río Paraná, que tiene una cuenca de escala continental, presenta un sistema de una mayor complejidad y se mostró la necesidad de estudiar la presencia de cambios dada las obras construidas y las proyectadas.

Los casos más interesantes son las series del río Paraná (Posadas y Corrientes) que indican la presencia de un punto de cambio en la media en el año 1971. La serie observada en el río Pilcomayo, aplicando la prueba de Pettitt y el programa *ecp* señalan la presencia de dos puntos de cambio en su media (1976 y 1997).

Los más recientes trabajos publicados muestran un consenso amplio en la necesidad de desarrollar estudios para evaluar el posible impacto del cambio climático global, de origen antropogénico, en la evaluación, control y planificación del escurrimiento.

La aplicación de pruebas estadísticas para la detección de puntos de cambio múltiples es un método adecuado, cuando se cuenta con series hidrológicas extensas, y representa un claro avance para un análisis conjunto de indicadores de la variabilidad climática y los caudales máximos.

En las cuencas, coexisten obras hidráulicas diseñadas con datos observados en diferentes periodos de observaciones hidrológicas y con distintas características estadísticas. Esta situación conduce a que las relaciones caudal máximo medio anual-periodo de retorno que se aplicaron a lo largo de una centuria puedan contener estimaciones de distinto nivel de riesgo y que en la actualidad podrían resultar diferentes a las estimadas con las series originales (datos escasos o en una fase baja).

Los resultados muestran variaciones en los caudales máximos estimados para dos periodos temporales que son importantes desde la visión de la ingeniería civil que y deberían ser considerados al evaluar los parámetros de diseño y la seguridad de obras ya hidráulicas construidas y con información observada a principios del siglo XX.

FUENTES DE INFORMACION

NAO: http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Data/nao.long.data
SOI: http://www.esrl.noaa.gov/psd/gcos_wgsp/Timeseries/Data/soi.long.data
PDO: <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>

CAPÍTULO IV

ESTIMACION DE CAUDALES MEDIOS ANUALES Y ESCENARIOS DEL CAMBIO CLIMATICO GLOBAL

IV.1 Introducción y objetivos

El objetivo de este capítulo consiste en presentar los resultados de un análisis realizado con la aplicación de un modelo matemático para estimar cambios del escurrimiento medio en cuencas de la Patagonia de Argentina.

La importancia de estudiar los efectos del cambio climático global sobre los caudales está relacionada con distintos usos del agua en una cuenca y con los problemas de Ingeniería que se deben resolver con escenarios hidrológicos futuros.

El análisis de los efectos del cambio climático global sobre los recursos hídricos plantea claramente la importancia de obtener resultados confiables dado que serán utilizados en la solución de problemas de Ingeniería aplicando series hidrológicas de valores medios y extremos.

Estudios realizados en distintos climas y cuencas muestran la importancia de la aplicación de pruebas de detección de tendencias y de modelos matemáticos para el análisis de los efectos del cambio climático sobre variables hidrológicas.

La idea central de este estudio consiste en evaluar el efecto que la utilización de distintas escalas de resolución espacial de la precipitación media areal tiene sobre las estimaciones del escurrimiento medio.

El análisis para diferentes escenarios se realizó con la modelación de cuencas (ríos Limay y Neuquén) y se evaluó las diferencias de las estimaciones de los caudales medios anuales en cuencas hidrológicas ubicadas en zonas montañosas.

Los experimentos realizados consisten en aplicar escenarios con un forzante (precipitación) para evaluar los efectos del cambio climático global sobre el escurrimiento en distintas escalas temporales de una cuenca hidrológica.

Se comparan los resultados con escenarios estimados con modelos de distinta resolución espacial. Los campos de precipitación fueron estimados con el modelo climático regional MM5/CIMA de alta resolución que se anidó en resultados del modelo climático global de baja resolución HadCM3 para el área de las cuatro cuencas.

Esta información de entrada permite utilizar un modelo de regresión para representar la relación precipitación anual media-caudal anual medio y se modifican las precipitaciones para estudiar los cambios en la respuesta de escurrimiento medio.

El análisis utilizó las precipitaciones medias areales estimadas con los escenarios climáticos obtenidos del modelo de alta resolución PRECIS para los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (A2 y B2) para estimar los caudales medios anuales para los siguientes años: 2020, 2030, 2050 y 2070.

Estos resultados permiten estimar una evolución futura de las condiciones hidrológicas medias de una región muy extensa y permiten estudiar el comportamiento de la infraestructura de obras hidráulicas para un futuro cercano (año 2030) y uno más lejano (año 2070).

IV.2 Revisión bibliográfica

En el marco del cambio climático global y sus aplicaciones a Hidrología se deben realizar análisis de las respuestas de cuencas que estén asociados con la modelación de las variables de entrada al sistema e implicó el desarrollo de una asociación con los modelos matemáticos de los distintos componentes del ciclo hidrológico.

En consecuencia, la evaluación del efecto de cambios en las variables de entrada, por ejemplo: precipitación y la temperatura, implica dos etapas. La primera consiste en definir un modelo de transformación para estimar el escurrimiento y en la segunda se modifican las variables de entrada para las condiciones futuras del clima representadas por modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG).

Se puede señalar que existen dos temas importantes en la modelación: la escala areal y la temporal. La modelación en escala áreal puede ser: continental, regional, a nivel cuenca. Esta última es más compleja y dependerá de las posibilidades de la información básica disponible.

En los estudios hidrológicos, las escalas temporales de uso más frecuente son: la diaria, la mensual, la anual y la media de un periodo. En este capítulo se estudió una caracterización en escala media anual.

La revisión bibliográfica muestra que los trabajos de distintos autores entendieron la importancia de comprender los cambios en la respuesta hidrológica desde principios de la década de los años ochenta.

Nemec y Schaake (1982) aplican un modelo determinístico complejo de humedad de suelo (National Weather Service) para estudiar la sensibilidad de sistemas hidrológicos ante variaciones climáticas. Se analizaron los efectos de modificaciones en la precipitación y en la temperatura para las cuencas de los ríos: Pease (9034 km²) y Leaf (1949 km²) con una precipitación media de 540 y 1314 mm, respectivamente. El análisis

utilizó escenarios asociados a una variación del clima representada por un intervalo de: -25 a +25 % para la precipitación y de 1° a 3° C para la temperatura.

Wigley y Jones (1985) proponen una expresión para una primera estimación de los cambios del escurrimiento medio anual cuyo coeficiente de esorrentía es conocido. La expresión fue aplicada para evaluar los efectos del cambio climático en cuencas ubicadas en distintas regiones del mundo. En el trabajo se presentan los coeficientes de esorrentía para importantes ríos y se observa la amplitud de su variación. Así, el límite inferior de los coeficientes estimados corresponde al río Murray (0.04) y los valores mayores fueron observados para los ríos Yangtze (0.50) y Brahmaputra (0.65). Se incluyen dos casos de América del Sur: el río Paraná con un coeficiente de 0.20 y el Amazonas con 0.47.

McCabe y Ayers (1989) proponen la utilización del modelo de balance de Thornthwaite para evaluar el efecto que modificaciones seleccionadas de precipitación de -20 a 20 % y temperaturas de 2° y 4° C tienen sobre la humedad del suelo y los caudales en la cuenca del río Delaware (12765 mi²). En este trabajo se estudió los efectos de cambios en la precipitación sobre los caudales, la recarga del agua subterránea y la frecuencia de ocurrencia de caudales extremos.

Arnell (1992) estudia los efectos que modificaciones en las series de precipitación y temperatura tienen en la estimación de las variaciones del escurrimiento. Un resultado interesante fue conocer la alta variabilidad entre las estimaciones del escurrimiento definidas por los distintos métodos y modelos. Los resultados muestran las posibilidades de aplicar los primeros para evaluaciones preliminares o análisis de sensibilidad y los segundos para obtener estimaciones de mayor precisión.

Valdés *et al.* (1994) aplican un modelo analítico de balance de humedad asociado con un generador de variables hidrometeorológicas para la evaluación numérica de la variabilidad de la humedad del suelo y el escurrimiento ante distintos escenarios de variación en la temperatura y en la precipitación. Los escenarios para la precipitación son de -20 a 20 % y para la temperatura de 2° a 4° C.

Arnell (1995) indica que existen distintas formas de definir los escenarios necesarios para estudiar los efectos del cambio climático sobre las componentes del ciclo hidrológico. Una de las principales consiste en simular el sistema hidrológico con escenarios arbitrarios aplicando modelos matemáticos de distinta complejidad y resolución temporal. Este esquema permite estudiar los efectos que los cambios climáticos tienen sobre la forma de los hidrogramas, indicadores de la calidad de agua y variables biológicas.

Labraga (1997) discute los resultados de simulaciones realizadas con distintos modelos de circulación general. Los resultados más importantes para el análisis de los efectos hidrológicos del cambio climático son los referidos a la precipitación media y a la temperatura en escala anual y estacional.

Sankarasubramanian *et al.* (2001), en escala temporal anual, estudian procesos de transformación precipitación-caudal y estiman la elasticidad del escurrimiento superficial medio en los Estados Unidos. Se presenta un modelo de regresión que considera al caudal medio anual como variable dependiente y como variables independientes la precipitación y la evapotranspiración potencial.

En el marco de esta Tesis el trabajo de Sankarasubramanian *et al.* (2001) resulta útil para definir la estructura del modelo matemático y cumplir con el objetivo de contar con una técnica adecuada para la escala de planificación de cuencas que es la anual.

En las cuencas ubicadas en la Patagonia, las características del régimen de precipitación fuertemente orográfica y los campos definidos con escasa información simultánea implica el desarrollo de un modelo de transformación con la estructura del trabajo citado.

Los Modelos Climáticos Globales (GCMs "*Global Climate Models*") representan el sistema climático en tres dimensiones utilizando ecuaciones que describen el movimiento de la energía (primera ley de la termodinámica) y el momento (segunda de Newton ley del movimiento), junto con la conservación de la masa (ecuación de continuidad) y vapor de agua (ley de gas ideal). La resolución horizontal de estos modelos se ubica entre los *100 y los 400 km*.

Las distintas componentes del sistema climático tienen escalas mucho más finas y esta característica implica la simplificación de los efectos de los procesos a pequeña escala en una respuesta a gran escala para todos los Modelos Climáticos Globales.

En estos MCG la representación de las nubes en GCMs es un desafío, debido a su papel en el balance de energía y las reacciones que surgen de un aumento de la humedad del aire con el calentamiento global.

Los Modelos Climáticos Regionales (MCR) o RCM (*Regional Climate Models*) simulan las características climáticas de forma dinámica en las resoluciones de *10 a 50 km* dadas las condiciones atmosféricas variables en el tiempo en el límite de un dominio especificado.

Los campos de variables atmosféricas simuladas por un MCG (por ejemplo: la presión, el viento o la temperatura) se introducen en los límites del MCR en diferentes niveles

horizontales y verticales. Esta información es luego procesada por el MCR para que la física y la dinámica del modelo interno puede generar modelos de cambio climático, que sean distintos a los del MCG "inicial".

La asociación (o anidación) del MCR en el MCG es muestra que el comportamiento de la MCR no puede influir en el escenario MCG. En la actualidad los MCR se utilizan para una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo predicción numérica del tiempo y las evaluaciones del cambio en el clima futuro para regiones seleccionadas del mundo.

Una ventaja clave de MCR es su capacidad para modelar respuestas regionales del clima a los cambios en la cobertura terrestre o la química atmosférica en formas físicamente consistentes.

Una mayor resolución espacial y, por tanto, una mejor representación de las elevaciones de la superficie permiten a los MCR resolver importantes procesos atmosféricos (como la precipitación orográfica o las interacciones con los cuerpos de agua) mejor que el MCG inicial.

Los MCR son computacionalmente exigentes y las proyecciones para eventos de precipitación extrema pueden diferir entre los distintos modelos debido a los esquemas de parametrización utilizados para representar procesos como la ocurrencia de precipitaciones convectivas.

Los modelos como el RegCM3 y el PRECIS están facilitando un uso más generalizado de los MCR en el estudio de la vulnerabilidad y adaptación del clima. Sin embargo, todavía hay una de los estudios publicados de reducción de escala para las regiones en desarrollo.

Es importante recordar que: *'un escenario de cambio climático es una descripción espacial y temporal, físicamente consistente, de rangos plausibles de las condiciones climáticas futuras, basadas en un cierto número de suposiciones y en la actual comprensión alcanzada por nuestro sistema científico.'* Labraga (1998).

Vera *et al.* (2006) señalan: *"la capacidad de los modelos IPCC-AR4 para reproducir los campos de la precipitación estacional media sobre Sudamérica muestra que estos aún tienen problemas en la representación cuantitativamente estacional precisa de la precipitación en las principales cuencas del continente (es decir, el Cuencas del Amazonas y La Plata), que debería impedir el uso de estos modelos para aplicaciones hidrológicas. Cerca de los Andes, la baja resolución del modelo de la orografía parece para afectar a la ubicación y la intensidad de la precipitación. Downscaling técnicas podría mejorar las simulaciones sobre esas regiones. "*

Estos conceptos indican el interés de explorar las posibilidades de aplicación real de los campos de precipitación simulados y utilizar un modelo de regresión para estimar los caudales medios anuales asociados y contrastarlos con las series de caudales anuales observadas.

Los escenarios de las variables precipitación y temperatura, estimados con el modelo MM5/CIMA, Nuñez y Solman (2006), también justifican el desarrollo de un modelo matemático que relacione escurrimientos con precipitaciones medias areales ya que los cambios predichos en las temperaturas para la región son menos relevantes que los definidos en los campos de la precipitación.

Este es un tema importante para el caso seleccionado de las cuencas de la Patagonia que presentan su mayor fuente de alimentación en la zona cercana a la cordillera de los Andes que presentan un fuerte cambio en las precipitaciones de dirección Este -Oeste.

En particular, en la región de los Andes argentino-chilenos, los modelos de circulación general tienden a desplazar los campos de circulación y de precipitación hacia el oeste del lado argentino y aunque ello se atenúa con el uso de los modelos de alta resolución (40 km)

Los antecedentes bibliográficos, la información hidrológica y meteorológica disponible para representar los procesos hidrológicos en una región tan extensa explican el criterio de la selección *de un modelo estadístico simplificado* que considere solamente la precipitación como variable independiente.

En resumen, la selección de la estructura del modelo se justifica por las siguientes causas:

a) la escasa cantidad de información completa de precipitación, temperatura y caudales que no permite definir modelos de mayor complejidad matemática para una región tan extensa;

b) los campos de precipitación y temperatura definidos por los escenarios estimados por los modelos de circulación general son de escaso detalle para determinar la entrada de modelos de transformación precipitación-caudal más complejos;

c) el análisis de los campos de precipitación y de temperatura, estimados con otros modelos (por ejemplo: HADCM3 y MM5/CIMA) indican que la principal variable para la simulación es la precipitación que presenta cambios más importantes que los observados en los campos de temperatura.

IV.3 Metodología

La metodología consiste en analizar la presencia de tendencias en los caudales medios anuales y utilizar un modelo de regresión. Este modelo utiliza como variable de entrada la precipitación media anual para estimar el escurrimiento superficial.

En la región la información pluviométrica es más completa que la termométrica y por lo tanto los escenarios analizados de cambio climático global corresponden a variaciones de la precipitación.

El método consiste en estimar los parámetros del modelo y validarlo. Luego, se modifica la variable de entrada para los escenarios de cambio climático seleccionados y se realiza un estudio de sensibilidad del caudal a las variaciones de la variable de entrada.

Estos caudales medios anuales serán una primera aproximación a la estimación del impacto de los escenarios de cambios futuros sobre el escurrimiento medio en cuencas patagónicas de Argentina.

Para estudiar los cambios en el escurrimiento debidos a las variaciones en las precipitaciones anuales se realizaron las siguientes etapas:

a) Solución de cuencas separadas

1) Estimación de precipitaciones con el modelo PRECIS, para el periodo actual y para los "años de corte": 2020, 2030, 2050, 2070.

2) Estimación de los parámetros de un modelo de regresión para las cuencas de los ríos Limay y Neuquén.

3) Aplicación de un modelo de regresión para las cuencas de los ríos Limay y Neuquén y estimación de los cambios del caudal medio en función de los cambios en las precipitaciones según los escenarios.

b) Solución de cuencas agregadas

1) Estimación de las precipitaciones totales anuales para las cuencas de los ríos Colorado (área 15300 km², Buta Ranquil), Neuquén (área 30843 km², Paso de los Indios), Limay (área 26400 km², Paso Limay) y Chubut (área 16400 km², Los Altares). La superficie total considerada es de 88943 km². Período 1974-1996.

2) Estimación del caudal asociado para los cuatro ríos considerados obtenido por suma de sus caudales medios anuales para el mismo período de análisis que las precipitaciones (1974 a 1996).

3) Estimación del modelo de regresión que relaciona la variable dependiente (caudal medio anual) y la variable independiente (precipitación anual).

4) Estimación de las tendencias en series de caudales para los ríos analizados.

IV.4 Datos utilizados

La información básica para el análisis son los caudales observados para el área considerada que fueron obtenidos para cada cuenca (Neuquén y Limay) de la región y para el mismo período de análisis que las precipitaciones.

El caudal asociado al área considerada fue obtenido para cada cuenca para los dos ríos (Neuquén y Limay) y para el mismo período de análisis que las precipitaciones observadas. Estos valores fueron calculados considerando el año hidrológico abril-marzo, ya que éste es el correspondiente a los ríos analizados y los estadísticos; Tabla N° IV.1.

Tabla N° IV.1 Estadísticos del caudal medio anual (1960-1990).

Variable	Neuquén Caudal (m ³ /s)	Limay Caudal (m ³ /s)
Media	302.2	689.0
Desvío estándar	106.5	153.7
Mínimo	82.6	398.3
Máximo	583.6	898.4

IV.5 Resultados

IV.5.1 Detección del cambio climático usando registros históricos

La detección de cambios en los caudales se realizó aplicando una prueba descrita en el capítulo III para los valores anuales y extremos (mínimos y máximos). La hipótesis nula (sin cambios) fue rechazada en los caudales mínimos que son valores asociados con la fusión nival.

Por ejemplo, para el río Limay, la hipótesis nula fue rechazada en enero-abril. Se obtuvieron resultados similares para ambos ríos. La prueba fue corregida con la propuesta del trabajo de Hamed & Rao (1998).

Tabla N° IV.2 Prueba de Mann-Kendall en los ríos Neuquén y Limay.

	Z	Valor p	Valor p *	Resultado		Pendiente (m ³ /s año)
(a) Neuquén						
Mínimos	-2.53	0.011	0.064	Rechaza	H ₀	-0.15
Medios	0.04	0.968		No se rechaza	H ₀	0.02
Máximos	1.66	0.097		No se rechaza	H ₀	6.01
(b) Limay						
Mínimos	-6.95	<0.001	<0.001	Rechaza	H ₀	-1.78
Medios	-2.08	0.037	0.009	No se rechaza	H ₀	-1.63
Máximos	-0.70	0.484		No se rechaza	H ₀	-3.36

*valor p * datos corregidos por la autocorrelación con Hamed y Rao (1998) .*

IV.5.2 Escenarios climáticos e incertidumbre

Con el objetivo de contar con información sobre la variabilidad entre los resultados de distintos modelos se ha aplicado el MAGICC-SCENGEN para definir escenarios de cambio en la precipitación y la temperatura; Wigley *et al.* (2000).

El software se utilizó para obtener los escenarios de la precipitación y temperatura para la región identificando dos partes: (a) 35-40°S; 70-75°W y (b) 40-45°S; 70-75°W, que cubre la región de las cuencas patagónicas.

Las Tablas N ° IV.3 y IV.4, presentan los escenarios de la temperatura y precipitación, bajo el escenario de emisiones IS92a, durante tres escenarios climáticos (1.5, 2,5 y 4.5 ° C), para la región 35-40°S; 70-75°W. Para la región 70-75°W se obtuvieron resultados similares.

Tabla N ° IV.3. Escenarios estimados de temperatura (°C). Zona 35–40°S; 70–75°W.

Modelo	Año 2050			Año 2100		
	Bajo	Promedio	Alto	Bajo	Promedio	Alto
HAD CM2	0.7	1.0	1.4	1.2	1.8	2.6
UKTR	0.8	1.1	1.6	1.4	2.0	2.9
CSIRO-TR	0.8	1.1	1.6	1.4	2.0	2.9
ECHAM4	0.8	0.8	1.1	1.0	1.4	2.1
UKHI-EQ	1.0	1.5	2.1	1.9	2.8	4.0
CSIRO2-EQ	0.8	1.1	1.6	1.4	2.1	3.0
ECHAM3	0.7	1.0	1.4	1.2	1.8	2.5
UIUC-EQ	0.8	1.1	1.6	1.4	2.1	3.0
ECHAM1	1.1	1.6	2.2	2.0	2.9	4.2
CSIRO1-EQ	0.8	1.2	1.7	1.5	2.2	3.2
CCC-EQ	0.9	1.2	1.8	1.6	2.3	3.3
GFDL-TR	1.0	1.4	2.0	1.8	2.6	3.8
BMRC-EQ	0.9	1.2	1.7	1.5	2.3	3.3
CGCM1-TR	0.7	1.1	1.5	1.3	2.0	2.8
NCAR-DOE	0.8	1.2	1.7	1.5	2.2	3.1
CCSR-NIES	0.6	0.8	1.2	1.0	1.5	2.2

La Tabla N ° IV.3., muestra los resultados de los modelos que indican un aumento de la temperatura para la región. Para el caso de la alta sensibilidad del clima, se observa un aumento de la temperatura de entre 2.0 y 4.2 ° C para el año 2100.

La Tabla N ° IV.4 presenta los resultados de los escenarios de precipitación y no son tan coherentes, ya que cinco modelos predicen un aumento y diez modelos predijeron una disminución de la precipitación en la región.

Estos resultados muestran la amplia incertidumbre de los resultados de los modelos y la significación de contar con estimaciones confiables para esta región.

Tabla N ° IV.4. Escenarios estimados de precipitación (%). Zona 35–40°S; 70–75°W.

Modelo	Año 2050			Año 2100		
	Bajo	Promedio	Alto	Bajo	Promedio	Alto
HAD CM2	-8.6	-12.4	-17.4	-15.5	-22.7	-32.7
UKTR	0.6	0.9	1.2	1.1	1.6	2.3
CSIRO-TR	-2.7	-3.9	-5.6	-4.9	-7.2	-10.4
ECHAM4	-8.8	-12.7	-17.9	-15.8	-21.5	-33.5
UKHI-EQ	-1.1	-1.6	-2.2	-2.0	-2.9	-4.2
CSIRO2-EQ	2.2	3.2	4.5	4.0	5.8	8.4
ECHAM3	-6.7	-9.6	-13.5	-12.0	-17.6	-25.4
UIUC-EQ	-2.6	-3.7	-5.2	-4.6	-6.8	-9.8
ECHAM1	-7.4	-10.6	-14.9	-13.2	-19.4	-28.0
CSIRO1-EQ	2.5	3.6	5.1	4.5	6.6	9.5
CCC-EQ	-3.1	-4.4	-6.6	-5.6	-8.2	-11.8
GFDL-TR	-1.2	-1.8	-2.5	-2.2	-3.3	-4.7
BMRC-EQ	2.9	4.2	5.9	5.3	7.7	11.1
CGCM1-TR	4.3	6.2	8.8	7.8	11.4	16.5
NCAR-DOE	-1.6	-2.4	-3.3	-3.0	-4.3	-6.3
CCSR-NIES	-3.8	-5.4	-7.7	-6.8	-10.0	-14.4

Para la zona en estudio, los resultados de las tablas anteriores muestran, para la mayoría de los modelos, una posible disminución de las precipitaciones y un aumento de las temperaturas.

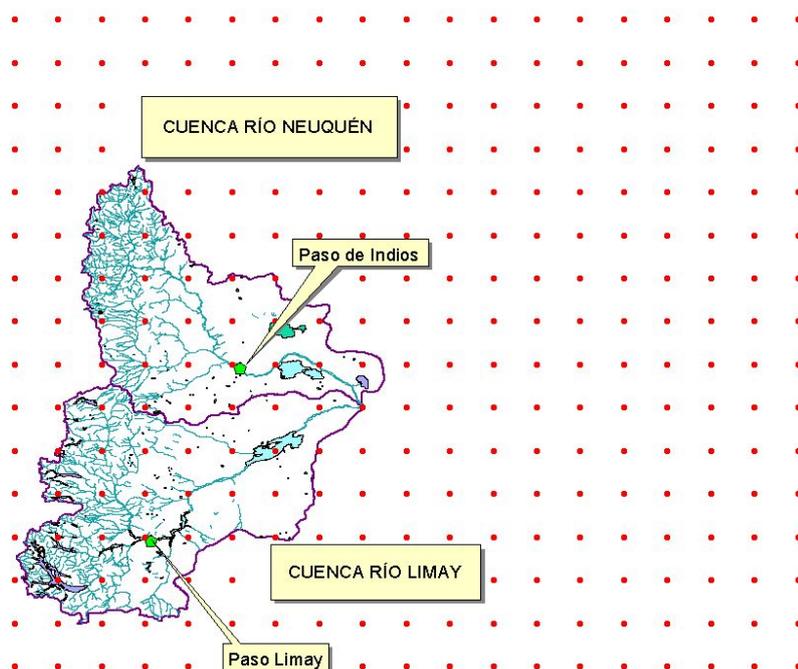
Por lo tanto, se pueden señalar los siguientes impactos:

- 1) Menor oferta de la energía hidroeléctrica generada (asociada con un menor escurrimiento).
- 2) Cambio en la distribución temporal de los caudales debido a que las variaciones (incremento) en las temperaturas afectarían a las precipitaciones sólidas de las tormentas de otoño-invierno.

IV.5.3 Precipitaciones anuales medias para dos cuencas

La estimación de las precipitaciones medias areales para las cuencas de los ríos Neuquén y Limay se realizó a partir de los datos en los puntos señalados en la Figura N° IV.1.

Figura N° IV.1 Cuencas de los ríos Neuquén y Limay y ubicación de los datos del modelo de circulación general (PRECIS).



El análisis de los campos de precipitación para el área de las dos cuencas que presentan las siguientes características estadísticas; Tabla N° IV.5.

Tabla N° IV.5. Estadísticos precipitación anual areal estimada con datos del modelo PRECIS para las cuencas de los ríos Neuquén y Limay.

Variable	Neuquén (mm)	Limay (mm)
Media	1318.5	1416.2
Desvío estándar	253.0	238.1
Mínimo	891.1	1019
Máximo	1914.7	1885

Se utilizaron dos escenarios de emisiones (A2 y B2) de gases de efecto invernadero. El primero, es de carácter tendencial, mientras que el segundo es más amigable con el ambiente porque supone una reducción de la tendencia creciente de emisiones y una reducción en la segunda mitad del siglo.

IV.5.4 Modelo de regresión precipitación caudal medio anual

La variable independiente del modelo de regresión es la precipitación total anual integrada en las cuencas de aporte y la dependiente es el caudal medio anual estimado para cada cuenca.

Se analizó la media de las precipitaciones para regiones cercanas a la Cordillera de los Andes ya que en esta zona se encuentran las fuentes de alimentación de ambos ríos.

El modelo de regresión lineal aplicado es:

$$Q_i = \beta_0 + \beta P_i + \varepsilon_i \quad \text{IV. 1}$$

Donde los residuos $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$ tienen distribución normal con media cero y varianza constante, son independientes de las precipitaciones e independientes entre sí.

La estimación de los parámetros del modelo de regresión lineal se realizó por el método de cuadrados mínimos; Tabla N° IV.6. Las Figuras siguientes IV.2 y IV.3. muestran las relaciones entre estas variables, para las dos cuencas analizadas: ríos Neuquén y Limay.

Tabla N° IV.6 Modelos de regresión para las cuencas de los ríos Neuquén y Limay.

Cuenca	R ²	Ordenada	DE	p-valor	Pendiente	DE	p-valor	DE del residuo
Neuquén	0.662	-149.5	63.2	0.025	0.343	0.047	<0.0001	63.1
Limay	0.733	-93.9	92.1	0.32	0.553	0.064	<0.0001	80.8

Figura N° IV.2. Relación entre los caudales anuales (m^3/s) en el río Neuquén y las precipitaciones totales anuales (mm) (1960-1990).

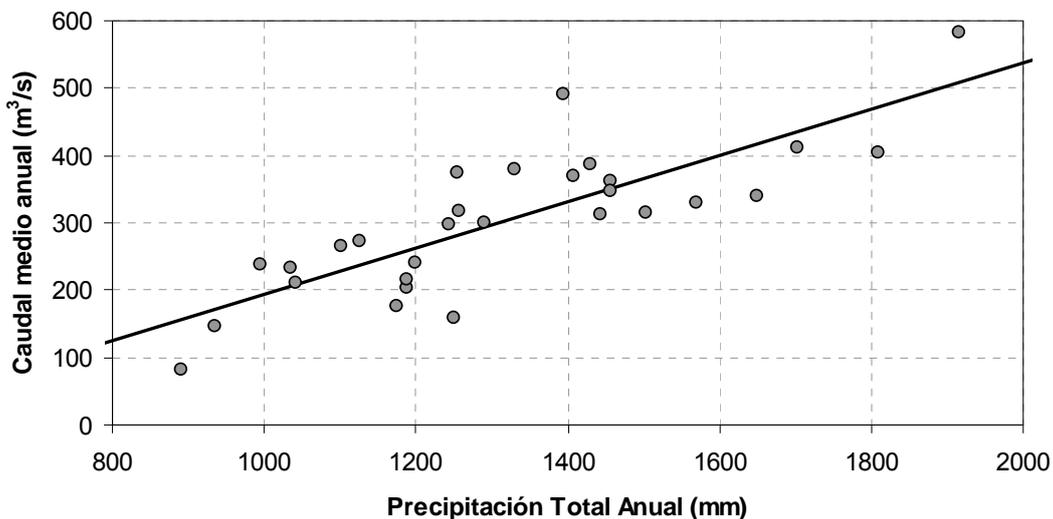
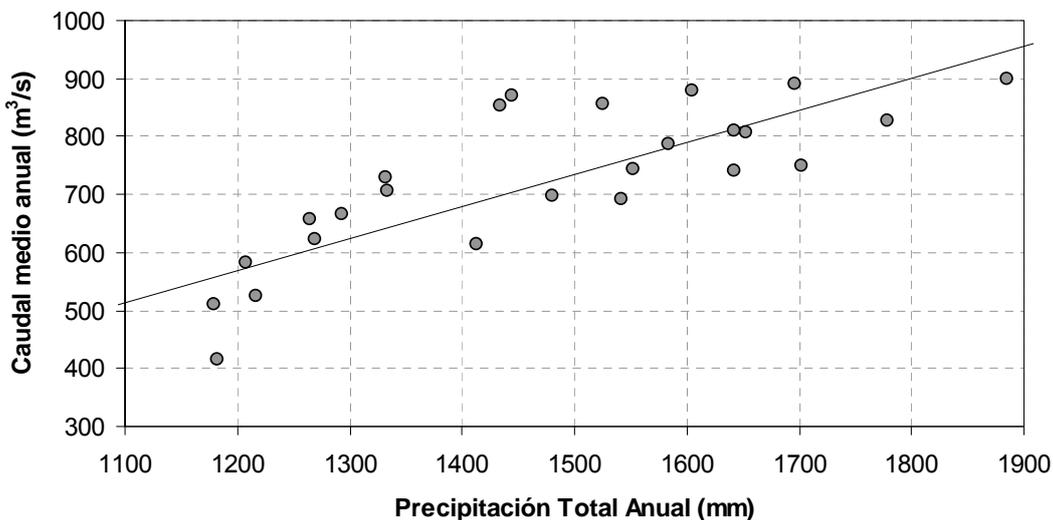


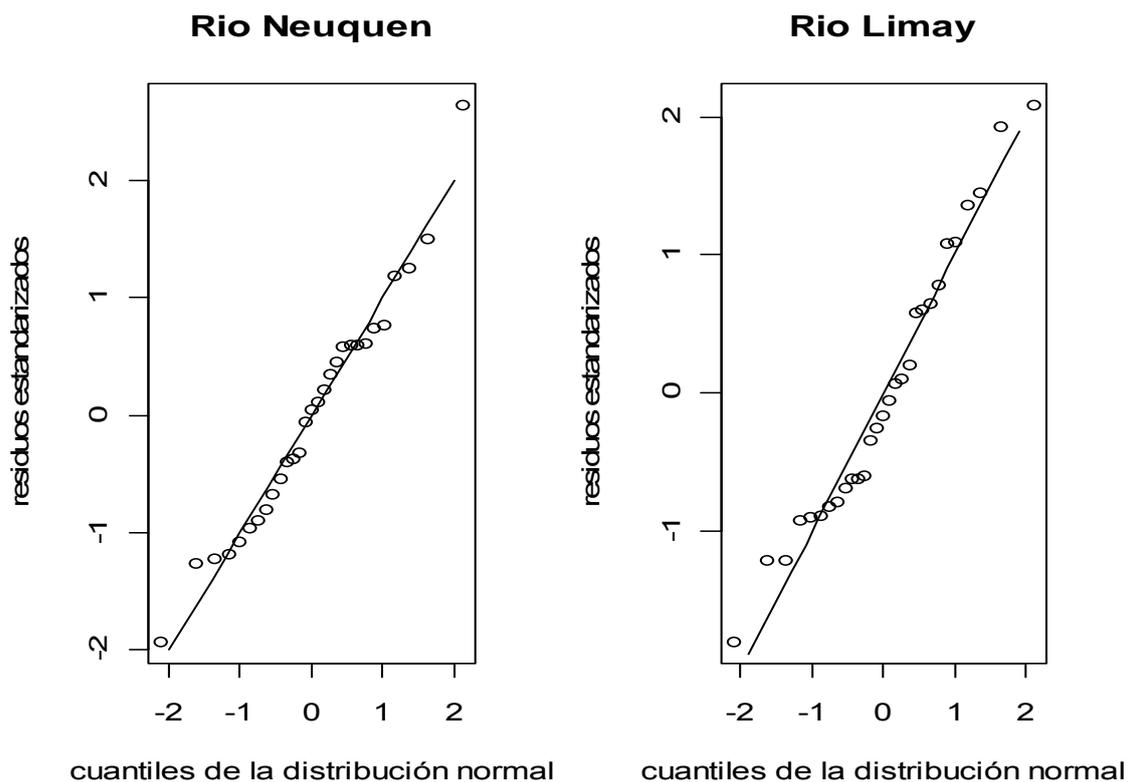
Figura N° IV.3. Relación entre los caudales anuales (m^3/s) en el río Limay y las precipitaciones totales anuales (mm) (1960-1990).



Si los residuos tienen distribución normal los puntos del gráfico están cerca de una línea recta. La Figura N° IV.4 no muestra puntos con apartamientos de la distribución normal, ni datos atípicos. La prueba de Shapiro-Wilks tampoco rechaza la hipótesis de

normalidad de los residuos ($p=0.73$ y $p=0.34$ para los ríos Neuquén y Limay respectivamente).

Figura N° IV.4. Residuos de las regresiones en función de los cuantiles de la distribución Normal.



En las Figuras N° IV. 5. y IV. 6. se grafican los valores reales y los valores estimados con los modelos de regresión y se observa un correcto ajuste de la capacidad de representación del modelo de regresión.

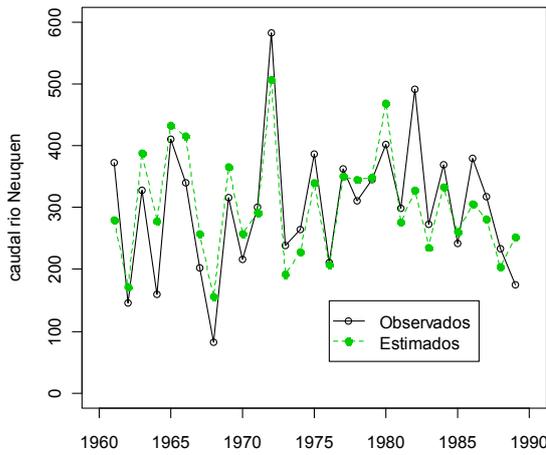


Figura N° IV.5. Valores observados del caudal y estimados usando el modelo de regresión. Río Neuquén (Paso de los Indios).

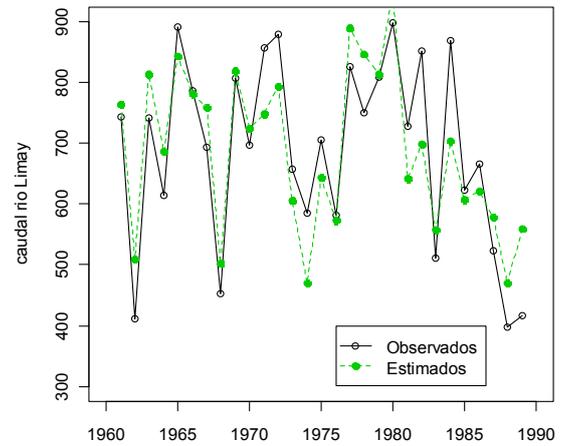


Figura N° IV.6 Valores observados del caudal y estimados usando el modelo de regresión. Río Limay (Paso Limay).

IV.5.5 Estimación del cambio de los caudales medios para escenarios futuros

Las predicciones de las medias y las desviaciones estándar de los caudales para cada período futuro de 31 años, se calcularon con expresiones deducidas del modelo de regresión lineal que se presentan a continuación.

Se denota con $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}$ a los estimadores por cuadrados mínimos de los parámetros β_0 y β respectivamente.

El predictor de la media del caudal para un período futuro $\hat{Q}_{periodo}$ se calculó del siguiente modo:

$$\hat{Q}_{periodo} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta} \bar{P}_{periodo} \tag{IV. 2}$$

donde $\bar{P}_{periodo}$ es la media de las precipitaciones para ese período estimadas con el modelo PRECIS.

El error de esta predicción se estima con:

$$\text{Error de Predicción} = DE_{residuo} \sqrt{\frac{1}{31} + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{P}_{periodo} - \bar{P})^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2}} \tag{IV. 3}$$

Donde n , \bar{P} y $\sum (P_i - \bar{P})^2$ son el número de datos, la media de las precipitaciones y la suma de las desviaciones al cuadrado de las precipitaciones del período de referencia. El intervalo de predicción al 95% se obtuvo como:

$$\hat{Q}_{\text{periodo}} \pm t * \text{Error de Predicción} \quad \text{IV. 4}$$

Donde: t es el cuantil de la distribución t de Student con $(n-2)$ grados de libertad.

Finalmente el estimador de la desviación estándar de los caudales de ese período se calculó con la siguiente expresión

$$\sqrt{\hat{\beta}^2 \frac{\sum (P_{\text{periodo},i} - \bar{P}_{\text{periodo}})^2}{31-1} + (DE_{\text{residuo}})^2} \quad \text{IV. 5}$$

En las siguientes Tablas N° IV.7 IV.8, se presentan los resultados de los modelos de regresión considerando variaciones en la precipitación estimadas con los escenarios seleccionados (A2 y B2) proporcionados por el modelo PRECIS.

Los resultados obtenidos indican disminuciones de los caudales medios anuales para los cuatro periodos analizados 2020, 2030, 2050 y 2070.

Tabla N° IV.7. Predicciones del caudal medio anual en el río Neuquén (m³/s).

Escenario	Variable	2020 (2005 – 2035)	2030 (2015 – 2045)	2050 (2035 – 2065)	2070 (2055 – 2085)
A2	Precipitaciones				
	Media en el período (1318.5 mm en el período de referencia)	1215	1155	1074	1006
	DE en el período (mm)	285	279	250	235
	Caudal				
	Media en el período (302.2 m ³ /s en el período de referencia)	267	246	219	195
	Porcentaje de cambio (%)	-11.6	-18.6	-27.5	-35.5
	Intervalo de predicción para la media en el período (al 95%)	232 a 302	209 a 283	118 a 259	150 a 240
	DE en el período	116	114	106	102
B2	Precipitaciones				
	Media en el período (1318.5 mm)	1269	1225	1175	1112
	DE en el período (mm)	319	323	291	290
	Caudal				
	Media en el período (302.2 m ³ /s)	285	270	253	231
	Porcentaje de cambio (%)	-5.7	-10.7	-16.3	-23.6
	Intervalo de predicción para la media en el período (al 95%)	252 a 319	236 a 305	217 a 289	192 a 270
	DE en el período	126	127	118	118

Es el intervalo de predicción para el promedio de los caudales que se observarían en los 31 años del período futuro. Está calculado considerando que el modelo de regresión

estimado con los datos del período de referencia sigue siendo válido en el período futuro y fijando las precipitaciones del período.

El error de predicción se debe entonces a la parte sin explicar por el modelo de regresión y al error estándar de los estimadores de los parámetros de dicho modelo.

Tabla N° IV.8. Predicciones del caudal medio anual en el río Limay (m³/s).

Escenario	Variable	2020 (2005-2035)	2030 (2015-2045)	2050 (2035 – 2065)	2070 (2055 – 2085)
A2	Precipitaciones				
	Media en el período (1416.2 mm en el período de referencia)	1317	1257	1213	1143
	DE en el período (mm)	316	261	230	224
	Caudal				
	Media en el período (689.0 m ³ /s en el período de referencia))	634	601	576	538
	Porcentaje de cambio (%)	<u>-8.0</u>	<u>-12.8</u>	<u>-16.4</u>	<u>-21.9</u>
	Intervalo de predicción para la media en el período (al 95%) (590 a 679	553 a 649	526 a 627	482 a 594
	DE en el período	193	166	150	148
B2	Precipitaciones				
	Media en el período (1416.2 mm)	1345	1262	1270	1209
	DE (mm)	278	203	285	281
	Caudal				
	Media en el período(689.0)	650	604	608	574
	Porcentaje de cambio (%)	<u>-5.7</u>	<u>-12.3</u>	<u>-11.8</u>	<u>-16.7</u>
	Intervalo de predicción para la media en el período (al 95%)	606 a 693	556 a 651	561 a 655	524 a 625
	DE en el período	174	138	177	175

Las siguientes Figuras N° IV.7 a IV.10 muestran las variaciones de las precipitaciones y los caudales para los escenarios del futuro.

Figura N° IV.7. Cuenca del río Neuquén y comparación de las precipitaciones medias anuales para el periodo en análisis con el modelo PRECIS.

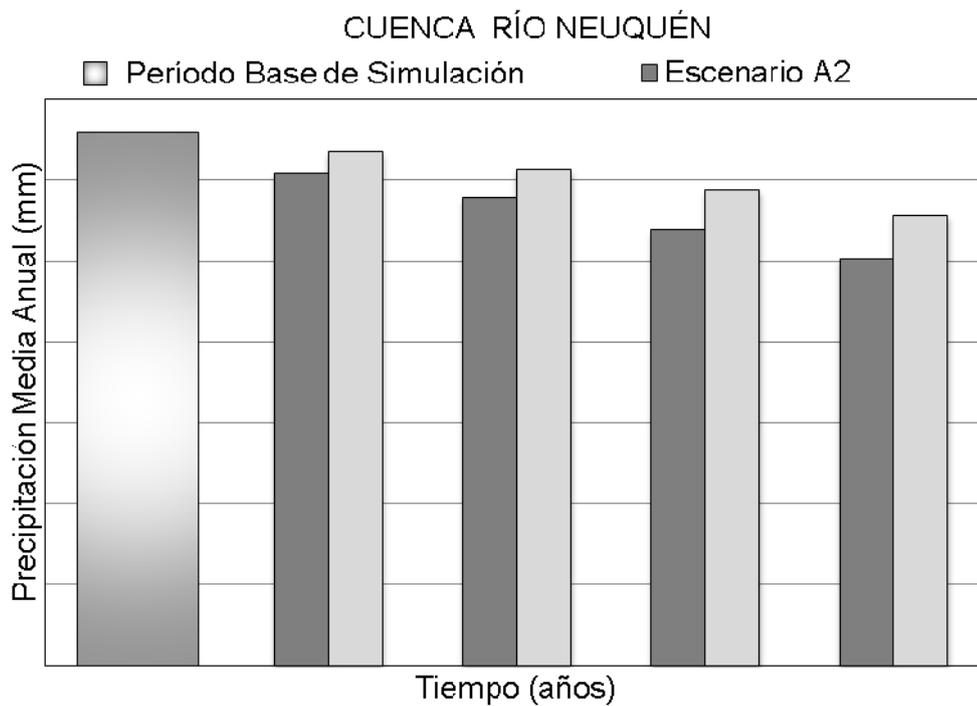


Figura N° IV 8. Cuenca del río Neuquén y comparación de los caudales medios anuales para el periodo en análisis con el modelo PRECIS.

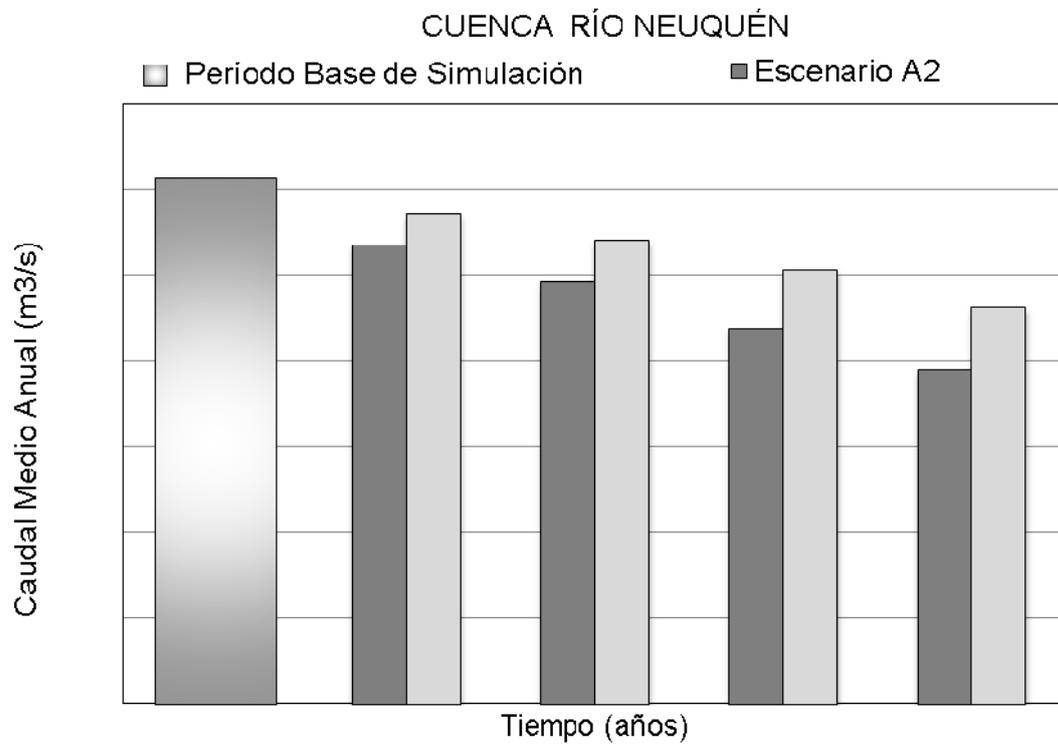


Figura N° IV 9. Cuenca del río Limay y comparación de las precipitaciones anuales para el periodo en análisis con el modelo PRECIS.

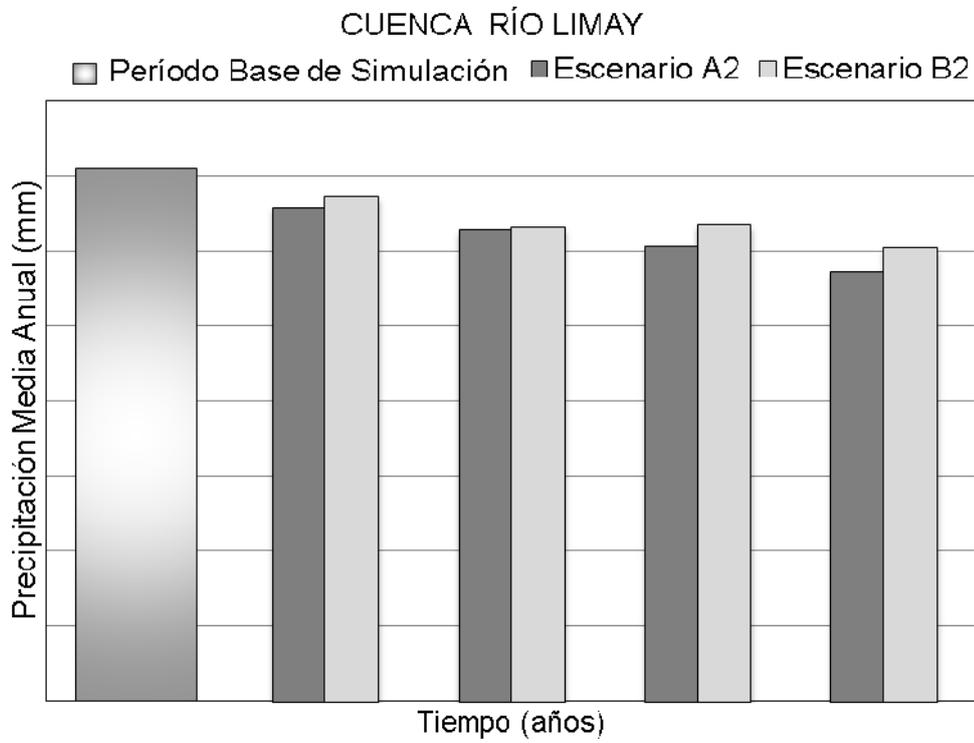
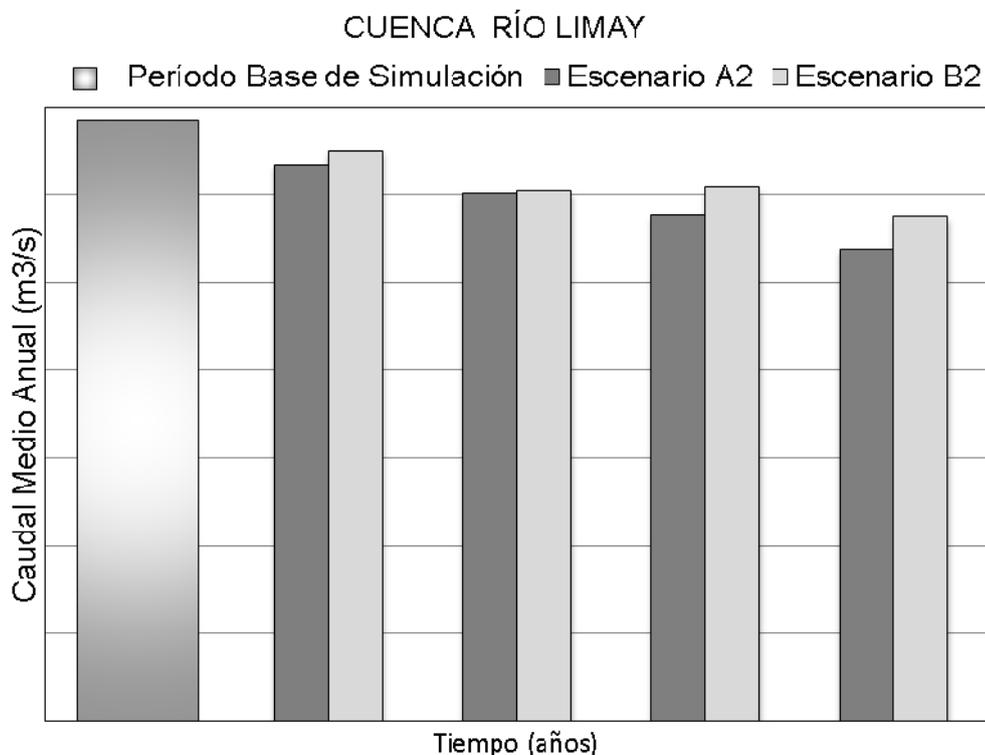


Figura N° IV 10. Cuenca del río Limay y comparación de los caudales medios anuales para el periodo de análisis con el modelo PRECIS.



Los resultados anteriores son consistentes con otras investigaciones que muestran la disminución de caudales en la Patagonia.

IV.5.6 Precipitaciones anuales medias para las cuatro cuencas (agregadas)

En este párrafo se presenta los campos de precipitación para el área de las cuatro cuencas estudiadas con la combinación de los modelos HADCM3 y MM5/CIMA.

Las Tablas N° IV.9. y IV .10 presentan las precipitaciones medias y los caudales medios para las cuatro cuencas. La Tabla N° IV.11 muestra los estadísticos de Mann-Kendall que fueron calculados en Seoane y López. (2005).

Tabla N° IV.9. Estadísticos de la precipitación areal de las cuatro cuencas

Variable	Precipitación (mm)
Media	1302.6
Desvío estándar	268.1
Mínimo	821.8
Máximo	1761.7

Tabla N° V. 10. Estadísticos del caudal medio anual de las cuatro cuencas

Variable	Caudal (m ³ /s)
Media	1170.77
Desvío estándar	290.28
Mínimo	553.56
Máximo	1694.41

Tabla N° IV.11. Prueba de Mann-Kendall para caudales medios de las series.

Estación	Período	S	Z	Valor-p	B (m ³ /s año)
Buta Ranquil	1940-2003	201	1.16	0.246	0.44
Los Altares	1943-2003	-18	-0.11	0.912	-0.02
Charles Führ	1955-2002	-5	-0.04	0.968	-0.03

Los valores presentados en las tablas anteriores fueron estimados considerando el año hidrológico abril-marzo.

IV.5.7 Escenarios climáticos

Los escenarios descritos en el Informe Especial del IPCC sobre escenarios de emisiones están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 B2) que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas junto con las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) resultantes.

Los escenarios IEEE no contemplan otras políticas climáticas además de las existentes y las proyecciones de emisión son muy utilizadas para evaluar el cambio climático futuro,

a partir de hipótesis respecto de la evolución socioeconómica, demográfica y tecnológica. Estos escenarios son el punto de partida de numerosos estudios sobre la vulnerabilidad del cambio climático y evaluaciones de su impacto.

A1 presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B).

B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información. B2 describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental.

A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento. No se han asignado niveles de probabilidad a ninguno de los escenarios IEEE.

Hay un alto nivel de coincidencia y abundante evidencia para afirmar que, con las políticas actuales de mitigación del cambio climático y con las prácticas de desarrollo sostenible que aquellas conducen, las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios.

IV.5.8 Modelo de regresión para estimar la relación precipitación-caudal medio

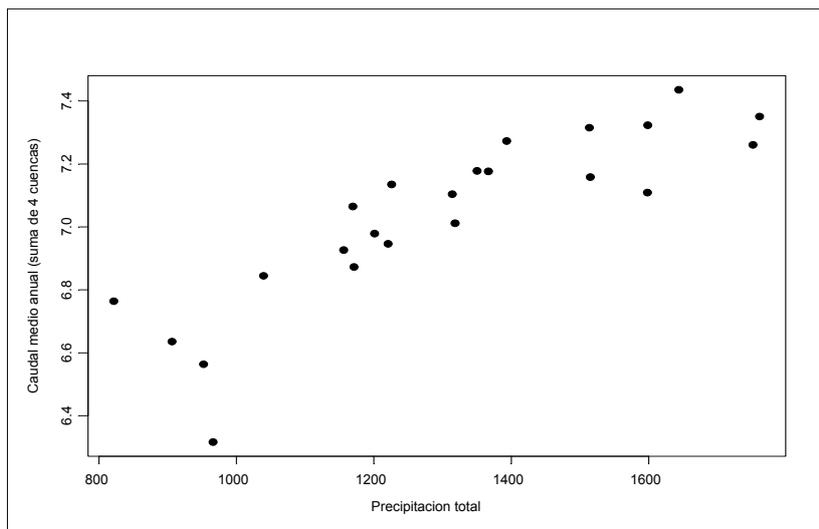
Los escenarios estimados con los modelos HADCM3 y MM5/CIMA indican que los cambios en las temperaturas para la región en estudio son menos relevantes que los definidos en los campos de la precipitación.

En consecuencia, los cambios en la temperatura que influyen en la variación de la evapotranspiración, fueron considerados menos importantes en la estimación del caudal. Por estas razones, la variable temperatura no se incorporó al modelo.

Los conceptos anteriores justifican la aplicación del modelo de regresión que considere como variable aleatoria de entrada a la precipitación areal estimada para las cuatro cuencas (Colorado, Neuquén, Limay y Chubut) y como salida a la suma de los caudales medios anuales de las estaciones Buta Ranquil, Paso de los Indios, Paso Limay y Los Altares.

Se presenta (Figura IV.10.) la relación entre la suma de los caudales medios anuales para las cuatro cuencas y la precipitación areal total anual.

Figura IV.10. Relación entre la suma de los caudales medios anuales para las cuatro cuencas y las precipitaciones (1974-1996).



En el período analizado, el año 1996 cumple con esta condición, por ello se aplicó un método de estimación robusta para evaluar la importancia de los apartamientos del modelo y su efecto sobre la estimación de parámetros. En la Tabla N° IV.12 se presentan los estimadores calculados por el método de cuadrados mínimos y un método robusto.

Tabla N° IV.12. Modelo de regresión para cuatro cuencas de la Patagonia

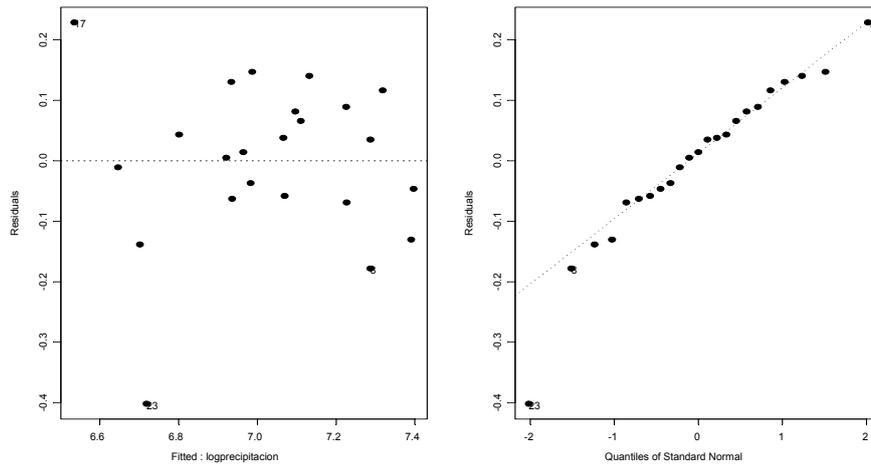
Método estimación	R ²	Ordenada	DE	p-valor	Pendiente	DE	p-valor
Cuadrados mínimos	0.7634	-1.0465	0.982	0.299	1.1297	0.137	0.000
Robusto ⁽¹⁾	0.6543	-0.1132	0.819	0.891	1.0020	0.114	0.000

(1) El método robusto empleado es el de MM estimadores con eficiencia 90% para el caso normal.

La Figura IV.11 presenta dos gráficos útiles para el diagnóstico de la validez de las suposiciones del modelo de regresión lineal. Son los gráficos de los residuos de la regresión (los residuos son valores aproximados de los errores ε_i).

En ambos gráficos se observa un residuo negativo grande, cercano a 3 desviaciones estándar (la observación número 23, del año 1996, con residuo estandarizado= - 2.94). Si no consideramos este punto, el gráfico de la izquierda muestra que no hay evidencia de que no se cumpla la suposición de que los errores tengan media cero y dispersión constante. El de la derecha muestra que el modelo normal se ajusta bien a los residuos.

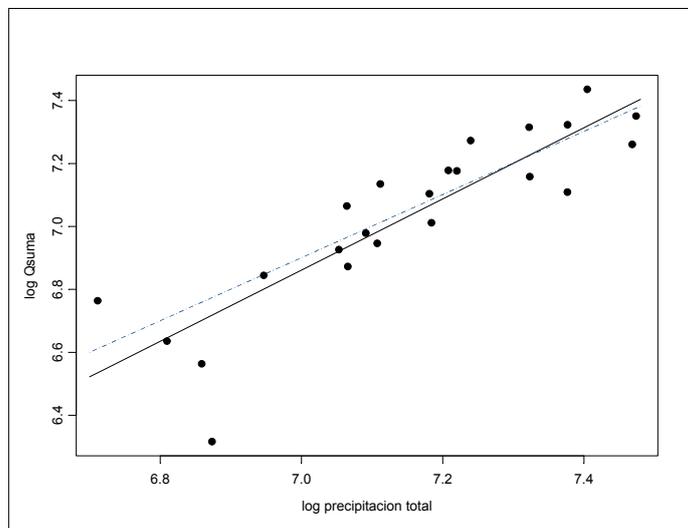
Figura IV.11. Gráficos para diagnóstico del modelo de regresión lineal.



El gráfico de la izquierda muestran los residuos en función de los valores ajustados. En el de la derecha los residuos en función de los cuantiles de la distribución normal.

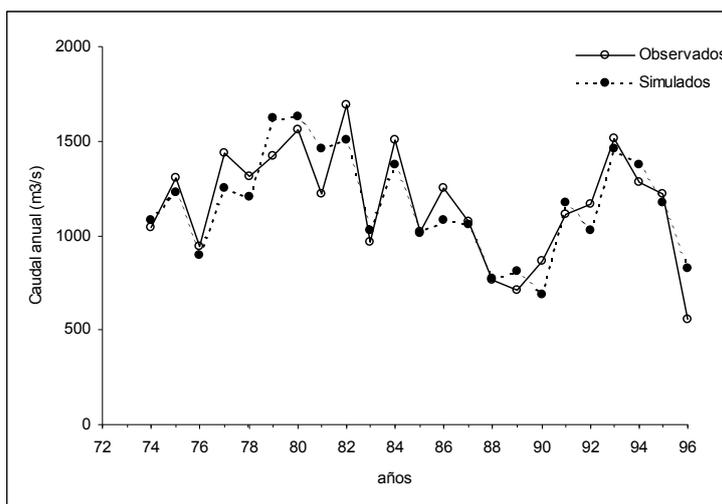
Se puede señalar que el método robusto proporciona los mismos estimadores para los coeficientes de la recta que cuadrados mínimos aplicado excluyendo el año 1996. La Figura IV.12 muestra las rectas ajustadas por ambos métodos y se puede observar que éstas son semejantes, aunque la ajustada por el método robusto tiene un poco menor pendiente y mayor ordenada al origen que la estimada por cuadrados mínimos.

Figura IV.12. Logaritmo de la suma de Q (caudal) para las cuatro cuencas en función del logaritmo de las precipitaciones. Cuadrados mínimos y método robusto.



La Figura IV.13 presenta un gráfico que muestra la capacidad de representación del modelo de regresión cuyos parámetros fueron estimados con el método de los cuadrados mínimos.

Figura IV.13. Valores de caudales suma observados y ajustados por el modelo.



IV.5.9 Caudales medios anuales con la estimación areal de las precipitaciones

El método de estimación supone que el cambio climático produce un efecto multiplicativo sobre las precipitaciones. Bajo la suposición anterior y si se cumple el modelo de regresión con los mismos parámetros actuales en los escenarios futuros, el efecto del cambio climático sobre el caudal medio anual es también de carácter multiplicativo con constante c^β :

$$Q \text{ con el cambio} \sim Q \text{ actual} * c^\beta \quad \text{IV. 6}$$

Donde \sim indica “tiene la misma distribución”. En particular, tomando esperanzas en (IV.6) se obtiene la siguiente relación:

$$E[Q] \text{ con el cambio} = E[Q] \text{ actual} * c^\beta \quad \text{IV. 7}$$

donde $E[Q]$ denota al valor medio o esperado del caudal.

$$\text{Precipitación con el cambio} \sim \text{Precipitación actual} * c \quad \text{IV. 8}$$

Donde el símbolo \sim indica “tiene igual distribución”.

Este efecto multiplicativo (IV.8) se puede interpretar como que no sólo la media, sino todos los percentiles de las precipitaciones tienen la misma disminución porcentual.

Bajo esta suposición (IV.8) y el modelo, se puede demostrar que el efecto del cambio climático sobre el caudal será también multiplicativo, pero la constante por la que se multiplica el caudal es c^β :

$$Q \text{ con el cambio} \sim Q \text{ actual} * c^\beta \quad \text{IV. 9}$$

En particular, tomando esperanzas en (IV.9) se obtiene la siguiente relación:

$$E[Q] \text{ con el cambio} \sim E[Q] \text{ actual} * c^\beta \quad \text{IV. 10}$$

donde $E[Q]$ denota al valor medio o esperado del caudal.

Las siguientes Tablas N° IV.13. y IV.14 presentan las variaciones de los caudales medios para las cuatro cuencas simuladas; Seoane y Barros (2005).

Tabla N° IV.13. Resultados obtenidos de los caudales medios para el escenario A2.

	actual	2020-29	2050-59	2080-89
<i>(a) Cambios en la media de la precipitación según escenario A2</i>				
Precipitación anual (mm)	1302.6	940	813	841
Coefficiente de cambio (C)		0.7216	0.6241	0.6456
% cambio media precipitación anual		-27.8%	-37.6%	-35.4%
<i>(b) Cambios en la media de los caudales medios anuales según escenario A2</i>				
$C^{1.1297} * E[Q]$	1170.77	809.8	687.3	714.1
$C^{1.0020} * E[Q]$	1170.77	844.3	730.0	755.2
$E[Q]$ por simulación ⁽¹⁾	1173.8	814.4	692.8	719.3
DE_Q ⁽²⁾	318.0	284.9	273.5	276.0
Coefficiente de variación (CV)	0.27	0.35	0.39	0.38
$DE_{Q \text{ media}}$ ⁽³⁾		90.6	87.0	87.8

⁽¹⁾ y ⁽²⁾ se presenta la media y la desviación estándar de todos los datos generados.

⁽³⁾ Desviación estándar de la media de Q de un período de 10 años para los datos generados

Tabla N° IV.14 Resultados obtenidos de los caudales medios para el escenario B2.

	actual	2020-29	2050-59	2080-89
<i>(a) Cambios en la media de la precipitación según escenario B2</i>				
Precipitación anual (mm)	1302.6	1036	1169	1604
Coefficiente de cambio (C)		0.7953	0.8974	1.2314
% cambio media precipitación anual		-20.5%	-10.3%	23.1%
<i>(b) Cambios en la media de los caudales medios anuales según escenario B2</i>				
$C^{1.1297} * E[Q]$	1170.77	903.9	1036.0	1481.1
$C^{1.0020} * E[Q]$	1170.77	930.7	1050.5	1442.3
$E[Q]$ por simulación ⁽¹⁾	1173.8	907.9	1039.5	1483.4
DE_Q ⁽²⁾	318.0	293.4	305.5	347.8
Coefficiente de variación (CV)	0.27	0.32	0.29	0.23
$DE_{Q\ media}$ ⁽³⁾		93.3	97.2	110.6

⁽¹⁾ y ⁽²⁾ presentan la media y la desviación estándar de todos los datos generados.

Figura N° IV.14. Comparación de las precipitaciones medias para el periodo de análisis con el modelo para cuatro cuencas.

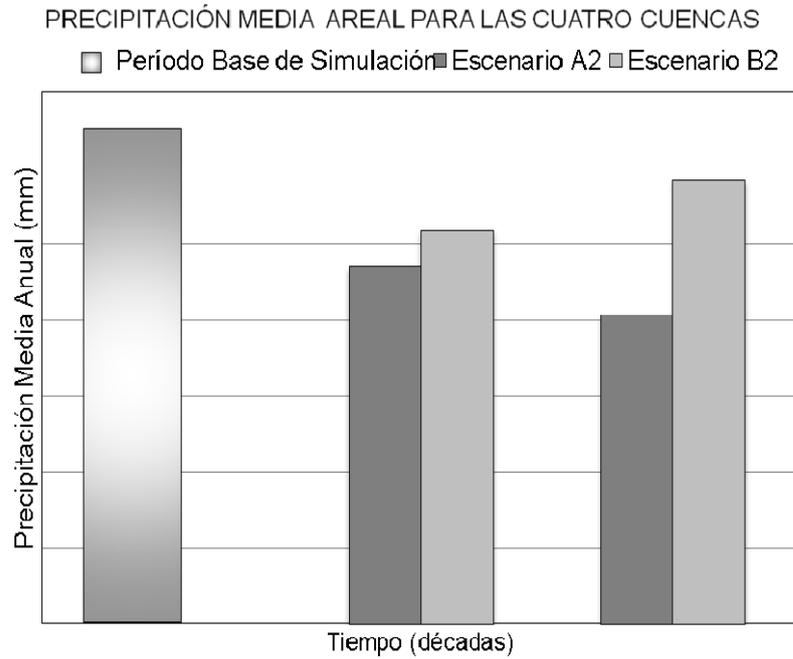
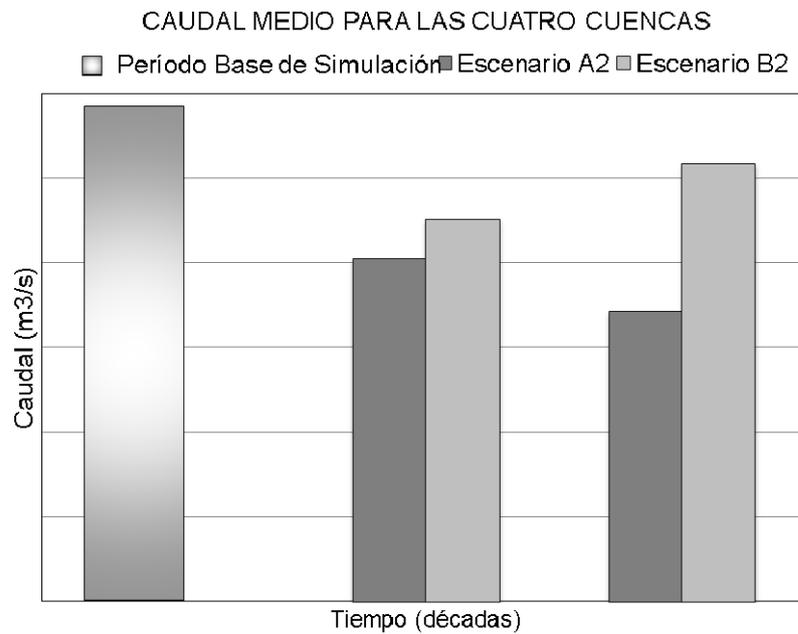


Figura N° IV. 15. Comparación de los caudales medios anuales para el periodo de análisis con el modelo para las cuatro cuencas.



Se ha aplicado el método Monte Carlo y con el modelo de regresión se han simulado series de caudales. En las Figura N° IV. 16. a 18, se observan los histogramas de los caudales medios anuales para la situación actual (CO₂) y para la simulada aplicando el modelo de regresión con el escenarios de cambio climático (A2).

Los resultados fueron verificados y se observan valores de cambio semejantes para los mismos períodos (-30.6%. -41.0%). Esta metodología considera que el cambio se produce en la media de la serie y no en la dispersión. Figura N° IV. 16. Estimación por simulación de la distribución del caudal medio anual. Periodo actual

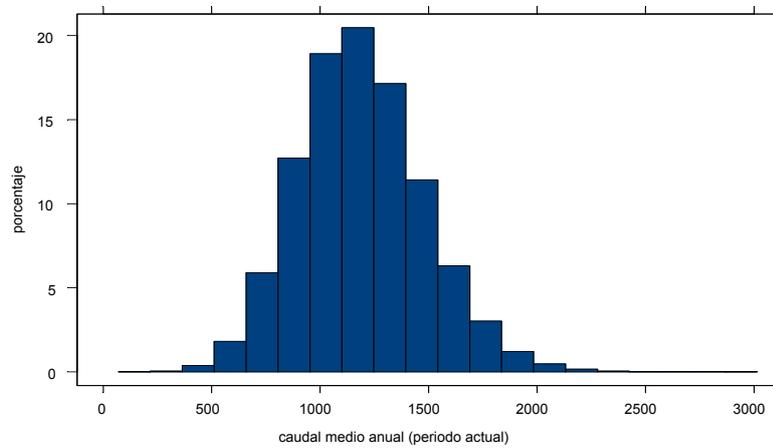


Figura N° IV. 17. Estimación por simulación de la distribución del caudal medio anual para el periodo 2020-2029. Escenario A2.

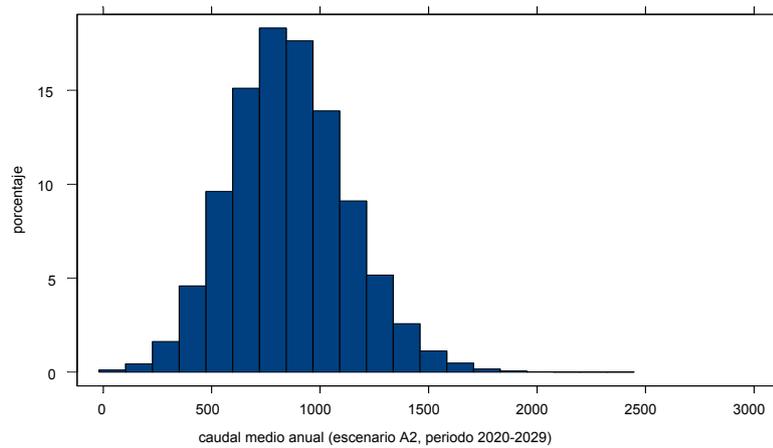
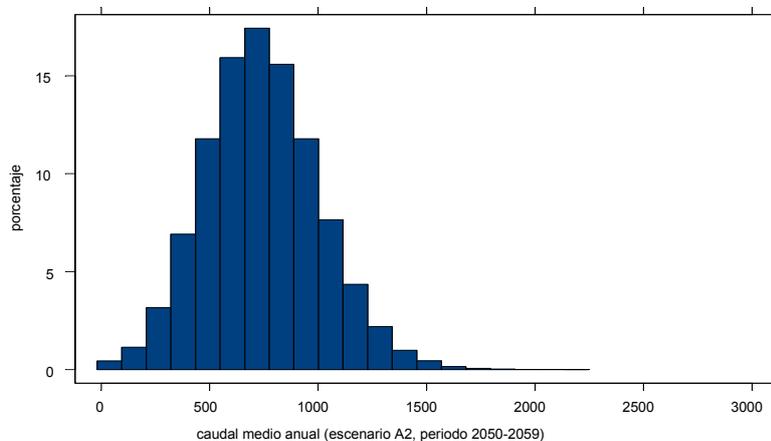


Figura N° IV.18. Estimación por simulación de la distribución del caudal medio anual para el periodo 2050-2059. Escenario A2.



El análisis realizado a partir de los cambios definidos con el modelo CIMA/MM5 para los escenarios A2 y B2 muestran disminuciones porcentuales que alcanzan para el período (2020-29) del 30.8%.

Discusión de resultados

La revisión de los resultados de algunos antecedentes muestra consistencia con los resultados presentados. Vera et al. (2006) señala que: "el análisis de los resultados del cambio climático para el Escenario SRESA1B muestran un acuerdo sustancial entre modelos en los cambios de precipitación para el período 2070-2099 con respecto a 1970-1999, que se caracteriza principalmente por:

- i) un aumento de las precipitaciones de verano sobre el norte de los Andes y el sureste de América del Sur,
- ii) una disminución de invierno las precipitaciones en la mayor parte del continente, y
- iii) una disminución de precipitación a lo largo de los Andes del sur para todas las estaciones.

En esta región se han desarrollado modelos de balance para simular caudales mensuales con distintos escenarios de cambio climático. Estas simulaciones tienen como objetivo estudiar la cantidad mínima de observaciones necesarias para detectar cambios en caudales medios anuales.

En Seoane *et al.* (2005) se aplicó el modelo de balance determinístico "abcd" para simular las componentes del proceso precipitación-caudal en escala mensual en la

cuenca del río Neuquén y sus parámetros fueron estimados utilizando un procedimiento de calibración automática, denominado "Shuffled Complex Evolution".

Se verificó aplicando el criterio de evaluación propuesto por Vandeweile (1998) y se observó que el ajuste alcanzado por modelo es satisfactorio, mostrando las posibilidades de utilizar esta metodología para la modelación.

Debido al interés por estudiar los efectos del cambio climático sobre cuencas de la Patagonia se resolvió avanzar en la simulación aplicando el modelo "abcde", que modifica la estructura del "abcd" original, introduciendo un término que permite considerar el proceso de fusión nival.

Este modelo se aplicó en dos subcuencas del río Limay, Nahuel Huapí y Aluminé y de los dos métodos aplicados para la estimación de sus parámetros, momentos y máxima verosimilitud, éste último es el que presenta mejor ajuste.

La asociación de generación sintética de variables hidrológicas con modelos de balance permitió estudiar la sensibilidad de sistemas hidrológicos a variaciones en las variables de entrada y estimar los tiempos mínimos para detectar tendencias en los caudales medios anuales. Los resultados obtenidos indican la necesidad de contar con series temporales extensas para la detección de tendencia.

Este plan de experimentos desarrollado demostró que los sistemas analizados, subcuencas del río Limay, Nahuel Huapí y Aluminé, son más sensibles a variaciones en la precipitación que a los cambios en las temperaturas, justificando el estudio del impacto de cambios en la precipitación sobre el escurrimiento medio anual.

Estos resultados son consistentes con los presentados en este capítulo y demuestran las posibilidades de avanzar con otros esquemas de modelación que permitan representar el ciclo hidrológico de una forma más completa.

Sin embargo, el modelo de regresión, que presenta una estructura matemática más simple que el modelo de balance determinístico, permitió estudiar la sensibilidad de los caudales a cambios en el clima y para estimar las variaciones definidas por escenarios de cambio climático

El modelo propuesto en esta investigación relaciona el caudal medio anual con la precipitación total anual, utilizándose esta estructura debido al bajo impacto de los cambios de temperatura en los caudales y a que la información pluviométrica, en las cuencas analizadas, es más completa que la termométrica.

IV.6 Conclusiones

Los valores medios se utilizan en la resolución de problemas relacionados con la planificación de sistemas hídricos y las escalas temporales del análisis son: mensual, estacional y anual.

En este contexto, se ha analizado los efectos del calentamiento global sobre los escurrimientos a nivel medios anual y se aplicaron modelos de regresión para estimar las condiciones hidrológicas futuras de cuencas en la Patagonía.

Las cuencas de los ríos Limay y Neuquén fueron seleccionadas. La primera presenta numerosos embalses de aprovechamientos múltiples y la segunda está siendo estudiada para realizar nuevas obras hidráulicas. Los resultados obtenidos durante las investigaciones orientaron los estudios a la evaluación de los impactos en otras cuencas ubicadas en Patagonia

Los posibles efectos de los escenarios implican una menor oferta de la energía hidroeléctrica generada (asociada con un menor escurrimiento) y un cambio en la distribución temporal porque las variaciones en las temperaturas afectarían a las precipitaciones sólidas de las tormentas de otoño-invierno.

El modelo de regresión ajustado fue utilizado con escenarios de cambio climático a escala anual considerando cambios en la precipitación total definidos por dos modelos MM5/CIMA y PRECIS.

Los resultados obtenidos corresponden a la aplicación de un enfoque estadístico que permite estimar los efectos del cambio climático sobre los escurrimientos medios. Si bien este análisis está condicionado por la estructura del modelo y por las estimaciones de los cambios en las precipitaciones predichas por los modelos de circulación general, estas predicciones, que indican una disminución en el escurrimiento para las dos cuencas, son importantes ya que permiten definir las características futuras del escurrimiento medio posibilitando la planificación de medidas de adaptación y mitigación en los usos del recurso hídrico, en particular en la generación de energía hidroeléctrica en la región.

La aplicación del modelo de regresión lineal entre las precipitaciones totales anuales promediadas en el espacio y los caudales medios anuales permitió estimar las disminuciones en los caudales para los caudales en los ríos Neuquén y Limay. Los valores estimados para los distintos periodos muestran un mayor porcentaje de disminución del caudal medio anual para el río Neuquén que para el río Limay.

Con otro modelo, el MM5/CIMA, se estimaron los campos de precipitación anual para las cuencas agrupadas de los ríos Colorado, Neuquén, Limay y Chubut y se los relacionó con los caudales medios anuales observados.

Este modelo de regresión presentó un buen ajuste a los datos observados y por lo tanto fue aplicado para estudiar la sensibilidad del escurrimiento al cambio en la media de los campos de precipitación y según los escenarios propuestos.

Los resultados de la estimación del cambio en el caudal medio para el escenario A2 aplicando la expresión del coeficiente de cambio asociado a su valor medio, indican disminuciones porcentuales que alcanzan para los períodos 2020-29, 2050-59 un 30.8 % y un 41.3 % respectivamente.

Las precipitaciones estimadas con el escenario B2 indican para los dos primeros períodos considerados disminuciones del caudal medio anual más moderadas.

Estos resultados indican que con los dos modelos de representación de los forzantes (precipitación) se han estimado disminuciones del mismo orden en los caudales medios anuales en cuencas importantes de la Patagonia que podrían influir sobre los distintos usos del recurso hídrico en la región.

La energía hidroeléctrica es una de las principales fuentes de energía del país y los cambios en los caudales pueden modificar significativamente la disponibilidad energética en las importantes cuencas patagónicas y especialmente las del Comahue.

Con el propósito de investigar la validez de la hipótesis de estacionariedad se realizó un análisis de tendencia en series de caudales de la Patagonia. Los resultados muestran detección sistemática, estadísticamente significativa, en las series de caudales mínimos y en algunas series de caudales máximos.

La hipótesis de estacionariedad implica que la función de densidad de probabilidad y sus parámetros no varían en el tiempo. En consecuencia, dado que las estimaciones de las relaciones caudal-período de retorno están basadas en el ajuste a funciones de densidad de probabilidad, el rechazo de la hipótesis de estacionariedad en las series afectará estas estimaciones.

Estos resultados son importantes ya que la presencia de tendencias podría influir sobre la generación hidroeléctrica en la Patagonia y esta condición debería ser considerada en la planificación de la operación de sistemas hidrológicos complejos.

El análisis de tendencia de caudales extremos mostró la necesidad de separar los dos casos más interesantes para el diseño de obras hidráulicas. El análisis de los valores mínimos se realizó con un enfoque probabilístico clásico y sería conveniente avanzar en

el estudio de los cambios en la forma de las funciones de densidad de probabilidades para los caudales de los ríos de la Patagonia.

En las series de valores medios no se han identificado tendencias, por lo tanto, se planteó la utilidad de analizar, con un modelo de regresión, que permita evaluar su impacto sobre el escurrimiento medio anual.

DEFINICIONES

Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). Es el grupo *de Expertos sobre el Cambio Climático* que fue establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) para analizar la información científica necesaria para abordar el problema del cambio climático global y evaluar sus consecuencias: medioambientales y socioeconómicas, y formular estrategias de respuesta realistas.

Cambio climático: se define como un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad climática natural como si es una consecuencia de la actividad humana.

PRECIS: sistema de modelación climática regional desarrollado por Centro Hadley de la Oficina Meteorológica del Reino Unido. Fue diseñado con la intención de ser un recurso para los científicos de países en desarrollo.

PRECIS se ha utilizado para ayudar al desarrollo de escenarios de cambio climático en las regiones de todo el mundo. Los modelos climáticos regionales (MCR) son parte integral de la planificación de la adaptación, ya que incorporar información detallada a las predicciones a gran escala realizadas por modelos de circulación general, ayudan a proporcionar una representación más precisa de características de la superficie.

<http://www.metoffice.gov.uk/precis/intro>

HadCM3: modelo climático acoplado que se ha utilizado ampliamente para la predicción del clima y otros estudios de sensibilidad climática.

HadCM3, modelo con una componente atmosférica con 19 niveles con una resolución horizontal de 2,5 grados de latitud por 3.75 grados de longitud, lo que produce una cuadrícula mundial de 96 x 73 celdas de la cuadrícula. El componente oceánico tiene 20

niveles con una resolución horizontal de 1,25 x 1,25 grados. En esta resolución es posible representar detalles importantes en las estructuras actuales oceánicas.

CAPÍTULO V

PERSISTENCIA DE LARGO PLAZO Y MULTIFRACTALIDAD EN SERIES DE HIDROLOGICAS EN DISTINTAS ESCALAS TEMPORALES

V.1 Introducción y objetivos

En este capítulo se presentan los resultados de estudiar la presencia de persistencia de largo plazo con la teoría fractal y estimar distintas medidas de multifractalidad para evaluar las variaciones del comportamiento, durante el siglo XX, en series de caudales diarios y mensuales en cuencas de Argentina.

La aplicación de métodos para la caracterización multifractal de series temporales es importante en Hidrología. Este es un tema crucial en la modelación de series temporales de variables geofísicas con registros extensos de observaciones dado que es una forma de conocer la estructura subyacente de la información.

En esta visión, el objetivo central consiste en precisar los orígenes de la multifractalidad, explorar la presencia de causalidad entre fenómenos climáticos e hidrológicos y explicar la variación de la respuesta hidrológica de una cuenca para con distintos periodos de la información.

Un análisis más preciso del problema consiste en estudiar el espectro multifractal se relaciona con las idea de identificar el origen de la multifractalidad, presencia de observaciones provenientes de poblaciones con colas pesadas, la ocurrencia consecutiva de observaciones altas (o bajas) y la estructura del modelo subyacente.

Se aplican los métodos de Rescalado y el de análisis multifractal de promedios móviles (Multifractal Detrending Moving Average, MFDMA) para estimar los espectros y la función generalizada de Hurst para distintas las series seleccionadas.

Los resultados numéricos mostraron la magnitud de las modificaciones en las características de los espectros multifractales para distintos periodos de observaciones hidrológicas registradas en las cuencas de los ríos Neuquén y Paraná.

La identificación del origen de la multifractalidad es un complemento necesario para la estimación de la variación de los espectros con el tiempo. Ambos permiten incrementar la precisión de las soluciones que en la Ingeniería Civil se desarrollan en la planificación y el diseño de grandes obras de infraestructura hidráulica.

Este capítulo está organizado considerando aspectos asociados con la variabilidad climática natural: a) la variación del coeficiente de Hurst observado en dos cuencas de Argentina; b) el estudio del cambio en la forma del espectro multifractal según la ventana temporal; y c) el análisis de series en otra escala de tiempo para relacionar las variaciones observadas en las series de caudales y una serie de variabilidad climática natural.

V.2 Revisión bibliográfica

Harold Edwin Hurst llegó a Egipto En el año 1906 para estudiar la variabilidad de los caudales del río Nilo. Este era un problema de preocupación para la economía de Inglaterra para las fábricas que utilizaban el algodón desde los tiempos de los faraones.

Este investigador, que trabajó durante más de sesenta años en Egipto, estudio el problema de la definición de la capacidad de almacenamiento de grandes embalses ante la ocurrencia consecutivos de caudales escasos y extendió sus estudios a distintas series geofísicas. En el año 1951 publicó un trabajo proponiendo un método para determinar la capacidad requerida por un embalse que asegure un caudal definido para una secuencia de observaciones con distintas características hidrológicas.

En este método se encuentra la base de la forma de estudio de la presencia de la persistencia de largo plazo que luego se generalizó para otras áreas de la Ciencia. En las últimas décadas se han desarrollado otros métodos para estudiar series temporales no estacionariedad y que permiten detectar la presencia de persistencia.

En el análisis de los procesos hidrológicos estos nuevos métodos explican mejor y permiten estimar los parámetros de diseño de obras hidráulicas con una mayor precisión que resulta más adecuada a la Ingeniería Civil. El exponente de Hurst se incorpora al estudio de los caudales máximos en los Estados Unidos para el siglo XX; Villarini *et al.* (2009). Estos métodos permiten la estimación de los parámetros de diseño de los embalses de control de crecidas.

Bashan *et al.* (2008) proponen un plan de experimentos para comparar los resultados obtenidos con distintos métodos para la detección de correlación en series de datos observacionales. El trabajo muestra la importancia del método de DFA para estudiar el problema cuando existen tendencias y la necesidad de incorporar un método independiente.

En el análisis de las referencias un trabajo importante por estar asociado con los caudales que son la respuesta hidrológica, Koscielny-Bunde *et al.* (2006). Esos autores presentan los resultados de la aplicación de distintos métodos para estudiar la

persistencia de largo plazo y la multifractalidad en series temporales de caudales observados en dieciocho cuencas ubicadas en Alemania y en veintitrés en distintos países del mundo.

Koscielny-Bunde *et al.* (2006) presentan un resultado importante: han observado que la multifractalidad desaparece con la aplicación de una simulación con permutaciones que permite discriminar el origen de la persistencia, que se puede asociar a dos orígenes principales: la persistencia de largo plazo y la ocurrencia de observaciones que no son Normales.

Este trabajo permitió detectar la persistencia de largo plazo como una explicación de los valores estimados del parámetro de Hurst e identificar la presencia de valores altos o bajos que podrían estar asociados con predicciones de la teoría del cambio climático global que indica la posibilidad de ocurrencia de crecidas y sequías muy cercanas en el tiempo.

La estimación de una función de autocorrelación con un decaimiento lento resulta en una clara indicación de la presencia de dependencia de largo plazo.

Mandelbrot al estudiar las fluctuaciones de los precios del algodón a principios de los años sesenta (cf. Mandelbrot, (1963)), señaló que los economistas ya había comprendido que el movimiento browniano geométrico estándar propuesto por Bachelier (1900) no es capaz de reproducir estas series. En particular, la presencia de funciones de densidad con la colas pesadas y la fuerte correlación observada en la volatilidad están en marcado contraste con las "leves", las fluctuaciones no correlacionados implícitos en los modelos con browniano aleatorio.

El método de Hurst permite definir tres procesos diferentes: 1) cuando el valor estimado de H es igual a $1/2$ entonces el proceso puede ser un movimiento Browniano; 2) se identifica una persistencia con valores de $H > 1/2$ que indican que los incrementos en el proceso se correlacionan positivamente y 3) se define la antipersistencia con valores de $H < 1/2$, los incrementos en el proceso se correlacionan negativamente.

Un tema de particular interés que permitiría mejorar la explicación de la presencia de estas variaciones consiste en relacionarlas con la ocurrencia de fenómenos climáticos en escala interdecadal; Koch and Markovic (2007).

Estos autores señalan que las correlaciones cruzadas de la observada hidroclimática de series de tiempo con el Atlántico Norte Oscilación (NAO) en la escala interdecadal indica una fuerte influencia de la NAO en la precipitación, aunque con efectos locales diferentes en Alemania.

Para la precipitación, los valores de Hurst, $H \sim$ fluctúan alrededor de 0,5 (indicando que sólo existiría una memoria a corto plazo) para la mayoría de las estaciones y $H \sim$ 0,6 (indicando cierta persistencia) para las estaciones en que tales a largo plazo de las oscilaciones están presentes.

Las correlaciones significativas de la precipitación en estas series sólo puede ser entendidas como una consecuencia del impacto de los otros forzantes de largo plazo como un comportamiento sistemático como el caso de la NAO.

La importancia de la estimación de H se justifica con los nuevos modelos de extremos que permiten incorporarlo en la estimación de la relación caudal máximo-periodo de retorno; Villarini, et al. (2009).

El método de análisis de media móvil (MA) o promedio móvil fue desarrollado para considerar las diferencias de segundo orden entre la señal y su función de media móvil, (DMA). Este método se aplica fácilmente y se puede estimar las propiedades de correlación para *series no* estacionarias y es ampliamente utilizado para cuantificar la correlación que subyace en las señales.

Recientemente Carbone extendió unidimensional DMA a una versión superior a estimar el exponente de Hurst de dimensiones superiores. Recientemente Gu y Zhou generalizaron un MFDFA a dimensiones más altas y han obtenido buenos resultados.

Los métodos MFDMA generalizadas fueron probados por medidas multifractales con propiedades conocida y los resultados numéricos estimados a partir de MFDMA presentaron en ajuste muy correcto.

Por otro lado, se ha comparado el rendimiento de MFDMA con MFDFA tanto para una dimensión y versiones de dos dimensiones, y encontraron que MFDMA es superior a MFDFA en los dos casos.

V.3. Metodología

La metodología consiste en estimar el parámetro de Hurst y los espectros multifractales para estudiar su variación con el tiempo. Se utilizó como un punto de corte la década de los años 70 que fue identificada en el capítulo III.

Se analiza la variación temporal del parámetro de Hurst y de la forma de la función de fluctuación multifractal para distintos periodos de tiempo de distintas series hidrológicas. Los datos corresponden a caudales observados en dos cuencas de características hidrológicas diferentes.

Los períodos de las sub-series analizadas fueron identificados con modelos estadísticos clásicos y como ya se señaló son coincidentes con los resultados de otras investigaciones realizadas en Argentina que señalan la existencia de cambios en el clima a partir de la década de los años setenta en ambos sistemas hidrológicos.

El primer método para estudiar el comportamiento de la serie temporal, denominado de rango rescalado, permite el estudio de la persistencia de largo plazo en series hidrológicas.

Se aplica el métodos MFDMA para la estimación del espectro multifractal para evaluar como los cambios del periodo de las observaciones en las series temporales se refleja en la forma del espectro y la predictibilidad.

Se aplica el método a series temporales climáticas e hidrológicas para evaluar de influencia de las primeras sobre el cambio de forma en el espectro multifractal.

Función de autocorrelación

La función de autocorrelación se estima con la siguiente expresión:

$$C(\tau) = \frac{1}{(N-\tau)\delta^2} \sum_{i=1}^{N-\tau} \delta_i \delta_{i+\tau} \quad \text{V. 1}$$

donde:

δ_i : datos utilizados para la estimación.

N: tamaño de la muestra.

Un proceso se define como de memoria larga (LRD) cuando $1 > H > 0.5$; se denomina auto similar o con autocorrelación persistente. Por lo tanto la autocorrelación decae potencialmente a 0., más lentamente:

$$\sum_{-\infty}^{\infty} \rho(k) = \infty \quad \text{V. 2}$$

El proceso se denomina sin memoria y no presenta autocorrelación, cuando $H=0.5$. Si $H \sim 0.5$, entonces se denomina con memoria de corto plazo (SRD, short range dependence), y en consecuencia la autocorrelación decae exponencialmente a 0.

$$\sum_{-\infty}^{\infty} \rho(k) = \sigma^2 \quad \text{V. 3}$$

El proceso cuando $0.5 > H > 0$; presenta autocorrelación antipersistente.

Método de Rescalado

Dada una serie temporal $x_i, i=1,2,\dots,N$ con una sumatoria acumulada relativa a su media. Las principales ecuaciones son:

$$\frac{R_N}{S_N} = \frac{\text{máx}(y_N) - \text{mín}(y_N)}{S_N} \quad \text{V. 4}$$

siendo:

$$y_N = \sum_{i=1}^N x_i - \bar{x}_N \quad \text{V. 5}$$

$$S^2_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(x_i - \bar{x}_N \right)^2 \quad \text{V. 6}$$

$$E \left[\frac{R_N}{S_N} \right] = D_H n^H \quad \text{V. 7}$$

con $n \rightarrow \infty$ donde D_H es una constante positiva y no depende de n .

Método MFDFA

Un método importante es el denominado Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MFDFA). Siendo una serie temporal $x_i, i=1,2,\dots,N$. Las principales ecuaciones son:

$$\delta_i = x_i - \langle x_i \rangle \quad \text{V. 8}$$

$$Y(k) = \sum_{i=1}^k \delta_i \quad \text{V. 9}$$

$$Y_s(k) = Y(i) - p_\nu(i) \quad \text{V. 10}$$

$$F^2_s(\nu) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s Y_s^2((\nu-1)s+i) \quad \text{V. 11}$$

$$F(s) = \left(\frac{1}{2N_s} \sum_{\nu=1}^{2N_s} F^2_s(\nu) \right)^{1/2} \quad \text{V. 12}$$

$$F_q(s) = \left(\frac{1}{2N_s} \sum_{\nu=1}^{2N_s} \left[F_s^2(\nu) \right]^{\frac{q}{2}} \right)^{1/q} \quad \text{V.13}$$

$$F_q(s) \approx s^{\alpha(q)} \quad \text{V.14}$$

$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{máx}} - \alpha_{\text{mín}} \quad \text{V.15}$$

$$\Delta\alpha = \alpha(q \rightarrow -\infty) - \alpha(q \rightarrow \infty) \quad \text{V.16}$$

El exponente generalizado de Hurst, $h(q)$ y el exponente de escalado $\tau(q)$ se relaciona con la siguiente expresión:

$$\tau(q) = qh(q) - 1 \quad \text{V. 17}$$

El espectro de singularidad $f(\alpha)$ es otro índice utilizado para describir una serie de tiempo multifractal, que se puede obtener a partir de $h(q)$ con la transformación de Legendre de primer orden:

$$\alpha = h(q) + qh'(q) \quad \text{V. 18}$$

$$f(\alpha) = q[\alpha - h(q)] + 1 \quad \text{V.19}$$

$$F(q) = qh(q) - 1 \quad \text{V.20}$$

Método MFDMA

La técnica está basada en los siguientes pasos del algoritmo MFDMA. La función es:

$$\sigma_{DMA}^2 = \frac{1}{N-n} \sum_{i=n}^N \left[x(i) - \tilde{x}_n(i) \right]^2 \quad \text{V. 21}$$

$$\tilde{x}_n(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^n x(i-k) \quad \text{V.22}$$

$$\sigma_{DMA}^2 = \frac{1}{N-n} \sum_{i=(1-\theta)n}^{N-n\theta} \left[x(i) - \tilde{x}_n(i) \right]^2 \quad \text{V.23}$$

$$\tilde{x}_n(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=-n\theta}^{n(1-\theta)} x(i-k) \quad \text{V.24}$$

Datos estandarizados . Las series de caudales diarias se se han estandarizado según la expresión presentada en Koscielny-Bunde et al. (2006).

Predictibilidad y dimensión fractal

Una utilidad práctica de la aplicación de los algoritmos anteriores consiste en estimar la dimensión fractal y aplicar la propuesta de Rangarajan y Sant (1997 y 2004) para medir la predictibilidad de una serie temporal.

La expresión de la predictibilidad, que depende de la dimensión fractal (D), se puede estimar con la siguiente expresión:

$$PQ = 2|D - 1.50| \quad \text{V. 25}$$

donde:

D: dimensión fractal,

H: exponente de Hurst,

PQ: predictibilidad de la serie temporal.

Medidas del espectro multifractal

Se aplican dos medidas:

Rango de multifractalidad

$$\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min} \quad \text{V. 16}$$

$$A = \frac{\alpha_0 - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_0} \quad \text{V. 27}$$

Índice de asimetría

A > 1 indica que el espectro se inclina a la izquierda (izquierda-sesgada).

A < 1 indica que la curva se inclina a la derecha (derecha sesgada).

La importancia de estimar estas medidas se relaciona con mejorar el entendimiento del significado físico de estos índices para interpretar los procesos asociados a la función multifractal. Para este tema se han desarrollado modelos de procesos complejos de cascada multiplicativos para relacionar estos índices con una *distribución multifractal binomial*.

V.4 Datos utilizados

Los datos aplicados corresponden a las cuencas de los ríos Neuquén y Paraná como se señaló en ambos ríos existen series temporales extensas, del orden de más de cien años que definen una información para estudios con fractales.

La posibilidad de alcanzar conclusiones acerca de la estructura fractal de una serie temporal depende de la cantidad de observaciones disponibles. Las primeras series hidrológicas utilizadas en esta parte del estudio son observaciones diarias que comienzan a principios del siglo XX. En escala mensual, se analizarán los datos de caudales de dos casos para estudiar sus relaciones con un indicador de la variabilidad climática natural.

Como un ejemplo se presentan las Figuras N° V.1 y V.2 con los gráficos de las series temporales de los datos de los caudales de los ríos Neuquén y Paraná.

Figura N° V.1. Gráfico de los caudales medios diarios. Río Neuquén, Paso de los Indios.

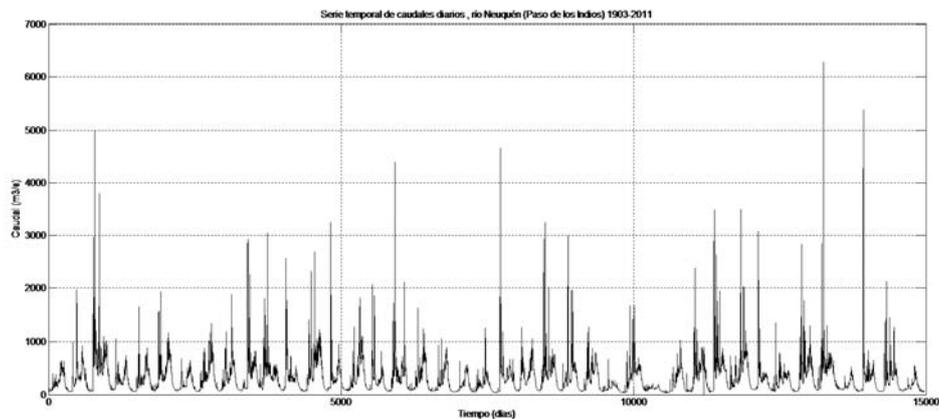
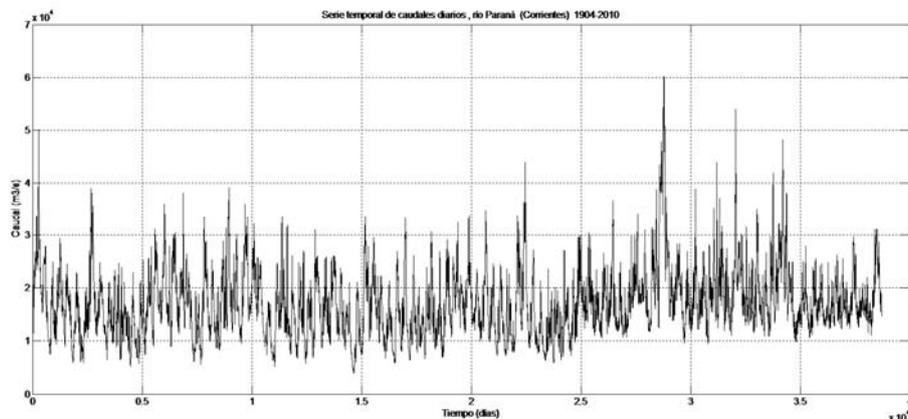


Figura N° V.2. Gráfico de los caudales medios diarios. Río Paraná, Corrientes.



V. 5 Resultados obtenidos

V.5.1 Estimación del parámetro de la función de autocorrelación

La función de autocorrelación de una serie temporal muestra la similitud entre las observaciones en referencia a la cantidad de tiempo que las separa. Las siguientes figuras muestran la presencia de autocorrelaciones que no decaen hacia cero y se observa que se estabilizan después de 1000 datos.

Figura N ° V.3. Función de autocorrelación en el río Neuquén en Paso de los Indios.

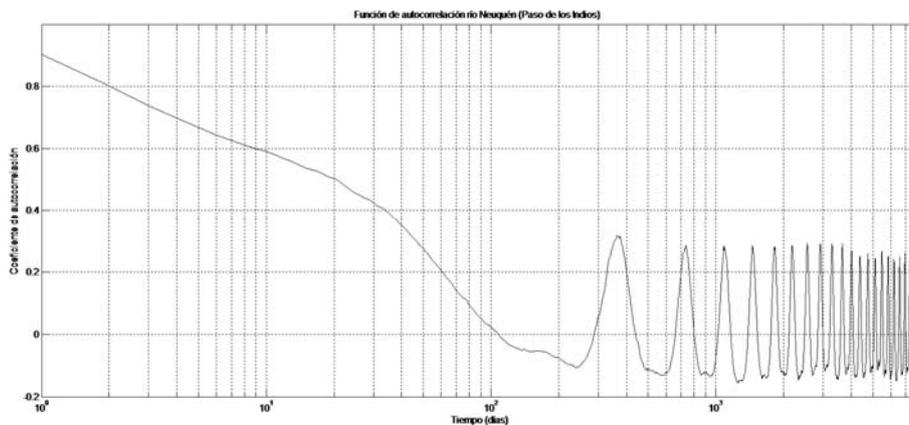
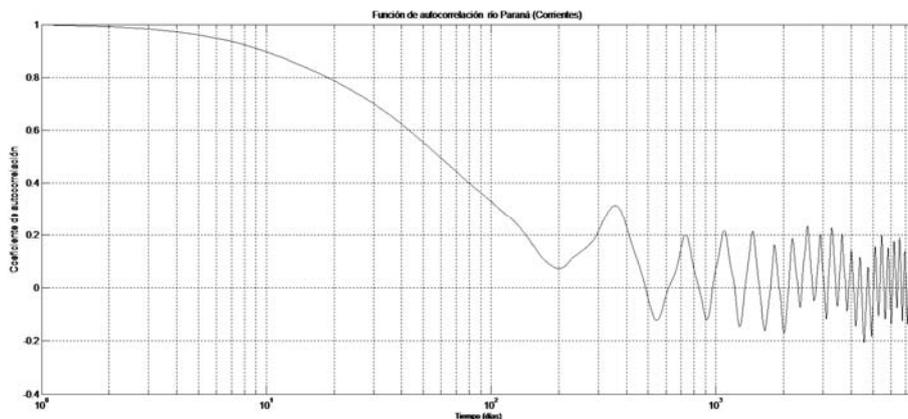


Figura N ° V.4. Función de autocorrelación en el río Paraná en Corrientes.



Esta forma de variación está asociada con la presencia de correlaciones de largo plazo y por lo tanto se desarrolla el análisis del principal indicador que es el exponente de Hurst.

V.5.2 Estimación del parámetro de Hurst (R/S)

Distintos métodos fueron aplicados para estudiar la existencia de un cambio en la estructura de la serie de caudales en el río Neuquén. El primer método es el denominado de rescalado (R/S) que permitió estimar el parámetro de Hurst en distintos periodos de observaciones de caudales diarios y evaluar la magnitud de sus variaciones y efectos sobre la predictibilidad; Tablas N ° V. 1 y 2.

Tabla N ° V.1. Exponentes de Hurst estimados en el río Neuquén.

Período	Exponente Hurst
1904-2011	0.7161
1904-1970	0.7512
1971-2011	0.7779

Tabla N ° V.2. Variación del índice de la predictibilidad en el río Neuquén.

Período	Predictibilidad
1904-2011	0.4322
1904-1970	0.5024
1971-2011	0.5558

Los resultados muestran la variación del valor del exponente de Hurst con la ventana temporal de la información y su relación con un indicador de la predictibilidad.

Si la dimensión fractal D para la serie de tiempo es 1.5, no existe una correlación entre los cambios de amplitud correspondientes a dos intervalos de tiempo sucesivos. Por lo Sin embargo, como la dimensión fractal disminuye a 1, el proceso se vuelve más y más

predecible Debido a que muestra " persistencia ". Es decir, la tendencia futura es más y más propensos a seguir una tendencia establecida.

Como la dimensión fractal aumenta de 1.5 a 2. el proceso de exposiciones "anti-persistencia ". Es decir, una disminución en la amplitud del proceso es más probable que conduzca a un aumento en el futuro.

Se observa que el indicador de predictibilidad se aparta de cero y para el segundo periodo es ligeramente mayor al primero.

Un valor de predictibilidad aproximado a cero indica que la serie se acerca al modelo de movimiento Browniano y muestra no predictibilidad. El valor cercano a uno es una indicación de predictibilidad.

V.5.3. Exponentes de Hurst y predictibilidad para distintas series hidrológicas

El análisis de la estimación del exponente de Hurst y del indicador de predictibilidad se realizó para datos observados en secciones seleccionadas de la cuenca del Paraná que presentan series de caudales diarios extensas.

A partir de la década de los años 70, se han construidos en Brasil numerosos embalses en las distintas cuencas del río Paraná que podrían haber modificado el comportamiento natural de las series de caudales diarios observados en Corrientes; Tabla N ° IV.3.

Tabla N ° V.3. Comparación de los exponentes de Hurst e Índices de predictibilidad para distintas series temporales diarias.

Cuenca	Lugar	Período	Hurst (H)	Dimensión fractal (D =2-H)	Predictibilidad PQ
Neuquén	Paso Indios	1904-2011	0.7161	1.2839	0.4322
Paraná	Corrientes	1904-2010	0.8074	1.1926	0.6148
Paraná	Túnel	1904-2010	0.8182	1.1818	0.6364

La cuenca del río Neuquén en la estación Paso de los Indios no presenta obras hidráulicas de magnitud que influirían directamente en la estimación del exponente de Hurst y por lo tanto en el indicador de predictibilidad.

Las distintas series muestran la presencia de persistencia de largo plazo y se observan diferencias en su predictibilidad. Las series utilizadas en el Paraná registran

observaciones de cuencas del orden de millones de km^2 en tanto que el Neuquén es del orden de 32000km^2 .

V.5.4. Orígenes de la multifractalidad para distintas series hidrológicas

Las causas de la multifractalidad pueden ser analizadas estudiando el efecto que la aplicación de un algoritmo que realice permutaciones de la serie original para evaluar el cambio de la forma de la función de los exponentes generalizados de Hurst.

Cuando se observa un cambio en la forma de la función $h(q)$ se asocia con la presencia de correlaciones y si se mantiene su forma se debe considerar la ocurrencia de observaciones alejadas de una función de densidad de probabilidades Normal.

Con la función generalizada de Hurst se realiza un análisis para evaluar los cambios con el tiempo después de la década de los años 70. Por lo tanto se ha evaluado para valores de q entre -5 y 5.

La observación de los valores de la función generalizada de Hurst muestra un cambio con la permutación de la serie temporal. Por lo tanto, el origen de la multifractalidad estaría asociado con la persistencia de largo plazo.

Se analiza la variación de los valores del exponente generalizado de Hurst, $h(q)$ y se observa que para la zona de valores de q negativos la función h son ligeramente mayores que los estimados para el segundo periodo de observaciones (1971-2012) respecto al primer periodo de los caudales.

Para valores de q positivos y valores mayores que 2 se observa una menor persistencia de largo plazo.

Tabla N ° V.4. Exponentes generalizados de Hurst. Caudales medios diarios. Río Neuquén, Paso de Indios, períodos: 1903-1971, 1972-2012. MFDMA.

q	1904-1971		1972-2012	
	h(q)	h(q) (shuffled)	h(q)	h(q) (shuffled)
-5	1.0670	0.5127	1.1188	0.5762
-4	1.0271	0.5046	1.0748	0.5608
-3	0.9746	0.4974	1.0167	0.5449
-2	0.9127	0.4912	0.9499	0.5288
-1	0.8552	0.4860	0.8906	0.5130
0	0.8110	0.4811	0.8418	0.4977
1	0.7776	0.4753	0.7959	0.4828
2	<u>0.7494</u>	0.4678	<u>0.7514</u>	0.4683

3	0.7237	0.4581	0.7119	0.4540
4	0.7002	0.4467	0.6793	0.4398
5	0.6796	0.4342	0.6530	0.4261

Figura N° V.5. Exponentes generalizados de Hurst para caudales diarios del Río Neuquén, Paso de los Indios, primer período.

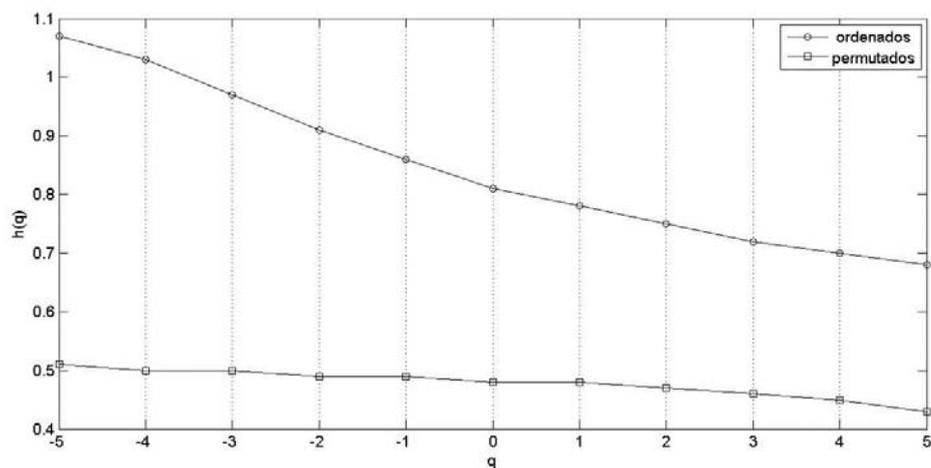
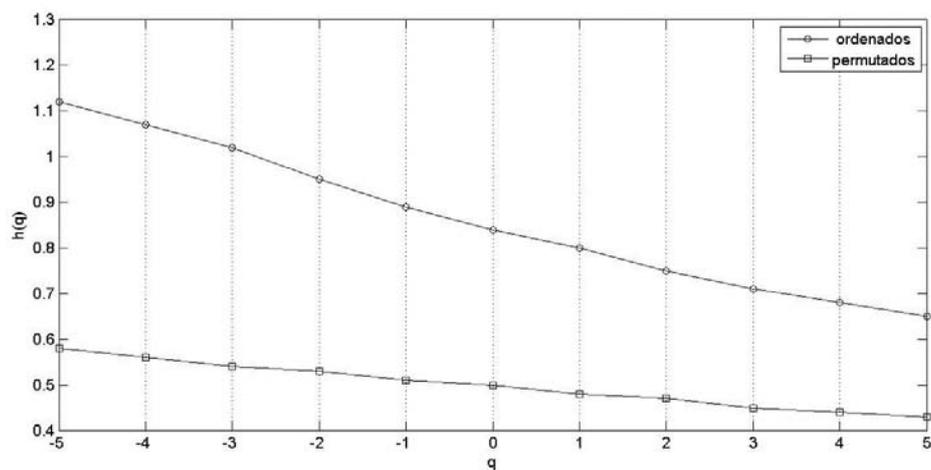
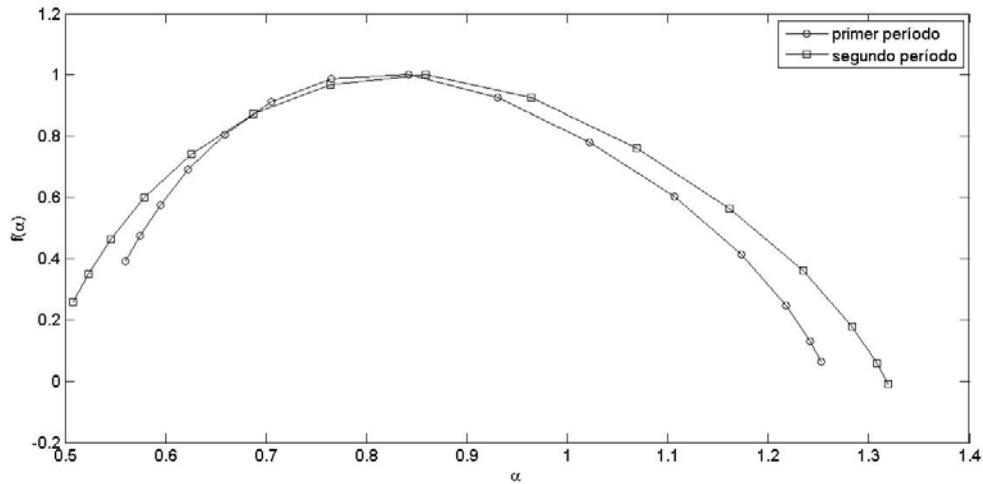


Figura N° V.6. Exponentes generalizados de Hurst para caudales diarios del Río Neuquén, Paso de los Indios, segundo período.



En la Figura N ° V.7 muestra las diferencias entre ambos casos y un cambio de la forma del espectro multifractal.

Figura N ° V.7. Espectro multifractal en el río Neuquén Paso de los Indios, caudales medios diarios.



La tabla V.6 muestra una variación diferenciada de los valores de h. Para la zona de valores de q negativos los valores de h son ligeramente mayores para el segundo periodo de observaciones (1971-2012) con respecto al primer periodo.

Tabla N ° V.6. Exponentes generalizados de Hurst caudales medios diarios. Río Paraná, Corrientes, periodos: 1904-1971, 1972-2013. MFDMA.

q	1904-1971		1972-2012	
	h(q)	h(q) (shuffled)	h(q)	h(q) (shuffled)
-5	1.1725	0.5575	1.1956	0.5229
-4	1.1274	0.5475	1.1520	0.5131
-3	1.0643	0.5384	1.0910	0.5038
-2	0.9821	0.5302	1.0151	0.4957
-1	0.8970	0.5228	0.9437	0.4893
-0	0.8313	0.5165	0.8920	0.4850
1	0.7862	0.5114	0.8550	0.4820
2	0.7535	0.5076	0.8220	0.4793
3	0.7275	0.5046	0.7894	0.4757
4	0.7057	0.5016	0.7610	0.4709
5	0.6871	0.4982	0.7386	0.4649

Figura N° V.8. Exponentes generalizados de Hurst para caudales diarios Río Paraná, Corrientes, primer período.

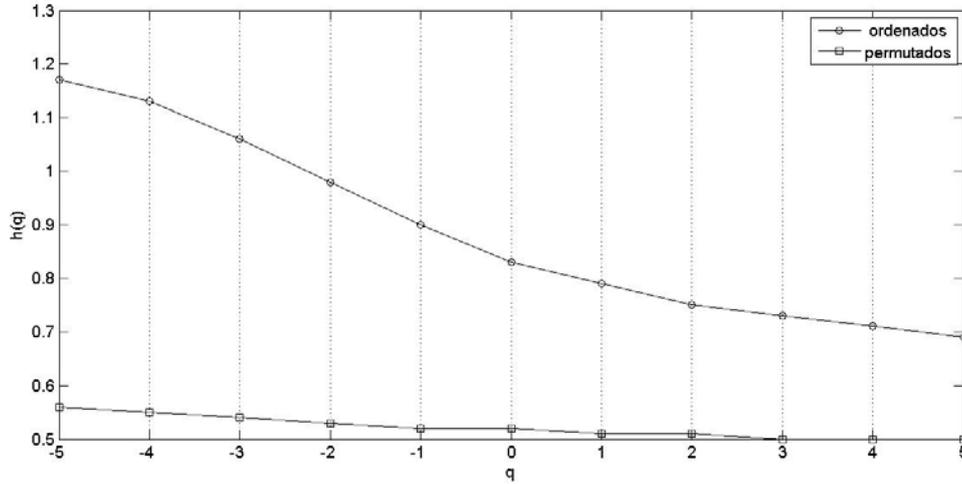
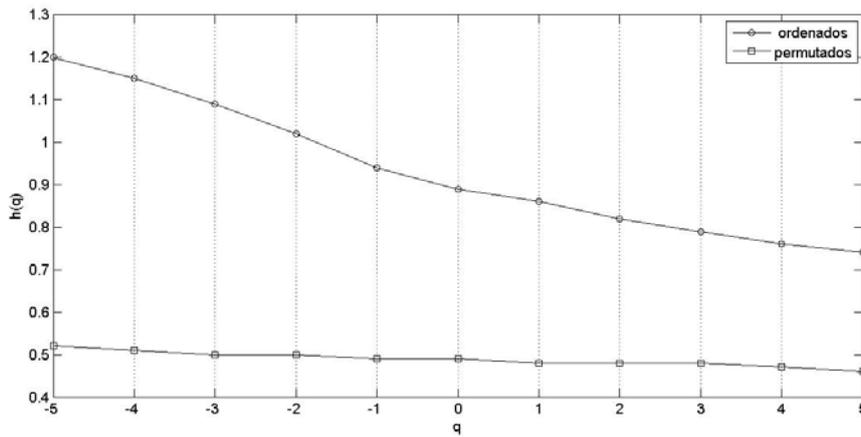


Figura N° V.9. Exponentes generalizados de Hurst para caudales diarios Río Paraná, Corrientes, segundo período.

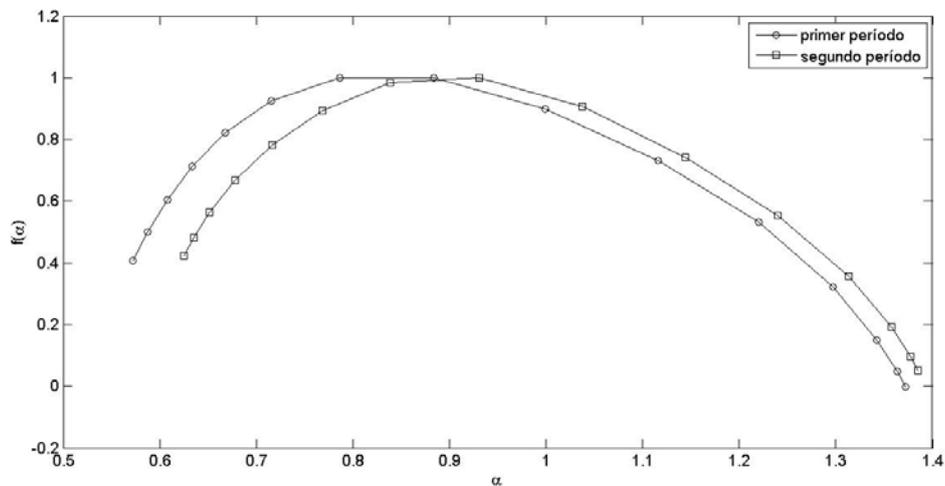


Para valores de q positivos y valores mayores que 2 se observa una mayor persistencia de largo plazo. Este resultado se podría asociar con la regulación de los embalses sobre los caudales menores y por lo tanto existirá una menor variabilidad.

Los dos casos analizados son diferentes en la parte positiva de q y por eso se propone la idea del efecto de la regulación de los caudales que existen en el río Paraná, aguas arriba de la sección donde se observan los caudales.

Las diferencias entre ambos casos se pueden observar en el cambio de la forma del espectro multifractal.

Figura N° V.10. Espectro multifractal en el río Paraná, Corrientes, caudales medios diarios.



V.5.5. Multifractalidad para series hidrológicas en escala mensual

En este párrafo se presentan los resultados de estimar los exponentes generalizados de Hurst para los datos de las dos cuencas cambiando la escala de análisis a un nivel mensual.

La Tabla N°V.7 presenta los exponentes para los mismos periodos y se observa un comportamiento semejante al discutido en el párrafo anterior.

Tabla N° V.7. Exponentes generalizados de Hurst caudales medios mensuales. Río Neuquén, Paso de Indios, períodos: 1903-1971, 1972-2012. MFDMA.

q	1904-1971		1972-2012	
	h(q)	h(q) (shuffled)	h(q)	h(q) (shuffled)
-5	0.6576	0.5155	1.0921	0.5639
-4	0.6389	0.5040	1.0434	0.5476
-3	0.6209	0.4944	0.9799	0.5298
-2	0.6082	0.4873	0.9017	0.5114
-1	0.6044	0.4813	0.8163	0.4932

-0	0.6075	0.4734	0.7344	0.4738
1	0.6108	0.4608	0.6629	0.4508
2	0.6090	0.4432	0.6043	0.4230
3	0.6016	0.4219	0.5584	0.3914
4	0.5907	0.3993	0.5234	0.3588
5	0.5785	0.3775	0.4966	0.3281

Figura N° V.11. Exponentes generalizados de Hurst .Caudales medios mensuales Río Neuquén, Paso de Indios, primer período.

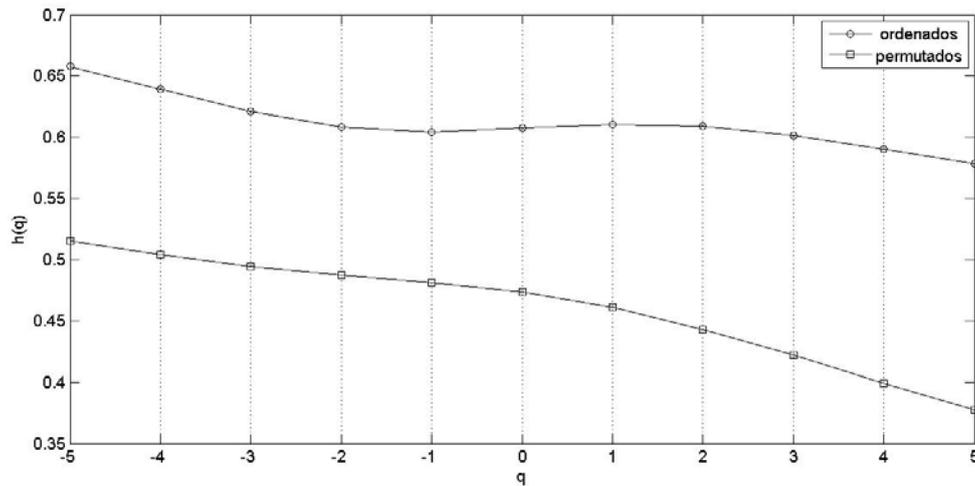


Figura N° V.12. Exponentes generalizados de Hurst. Caudales medios mensuales Río Neuquén, Paso de Indios, segundo período.

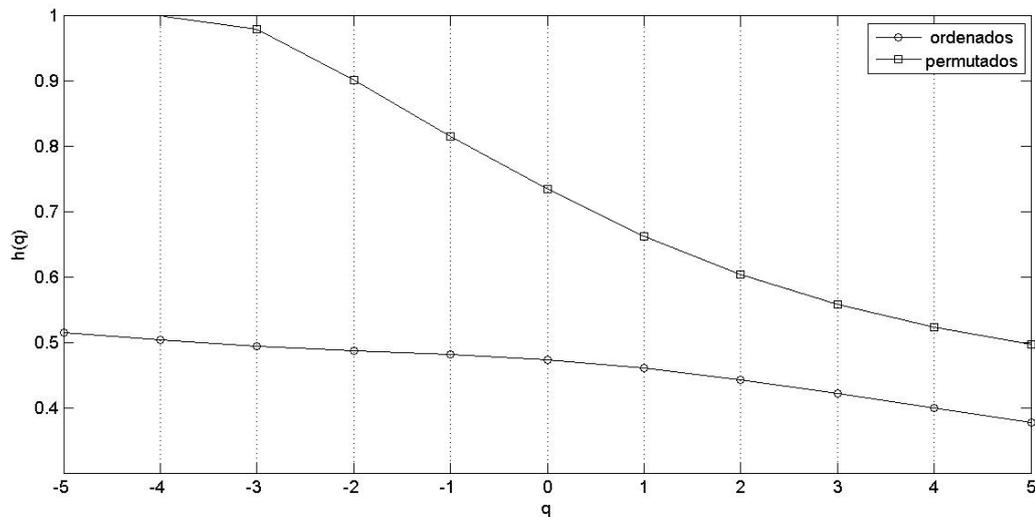


Figura N ° V.13. Espectro multifractal en el río Neuquén Paso de los Indios, caudales medios mensuales.

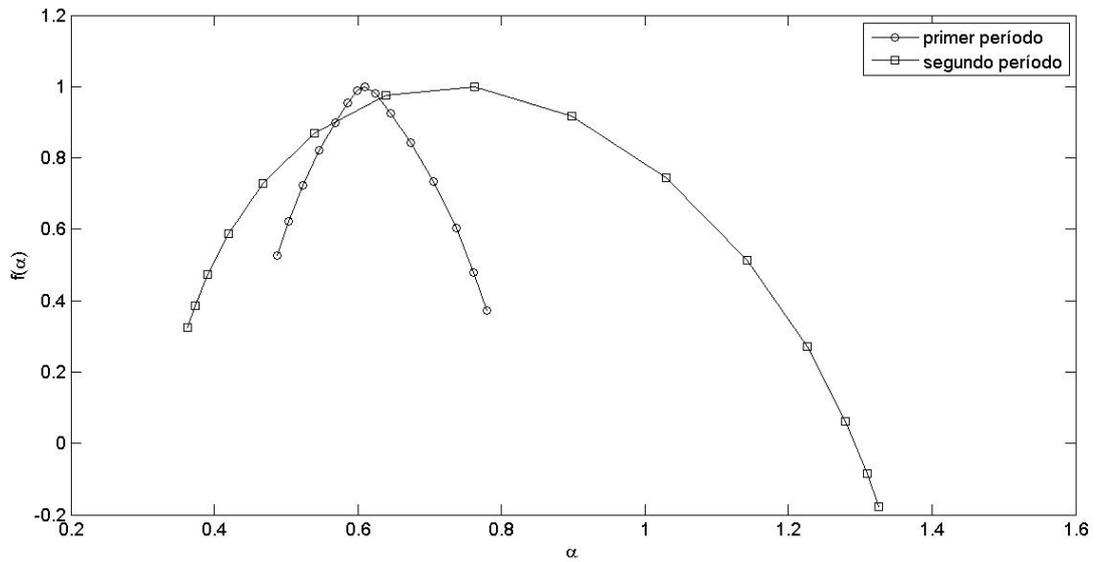


Tabla N ° V.8. Exponentes generalizados de Hurst (MFDMA). Caudales medios mensuales

Río Paraná, Corrientes, períodos: 1904-1971, 1972-2013				
q	1904-1971		1972-2012	
	h(q)	h(q) (shuffled)	h(q)	h(q) (shuffled)
-5	0.7957	0.6558	0.9197	0.5538
-4	0.7636	0.6399	0.8977	0.5301
-3	0.7260	0.6230	0.8738	0.5034
-2	0.6860	0.6065	0.8508	0.4745
-1	0.6481	0.5918	0.8304	0.4449
-0	0.6149	0.5788	0.8049	0.4156
1	0.5867	0.5661	0.7528	0.3868
2	0.5627	0.5519	0.6616	0.3578
3	0.5418	0.5357	0.5614	0.3287
4	0.5230	0.5178	0.4846	0.3008
5	0.5057	0.4992	0.4321	0.2759

Figura N° V.14. Exponentes generalizados de Hurst. Caudales medios mensuales Río Paraná, Corrientes, primer período.

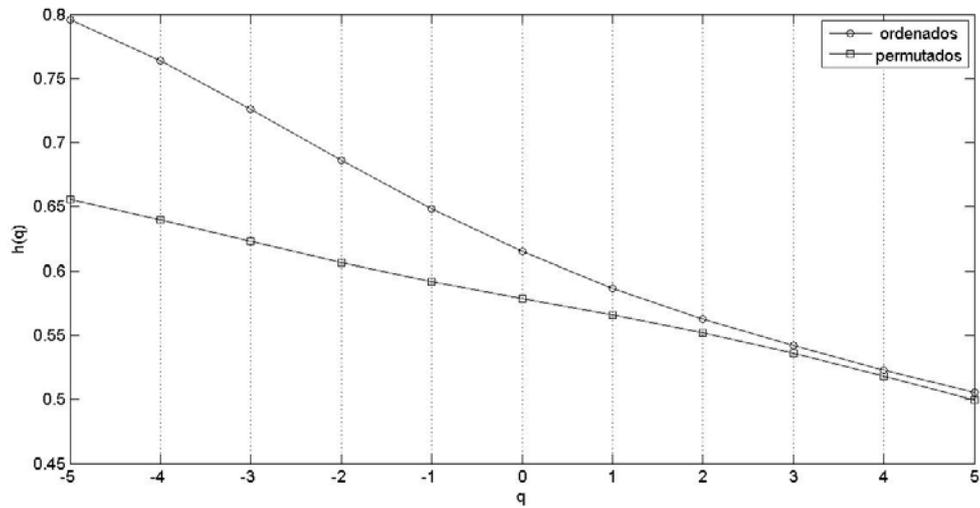


Figura N° V.15. Exponentes generalizados de Hurst, Caudales medios mensuales Río Paraná, Corrientes, segundo período.

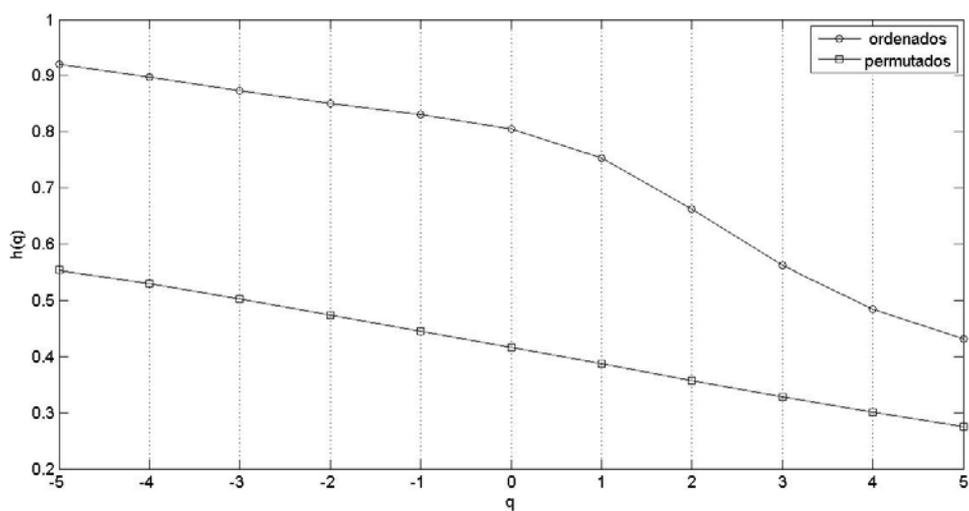


Figura N ° V.16. Espectro multifractal en el río Paraná, Corrientes, caudales medios diarios.

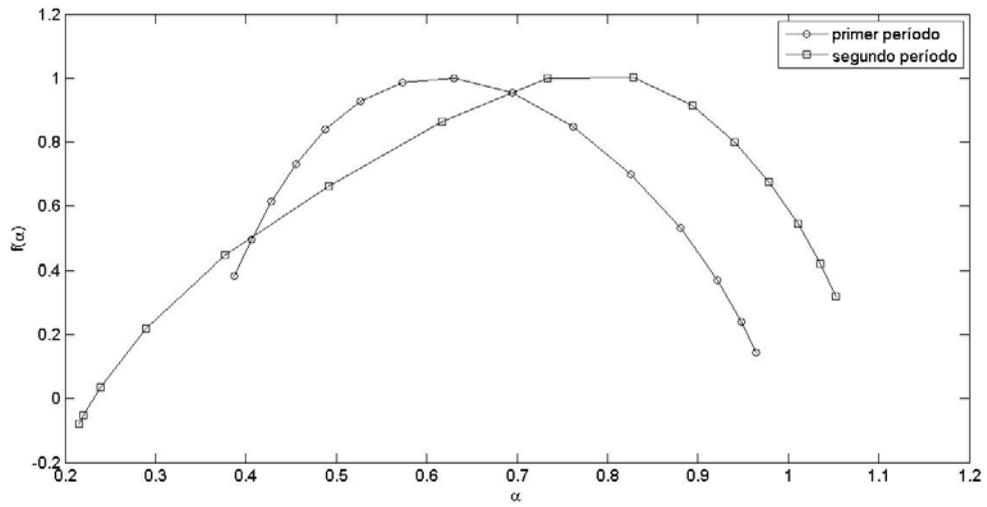


Figura N ° V.17. Comparación de espectros multifractales caudales medios mensuales, primer período.

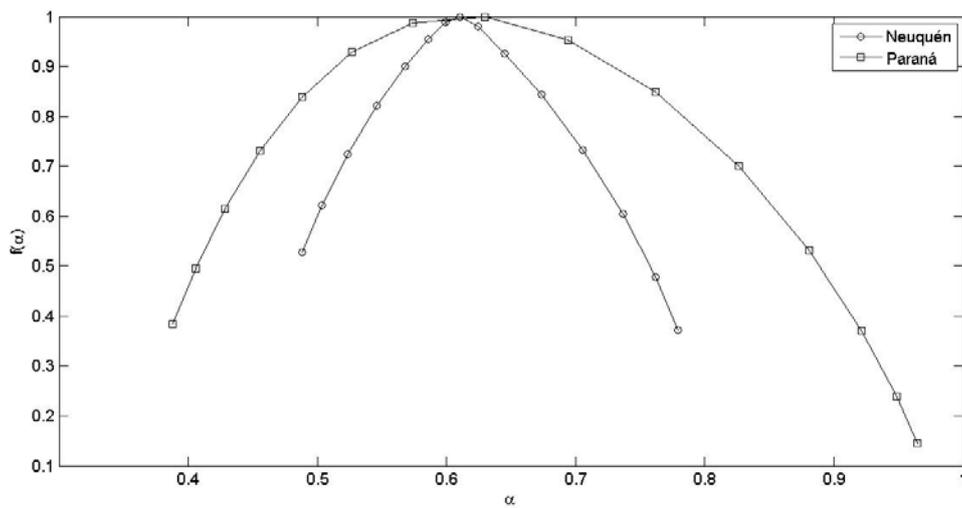


Figura N ° V.18. Comparación de espectros multifractales caudales medios mensuales, segundo período.

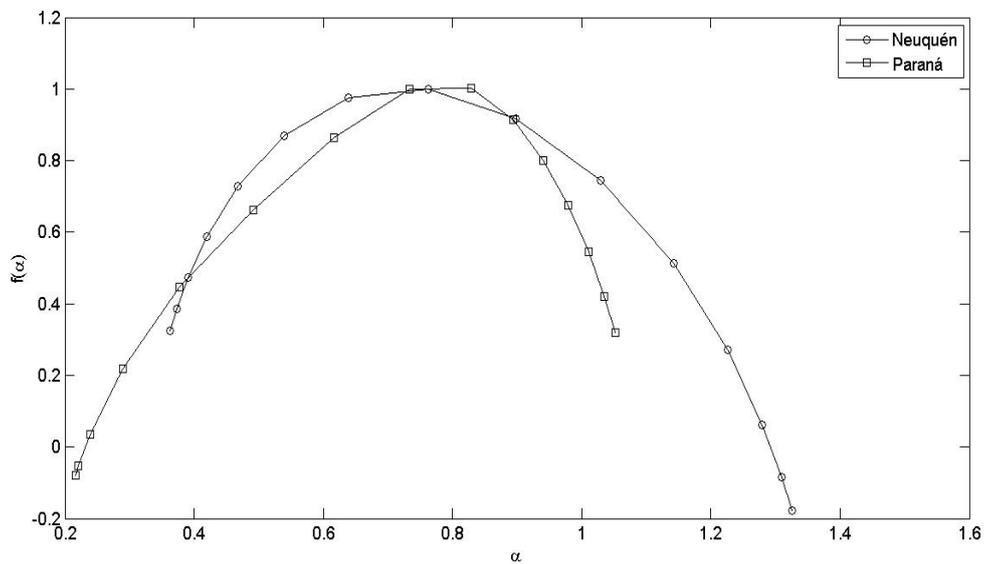
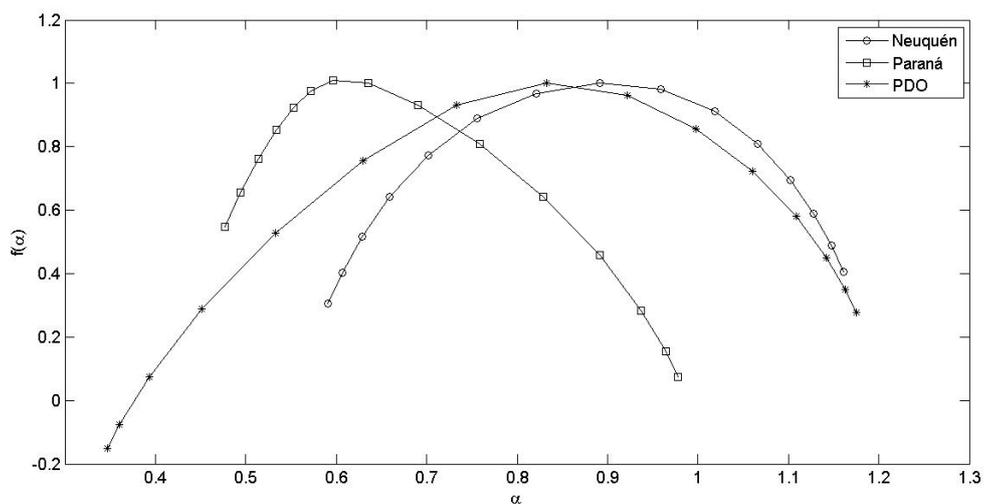


Figura N ° V.19. Comparación de espectros multifractales con PDO, período completo.



Las diferencias observadas en los últimos espectros multifractales estimados muestran el interés por calcular medidas de asimetría para contar con más información sobre el proceso de generación multifractal subyacente.

V.5.6. Multifractalidad y la relación entre series geofísicas

En este párrafo se comparan los indicadores de asimetría de los espectros multifractales para evaluar la posibilidad de estudiar los efectos de una serie temporal de variabilidad climática natural sobre la serie de los caudales observados en las dos cuencas.

Tabla N ° V.9. Análisis de asimetría de distintas series geofísicas

Índice	Período completo			
	SOI	PDO	Paraná	Neuquén
$\Delta\alpha$	0.45	0.57	0.83	0.50
A	0.33	1.11	1.42	0.46
H(q=2)	0.56	0.81	0.75	0.58

Los resultados muestran que los indicadores de asimetría del Índice de Oscilación del Sur se aproximan más a los estimados para la serie observada en el río Neuquén y los del PDO al Paraná. El índice A muestra espectros con asimetrías diferentes, algunas mayores que 1, por ejemplo la serie caudales del Paraná y otras menores como la del río Neuquén.

Estos resultados son dependientes de la ventana temporal y por ese motivo son una primera aproximación a la descripción de la forma de asociación que debería completarse con un análisis de las dos series con el tiempo.

A partir de las ideas de Serinaldi (2010) se realizó un análisis preliminar, para estudiar las variaciones entre las estimaciones del exponente de Hurst utilizando otros métodos de cálculo (Peng e Higuchi) que pondrían en evidencia la estructura del proceso subyacente.

Tabla N ° V.10. Análisis de dos series geofísicas PDO y SOI.

H	total	SOI		total	PDO	
		1 período	2 período		1 período	2 período
Peng	0.900	0.986	1.117	0.921	0.979	0.956
Higuchi	0.628	0.603	0.795	0.845	0.850	0.838
MFDMA(q=2)	0.563	0.385	0.687	0.811	0.832	0.790

Tabla N ° V.11. Análisis de dos series de caudales Neuquén y Paraná.

	Neuquén	Paraná
--	---------	--------

H	total	1 período	2 período	total	1 período	2 período
Peng	0.911	0.994	0.928	0.900	0.941	1.053
Higuchi	0.691	0.739	0.670	0.757	0.696	0.748
MFDMA(q=2)	0.583	0.609	0.604	0.751	0.563	0.662

Los resultados anteriores indican la importancia de estudiar el proceso para poder seleccionar mejor el método de estimación adecuado al supuesto modelo generador. Por ejemplo: fBM o FGm.

Discusión de resultados

Los valores estimados de H para el río Paraná están en el rango de 0.77 a 0.82. Los casos presentados por Koescienly-Bunde (2006) presentan del mismo orden para los casos de los caudales medios diarios valores.

El caso del río Neuquén (0.75-0.77) se encuentra en el rango de otros ríos con áreas semejantes, por ejemplo, los casos del río Orinoco con un área de 836000 km², el Mississippi (1.805000 km²).

En cuanto al origen de la multifractalidad la primera observación indica que los valores de la función generalizada de Hurst cambian con la permutación de la serie temporal. Por lo tanto, el origen está asociado con la persistencia de largo plazo.

Los espectros multifractales estimados son diferentes según: a) el régimen hidrológico (húmedo, semiárido o árido), b) regulación asociada con la presencia de obras hidráulicas que regulan los caudales y c) el tamaño de la cuenca.

La mayor diferencia se observa para la última parte del periodo de observación de los caudales diarios (1971-2011) y resulta una medida de la fuerza del fractal del aumento de su variabilidad.

Las diferencias son muy marcadas entre los ríos regulados y no regulados. En el Paraná para dos series estudiadas los valores son de 0.19 y 0.14.

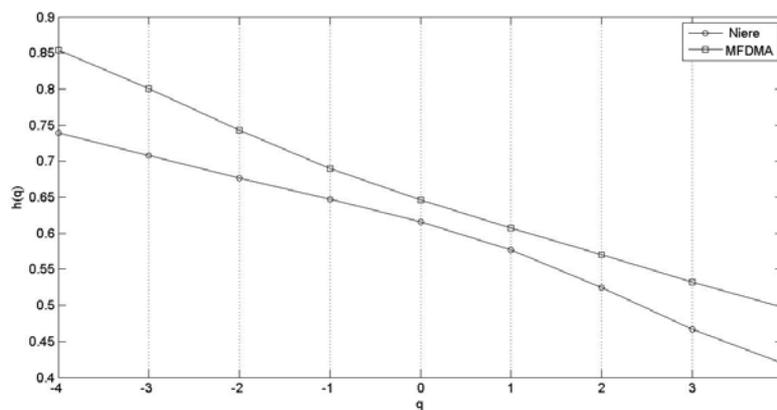
En este caso el río Paraná aunque está más regulado, a partir de los años 70, se observa los caudales más grandes en la segunda parte (1971-2011) asociados con el fenómeno de El Niño y la variabilidad interdecadal.

Para evaluar el método MFDMA Gu, *et al.* (2010) se aplicó el algoritmo a los datos utilizados en el trabajo de Niere (2013) y se compararon los resultados obtenidos. Los datos que se utilizan son de la serie de diferencias entre el Peso Filipino Peso y el US Dollar desde el 2 de enero de 1998 hasta el 31 de julio del 2013.

Tabla N ° V.12. Análisis de dos series MFDFA Y MFDMA.

q	Niere	MFDMA
-4	0.739	0.854
-3	0.708	0.801
-2	0.677	0.743
-1	0.647	0.690
0	0.616	0.646
1	0.577	0.607
2	0.525	0.570
3	0.467	0.532
4	0.419	0.497

Figura N° V.20. Comparación de los resultados de la función generalizada de Hurst estimada con los métodos MFDFA y MFDMA.



Los resultados de este experimento numérico muestran que el comportamiento es semejante. Esta observación coincide con los resultados de otras comparaciones realizadas en investigaciones sobre el tema.

Los índices de predictibilidad estimados representan un complemento de los calculados en Rangarajan y Sant (2004) para otras series geofísicas, por ejemplo, temperatura, presión atmosférica y viento.

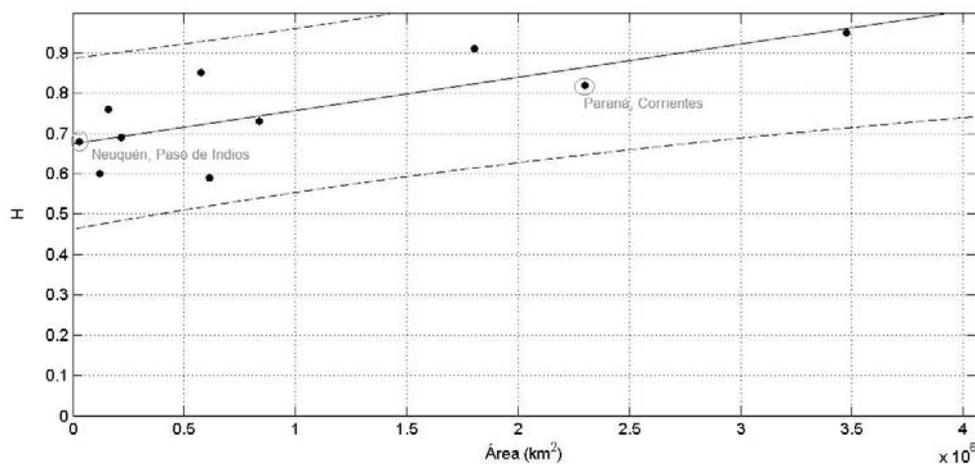
La siguiente Tabla muestra los resultados de estimar los exponentes de Hurst para los casos del trabajo de Koescienly-Bunde *et al.* (2006) y se ha incorporado las estimaciones realizadas en las etapas anteriores.

Tabla N° V.13. Análisis de dos series de caudales Neuquén y Paraná. Escala diaria.

Río	Area (km ²)	Exponente de Hurst
Orinoco	836000	0.73
Zaire	3475000	0.95
Columbia	613830	0.59

Missisipi	1805000	0.91
Danube	576232	0,85
Fraser	217000	0.69
Niger	120000	0.6
Rhein	159680	0.76
<i>Paraná (Corrientes)</i>	<i>2300000</i>	<i>0.82</i>
<i>Neuquén (Paso de Indios)</i>	<i>30317</i>	<i>0.68</i>

Figura N° V.21. Comparación con datos estimados de otros ríos.



V. 6. Conclusiones

La estimación de los exponentes generalizados de Hurst y los espectros multifractales para las distintas series geofísicas observadas han permitido describir cuantitativamente la importancia de los cambios en la descripción multifractal de las series de caudales diarios y mensuales observados a partir de los años 70.

Las variaciones observadas en el parámetro generalizado de Hurst para los valores positivos y negativos de q están asociadas con la ocurrencia de cambios en la persistencia de largo plazo de las crecidas y los estiajes. Estos cambios se observan en dos zonas críticas del hidrograma: *caudales máximos y mínimos*.

En el caso de la serie observada de caudales en el del río Paraná la regulación asociada con la presencia de obras hidráulicas justifica que se incremente la persistencia de largo plazo de los caudales mínimos.

En este caso el río está más regulado a partir de los años 70 y se caudales más grandes en la segunda parte (1971-2011) que podrán estar asociados con el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur y la variabilidad interdecadal.

Los exponentes de Hurst estimados son consistentes con las referencias bibliográficas. Se estudió para las series hidrológicas de caudales analizadas la causa de la multifractalidad que en estos casos se asocia con la presencia de memoria de largo plazo. Los valores de la función generalizada de Hurst cambian con la permutación de la serie temporal.

Para estas dos cuencas, los exponentes generalizados de Hurst, el espectro multifractal y el rango de singularidades calculados son potencialmente útiles para verificar los ajustes de modelos hidrológicos de precipitación caudal que se están desarrollando para evaluar el efecto del cambio climático global y para el dimensionamiento de grandes obras hidráulicas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES GENERALES / GENERAL CONCLUSIONS

VI.1 Conclusiones generales

En este capítulo se integran los resultados obtenidos aplicando modelos probabilísticos a la estimación de valores de caudales extremos en cuencas de gran extensión. La significación de esta línea de investigación se asocia con la necesidad de contar con nuevos métodos para definir con más precisión las medidas de mitigación y atenuación de los efectos del cambio climático global.

De acuerdo con esta argumentación, el análisis de la incertidumbre bajo modelos probabilísticos considera distintas causas: los datos (muestra), el modelo (función de densidad de probabilidades) y los métodos de estimación de los parámetros.

En esta tesis se consideró una particularidad observable en cuencas de gran extensión: la presencia de obras hidráulicas de muy diferente importancia. Por ejemplo: grandes embalses, puentes nacionales e internacionales y obras de control de inundaciones para ciudades.

Las obras hidráulicas de esta complejidad se diseñan para horizontes de tiempo extensos y pueden demorar hasta una década desde el momento del proyecto hasta el su puesta en operación.

Para obras civiles con horizontes extensos la aplicación de los resultados de modelos de cambio climático global asociados con los hidrológicos es importante dado que contribuirá a desarrollar mejores medidas para la adaptación de sus efectos sobre distintos usos del agua.

En Argentina existe un inventario de proyectos de obras hidroeléctricas que incluyen las actualmente en operación y las que se encuentran en planificación. Entre las primeras se destacan Yacyretá (río Paraná, tramo superior), Salto Grande (río Uruguay) y Uruguái (río Uruguái), construidas y operando que definen un aporte sustancial a la matriz energética Argentina. Entre las proyectadas se cuentan: Corpus Christi e Iratí – Itacorá (ambas en el río Paraná, tramo superior) Garabí y Panambí (río Uruguay) y Paraná Medio Sur y Norte (en el tramo medio del río Paraná). Las obras del río Paraná, tramo superior, tienen una fuerte influencia del río Iguazú asociada con la ocurrencia de sus importantes crecidas.

Distintos informes técnicos muestran una clara oportunidad de identificar un conjunto de estudios avanzados de centrales hidroeléctricas, que entrarán en operación en el futuro. Estas obras son importantes porque aún es posible incorporar, sin costos significativos, las modificaciones y los cambios en el diseño de los proyectos. Entre los aprovechamientos se destacan: Corpus Christi, Garabí y Panambí.

En este punto se debe incorporar otro concepto que orientó esta investigación, que consiste en describir cuantitativamente la importancia de los cambios en la respuesta hidrológica en cuencas extensas y evaluar sus efectos sobre los parámetros de diseño de obras hidráulicas.

Por esta razón, fueron seleccionadas la cuenca del río Neuquén, que presenta un área total de 30843 km² (Paso de los Indios) y la cuenca del río Paraná, con un área total de 1.950.000 km² (Corrientes).

Se ha observado que aun para periodos de retorno bajos las diferencias entre las estimación en los caudales extremos serán disímiles variando con la función de densidad de probabilidades y la ventana temporal utilizada para las estimación de los parámetros.

Esta situación es importante porque existen nuevas técnicas para relacionar la presencia de puntos de cambio múltiples, que definen con más precisión la influencia de los efectos de la variabilidad climática natural sobre las propiedades estadísticas de las muestras. Estas serán usadas para la estimación de los parámetros de la función de densidad de probabilidades y por lo tanto en el diseño hidráulico de componentes de las obras.

Los conceptos anteriores muestran la necesidad de estudiar fenómenos extremos, por ejemplo las crecidas extraordinarias asociadas con nuevos eventos meteorológicos y la modelación de sistemas complejos para evaluar los resultados de las estimaciones con la teoría de valores extremos en Ingeniería.

La detección de los puntos de cambio múltiple contribuye a mejorar el proceso de selección de la muestra más adecuada para estimar los parámetros de diseño, tanto en la etapa de planificación como en la de diseño. En particular cuando se pueden relacionar estos cambios con indicadores de la variabilidad climática natural periten alcanzar una mejor explicación de las relaciones entre series geofísicas.

Los resultados alcanzados permiten señalar:

- 1) En Argentina, lo mismo que en otros numerosos países, existen obras hidráulicas cuyos parámetros de diseños fueron estimados con métodos antiguos y con series

hidrológicas observadas antes que ocurrieran modificaciones en las propiedades estadísticas de la muestra.

Las causas pueden ser, la utilización de series hidrológicas cortas o los cambios en las propiedades estadísticas a lo largo de distintos periodos de la información.

En esta Tesis se estudió el problema del cambio de las propiedades estadísticas con el tiempo para dos miradas, una basada en los modelos probabilísticos y otra en la teoría fractal.

2) Para dos cuencas de gran extensión (Neuquén y Paraná y) se realizó un análisis de la evidencia empírica que muestra la necesidad de mejorar las explicaciones de las causas de los cambios bajo la hipótesis de su dependencia del clima. Este conocimiento contribuye a la identificación de las obras más vulnerables a las condiciones futuras del clima.

Para la cuenca del río Neuquén se analizó la importancia de una crecida ocurrida que condujo a la re-estimación de una Crecida Máxima Probable y la construcción de una nueva obra hidroeléctrica y de control de inundaciones.

En la cuenca del río Paraná, se analizó el incremento en la cantidad de inundaciones rurales y urbanas. En obras hidráulicas de mayor importancia, como la presa de Corpus, se observó una variación significativa en los caudales máximos anuales estimados, según el periodo de las observaciones, y posiblemente asociada con la variabilidad climática natural.

3) Las cuencas de gran extensión presentan obras hidráulicas de muy diferente importancia y diseñadas para diferentes periodos de retorno y vidas útiles. Los cambios a partir de la década de los años 70 en las políticas ambientales y económicas fueron evaluados como una respuesta a las nuevas percepciones del riesgo de las economías más industrializadas a continuar considerando al medio ambiente como si fuera totalmente controlable. En la actualidad las soluciones de la ingeniería tienen como objetivo utilizar el conocimiento hidrológico para definir mejores soluciones que se adapten al cambio climático global y a la variabilidad climática natural para mitigar los impactos.

4) La decisión de realizar un análisis de vulnerabilidad ante cambios en las relaciones periodo de retorno-caudales máximos depende directamente de contar con métodos y

modelos adecuados para definir la presencia de tendencias y/o cambios múltiples en las series de caudales máximos medios diarios.

Los ejemplos presentados muestran la importancia de contar con métodos para la detección de tendencias y cambios múltiples en series temporales, de analizar de la variabilidad climática natural sobre los caudales y **de** estimar los efectos del cambio climático global sobre las componentes del ciclo hidrológico utilizadas en Ingeniería para diseñar medidas de atenuación de los impactos.

5) La propiedad de integración de efectos de la variable caudal de distintos forzantes meteorológicos es conocida, por esta causa se orientó la investigación a estudiar posibles relaciones de causalidad, se seleccionaron las asociadas con la variabilidad climática natural y por lo tanto fue necesario evaluar más de un punto de cambio en series de valores extremos

6) Un núcleo de la investigación fueron las pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas aplicadas al análisis de distintas series de caudales extremos. Así, se demostró la importancia de estudiar el problema de la ocurrencia de puntos de cambio múltiples dada la existencia de varios puntos de cambio en indicadores de la variabilidad climática natural. En el caso de la cuenca del río Paraná además de la complejidad de las obras hidráulicas se encuentra cambios en los usos del suelo que deben influir en las componentes del escurrimiento superficial. Este es un tema de investigación abierto que no se estudió en este trabajo.

7) Un resultado fue la clara identificación del punto de cambio en las series de caudales máximos observados en las dos cuencas a partir de la década de los años 70.

Se observó que resultó más complejo detectar el segundo punto de cambio asociado con otra fase de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) ocurrido entre las décadas de los años 20 y 40.

La aplicación de un nuevo método permitió detectar los puntos señalados en la bibliografía del PDO y mostrar la dificultad para detectar su impacto sobre la respuesta medida en las series de caudales máximos.

8) Los resultados de los experimentos numéricos realizados muestran la importancia de la época del diseño dado los cambios en las propiedades estadísticas de las series de caudales máximos y asociados con la variabilidad climática natural.

9) Pittock y Hartmann (2011) señalaban que los embalses construidos afectan a ríos y ecosistemas de agua dulce en todo el mundo. El estudio mostró la evaluación del desempeño estructural y de las prestaciones de numerosos embalses y señalan que muchas obras son inseguras y no producen los beneficios considerados en el diseño. La presencia de los cambios definidos en nuevos estudios hidrológicos requerirá la evaluación de su seguridad y de su funcionamiento.

Estos autores han examinados casos de re-evaluación de las presas de Australia, China, Francia y Estados Unidos, que muestran un desafío de la gestión de proceso (¿?) de obsolescencia (o envejecimiento); las oportunidades no alcanzadas para mejorar los beneficios ambientales, sociales y económicos; y los beneficios de los sistemas ante el relicenciamiento.

En este punto se incorpora otro concepto que orientó a esta investigación, la necesidad de describir cuantitativamente la importancia de los cambios en la respuesta hidrológica en cuencas extensas y evaluar sus efectos sobre los parámetros de diseño de obras hidráulicas.

10) En cuencas de la Patagonia, importantes por sus numerosos usos del agua, los resultados de los modelos de circulación general de la atmósfera permitieron definir estimaciones de caudales medios anuales.

Los efectos del proceso de calentamiento global en el régimen de caudales no dependen solamente del cambio climático asociado sino también del clima actual de la cuenca, de las fluctuaciones periódicas, debidas a fenómenos como el ENSO, y de sus características fisiográficas. Por esto será necesario contar con información hidrometeorológica adicional para definir con más precisión el comportamiento hidrológico de las cuencas.

Por lo tanto las conclusiones quedan asociadas a las secciones con datos. Se ha estudiado la presencia de tendencias en las series de caudales para los ríos seleccionados. Este análisis estadístico contribuyó a definir la importancia de los posibles cambios en la forma de los hidrogramas observados.

El análisis de los efectos del cambio climático global y su interacción con la variabilidad climática natural no se estudió y se considera que es un tema abierto de investigación.

11) Los modelos de circulación general aplicados muestran una disminución de la precipitación y un aumento en la temperatura para el período octubre–marzo. Este es el período para el cual se han identificado tendencias que indican una disminución de los caudales para la mayoría de los sistemas ubicados al sur del río Colorado.

12) La aplicación de la teoría de multifractalidad permitió estudiar la relación entre los fenómenos climáticos y los hidrológicos. Estas ideas comienzan con Edwin Hurst quien orientó sus investigaciones para desarrollar el primer estimador de persistencia de largo plazo útil para calcular la capacidad de regulación de obras para controlar la ocurrencia de periodos extensos de crecidas o sequias en el río Nilo.

En esta Tesis se aplicó un nuevo método denominado Multifractal Detrending Moving Average que definió estimaciones de los exponentes generalizados de Hurst y del espectro multifractal.

Se comparó las estimaciones del exponente de Hurst para la serie de caudales del río Paraná y Neuquén con resultados obtenidos en el marco de una investigación de grandes ríos del mundo. Los ejemplos presentados incluyeron la estimación de un índice de predictibilidad y mostraron las posibilidades de su uso en Hidrología para el análisis de series temporales.

Un experimento numérico realizado para las dos series de caudales muestra que la estimación de la función generalizada de Hurst y del espectro multifractal asocia al origen de la multifractalidad con la persistencia de largo plazo. Estos resultados contribuyen a la definición de las propiedades de los modelos multifractales adecuados a series de caudales.

13) La estimación de los espectros multifractales para las series de caudales tienen una aplicación potencial es para la verificación del ajuste de modelos de transformación precipitación que se han desarrollado para estas cuencas. Los indicadores de asimetría del espectro multifractal muestra la posibilidad de aplicar modelos de cascada que incorporen esta propiedad.

14) La aplicación conjunta de pruebas de detección de puntos de cambio múltiples, el estudio de la relación con la variabilidad climática natural, el cambio climático global y la teoría fractal definen un núcleo de temas asociados que resultan un campo de investigación abierto y que permite integrar los estudios hidrológicos en grandes cuencas en el análisis de sistemas complejos.

VI.2 General conclusions

This chapter shows the results obtained applying probabilistic models to the estimation of the values of extreme flows in large basins. The significance of this line of research is associated with the need to have new methods to define with greater precision the means to mitigate and adaptation to global climatic change effects.

According to the arguments presented in this paper, in the analysis of uncertainty under probabilistic models diverse causes are considered: the data (sample), the model (function of probability density) and the methods of estimation of the parameters.

In this thesis, a distinctive feature in large basins is considered, as the presence of hydraulic projects of diverse importance. For instance, large dams, national and international bridges, and flood control constructions for cities.

These complex hydraulic projects are designed for the long term and can take up to a decade, from the planning stage to the implementation.

For civil hydraulic structures of long term implementation, the application of the results of models of global climatic change associated with hydrological models is important, given that it will contribute to the development of better measures to adapt its effects on different uses of water.

In Argentina, there is an inventory of projects for hydroelectric buildings which include those currently in operation and those in the planning stage. Among the former, are Yacyretá (Paraná river, upper stretch), Salto Grande (Uruguay river), and Uruguái (Uruguái river), built and in operation, which make a substantial contribution to the Argentinean energetic matrix. Among those in planning stages, there are Corpus Christi and Iratí – Itacorá (both in Paraná river, in its upper stretch), Garabí and Panambí (Uruguay river) and Medium South and North Paraná (in the middle stretch of Paraná river). The works in Paraná river, in its upper stretch, have a strong influence of the Iguazú river associated with its great swellings.

Diverse technical reports show a clear opportunity to identify a group of advanced studies of hydro-electric plants, which will become operational in the future. These works are important since it is still possible to incorporate, without a high cost, modifications and changes in the design of the projects. Among these cases Corpus Christi, Garabí and Panambí can be highlighted.

In this respect, one must incorporate another concept which has oriented the present research, which involves describing quantitatively the importance of the changes in the hydrological response in large basins and evaluating its effects over the design parameters in hydraulic projects.

For this reason, the Neuquén river basin, with a total area of 30,843 km² (Paso de los Indios, Neuquén province) and the Paraná river basin, with a total area of 1,950,000 km² (Corrientes, Corrientes province) have been selected.

It has been observed that even for low return periods the differences between the estimations of extreme flows will be dissimilar, varying with the function of probabilities density and the temporal window used for the estimation of the parameters.

This situation is meaningful because there are new techniques to relate the presence of multiple points of change, which define more precisely the influence of the effects of natural climatic variability over the statistic properties of the samples. These will be used for the estimation of the parameters of the function of density of probabilities and therefore, in the hydraulic design of the different parts of the works.

The aforementioned concepts show the need to study extreme phenomena, such as the extraordinary swellings associated with new meteorological events and the modelling of complex systems in order to evaluate the results of the estimations along with the theory of extreme values in engineering.

The detection of multiple points of change contributes to the improvement of the process of selection of the most adequate sample to estimate the parameters of design, both in the planning and in the design stages, particularly when these changes can be related to indicators of natural climatic variability allow to reach a better explanation of the relationship between geophysical series.

The obtained results conclude that:

In Argentina, as in many other countries, there are hydraulic projects whose parameters of design were estimated using outdated methods and with hydrological series which were observed before the occurrence of modifications in the statistic properties of the sample.

This may be due to the use of short hydrological series or to the changes in the statistic properties along different periods of information.

In this thesis, the problem of the change in statistic properties across time has been studied for two perspectives, one based on probabilistic models and the other on the fractal theory.

For two large basins (Neuquén and Paraná) an analysis of the empiric evidence has been conducted, and it shows the need to improve the explanations of the causes of the changes, under the hypothesis that it is dependent on the climate. This knowledge contributes to the identification of those constructions which are most vulnerable to future climatic conditions.

For the Neuquén river basin, the analysis has been focused on the importance of a swelling which led to the re-estimation of a Probable Maximum Flood (PMF) and the construction of new hydroelectrical and flood control dam.

In Paraná river basin, the analysis has been based on the increase in the quantity of rural and urban floods. In hydraulic buildings of greater importance, such as the Corpus Christi dam, a meaningful variation in the estimated maximum annual flows has been observed, according to the period of time, which is possibly associated with natural climatic variation.

Large basins show hydraulic projects of different importance and designed for diverse periods of return and lifespans. Changes as from the 1970s environmental and economic policies have been evaluated as a response to new perceptions of the risk of more industrialised economies to continue to consider the environment as a controllable factor. Nowadays, the engineering solutions are aimed at using hydrological knowledge to define solutions which adapt to global climatic change and to natural climatic variation so as to mitigate their impact.

The decision to perform a vulnerability analysis of the changes in the relationship between the return period and the maximum flows depends directly on the availability of adequate methods and models to define the presence of tendencies and/or multiple changes in the series of average daily maximum flows.

The examples show the importance of having appropriate methods to detect tendencies and multiple changes in temporal series, of analysing the natural climatic variation on the flows and of estimating the effects of global climatic change over the components of the hydrological cycle used in engineering to design measures to mitigate its impact.

The integration property of the effects of the flow variable of different meteorological forces is known, consequently, the investigation was oriented towards the study of possible relationships of causality, the relationships associated to natural climatic variability were selected and therefore it was necessary to evaluate more than one point of change in the series of extreme values.

The core of the investigation has been the statistic parametric and non-parametric tests applied to the analysis of different series of extreme flows. Hence, the importance of studying the problem of occurrence of multiple points of change has been proven, given the existence of several points of change in indicators of natural climatic variability. In the case of the Paraná river basin, apart from the complexity of the hydraulic projects, there are changes in the use of the soil which must influence on the components of superficial runoff. This is a topic for further research which has not been included in the present thesis.

Another result has been the clear identification of the point of change in the series of maximum streams observed in the two basins as from the 1970s.

It has been observed that it was more complex to detect the second point of change associated with another phase of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) which took place between the 1920s and the 1940s.

The application of a new method has allowed us to detect the aforementioned points in the bibliography of the PDO and to show the difficulty to detect its impact on the measured response in the series of maximum flows.

The results of the numeric experiments conducted show the importance of the design period, since the changes in statistic properties of maximum flow series associated to natural climatic variation.

Pittock and Hartmann (2011) pointed out that dams affect rivers and fresh water ecosystems around the world. This study has shown the evaluation of structural performance and benefits of numerous dams and they highlighted that many constructions are unsafe and fail to produce the benefits considered in their design. The presence of changes defined in new hydrologic studies will require the evaluation of their safety and their functioning.

These authors have examined cases of re-evaluation of dams in Australia, China, France and the United States, which show a challenge in managing the process of obsolescence (or aging); the unfulfilled opportunities to improve environmental, social and economic benefits of these systems for relicensing.

This issue incorporates another concept which has oriented this research, which is the need to produce a quantitative description of the importance of changes in the hydrological response in large basins and to evaluate their effects on the parameters of design in hydraulic projects.

In basins in Patagonia, which are important because of their numerous uses of water, the results of the models of general circulation of the atmosphere led to the definition of estimations of average annual streams.

The effects of the process of global warming on the flows regime do not depend only on the associated climatic change but also on the current climate of the basin, on periodic fluctuations due to phenomena like El Niño Southern Oscillation (ENSO), and on physiographic characteristics. Consequently, it will be necessary to have hydro meteorological information to define the hydrological behaviour of the dams with greater precision.

Therefore, the conclusions remain associated to the sections with data. The presence of tendencies in the series of flows for the selected rivers has been studied. This statistic analysis has contributed to define the importance of possible changes in the shape of the observed hydrograms.

The analysis of the effects of global climatic change and its interaction with natural climatic variation has not been studied and is considered an area for further research.

The models of general circulation that have been applied show a decrease in precipitation and an increase in temperature for the period of October to March. This is the period for which we have identified tendencies that indicate a decrease in flows for most of the systems South of the Colorado river.

The application of the multifractality theory has allowed us to study the relationship between climatic and hydrologic phenomena. These ideas have begun with Edwin Hurst, who oriented his research to develop the first persistence long-term estimator and to calculate the capacity of regulation of works to control the occurrence of extended periods of swellings or draughts in the river Nile.

In this thesis, a new method called Multifractal Detrending Moving Average has been applied. It defined estimations of Hurst's generalized exponents and the multifractal spectre.

The estimations of Hurst's exponents have been compared for the series of flows of rivers Paraná and Neuquén, with results obtained in the framework of a research of great rivers of the world. The examples presented in this paper include the estimation of a predictability index and they have shown the possibilities of its use in hydrology for the analysis of temporal series.

A numerical experiment conducted for the two series of flows has shown that the estimation of Hurst's generalised function and of the multifractal spectre associate the

origin of this multifractality with long-term persistence. These results contribute to the definition of the properties of multifractal models adapted to flow series.

The estimation of multifractal spectres for the series of flows have a potential application for the verification of the adjustments of transformation and precipitation models that have been developed for these dams. The asymmetry indicators of the multifractal spectre show the possibility of applying cascade models that incorporate this property.

The joint application of multiple points of change detection tests, the study of the relationship with natural climatic variation, global climatic change and the fractal theory define a nucleus of associated topics which become an open field of research and which allows us to integrate hydrological studies in large dams for the analysis of complex systems.

BIBLIOGRAFÍA

- Alley, M.W., 1981. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water model. *Water Resources Research*, 20(8): 1137-1149.
- Anderson, R. J; da Franca Ribeiro dos Santos, N.; Díaz, H. F. 1993. An analysis of flooding in the Parana / Paraguay river basin. LATEN dissemination note; no. 5. Washington, D.C. The World Bank.
- Arianos, S. y A. Carbone, 2007. De trending moving average algorithm: A closed-form approximation of the scaling law. *Physica A*, 382, 9-15.
- Arnell, N., 1992. Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperature environment. *J. Hydrology* 132: 321-342.
- Arnell, N., 1996. *Global warming, river flows and water resources*. Wiley & sons.
- Barros, V., 2013. Escenarios hidrológicos de caudales medios del Río Paraná y Uruguay. CEPAL. Medio Ambiente y Desarrollo. ISSN: 1564-4189.
- Barros, V., Castañeda, M.E., Doyle M., 1996. Variabilidad interanual de la precipitación: señales del ENSO y del gradiente meridional hemisférico de temperatura. Actas del VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, 321-322. Buenos Aires.
- Barros, V., Doyle, M. y Camilloni, I., 2005. Potential impacts of climate change in the plata basin regional hydrological. *Regional Hydrological Impacts of Climatic Variability and Change. IAHS Publ.* 295.
- Barros. V., Clarke, R. y Díaz, P.S., 2006. *El Cambio Climático en la Cuenca Del Plata*. Buenos Aires. CONICET.
- Bashan, A., R. Bartsch, J.W. Kantelhardt, S. Havlin, 2008. Comparison of detrending methods for fluctuation analysis. *Physica A*, 387: 5080-5090.
- B.C. Hydro International LTD., 1996. Review of PMP/PMF Studies for the Limay and Neuquén River Basins, Argentina. Update of the Hydrological Studies Pertaining to the Safety of the Diversion and Relief Structures in the Neuquén River Basin.
- B.C. Hydro International LTD., 1999. Determination of the Probable Maximum Precipitation for the Neuquén River Basin. Update of the Hydrological Studies Pertaining to the Safety of the Diversion and Relief Structures in the Neuquén River Basin.

- Beran, J., 1994. Statistical for Long-Memory Processes. *Monographs on Statistics and Applied Probability* 61. ISBN 0-412-04901-5. Chapman & Hall/CRC.
- Bodini y Cossu, 2010. Vulnerability assessment of Central East Sardinia (Italy) to extremes rainfall events. *Nat Hazards Earth Sys Sci.* 10, 61-71.
- Box, G.E.P. y G.M., Jenkins, 1976. Time series analysis: Forecasting and control. San Francisco: Holden-Day.
- Bras, R., 1990. Hydrology. An Introduction to Hydrologic Science. Addison-Wesley series in civil engineering), Addison Wisley.
- Bras, R. y I. Rodríguez-Iturbe, 1994. Random Functions and Hydrology. (Dover Books on Advanced Mathematics Dover Publications.
- Dooge, J., 2001, Concepts of the hydrological Cycle. Ancient and modern International Symposium 'Origins and History of Hydrology'.
- Camilloni, I. y Barros, V., 2000. The Parana river response to El Niño 1982–83 and 1997–98 events. *Journal of Hydrometeorology*: 412-430.
- Carril, A. F., Doyle, M., Barros, V. y Nuñez, M., 1996. Sobre la variabilidad en los caudales de los ríos cuyanos. *Actas del VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología*, 365-366, Buenos Aires, Argentina.
- Cohn, T.A. y H. F. Lins. Nature Style: Naturally trendy: *Geophysical Research Letters*: Vol
- Coles, S., 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer Series in Statistics.
- Collischonn, W., C.E.M Tucci, R.T. Clarke, 2001. Further evidences of changes in the hydrological regime on the River Paraguay: prat of a wider phenomenon of Climate Change: *Journal of Hydrology*, 245: 218-238.
- Cheng, Q., 2014. Generalized binomial multiplicative cascade processes and asymmetrical multifractal distributions. *Nonlin. Processes Geophys.*, 21, 477–487.
- Cunderlik, J. M. y D. H. Burn, 2004. Linkages between regional trends in monthly maximum flows and selected climatic variables. *Journal of Hydrologic Engineering*. Vol. 9: 246-256.
- Devoto, G., R. Manzano, I. Obertello y R.S. Seoane., 1988. Probable maximun flood for the design of Piedra del Aguila project. *Comission International des Grande Barrages*, San Francisco. 1534-1540.
- Eltahir, E. A.B., 1996. El Niño and the natural variability in the flow of the Nile river. *Water Resources Research*. 32(1): 131-137.

- Eagleson, P. S., 1972. *Dynamic hydrology*. McGraw-Hill.
- Eagleson, P. S., 1978. Climate, soil, and vegetation. 5. Derived distribution of storm surface runoff. *Water Resources Research* 10/1978; 14(5).
- Eagleson, P. S., 1994 The evolution of Modern Hydrology. From watershed to continental in 30 years. *Advances in Water Resources*. Elsevier Sciences Limited. 3-18.
- Fealy, R. y J. Sweeney, 2005. Detection of a possible change point atmospheric variability in the North Atlantic and its effect on Scandinavian glacier mass balance. *International Journal of Climatology*, 25:1819-1833.
- Frich, P. L. V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the Twentieth Century". *Climate Research*, 19: 193–212.
- Gao, J, Cao Y, Tung W-W. y Hu, J., 2007. *Multiscale analysis of complex time series. Integration of chaos and random fractal theory and beyond*. John Wiley and Sons.
- George, R.K., Waylen, P. y Laporte, S., 1998. Interannual variability of annual streamflow and the Southern Oscillation in Costa Rica. *Hydrological Sciences Journal*. 43(3): 409-424.
- Gervini, D. y Yohai, V. J., 2002. A class of robust and fully efficient regression estimators. *Annals of Statistics*, 30: 583-616.
- Griffis, V.W. y J.R. Stendinger, 2007. Incorporating Climate Change and Variability into Bulletin 17B LP3 Model. World Water and Environmental Resources Conf., American Society of Civil Engineers, ASCE. Paper 40927–2320.
- Gu, Gao-Feng y W.X, Zhou, 2010. Detrending moving average algorithm for multifractals. *Phys. Rev. E* 82, 011136.
- Gumbel E.J., 1941. The return period of flood flows. *The Annals of Mathematical Statistics* 12: 163–190.
- Gumbel, E.J., 1958. *Statistics of Extremes*. New York.
- Hamlet, A. F. y Lettenmaier, D. P., 1999. Effects of climate change on hydrology and water resources in the Columbia River basin. *Am. Water Res. Assoc.*, 35: 1597-1623.
- Hamed, K.H. y A.R. Rao, 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*. 204: 182-196.
- Hampel, F., 1968. *Contributions to the theory of robust estimation*. Ph. D. dissertation. University of California, Berkeley.
- Hampel, F. R., 1971. A general qualitative definition of robustness. *Annals of Mathematical Statistics*, 42: 1887-1896.

- Hirsch, R.M., J.R. Slack y R.A. Smith, 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18 (1): 107-121.
- Hurst, H.E., 1950. Long -term storage capacity of reservoirs. *American Society of Civil Engineers Paper 2447*.
- Hurst, H.E., 1951. Long term storage capacities of reservoirs. *Trans. Am. Soc.Civil Engrs.*, 116: 776-808.
- Hurtington, T.G., 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319: 83-95.
- Ihlen, E.A.F., 2012. Introduction to Multifractal Detrended Fluctuation Analysis in Matlab *Front Physiol.* 3: 141. doi: 10.3389/fphys.2012.00141.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2001. Tercer informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2007. Cuarto informe de evaluación del panel intergubernamental de expertos sobre cambio climático.
- James, N. y D. Matteson, 2014. An R Package for nonparametric multiple change point analysis of multivariate data. *Journal of Statistical Software*. Vol 62, Issue 7.
- Kantelhardt, J.W., Zschiegner, S.A., Koscielny-Bunde, E., Havlin, S., Bunde y A., H.E. Stanley, 2002. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A*, 316: 87-114.
- Killick,R. y I. A. Eckley, 2013. Change point: An R Package for change point analysis.
- Koch y Markovic, 2007. Evidences for Climate Change in Germany over the 20th Century from the Stochastic Analysis of hydro-meteorological Time Series MODSIM07, International Congress on Modelling and Simulation, Christchurch, New Zealand.
- Koscielny-Bunde, E., J.W. Kantelhardt, P. Braun, A. Bunde y S. Havlin, 2006. Long -term persistence and multifractality of river runoff records: Detrended fluctuation studies. *Journal of Hydrology*, 322: 120-137.
- Kuhn, T.S., 1971. *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Kundzewicz, Z.W. y A. Robson, 2004. Change detection in hydrological records a review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal*, 49 (1): 17-16.
- Kundzewicz, Z.W., D. Graczyk, T. Maurer, I Ppinskiwar, M. Radziejewski, C. Svensson, y M. Szwed, 2005. Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. *Hydrological Sciences Journal*, Vol 50, 5: 797-810.

- Kundzewicz, Z.W., Pinskiwar, I. y Brakemridge, G., 2012. Large flood in Europe, 1985-2009. *Hydrologica Sciences Journal*.
- Labat, D., J. Ronchail y Guyot, J.L., 2005. Recent advances in wavelet analyses: Part 2 - Amazon, Paraná, Orinoco and Congo discharges time scale variability. *Journal of Hydrology*, 314 (1-4): 289-311.
- Li, E., X Mu, G. Zhao y P. Gao, 2015. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Streamflow in the Yellow River Basin, China. *Water*, 7, 1670-1686; 10.3390/w7041670.
- Linsley, R., 1979. *Hidrología para Ingenieros*. McGraw-Hill.
- Lohmann, D., Raschke, E., Nijssen, B. y D. P. Lettenmaier, 1998. Regional scale hydrology I: Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. *Hydrological Sciences Journal*, 43: 131-141.
- Matteson, D.S. y James, N.A., 2014. A Nonparametric Approach for Multiple Change Point Analysis of Multivariate Data. *Journal of the American Statistical Association*, 109(505): 334-345.
- Mc Cabe, G.J. y M. Ayers, 1989. Hydrologic effects of climate change in the Delaware river basin. *Water Resources Bulletin*, 25: 1231-1241.
- Mc Cabe, G.J. y Wolock, D.M., 1991. Detectability of the effects of a hypothetical temperature increase on the Thornthwaite moisture index. *Journal of Hydrology*, 125: 25-35.
- Milly, P.C., Wetherald, T, Dunne, K.A. y Delworth, T.L., 2001. Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature* 415: 514-517.
- Milly, P.C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R., Kundzewicz, Z., Lettenmaier, D., Stouffer, R., 2008. Stationarity is dead: whither water management. *Science*, 319(5863): 573-574.
- Mirza, M. Q., R.A. Warrick, N. J. Ericksen y G.J. Kenny, 1998. Trends and persistence in precipitation in the Ganges, Brahmaputra and Meghna river basins. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 43(6). 845-858.
- Mudelsee, M., Börngen, M., Tetzlaff, G. y Grünwald, U., 2003. Upward trends in the occurrence of extreme floods in Central Europe. *Nature*, 425.
- Niere, H. M., 2013. Multifractality in the Philippine Foreign Exchange Market. *Management Science and Engineering*. vol 7. (3).
- Nemec, J. y J. Schaake, 1982. Sensitivity of water resources systems to climate variation. *Hydrological Sciences Journal*, 27: 327-343.

- Nuñez, M. y S. Solman, 2006. Desarrollo de Escenarios Climáticos y Estudios de Vulnerabilidad. Proyecto de desarrollo de escenarios climáticos y estudios de vulnerabilidad. *Fundación Torcuato Di Tella y Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable*, Argentina.
- Peng, C. K. S. Havlin, H.E. Stanley y A.L. Goldberger, 1995. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in non stationary heart beat time series. *Chaos*, 5: 82-87.
- Pettitt, A.N., 1979. A Non parametric approach to the change -point problem. *Journal of the Statistical Society, Serie C*, 28, 2, 126-135.
- Pittock, J. y Hartmann, J., 2011. Taking a second look. *Climate Change*, prior relicensing and improved management dams marine and freshwater. 62: 312-320.
- Rangarajan, G. y D.A. Sant, 1997. A climate predictability index and its applications. *Geophysical Research Letters*. Volume 24, Issue 10, 1159–1282.
- Rangarajan G. and D.A. Sant, 2004. Fractal dimensional analysis of Indian climatic dynamics. *Chaos Solutions and Fractals*, 19: 285-291.
- Rybsky;D. , A. Bunde, S. Hayluin, and von Stoch, H, 2006. Long-term persistence in climate and detection problem. *Geophysical Research Letters*, Volume 33, L06718, doi:10.1029/2005GL025591.
- Rybsky Neuman, 2011. A review on the Pettitt test. In *Extremis Disruptive Events and Trends in Climate and Hydrology*. Jürgen Kropp, Hans-Joachim Schellnhuber.
- Rodionov, S. N., 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophys. Res. Lett.*, 31(9), L09204, 10.1029/2004GL019448.
- Rodionov, S. N. y Overland, J. E., 2005. Application of a sequential regime shift detection method to the bering sea ecosystem. *ICES J. Mar. Sci.*, 62(3): 328–332.
- Rodríguez-Iturbe, I. y A. Rinaldo, 2001. *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*. Cambridge University Press.
- Sanchez Granero, M.A., J.E. , Trinidad Segovia, J., García Pérez, 2008. Some comments on Hurst exponent and the long memory processes on capital markets. *Physica A*, 387: 5543-5551.
- Sankarasubramanian, A., Vogel, R.M. y J. Limbrunner, 2001. Climate elasticity of streamflow in the United Stated. *Water Resources Research*, 37: 1771-1781.
- Seoane, R. y V. Barros, 2005. Impactos del cambio climático en los recursos hídricos: Proyección de los caudales. *Comunicación Nacional de Cambio Climático*:

- Vulnerabilidad de la Patagonia y Sur de las Provincias de Buenos Aires y La Pampa Fundación Torcuato Di Tella.
- Seoane, R. y G. Devoto, 2008. Estimación de la crecida decamilenaria del río Neuquén. *Actas del Instituto Nacional del Agua*.
- Seoane R. y P. López, 2005. Recursos hídricos y sus tendencias. Comunicación Nacional de Cambio Climático: Vulnerabilidad de la Patagonia y sur de las Provincias de Buenos Aires y La Pampa, Fundación Torcuato Di Tella.
- Seoane, R. y Pochat, V., 2014. Impactos sobre los caudales de los principales ríos de la región del Comahue. *La economía del Cambio Climático en la Argentina Primera Aproximación CEPAL*. Colección Documentos de Proyectos: 88-91, Chile.
- Seoane, R., Lopardo, R. y Sánchez Guzmán, A., 2010. Hydrological design for dams and environmental impacts. *Actas del 6th International Symposium on Environmental Hydraulics, International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR)* Atenas, Grecia.
- Seoane, R., J. B. Valdés y L. J. Mata, 2003. Detection of climate change in streamflows of Patagonian basins. *Proc. Int. Symp. on Climate Change* (Beijing, 1-4. , China). World Meteorological Organization, WMO/TD 1172, 214–217. Geneva, Switzerland.
- Seoane, R., J. Valdés y L.J. Mata, 2005. Climate variability and climate change in Patagonian rivers. *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change Impact Assessment and Decision Making*. Edited by Stewart Franks, Thorsten Wagener, Eva Bøgh, Hoshin V. Gupta, Luis Bastidas & Carlos Nobre & Carlos de Oliveira Galvão Publ. 296. ISBN 1-901502-13-9; 300: 26-36.
- Serinaldi, F., 2010. Use and misuse of some Hurst parameter estimators applied to stationary and non-stationary financial time series. *Physica A*, 389: 2770-2781.
- Valdés, J., Seoane, R. y J. North, 1994. A methodology for the evaluation of global warming impact on soil moisture and runoff. *Journal of Hydrology*, 161: 389-413.
- Ven Te Chow, D., 1962. *Handbook of Applied Hydrology*. Mc Graw-Hill.
- Ven Te Chow, D. Maidment, y L. Mays., 1994. *Hidrología Aplicada*. Mc Graw-Hill.
- Vera, C.,G., Silvestri B., Liebmann y P. Gonzalez, 2006. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L13707.

- Villarini, G., F. Serinaldi, J. A. Smith y W. F. Krajewski, 2009. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century. *Water Resour. Res.*, 45, W08417, doi: 10.1029/2008WR007645.
- Villarini, G. y Smith, J.A., 2010. Flood peak distributions for the Eastern United States. *Water Resources Research*, 10.1029/2009WR008395, 46, W06504.
- Villarini G. A.B., Smith J. A. A, F. Napolitano, 2010. Nonstationary modeling of a long record of rainfall and temperature over Rome. *Advances in Water Resources*. 33: 1257-1267.
- Villarini, G., Smith, J.A., Serinaldi, F., Bales, J., Bates, P.D. y Krajewski, W.F., 2009. Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin. *Advances in Water Resources*, 32(8): 1255-1266.
- Vogel, R., M. Chad y Meghan, W., 2011. Nonstationarity: flood magnification and recurrence reduction factors, in the United States Journal of the American Water Resources Association, Vol. 47:
- Westmatcoot, J.R. y D. H. Burn, 1997. Climate change effect on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson river basin. *Journal of Hydrology*, 202: 263-279.
- Wigley, T.M.L y P.D. Jones, 1985. Influences of precipitation changes and direct CO₂ effects on streamflow. *Nature*, 314: 149-152.
- Wigley, T. M., Raper, S. C. B., Hulme, M. y Smith, S., 2000. The MAGICC/SCENGEN Climate Scenario Generator: Version 2.4. *Technical Manual. Climatic Research Unit*, Univ. of East Anglia, Norwich, UK.