



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**APLICABILIDAD DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA
PARA PROYECCIÓN DE EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO
SOBRE CAUDALES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LOA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

CAROLINA ANDREA SILVA HERRERA

**PROFESOR GUÍA:
JAMES MC PHEE TORRES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
XIMENA VARGAS MESA
RENÉ GARREAUD SALAZAR**

**SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE 2010**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL
POR: CAROLINA SILVA HERRERA
FECHA: 13/09/2010
PROF. GUIA: Sr. JAMES MC PHEE T.

“APLICABILIDAD DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA PROYECCIÓN DE EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE CAUDALES EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO LOA”

El objetivo general del presente trabajo de título es evaluar la aplicabilidad de los modelos de función de transferencia (modelos ARMAX) en la proyección de series de caudales futuros en la cuenca alta del río Loa considerando los efectos del cambio climático global. Para esto, se analiza tanto la serie de caudales proyectada en período futuro, como las etapas intermedias de cálculo realizadas para obtener este resultado. La importancia de obtener proyecciones de caudales del río Loa, radica en su papel como fuente de abastecimiento de agua para importantes sectores productivos y sociales, emplazados en una cuenca árida, y en la cual el río Loa se considera agotado en cuanto a la posibilidad de otorgamiento de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas superficiales permanentes.

Los efectos del cambio climático global quedan caracterizados mediante proyecciones meteorológicas futuras, obtenidas en un estudio realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile como proyecciones del modelo meteorológico regional PRECIS. Estas proyecciones se realizan para un periodo de línea de base (1960-1990) y otro futuro (2070-2100) considerando diferentes escenarios de aumento de concentraciones de CO₂ para diferentes regiones del país, donde la variable de interés para el presente estudio corresponde a las precipitaciones estimadas en un nivel temporal mensual, en periodo de línea de base y futuro A2.

Mediante el uso de modelos de función de transferencia se realizaron proyecciones de caudales futuros a nivel mensual, empleando como variables de entrada las series de precipitaciones PRECIS. Para esto, fue necesario realizar una secuencia de cálculos, correspondientes a diferentes etapas como: validar y corregir las series de precipitaciones PRECIS, calibrar el modelo de función de transferencia a partir de series históricas de precipitaciones y caudales, y validarlo tanto para las series históricas como para las respectivas series PRECIS corregidas. Un punto importante en el desarrollo de la metodología, corresponde al cumplimiento de normalidad y estacionariedad requeridos para las series modeladas mediante función de transferencia, ninguno de los cuales se cumple para las series de caudales y precipitaciones, debiendo aplicarse previamente funciones de transformación sobre las series. Como etapa final del proceso de cálculo, se aplican las inversas de éstas últimas transformaciones en las series proyectadas por el modelo de función de transferencia.

Como resultado final se obtienen proyecciones de caudales que, comparadas con la serie de caudales observados en periodo de línea de base, son coherentes con la comparación entre las respectivas series de precipitaciones de entrada, en cuanto a un valor promedio general. Pero presentan problemas en cuanto a la distribución de caudales en el ciclo anual, y en los valores extremos (máximos y mínimos) de la serie, ya que no son coherentes con las variaciones de los valores extremos de las precipitaciones futuras.

Se concluye planteando dos posibles hipótesis que pueden explicar los problemas en los resultados obtenidos. La primera plantea emplear un modelo de función de transferencia que contenga componentes estacionales para ver si mejora el problema de la distribución de valores en el ciclo anual, y la otra plantea la incompatibilidad entre el uso de modelos de función de transferencia y series PRECIS, debido a que éste modelo considera el orden de los valores dentro de la serie, mientras que las series PRECIS no presentan correspondencia cronológica con las series observadas.

ÍNDICE

1.	Introducción.....	5
1.1.	Motivación.....	5
1.2.	Objetivos.....	7
1.3.	Organización del informe	7
2.	Marco teórico.....	8
2.1.	Aspectos generales sobre series PRECIS y Cambio Climático.....	8
2.2.	Marco teórico general de modelos de Función de Transferencia.....	19
2.2.1	Modelos de Función de Transferencia y representación	19
2.2.2	Identificación de Modelos de Función de Transferencia - Ruido	26
3.	Antecedentes Generales de la cuenca del río Loa y selección de series de precipitaciones y caudales	28
3.1.	Características generales de la zona de emplazamiento de la cuenca	28
3.2.	Características generales de la zona de interés.....	32
3.3.	Registros históricos de caudales disponibles en la cuenca alta del río Loa.....	33
3.3.1	Estaciones fluviométricas	33
3.4.	Registros históricos de precipitaciones disponibles en la cuenca alta del río Loa	35
3.5.	Antecedentes generales sobre derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y usos de recursos hídricos en la cuenca alta del río Loa	38
3.6.	Selección de series de precipitaciones y caudales para la modelación y definición de la cuenca de estudio.....	42
4.	Metodología.....	47
4.1.	Selección y validación de series de precipitaciones PRECIS.....	47
4.2.	Selección y aplicación de transformaciones para aseguramiento de Estacionariedad y Normalidad	48
4.2.1	Obtención de serie normalizada	48
4.2.2	Obtención de estacionariedad.....	49
4.2.3	Verificación del cumplimiento de los requisitos	50
4.3.	Identificación y calibración de modelos de función de transferencia	51
4.3.1	Identificación de función impulso - respuesta.....	51
4.3.2	Obtención de parámetros y calibración de modelo de Función de Transferencia - Ruido	52
4.4.	Validación de modelo de Función de Transferencia - Ruido	54
4.5.	Validación de modelos de Función de Transferencia para series PRECIS corregidas ..	56
4.6.	Proyección de series de caudales futuras transformadas	57
4.7.	Obtención de series futuras de caudales sin transformadas.....	57
5.	Resultados.....	58
5.1.	Selección y Validación de Series de precipitación PRECIS	58
5.1.1	Selección de series PRECIS y comparación con serie de precipitaciones observada	58
5.1.2	Obtención de función de corrección de series PRECIS	64
5.2.	Transformadas de Series para obtención de Estacionariedad y Normalidad.....	73
5.2.1	Obtención de series transformadas para precipitación y caudales observados	73
5.2.2	Obtención de series transformadas para precipitaciones PRECIS corregidas (periodo BL y A2)	76
5.3.	Identificación y calibración de modelo de Función de Transferencia.....	77

5.3.1	Obtención de función impulso - respuesta	77
5.3.2	Estimación de parámetros y calibración del modelo de Función de Transferencia 83	
5.4.	Validación del modelo de Función de Transferencia - Ruido	89
5.5.	Validación del modelo de Función de Transferencia para la serie PRECIS corregida (BL) 91	
5.6.	Proyección de series de caudales futuras transformadas	93
5.7.	Obtención de series futuras de caudales sin transformadas.....	95
6.	Conclusiones.....	100

1. Introducción

1.1. Motivación

Durante las últimas décadas, se ha observado un aumento de la demanda de recursos hídricos en el país causada por el incremento de la población y un mayor desarrollo técnico-económico. Frente a este aumento de demanda, la disponibilidad de los recursos hídricos está definida principalmente por los escenarios climáticos que caracterizan a un área geográfica determinada. Respecto a este último punto, se considera relevante la ocurrencia de sequías en algunas cuencas del país y el fenómeno de cambio climático global.

En la zona norte del país, la disponibilidad de recursos hídricos es menor que en el centro y sur, debido a las características climáticas y morfológicas de dicha zona. Más aún, en la referencia UNESCO, 2006 se presenta una zonificación a escala global con una resolución de 50 [km] que clasifica la zona norte del país como un sector con estrés hídrico. Por tanto, una disminución en la disponibilidad de dichos recursos en esta zona conllevaría efectos significativos para todos los sectores productivos y sociales que emplean recursos hídricos para el desarrollo de sus actividades.

En el caso de la cuenca del río Loa, los principales sectores afectados por una disminución de los recursos hídricos corresponderían a los usuarios de agua potable, el sector agrícola y la minería. Considerando la relevancia del agua para los sectores productivos mencionados, su papel como fuente de abastecimiento de agua potable de cuatro ciudades importantes en una zona árida, y como fuente de agua para una región con importante desarrollo minero; sumado a la demanda ambiental, determinada a nivel de autoridades estatales mediante el concepto de caudal ecológico, además de otras características del río Loa, como ser la única cuenca exorreica de la zona norte del país, se puede concluir que conocer y prever las condiciones futuras de la disponibilidad de los recursos hídricos de esta cuenca resulta ser de vital interés. De esta manera, se puede determinar riesgos, anticipar posibles problemas y considerar con antelación las vías de prevención o solución de estos.

Teniendo en cuenta lo señalado en el párrafo anterior, el presente trabajo representa un acercamiento preliminar de la disponibilidad de estos recursos para la cuenca del río Loa en períodos futuros, mediante proyecciones de caudales medios mensuales en dichos períodos. Para ello se plantea estudiar la aplicabilidad de los modelos de función de transferencia como herramienta de modelación.

El origen de estos modelos se sitúa en la década de 1970, observándose su posterior desarrollo en Chile durante la década de 1980. Debido a que se basan principalmente en las características estadísticas de las series de tiempo que emplean, se considera que son modelos de manejo simple. En términos generales, su estructura consiste en un filtro lineal que relaciona una variable explicativa (de entrada) y otra explicada (de salida). En este trabajo la variable de salida corresponde a las series de caudales que se quiere proyectar, y la variable explicativa o de entrada, a variables de precipitaciones.

La información básica para la generación de los modelos de función de transferencia que sean representativos de la cuenca, corresponde a las series observadas de caudales y a las precipitaciones a nivel mensual, las cuales pueden obtenerse en la Dirección General de Aguas (DGA). Por otra parte, se dispone de series de precipitaciones mensuales de período futuro (2071-2100) y período de línea de base (1961-1990), las cuales son proyectadas por el modelo meteorológico regional PRECIS. Estas series se encuentran contenidas en el trabajo titulado “Estudio de variabilidad climática en Chile para el siglo XXI” (DGF, 2006), realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF), por encargo de la CONAMA (Comisión Nacional de Medio Ambiente). Es en estas últimas series donde se consideran los efectos del cambio climático global que deben ser incluidos en las proyecciones futuras de caudales. Debido a esto último, los modelos de función de transferencia calibrados y validados con las series de precipitaciones observadas, deben ser igualmente validados para las series de precipitaciones PRECIS de periodo de línea de base (1961-1990) que correspondan a las series de precipitaciones de registro histórico escogidas como representativas de la cuenca de estudio. La representatividad de las series PRECIS respecto de las series de precipitaciones históricas, se asegura revisando su correspondencia y realizando las correcciones que sean necesarias.

Una vez validados los modelos, tanto para las series empleadas en la generación del modelo como para las series PRECIS respectivas, se puede llevar a cabo la proyección de las series de caudales en períodos futuros, empleando como variables de entrada a los modelos las series de precipitaciones PRECIS de periodo futuro corregidas. Ésta corrección de las series futuras se realiza de la misma manera en que se corrigen las series PRECIS de periodo de línea de base correspondientes.

Un punto importante a considerar, es que las series empleadas para generar y como variables de entrada a modelos de función de transferencia deben cumplir ciertos requisitos, como ser estacionarias y seguir una distribución normal, características que, por ejemplo, de manera segura no cumplen las series de precipitación de la cuenca del río Loa, debido a que en cada año existen muchos meses con valor nulo. Esto, podría poner en duda la factibilidad, simplicidad o eficiencia del empleo de modelos de función de transferencia en las cuencas con las características hidrometeorológicas del río Loa. Debido a esto, el

presente trabajo pone énfasis especial en la identificación y mitigación de los problemas arriba mencionados, en el caso de la proyección de caudales futuros en la cuenca alta del río Loa mediante modelos de función de transferencia.

1.2. Objetivos

OBJETIVO GENERAL:

Evaluar el uso de modelos de función de transferencia para la proyección de series de caudales medios mensuales futuras, obtenidas para la cuenca alta del río Loa mediante el análisis de sus proyecciones, y los pasos intermedios empleados en la obtención estas series.

OBJETIVO ESPECÍFICO:

Realizar un breve análisis, sobre el grado similitud, o de diferencia, existente entre las series de precipitaciones observadas y las respectivas series PRECIS de periodo de línea de base. En caso que corresponda, efectuar las correcciones correspondientes.

1.3. Organización del informe

El presente informe esta organizado según los capítulos descritos a continuación. En el capítulo 2 se encuentra el marco teórico del modelo empleado y del contexto en que se desarrolla y las características de las series proyectadas por el modelo meteorológico PRECIS, las cuales representan la componente que contiene la información respecto a cambio climático. En el capítulo 3 se encuentran antecedentes generales de la cuenca de estudio y la definición de las series pluviométricas y pluviométricas con las cuales se lleva a cabo la modelación. A continuación, se expone en el capítulo 4 la metodología llevada a cabo para la modelación requerida, encontrándose sus resultados en el capítulo 5. Finalmente, en el capítulo 6 se exponen los comentarios y conclusiones realizados en torno a los resultados y al trabajo realizado.

2. Marco teórico

Se determina que para respaldar el desarrollo del trabajo llevado a cabo y las herramientas empleadas en el presente estudio, existen dos aspectos relevantes en los cuales es necesario exponer una base teórica. Uno de ellos corresponde a los efectos del cambio climático global causado por el aumento de gases de efecto invernadero, y el otro, a los aspectos teóricos generales de los modelos de función de transferencia. Además se exponen antecedentes generales y relevantes para caracterizar la cuenca de estudio.

En el caso de los efectos del cambio climático global es importante mencionar la base teórica y los supuestos que se han realizado en la generación de las proyecciones meteorológicas PRECIS empleadas en el presente trabajo, cuyas coordenadas se emplazan en la cuenca del río Loa o sus cercanías. En cuanto a los modelos de función de transferencia, se expone su base teórica general, resaltando los aspectos relevantes para su empleo en el desarrollo de éste estudio. Otras características del modelo se exponen en Anexos.

2.1. Aspectos generales sobre series PRECIS y Cambio Climático

Este capítulo está referido principalmente al informe realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile por encargo de la CONAMA, denominado “Estudio de variabilidad climática en Chile para el siglo XXI” (DGF, 2006). En él, se realizan proyecciones de escala regional de diferentes variables meteorológicas a lo largo de todo el país, para los últimos 30 años del siglo XXI (2071-2100), ante escenarios de aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero.

La importancia de este estudio para el presente trabajo radica en que las series de tiempo meteorológicas generadas en él corresponden a las variables de entrada a los modelos de función de transferencia generados para la obtención de las series de caudales futuras, llevadas a cabo en el presente estudio. Debido a esto, se considera necesario tener conocimiento de los antecedentes, comentarios y supuestos realizados, que sean pertinentes a las series meteorológicas generadas por el estudio de variabilidad climática y que tengan relación con el sector de emplazamiento del río Loa.

Estas series se encuentran a libre disposición a través de Internet, y son presentados para dos niveles temporales: diario y mensual, donde este último corresponde al de interés para el desarrollo del presente estudio, y corresponde al promedio de 30 días de los valores extremos diarios (Ref.

<http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS/#Variables>). En cuanto a la distribución espacial, estos corresponden a series ubicadas en los nodos de una grilla con separación de 0.25 ° de latitud y longitud.

Descripción breve del estudio

Corresponde a una investigación cuyo objetivo principal es el estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, lo cual significa estudiar dos aspectos: el análisis de los escenarios climáticos observados a fines del siglo XX, y la estimación de escenarios climáticos para diferentes regiones de Chile durante los últimos 30 años del siglo XXI, los cuales están asociados a un cambio climático global determinado por un incremento sostenido de gases de efecto invernadero. A lo anterior se suman otros objetivos como, por ejemplo: la estimación de escenarios climáticos para periodos intermedios del presente siglo y estimaciones de cambio climático a nivel del mar. En relación a estos objetivos, los resultados relevantes para el presente trabajo corresponden a los del objetivo principal, por tanto la información expuesta en los siguientes párrafos están referidos principalmente al análisis de los escenarios climáticos de fines del siglo XX, y a la obtención de los escenarios climáticos futuros de las últimas décadas del siglo XXI.

Para la estimación de los escenarios climáticos futuros para fines del siglo XXI, es decir, la segunda parte del objetivo general, es necesario el empleo de modelos meteorológicos, a partir de los cuales estimar variables que permitan caracterizar dichos escenarios. Algunos requerimientos para dichos modelos tienen relación con la escala temporal y espacial de interés. Debido a que la escala temporal requerida para estos análisis es de un siglo, las componentes climáticas consideradas corresponden a atmósfera y océano, ya que presentan respuestas en ese período. Por esta misma razón se descarta la componente terrestre. En cuanto a escala espacial, las variables relevantes para un análisis de variabilidad climática son las que se encuentran a nivel superficial, especialmente temperatura, viento y precipitaciones.

En relación a los requerimientos, existen modelos numéricos de circulación general de atmósfera y océano, con los cuales se puede evaluar cambios climáticos a nivel global y cuya información se encuentra disponible a la comunidad internacional. Estos modelos contienen formulaciones matemáticas que consideran los procesos físicos que explican el comportamiento climático terrestre, y modelan a partir de un estado inicial y del forzamiento de la radiación solar. Además, los posibles problemas de incertidumbre de algunas variables analizadas a través de estos modelos se reducen cuando se requiere comparar escenarios climáticos en momentos diferentes, situación que corresponde al caso del estudio de variabilidad climática.

A pesar de la idoneidad de las características de estos modelos de escala global para el análisis requerido, éstos presentan problemas respecto a la resolución espacial (del orden de centenas de kilómetros), la cual resulta insuficiente para análisis realizados en territorio chileno, donde existe una importante variación del relieve en dimensiones menores. Para solucionar el problema de la resolución espacial, se emplean un segundo modelo meteorológico de escala regional, cuyo dominio se restringe sólo a un sector del planeta, lo cual permite obtener resultados con una resolución espacial de 50, 25 km o menos. Con esto se obtienen resultados significativos, acorde a las dimensiones y variaciones de relieve de Chile.

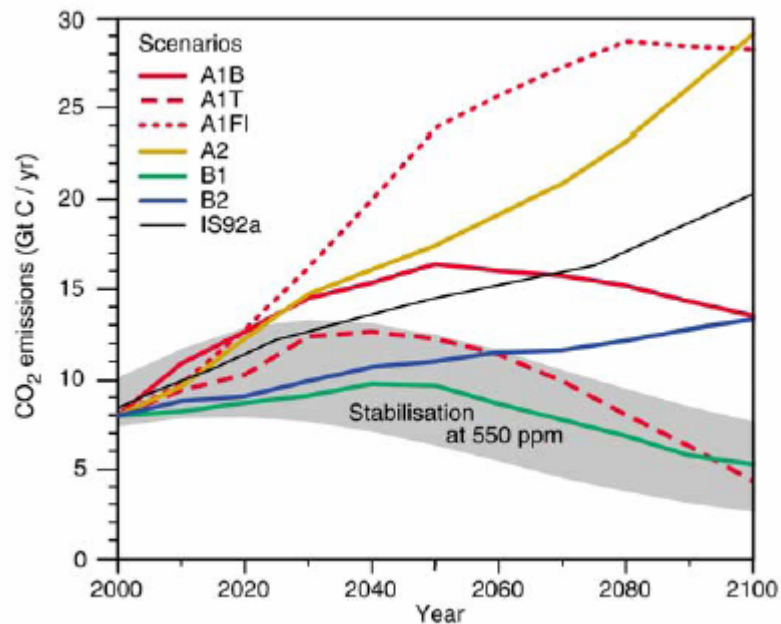
El modelo meteorológico regional empleado en el estudio corresponde al modelo PRECIS (Providing Regional Climate for Impact Studies), el cual se trabaja con una resolución espacial de 25 km (aproximadamente 0,25° latitud), y se basa en las salidas del modelo meteorológico de escala global HadCM3 (Hadley Center Climate Model, versión 3). Algunas características de este modelo global son: presentar componentes de atmósfera y océano acopladas, una resolución espacial promedio de 300 × 300 km (de 417 × 278 km en el ecuador y 295 × 278 km en latitudes de 45°) y la componente atmosférica presenta 19 niveles en la vertical, en la cual es posible simular resultados para periodos con más de 1.000 años.

La compatibilidad entre ambos modelos se establece mediante condiciones de borde y salidas de estos, y por intermedio del modelo HadAM3P. Este último corresponde a un modelo atmosférico de características similares a HadCM3, pero con mejor resolución espacial. La mejora en la resolución se logra mediante el proceso de “*downscaling*” dinámico, en el cual, a partir de las salidas del modelo global se deriva información con mayor detalle espacial. Esta información corresponde a las salidas del modelo HadAM3P, las que a su vez, son las condiciones de borde del modelo PRECIS aplicadas en el borde del dominio regional de éste.

Con el modelo PRECIS se generan proyecciones meteorológicas de escenarios climáticos futuros para los últimos 30 años del siglo XXI (periodo: 2071 - 2100), en el cual se consideran dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero definidos en el Tercer informe del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Un escenario severo (SRES A2) y otro moderado (SRES B2). Además, se genera una modelación para el periodo 1961 – 1990, los cuales caracterizan 30 años de la parte final del siglo XX, respecto a los cuales se comparan los resultados de los escenarios futuros. Las variables meteorológicas consideradas en la modelación descrita corresponden a precipitaciones y temperaturas media, máxima y mínima.

Algunos detalles referentes a los escenarios de emisiones de gases efecto invernadero A2 y B2, se caracterizan a través las diferencias que presentan en cuanto a crecimiento demográfico, política ambiental y equidad social. En el escenario A2, el más severo, existe un aumento rápido de la población, y un deterioro en los aspectos ambientales y de equidad social. En tanto para el escenario B2 el aumento de la población es moderado, y los aspectos ambientales y de equidad social presentan un progreso. Una proyección de las emisiones de los gases efecto invernadero para estos y otros escenarios desarrollados en el Tercer informe del IPCC entre el año 2000 y el 2100, se exponen en la Figura 2.1. En ella se observa que ambos escenarios, A2 y B2, presentan un crecimiento sostenido en las emisiones de CO₂, donde el escenario A2 presenta, como ya se dijo un crecimiento mayor, correspondiendo al escenario más severo.

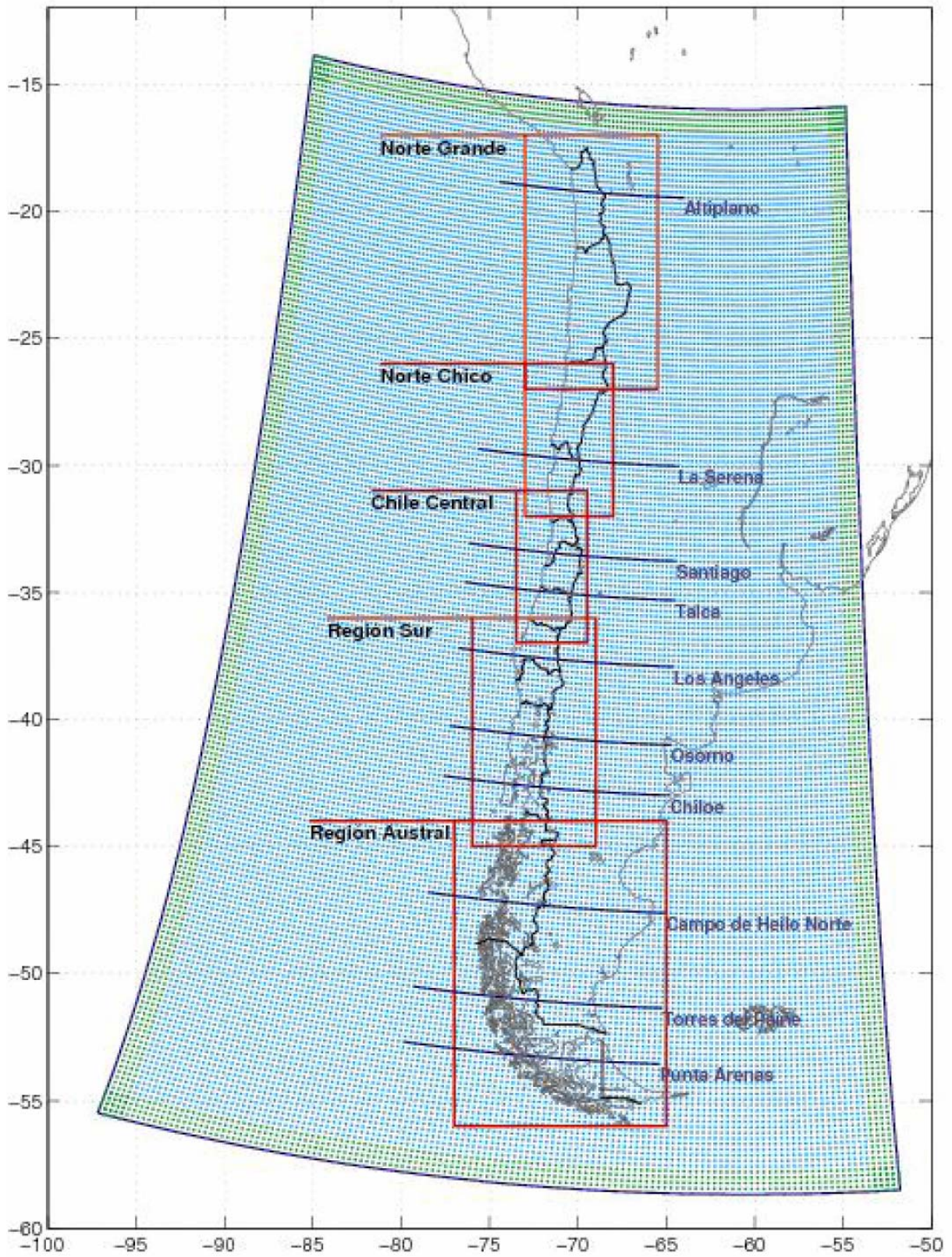
Figura 2.1 Escenarios de emisión de anhídrido carbónico proyectado para diferentes escenarios



(DGF, 2006)

En cuanto al dominio de modelación de PRECIS, este comprende el territorio continental del país, entre 18°S y 65°S de latitud y entre 100°W y 55°W de longitud. En él se extiende una grilla de 25 km (0,25 °) de separación, en cuyos puntos se calculan los valores de las series meteorológicas en intervalos de tiempo de 1 minuto. Además, el dominio de cálculo se encuentra dividido en cinco sectores, en cada uno de las cuales se caracteriza una zona del país, y para los cuales se realizan análisis de los resultados en forma conjunta. Estos se encuentran representados en la Figura 2.2, y su ubicación es presentada en la Tabla 2.1. Además, en cada una de estas regiones se define al menos una transecta en dirección W-E, para un análisis en corte realizado con mayor detalle.

Figura 2.2



(DGF, 2006)

Tabla 2.1

Ubicación de unidades regionales de análisis	
Sectores	Latitud
Norte Grande	17° S a 27° S
Norte Chico	26° S a 32° S
Chile Central	31° S a 37° S
Región Sur	36° S a 45° S
Región Austral	44° S a 56° S

(DGF, 2006)

Por otro lado, los objetivos secundarios de este estudio incluye también calculo de información meteorológica para periodos intermedios (2011-2030 y 2046-2065), los cuales se llevan a cabo con el modelo HadCM3 de baja resolución, y estimaciones generales para las variaciones a nivel del mar. Como estos resultados no son de interés directo para los análisis del presente estudio, no se realizan mayores referencias a ellos.

Algunos resultados, conclusiones y comentarios generales relativos a la región del río Loa

Los comentarios expuestos a continuación corresponden a los análisis realizados en el estudio de variabilidad climática (DGF, 2006), y corresponden principalmente a las referencias específicas de precipitaciones y temperaturas relativas a la zona de emplazamiento de la cuenca del río Loa.

Comentarios referentes a periodos históricos

Respecto a las precipitaciones, se menciona que el parámetro observado corresponde a los cambios en la tendencia lineal de la precipitación anual, observados en periodos móviles de 30 años, y empleando la información comprendida entre los años 1930 y 2000. En cuanto a la región subtropical (ubicada a continuación de la región tropical, generalmente entre los 20 y 35 grados de latitud), a la cual pertenece la cuenca del río Loa, se menciona que presenta una marcada tendencia al aumento de las precipitaciones hasta la década de 1970. Desde ese momento hasta la época de la realización del estudio, esta tendencia comienza a descender.

En cuanto a las temperaturas medias, todas las observaciones están relacionadas a otros sectores del país, específicamente a la costa extratropical de Sudamérica, debido a lo cual no se hace referencia a ellas. Sin embargo, para las temperaturas extremas se realizan comentarios en forma generalizada para la

totalidad del territorio nacional analizado, por lo cual se mencionan a continuación. Tanto para el régimen de temperaturas máximas y mínimas diarias, a nivel superficial, se menciona que existe una conservación de éste desde la década de 1960 hasta la actualidad, con excepción de la región ubicada entre Santiago y Concepción. Pero, si en el caso de las temperaturas mínimas se separan los periodos 1961 – 1976 y 1977 – 2004, las tendencias de ambos resultan negativas.

Comentarios referentes al periodo de validación

Otro comentario referente a sectores que incluyen la cuenca alta del río Loa, mencionado en relación a la validación de los escenarios climáticos generados por el modelo HadCM3, es que la precipitación en el Altiplano es del orden de 300 mm en los tres meses de verano, dato que es corroborado con la información observada.

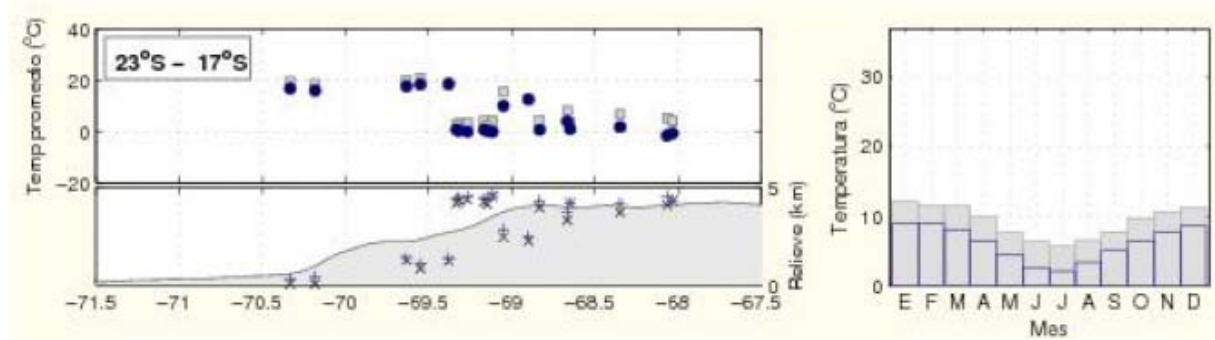
Comentarios referentes a proyecciones futuras

Los primeros comentarios sobre las proyecciones realizadas para fines del siglo XXI por el modelo PRECIS, corresponden a temperaturas. En términos generales se comenta que las variaciones de éstas respecto al clima actual presentan un predominio de las alzas, sobre todo para el escenario A2 (alza de temperatura media: entre 2°C y 4°C), el cual se acentúa en las regiones andinas y disminuye de norte a sur. Estacionalmente, las alzas son mayores en verano, llegando a ser mayores a 5°C en sectores altos de la cordillera de los Andes.

Además, se realiza una comparación entre las proyecciones PRECIS y valores observados de períodos actuales en cuanto a los ciclos anuales de temperatura media. Los análisis se realizan por franjas definidas según latitud, donde la franja entre 17°S y 23°S incluye el sector de ubicación de la cuenca alta del río Loa. Respecto a ésta se menciona que existe una muy buena correspondencia de este ciclo, pero que el modelo entrega temperaturas medias menores en 2°C a los de las series observadas. Una representación de estos resultados se presenta en la Figura 2.3.

En cuanto a la variación de temperaturas extremas diarias de periodo futuro, respecto al periodo de línea de base, se menciona que las máximas variaciones ocurren en la cordillera de la zona norte en verano, las cuales alcanzan un alza de hasta 6°C para el periodo futuro A2.

Figura 2.3 Validación de temperaturas medias con observaciones para faja entre 17°S y 23°S



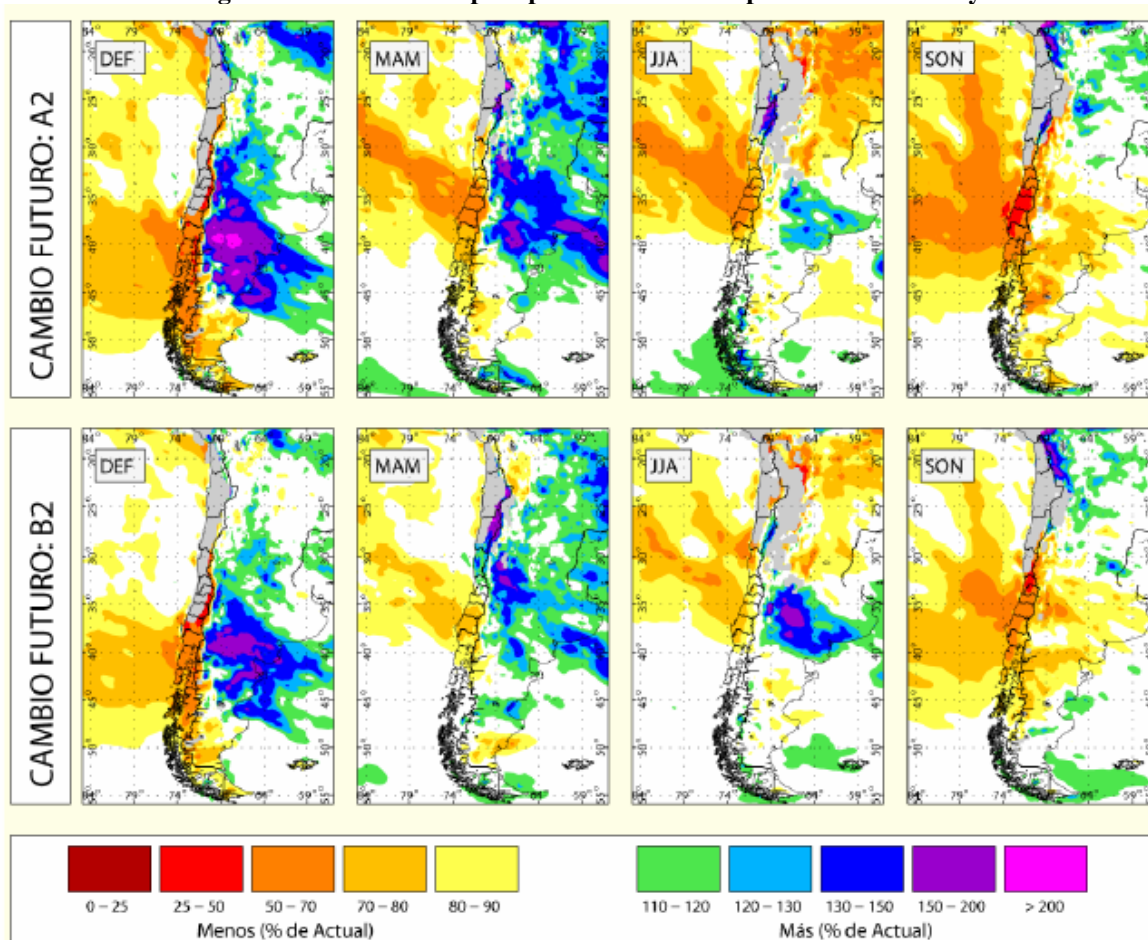
(DGF, 2006)

Posteriormente, se realiza un análisis en torno a las proyecciones futuras de precipitaciones, en el cual se menciona el contraste en el comportamiento en las cumbres de los Andes, en cuyas laderas ubicadas al este se observa un aumento de las precipitaciones, mientras que en la ladera oeste una disminución. Esta última incluye Chile continental y el Pacífico adyacente. Este comportamiento ocurriría particularmente en las latitudes medias y en las estaciones de verano y otoño. En particular, para el sector altiplánico chileno se proyecta un aumento de las precipitaciones en primavera y verano, el cual es más significativo en primavera en el escenario A2 para la I y XV región, y más extendido en la II región para el escenario B2.

Al validar las precipitaciones proyectadas por PRECIS respecto a valores observados en un periodo concurrente, se menciona que en general las primeras sobreestiman las precipitaciones observadas en sectores de altura, pero que los ciclos anuales se encuentran bien representados.

Se menciona como posibles causas de la sobreestimación de precipitaciones, problemas en las mediciones de precipitación nival y las mediciones realizadas en valles angostos debido a que quedan mal representados. En el caso particular de la región ubicada entre la latitud 17°S y 23°S, los resultados presentados en el informe corresponden a los de la Figura 2.5. En referencia a esto, según lo que se observa en el primer gráfico, los datos proyectados por PRECIS (círculos azules) sobreestiman las precipitaciones observadas (cuadrados grises), lo cual se exagera entre las longitudes 70,5°S y 69°S. La cuenca alta del río Loa se ubica entre las longitudes 69°S y 68°S, sector en el cual también se observa precipitaciones proyectadas sobreestimadas, pero en un grado mucho menor que en el sector contiguo.

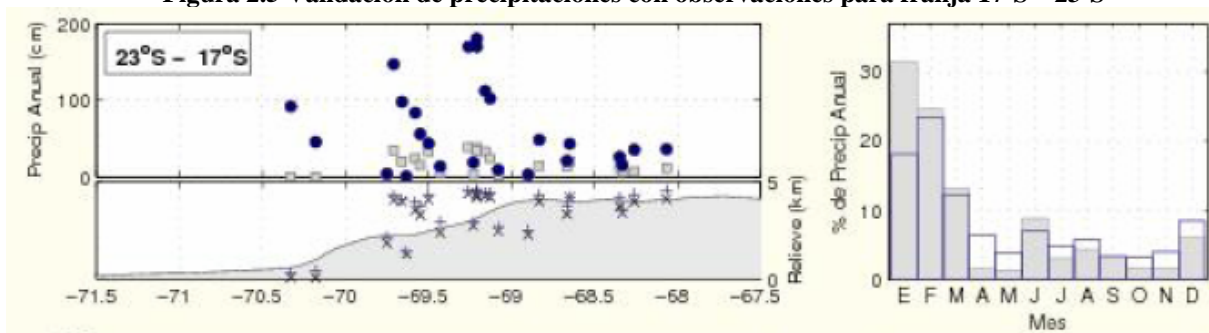
Figura 2.4 Variación de precipitación estacional para escenarios A2 y B2



Color gris: zona de precipitación muy escasa (porcentajes no tienen significancia)
(DGF, 2006)

En relación al segundo gráfico de la Figura 2.5, en el cual se comparan los ciclos anuales de precipitaciones para el sector entre 17°S y 23°S, se observa que para las tres estaciones de mayores valores (enero, febrero y marzo), los datos proyectados se encuentran subestimados respecto a los observados, en una proporción baja para los meses de febrero y marzo, y en una proporción alta para el mes de enero. Para el resto de los meses, en los cuales las precipitaciones son mucho menores a los de la estación de verano, todas las proyecciones son mayores a los valores observados, a excepción del mes de junio y el mes de septiembre.

Figura 2.5 Validación de precipitaciones con observaciones para franja 17°S – 23°S

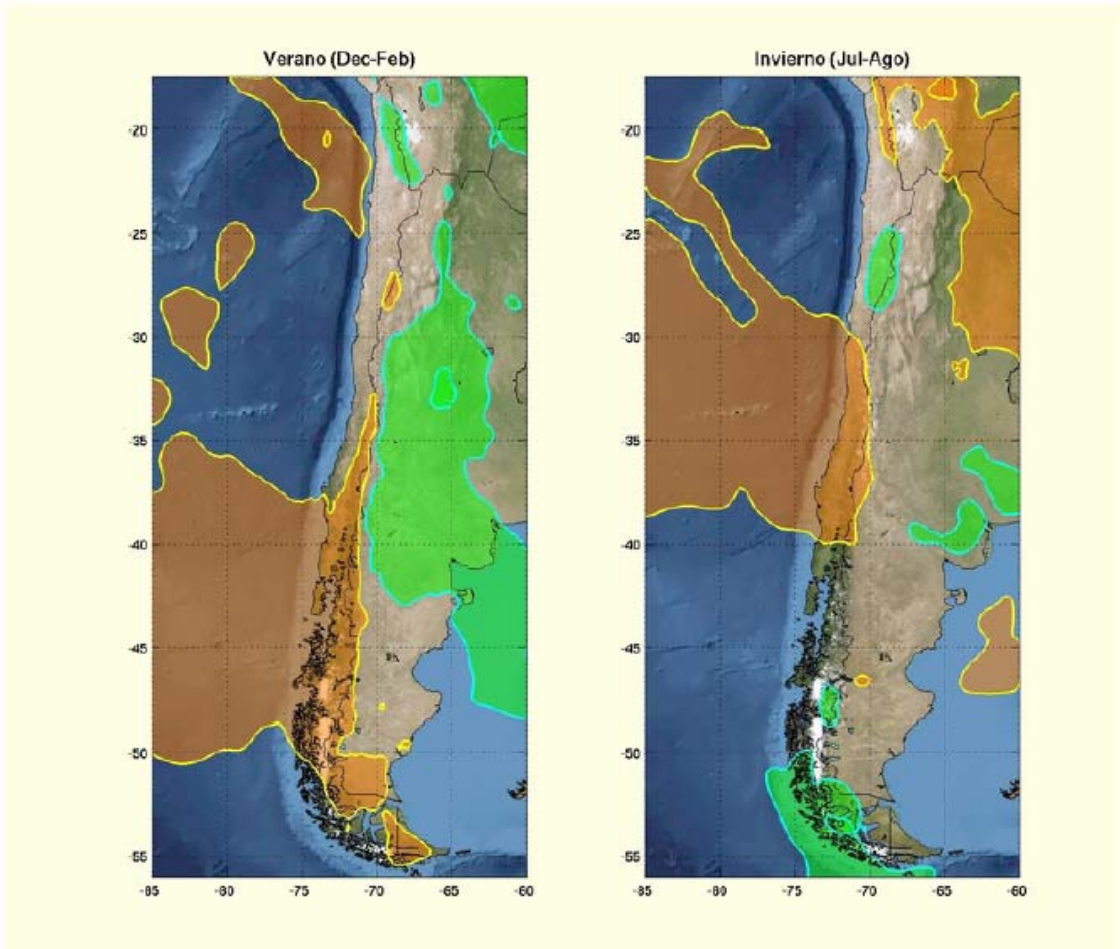


(DGF, 2006)

Comentarios referentes a los impactos hidrológicos de las proyecciones futuras

Respecto a los impactos hidrológicos, se destaca el efecto producido por las variaciones en temperatura sobre el sector andino, en el cual, debido a la elevación en altura de la isoterma 0°C, se produce un aumento de las crecidas en invierno debido al aumento en área de la cuenca aportante, y en consecuencia, disminuye el área de reserva nival. En cuanto a las variaciones de precipitaciones, se menciona que en todo el territorio nacional predominan las disminuciones, donde la región altiplánica, sector al cual pertenece la cuenca alta del río Loa, corresponde a una de las excepciones para la estación de verano, debido que se producen aumentos. (La Figura 2.6 corresponde a un ejemplo del escenario A2).

Figura 2.6 Variación de precipitaciones en escenario A2 para estaciones con valores anuales extremos



Color café: disminuye en 15% o más

Color verde: aumenta en un 15% o más

(DGF, 2006)

2.2. Marco teórico general de modelos de Función de Transferencia

2.2.1 Modelos de Función de Transferencia y representación

Los modelos de Función de Transferencia consiste en la descripción de una respuesta dinámica en la cual una variable de salida \mathbf{Y} en un tiempo \mathbf{t} , está explicada o determinada por variables de entrada \mathbf{X} , donde la respuesta de \mathbf{Y} presenta un desfase (retardo) respecto a la variación de \mathbf{X} . Para el presente trabajo, la variable \mathbf{Y} corresponde a caudales, y la variable \mathbf{X} a las variables de precipitación.

Otra característica de la función de transferencia, es que corresponde a un modelo discreto, en el sentido que las variables observadas (\mathbf{X} e \mathbf{Y}) se encuentran equi-espaciadas por un intervalo de tiempo \mathbf{t} , el cual corresponde a la unidad básica de tiempo. En el caso de estudio, esta unidad básica equivale a un mes. Además, este modelo discreto debe representar en forma adecuada el proceso que se está modelando, el cual es continuo para el caso de caudales y precipitaciones.

Por otra parte, la respuesta de la variable \mathbf{Y} en un tiempo \mathbf{t} (\mathbf{Y}_t), no queda determinada en forma completa por la variable \mathbf{Y} en tiempos anteriores a \mathbf{t} y la variable explicativa \mathbf{X} . Existe un valor residual llamado ruido o perturbación (N_t), que numéricamente representa la parte de la respuesta no explicada por estas últimas. Lo anterior, obliga a generar un modelo conjunto entre la Función de Transferencia (parte determinística) y un Modelo Estocástico de Ruido, el cual modela este valor residual. Este conjunto corresponde al modelo de Función de Transferencia – Ruido, el cual se representa en la Ecuación 2.1.

$$Y_t = \nu_0 \cdot X_t + \nu_1 \cdot X_{t-1} + \nu_2 \cdot X_{t-2} + \dots + N_t = \nu(B)X_t + N_t$$

Ecuación 2.1

La primera parte del modelo descrito en la Ecuación 2.1, corresponde a la Función de Transferencia determinística, en la cual se establece la relación entre la variable explicativa \mathbf{X} y la variable explicada \mathbf{Y} . Para diferenciarla de la Función de Transferencia que incluye la componente de ruido, se expresa como Y_t^* , y queda representada por la Ecuación 2.2. A pesar de la diferenciación en la notación de los modelos de función de transferencia con y sin componente de ruido, es posible que en el resto del informe ambos casos se representen indistintamente como Y_t .

$$Y_t^* = \nu_0 \cdot X_t + \nu_1 \cdot X_{t-1} + \nu_2 \cdot X_{t-2} + \dots = \nu(B)X_t$$

Ecuación 2.2

La relación dada por la Ecuación 2.2, consiste en un filtro lineal, en el cual la variable de salida Y_t está determinada por una ecuación lineal dependiente de X_t , para el mismo tiempo t y tiempos anteriores a éste. En esta relación, las variables X_t e Y_t representan las “desviaciones del estado de equilibrio” de las variables correspondientes, en el tiempo t .

La segunda parte del modelo, corresponde a la variable aleatoria o estocástica del sistema, representada por la variable de ruido N_t . La principal característica de esta variable es que es independiente de la serie de variables X . (Juan Fernández, 2006). Por lo tanto correspondería a la parte de la variable Y_t que no es explicada por la variable X_t .

Otros conceptos específicos de cada una de las dos componentes del modelo de función de transferencia-ruido se exponen a continuación.

2.2.1.1 Función de transferencia determinística

a) Representación mediante ponderadores de la función impulso - respuesta

Otra forma de representar la Ecuación 2.2 es mediante el “operador de retardo”: B , cuya fórmula está dada por la Ecuación 2.3.

$$B^d = \frac{X_{t-d}}{X_t}$$

Ecuación 2.3

Definido este operador, la Ecuación 2.2 (función de transferencia en su forma determinística), queda descrita por la Ecuación 2.4.

$$Y_t = (v_0 + v_1 \cdot B + v_2 \cdot B^2 + \dots) \cdot X_t$$

Ecuación 2.4

A partir de la representación de la Ecuación 2.2 y la Ecuación 2.4 se pueden definir algunas de sus componentes como las presentadas a continuación.

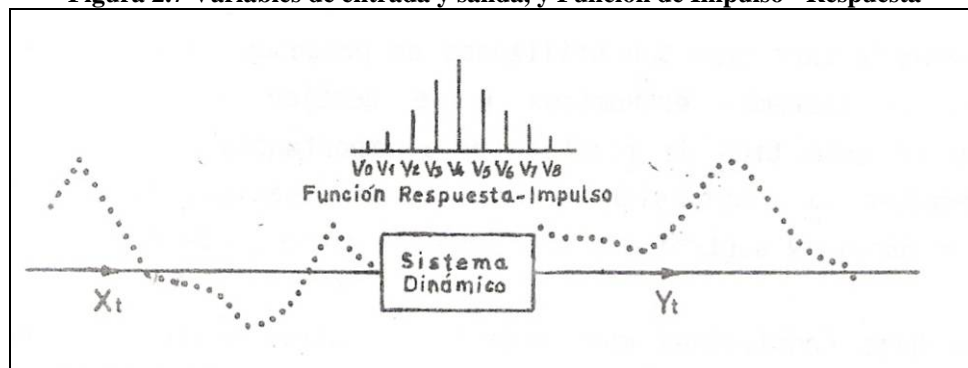
Función de transferencia del filtro: corresponde al polinomio de los ponderadores v de la ecuación lineal que define Y_t^* . (Sandoval, 1988). Se describe en la Ecuación 2.5.

$$v(B) = (v_0 + v_1 \cdot B + v_2 \cdot B^2 + \dots)$$

Ecuación 2.5

Función impulso - respuesta: corresponde a la función de ponderadores v_i , graficados en barras. Una representación conceptual de ellos se presenta la Figura 2.7

Figura 2.7 Variables de entrada y salida, y Función de Impulso - Respuesta



(Sandoval, 1988)

Variaciones incrementales de las variables X_t e Y_t .

Se definen las “variaciones incrementales” de las variables X_t e Y_t , como las diferencias entre la variable en el tiempo t , y la misma variable en el tiempo anterior $t-1$. Se expresan como x_t e y_t , respectivamente, y sus respectivas ecuaciones corresponden a la Ecuación 2.6 y la Ecuación 2.7.

$$y_t = Y_t - Y_{t-1} = (1 - B) \cdot Y_t$$

Ecuación 2.6

$$x_t = X_t - X_{t-1} = (1 - B) \cdot X_t$$

Ecuación 2.7

Considerando que las ecuaciones anteriores (Ecuación 2.6 y Ecuación 2.7) corresponden a gradientes de las variables X_t e Y_t respectivamente, la definición de estos gradientes quedan representados por la Ecuación 2.8 y la Ecuación 2.9.

$$y_t = Y_t - Y_{t-1} = (1 - B) \cdot Y_t = \nabla Y_t$$

$$\Rightarrow y_t = \nabla Y_t$$

Ecuación 2.8

$$x_t = X_t - X_{t-1} = (1 - B) \cdot X_t = \nabla X_t$$

$$\Rightarrow x_t = \nabla X_t$$

Ecuación 2.9

La operación mediante la cual se obtiene las series \mathbf{x}_t e \mathbf{y}_t , al emplear la Ecuación 2.6 y la Ecuación 2.7, se puede denominar operación de retroceso diferencial (Salas, 1983) o diferencias, (Juan Fernández, 2006).

Una característica relevante de las variaciones incrementales \mathbf{x}_t e \mathbf{y}_t es que pueden ser representadas por el mismo modelo de función de transferencia que relaciona \mathbf{X}_t e \mathbf{Y}_t . Es decir, presenta la misma función impulso – respuesta, o expresado de otra forma, las variaciones incrementales de \mathbf{X}_t e \mathbf{Y}_t (\mathbf{y}_t y \mathbf{x}_t) se relacionan a través de la misma función de transferencia del filtro que las variables originales, tal como se muestra en la Ecuación 2.10. Su demostración se encuentra en Anexos.

$$\text{Si } Y_t = v(B) \cdot X_t \quad \text{Entonces } y_t = v(B) \cdot x_t$$

Ecuación 2.10

b) Representación alternativa del modelo de Función de Transferencia determinística mediante ecuaciones de diferencia lineales

La necesidad de una representación alternativa a la función impulso - respuesta se genera debido a que es poco recomendable obtener directamente los parámetros v_j , debido a que generalmente están relacionados funcionalmente entre si, por lo cual se puede obtener resultados inestables e imprecisos. (Sandoval, 1988).

Considerando que el modelo de Función de Transferencia determinístico corresponde a un modelo dinámico discreto, entonces, éste puede ser representado por una Ecuación General de Diferencias Lineales. Esta ecuación corresponde a una representación parsimoniosa de un sistema dinámico discreto, es decir, en la que se emplea el menor número de parámetros posible con valores significativos, con lo

cual, los parámetros son finitos y por lo tanto más sencillos de determinar. Su representación corresponde a la Ecuación 2.11, la que puede ser escrita también según la Ecuación 2.12.

$$Y_t = (\delta_1 \cdot Y_{t-1} + \delta_2 \cdot Y_{t-2} + \delta_3 \cdot Y_{t-3} + \dots + \delta_r \cdot Y_{t-r}) + (\omega_0 \cdot X_{t-b} + \omega_1 \cdot X_{t-b-1} + \dots + \omega_s \cdot X_{t-b-s})$$

Ecuación 2.11

$$(Y_t - \delta_1 \cdot Y_{t-1} - \delta_2 \cdot Y_{t-2} - \delta_3 \cdot Y_{t-3} - \dots - \delta_r \cdot Y_{t-r}) = (\omega_0 \cdot X_{t-b} + \omega_1 \cdot X_{t-b-1} + \dots + \omega_s \cdot X_{t-b-s})$$

Ecuación 2.12

Esta representación corresponde a un modelo de función de transferencia de la forma FT(r,s,b), donde:

r: corresponde al número de términos autorregresivos

s+1: el número de términos de excitación (variable externa)

b: retardo

Dada la representación recién descrita, la Ecuación 2.1, correspondiente al modelo de función de transferencia en su forma completa, queda representada por la Ecuación 2.13.

$$Y_t = (\delta_1 \cdot Y_{t-1} + \delta_2 \cdot Y_{t-2} + \delta_3 \cdot Y_{t-3} + \dots + \delta_r \cdot Y_{t-r}) + (\omega_0 \cdot X_{t-b} + \omega_1 \cdot X_{t-b-1} + \dots + \omega_s \cdot X_{t-b-s}) + N_t$$

Ecuación 2.13

Considerando que el operador de retardo B, definido en la Ecuación 2.3, es válido también para la serie de variables Y_t , éste queda definido en la Ecuación 2.14 para ésta variable.

$$B^d = \frac{Y_{t-d}}{Y_t}$$

Ecuación 2.14

Entonces, considerando los operadores de retardo de las variables X_t e Y_t (Ecuación 2.3 y Ecuación 2.14), se tiene que la función de transferencia determinística, expresada mediante una ecuación de diferencias lineales (Ecuación 2.12) puede ser expresada según la Ecuación 2.15.

$$\delta_r(B) \cdot Y_t = \omega_s(B) \cdot B^b \cdot X_t$$

Ecuación 2.15

Donde:

$$\delta_r(B) = 1 - (\delta_1 \cdot B^1 + \delta_2 \cdot B^2 + \delta_3 \cdot B^3 + \dots \delta_r \cdot B^r)$$

Ecuación 2.16

$$\omega_s(B) = \omega_1 \cdot B^1 + \omega_2 \cdot B^2 + \omega_3 \cdot B^3 + \dots \omega_s \cdot B^s$$

Ecuación 2.17

c) Relación entre los parámetros v , y (δ, ω) , pertenecientes a ambas representaciones de los modelos de Función de Transferencia

Considerando ambas representaciones de los modelos de función de transferencia, dadas por la Ecuación 2.4 y la Ecuación 2.15, e igualándolas respecto a la variable Y_t , se tiene que:

$$v(B) \cdot X_t = \frac{\omega_s(B) \cdot B^b}{\delta_r(B)} \cdot X_t$$

Ecuación 2.18

Con lo cual se obtiene la Ecuación 2.19.

$$v(B) = \frac{\omega_s(B) \cdot B^b}{\delta_r(B)}$$

Ecuación 2.19

La Ecuación 2.19 se puede escribir en forma extendida según la Ecuación 2.20, la que en forma desarrollada se expresa según la Ecuación 2.21.

$$(1 - \delta_1 \cdot B - \delta_2 \cdot B^2 - \dots \delta_r \cdot B^r) \cdot (v_0 + v_1 \cdot B + v_2 \cdot B^2 \dots) = (\omega_0 + \omega_1 \cdot B + \dots + \omega_s \cdot B^s) \cdot B^b$$

Ecuación 2.20

$$(v_0 + (v_1 - \delta_1 \cdot v_0) \cdot B + (v_2 - \delta_1 \cdot v_1 - \delta_2 \cdot v_0) \cdot B^2 + \dots) = (\omega_0 \cdot B^b + \omega_1 \cdot B^{b+1} + \dots + \omega_s \cdot B^{b+s})$$

Ecuación 2.21

Estableciendo un sistema de ecuaciones lineales, a partir de una igualdad de coeficientes de la Ecuación 2.21, para un mismo operador de retroceso B, se obtiene dicho sistema de ecuaciones definido por la Ecuación 2.22, la Ecuación 2.23, la Ecuación 2.24 y la Ecuación 2.25.

$$v_k = 0 \quad \forall k < b \quad \text{Ecuación 2.22}$$

$$v_k = (\delta_1 \cdot v_{k-1} + \delta_2 \cdot v_{k-2} + \delta_3 \cdot v_{k-3} + \dots + \delta_r \cdot v_{k-r}) + \omega_0 \quad \forall k = b \quad \text{Ecuación 2.23}$$

$$v_k = (\delta_1 \cdot v_{k-1} + \delta_2 \cdot v_{k-2} + \delta_3 \cdot v_{k-3} + \dots + \delta_r \cdot v_{k-r}) + \omega_{k-b} \quad \forall k \in (b; b+s) \quad \text{Ecuación 2.24}$$

$$v_k = (\delta_1 \cdot v_{k-1} + \delta_2 \cdot v_{k-2} + \delta_3 \cdot v_{k-3} + \dots + \delta_r \cdot v_{k-r}) \quad \forall k > b+s \quad \text{Ecuación 2.25}$$

Considerando $v_{k-i} = 0$ si $k-i < 0$

El sistema de ecuaciones anterior permite relacionar los parámetros de las dos formas en que se puede expresar el modelo de Función de Transferencia. Además, se puede determinar algunas características de los coeficientes de la función impulso - respuesta. Estas son las siguientes.

- 1) Existen b coeficientes iguales a cero: v_0, v_1, \dots, v_{b-1} .
- 2) Existen $s - r + 1$ coeficiente que no siguen ningún patrón de comportamiento fijo: $v_b, v_{b+1}, \dots, v_{b+s-r}$. (Estos valores no existen si $s < r$).
- 3) Para $k > b + s$ los coeficientes v_k siguen el patrón dado por la ecuación de diferencia $\delta(B) \cdot v_k = 0$, donde r valores: $v_{b+s}, v_{b+s-1}, \dots, v_{b+s-r+1}$, sirven como valores iniciales.

2.2.1.2 Componente de ruido N_t del modelo de Función de Transferencia

Corresponde a la diferencia entre el valor de la variable de salida Y_t y la parte determinística de ésta (Y_t^*) (Ecuación 2.26). Esta serie puede ser representada por un modelo ARMA, definido en la Ecuación 2.27, y cuya serie de ruido se denomina a_t .

$$N_t = Y_t - Y_t^*$$

Ecuación 2.26

$$\phi(B)N_t = \theta(B)a_t$$

Ecuación 2.27

Considerando la Ecuación 2.27, se tiene que el modelo de función de transferencia con sus componentes determinística y aleatoria, representado por la Ecuación 2.13, se puede escribir como se presenta en la Ecuación 2.28.

$$Y_t = (\delta_1 \cdot Y_{t-1} + \delta_2 \cdot Y_{t-2} + \delta_3 \cdot Y_{t-3} + \dots + \delta_r \cdot Y_{t-r}) + (\omega_0 \cdot X_{t-b} + \omega_1 \cdot X_{t-b-1} + \dots + \omega_s \cdot X_{t-b-s}) + \phi_1 N_{t-1} + \dots + \phi_p N_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q}$$

Ecuación 2.28

2.2.2 Identificación de Modelos de Función de Transferencia - Ruido

Los conceptos teóricos referentes a la identificación de los modelos de Función de Transferencia – Ruido, se encuentra en Anexos, explicitándose en el presente informe, sólo los conceptos necesarios para la definición de la metodología expuesta en el Capítulo 4, capítulo en el cual se exponen estos conceptos.

Al modelar un proceso Precipitación – Escorrentía mediante modelos de Función de Transferencia, su forma lineal puede desprestigiar las respuestas no – lineales que ocurran en dicho proceso. Al respecto, Sandoval (1988), se emplea una función de corrección llamada función Perlog, la cual está orientada a corregir inestabilidades de un hidrograma de escorrentía. Su forma para variables discretas está dada por la Ecuación 2.29.

$$pl_t = \frac{1}{Q_t} \cdot \left(\frac{\sum_{r=-j}^j r \cdot Q_{t+r}}{\sum_{r=-j}^j r^2} \right)$$

Ecuación 2.29

Se hace referencia a esta función de corrección debido a que se encuentra incluida en la ecuación del programa computacional FTXZ, programa desarrollado en la División de Recursos Hídricos del

Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, y que es empleado en el presente trabajo para la calibración de los parámetros óptimos de modelos de función de transferencia. En dicho programa la ecuación de función de transferencia (determinística) incluye la función Perlog con un retardo de j pasos, como se muestra en la Ecuación 2.30., y con un valor para $j = 2$ como se muestra en la Ecuación 2.31.

$$Y_t = (\delta_1 \cdot Y_{t-1} + \delta_2 \cdot Y_{t-2} + \delta_3 \cdot Y_{t-3} + \dots + \delta_r \cdot Y_{t-r}) + (\omega_0 \cdot X_{t-b} + \omega_1 \cdot X_{t-b-1} + \dots + \omega_s \cdot X_{t-b-s}) + \alpha \cdot Pl_{t-j}$$

Ecuación 2.30

$$pl_t = \frac{1}{Q_t} \cdot \left(\frac{\sum_{r=-2}^2 r \cdot Q_{t+r}}{\sum_{r=-2}^2 r^2} \right) = \frac{-2 \cdot Q_{t-2} - Q_{t-1} + Q_{t+1} + 2 \cdot Q_{t+2}}{10}$$

Ecuación 2.31

3. Antecedentes Generales de la cuenca del río Loa y selección de series de precipitaciones y caudales

En el presente capítulo se exponen las principales características de la zona de interés y aquellas que resulten relevantes para el presente estudio. Además se presentan las series de precipitaciones y caudales seleccionadas para la modelación mediante un modelo de función de transferencia.

3.1. Características generales de la zona de emplazamiento de la cuenca

La información expuesta en la presente sección corresponde principalmente a antecedentes generales presentados por Cade-idepe (2004) y DGA (2005) y descripciones físicas generales del río Loa y sus afluentes (Espildora et al., 1979).

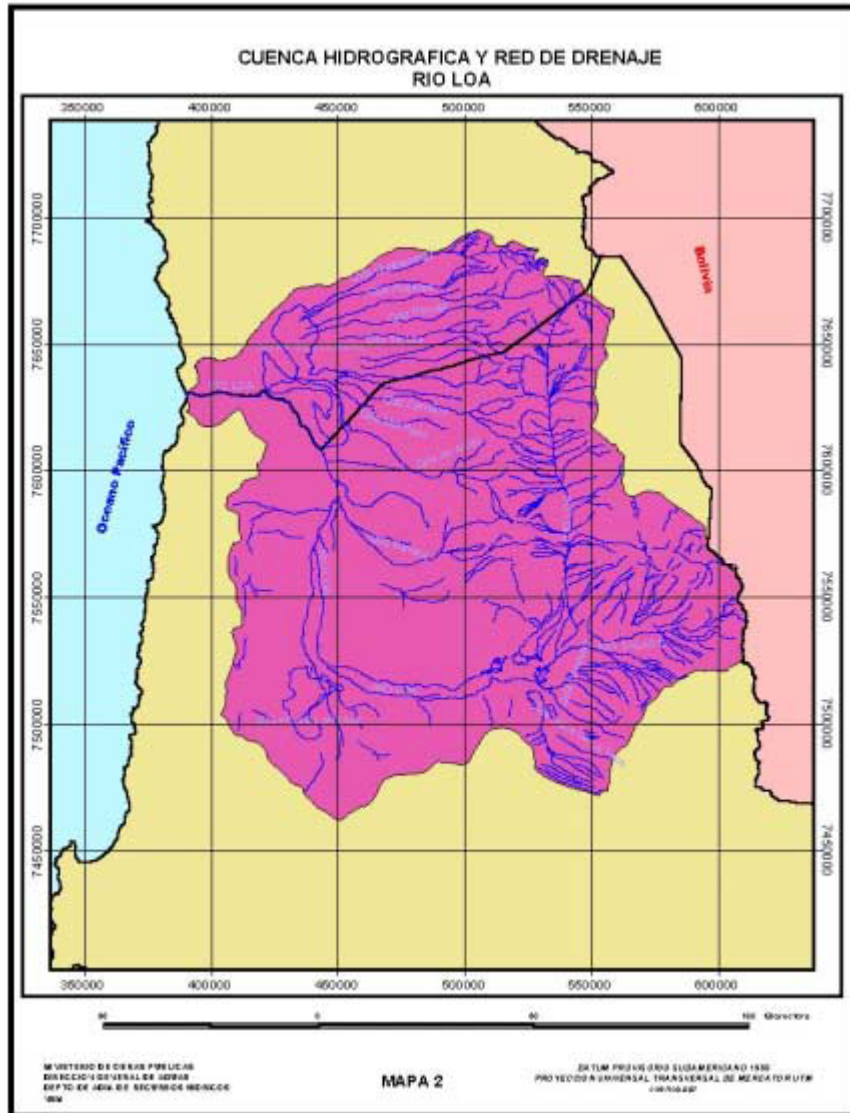
La cuenca queda comprendida entre los paralelos 21°00' y 22°58' de latitud Sur y entre los meridianos 70°05' y 68°00' de longitud Oeste, ubicada principalmente en la región de Antofagasta y en parte de la región de Tarapacá. Corresponde a la única cuenca exorreica de dichas regiones, cuyo cauce recorre el desierto de Atacama recibiendo recursos hídricos desde la cordillera de los Andes, hasta desembocar en el océano Pacífico.

La longitud de su cauce es de 440 Km. y el área de la hoya hidrográfica es de 33570 km², donde sólo el 20% del área es activa, en el sentido de que es en esa porción de área donde ocurre la recarga de recursos hídricos de la cuenca, correspondiente a recursos hídricos de precipitaciones cordilleranas. (Cade-idepe, 2004). Es por ésta razón que es en ésta zona, también llamada cuenca alta del río Loa, donde se enfoca el análisis del presente estudio.

En cuanto al régimen hidrológico de la cuenca del río Loa y sus afluentes, este es pluvial donde las crecidas obedecen a intensas lluvias de verano caídas en la alta cordillera. (DGA, 2005).

En las Figura 3.1 y Figura 3.2 se puede apreciar algunas imágenes de la zona de estudio. En la Figura 3.1 se presenta en forma general la red hidrográfica de la cuenca.

Figura 3.1
Vista de la red hidrográfica del río Loa



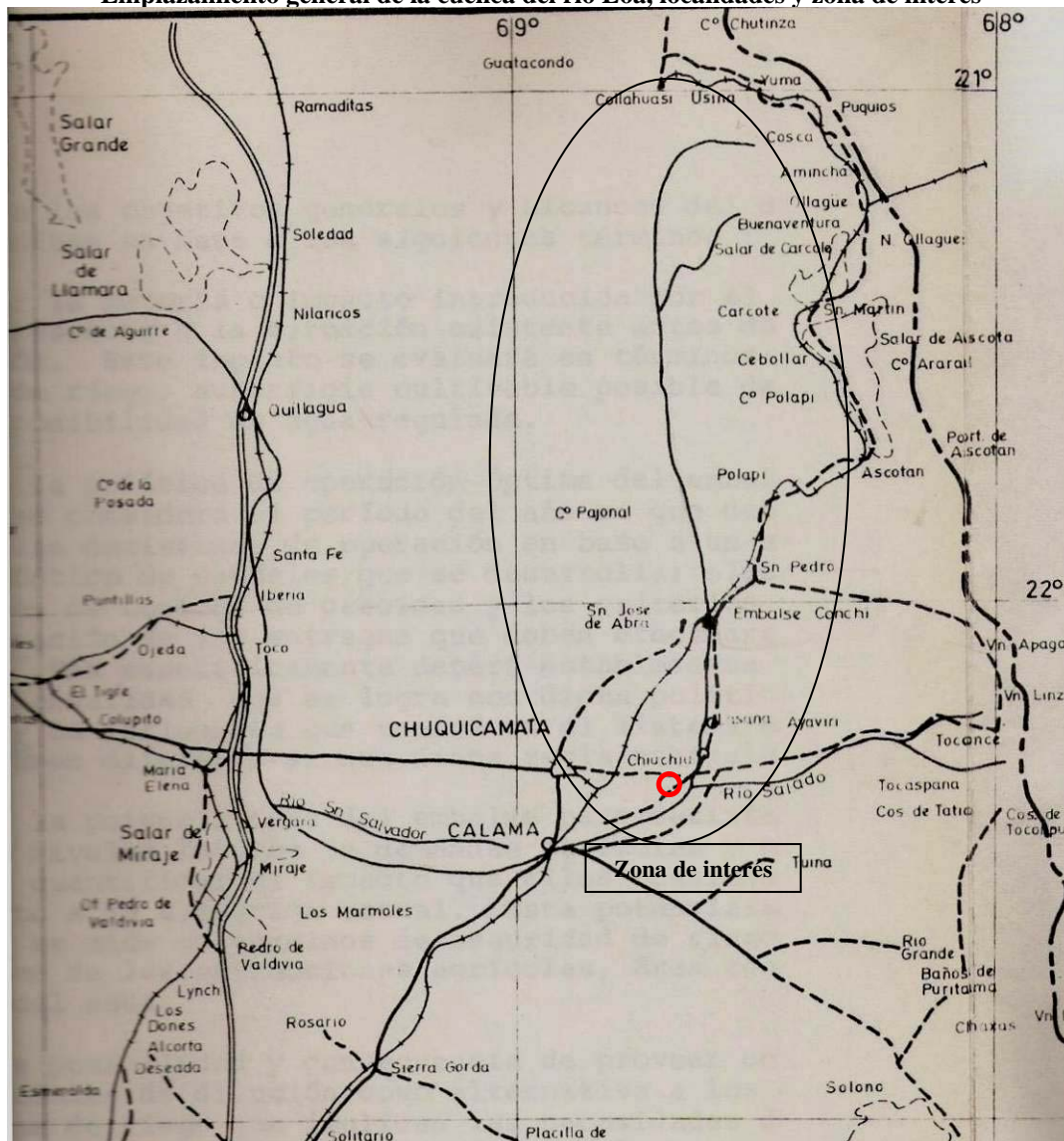
(Fuente: DGA, 2005)

En la Figura 3.2 se presenta un mapa general de emplazamiento, el cual incluye nombres de algunas localidades a las cuales se hace referencia en las descripciones físicas del río Loa. Se incluye también en la Figura 3.2 la zona de interés para el presente estudio.

El río Loa nace en la falda norte del volcán Miño, en Ojos del Miño (5.651 m.s.n.m), casi en el límite entre las regiones de Tarapacá y Antofagasta. Desde su nacimiento hasta el oasis de Chiuchiu, recorre casi 150 Km. en un profundo cañón de altura variable, con curso aproximadamente N-S. En este tramo, 105 km aguas abajo del nacimiento del río Loa, se observa la primera zona de confluencia importante, correspondiente a la junta con el río San Pedro. Desde este punto hasta 30 km aguas abajo, en

Lasana, el río Loa recorre un cañón de grandes proporciones el cual comienza a disminuir en Lasana. Además, en este sector, a 6 km del río San Pedro y aguas arriba de Conchi, existen numerosas vertientes menores.

Figura 3.2
Emplazamiento general de la cuenca del río Loa, localidades y zona de interés



(Fuente: Espildora et al., 1979)

El segundo afluente de importancia corresponde al río Salado, el cual confluye en el Loa aguas abajo de Chiu-chiu y a 45 km de la junta del río San Pedro.

En Chiu-chiu el curso del río Loa gira hacia el oeste para alcanzar la localidad de Chacance, luego de 115 km. En este punto, confluye por la rivera derecha del río Loa el río San Salvador, el cual puede encontrarse en forma paralela al río Loa durante este tramo de recorrido en dirección oeste, ubicado a 5

km al norte del río Loa, y presentando características similares a él. En este tramo, el río Loa pasa por el extremo Sur de la Cordillera del Medio.

En Angostura, a 23 km del río Salado, el río Loa vuelve a tomar características de cañón profundo, para que en las cercanías de Calama, vuelva a ensancharse y disminuir en altura, regando las zonas de cultivo del lugar. En Chintoraste, al término de la zona de riego de Calama, nuevamente el río presenta un cauce profundo y con sus laderas de calizas escarpadas, característica que mantiene mientras atraviesa la pampa y recoge numerosas quebradas secas.

En el punto de confluencia entre el río San Salvador y el Loa, este último toma dirección al norte por 80 km, hasta que alcanza el oasis de Quillagua. Durante este tramo, el río Loa conserva las características topográficas que presenta al final del tramo anterior.

A partir de Quillagua, el Loa comienza a doblar hacia el mar, donde confluye por el norte la Quebrada Amarga, para luego desembocar en el Pacífico en caleta Huelén, después de traspasar el macizo costero en un tajo profundo de más de 500 m de altura.

Los tributarios más importantes, que aportan regularmente al Loa, son los ríos Salado y San Salvador. El río San Pedro hidrológicamente también es afluente de este río, sin embargo, su aporte es muy esporádico, no habiéndose observado escurrimiento al Loa en los últimos años. (DGA, 2005). Esta información resulta coherente además con el hecho de que el río San Pedro en la actualidad no presenta caudal, y su cauce sólo es empleado para transporte de derechos de aguas subterráneas, captadas en la zona en que durante la década de 1960 existía una zona de humedal. (Brown, E., com. pers.).

El río Salado tiene sus orígenes en más de 30 vertientes frías y termales surgentes, en una gran extensión de terreno bajo, ubicada a los pies de la cadena del volcán Tatio, a unos 4.200 m s.n.m. Después de un breve recorrido S-N, toma dirección al W, labrando también un profundo cañón de 100 o más metros de altura en las tobas soldadas e ignimbritas riolíticas.

En su curso medio recibe desde el norte el río Toconce reunido con el Hojalar; más abajo recibe por su orilla izquierda al río Caspana. En los afluentes del norte es donde se encuentra la principal toma de agua dulce con fines domésticos para Antofagasta, Tocopilla y las oficinas salitreras.

Ligadas al curso medio del río Salado se encuentran extensas vegas que constituyen lugares de pastoreo para el ganado de los habitantes de Toconce, Caspana y Ayquina; las más conocidas de ellas son las vegas de Turi y de Ayquina.

Desde su nacimiento en los géisers del Tatio hasta su desembocadura en el río Loa, tres kilómetros aguas abajo de Chiuchiu, el Salado tiene un desarrollo de 80 km. y su hoya hidrográfica comprende 2.210 km².

El otro afluente de importancia que no se encuentra en la zona de interés es el río San Salvador, el cual nace de la reunión de varias quebradas secas con cabeceras en las proximidades de salares de la pampa. Después de un desarrollo de aproximadamente 25 km., al cauce así formado se le reúne por su ribera izquierda la quebrada Opache, en cuya pared surgen dos poderosas vertientes asociadas a una formación de calizas antiguas y muy compactas. El lugar se conoce con el nombre de Ojos de Opache y se considera el verdadero nacimiento del río. Su recorrido, hasta su junta al Loa en Chacance, es de 56 km. y el caudal aportan las vertientes de Opache es de alrededor de 600 l/s. Su cuenca cubre 619 km². Este afluente no pertenece a la zona de recarga de la cuenca, debido a lo cual no se considera mayormente en el estudio.

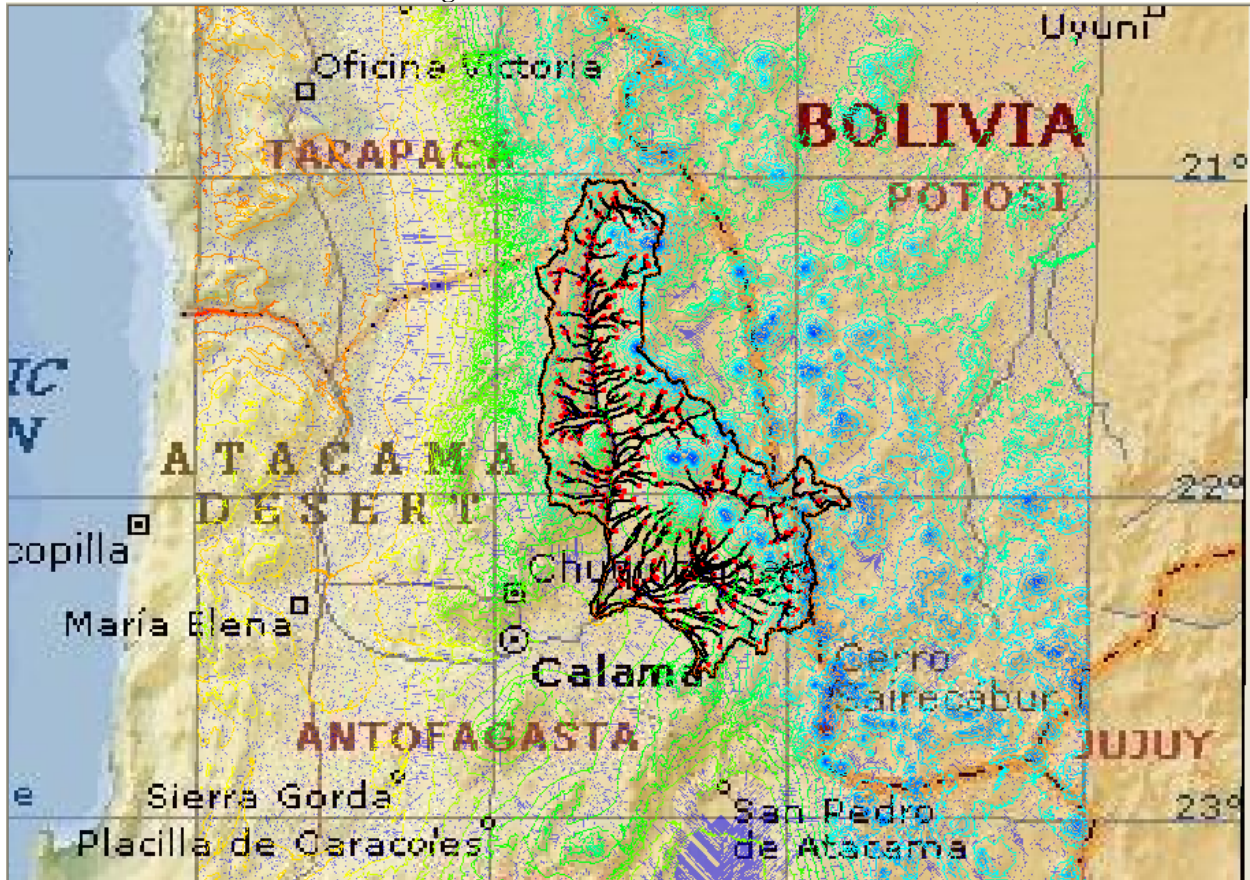
3.2. Características generales de la zona de interés

Correspondiente a la zona activa de la cuenca, donde se produce la recarga de ésta mediante precipitaciones cordilleranas, se define como la cuenca cuyo punto de salida se ubica en la junta del río Loa con el río Salado. Algunas de sus características se obtienen del análisis de un modelo de elevación digital de terreno obtenido en la referencia USGS [en línea], mediante el programa computacional WMS, las cuales se presentan en la Figura 3.3 y la Tabla 3.1.

Tabla 3.1

Datos de la cuenca		
Área cuenca	8483	Km ²
Elevación media de la cuenca	3855	m.s.n.m.
Pendiente de la corriente en el centroide	0.0139	m/m

Figura 3.3 Cuenca de zona de interés



(WMS, DEM: USGS, Datum: WGS84)

3.3. Registros históricos de caudales disponibles en la cuenca alta del río Loa

Esta información corresponde a la ubicación de estaciones fluviométricas y los respectivos periodos de información a nivel mensual de caudales disponibles en la cuenca, obtenidos desde la Dirección General de Aguas (DGA) y partir de los cuales se definen las posibles cuencas de estudio. Además, en el estudio Cade-idepe, 2004 se presentan curvas de variación estacional de varias estaciones fluviométricas del sector de interés. La información referente a las estaciones fluviométricas es presentada a continuación.

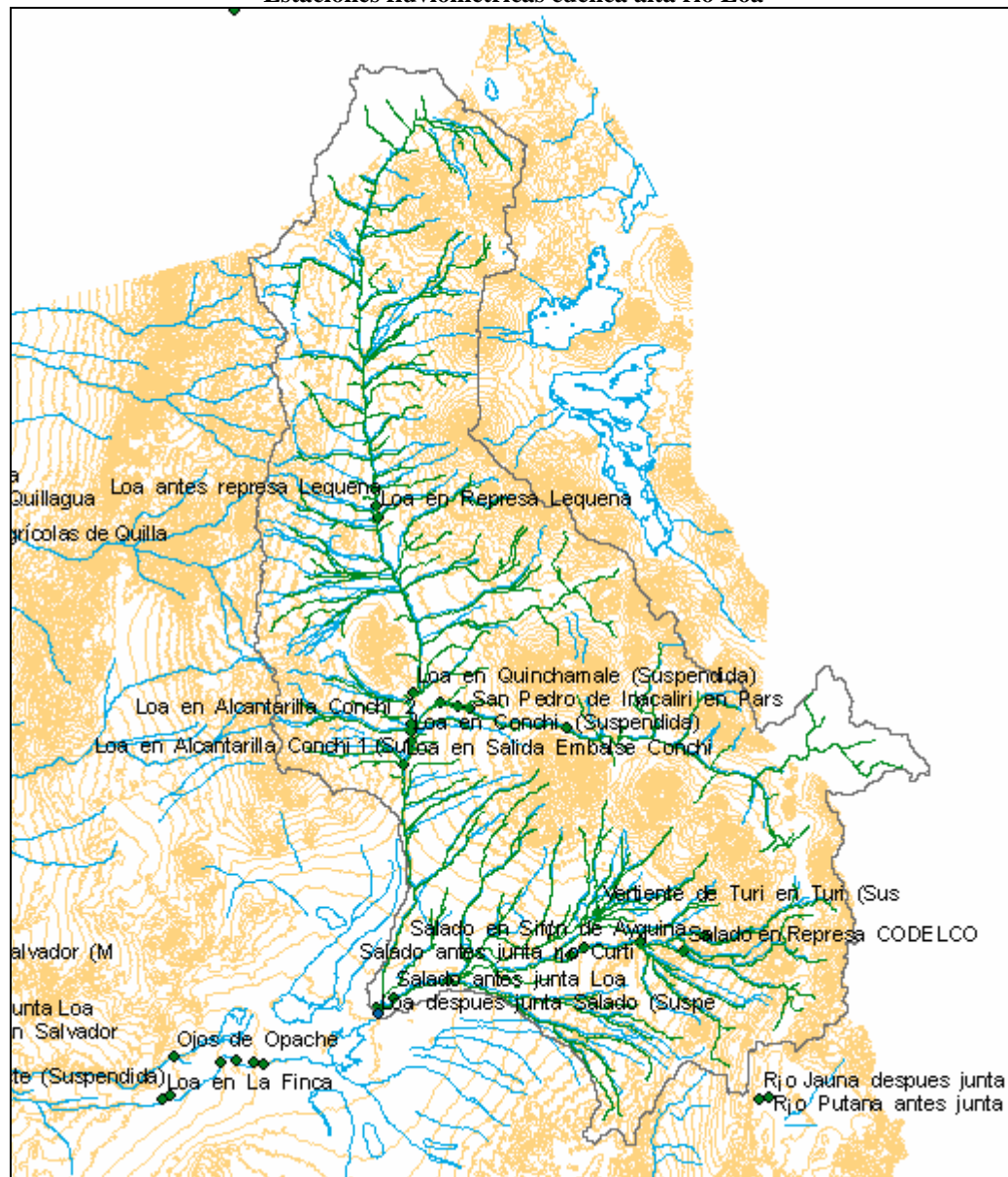
3.3.1 Estaciones fluviométricas

En la Figura 3.4 se presenta la ubicación de algunas de las estaciones fluviométricas del sector de interés. Se observa en la Figura 3.4 que existen varias estaciones fluviométricas al interior de la zona de

interés, otras en el punto de salida la cuenca que define el sector de interés, además de otras estaciones cercanas a este punto, pero emplazadas fuera de la cuenca.

En la Tabla 3.2 se encuentra el listado de estaciones fluviométricas disponibles, mientras que en Gráfico 3.1 se muestran los periodos disponibles con información en cada una de las estaciones. Los números de las estaciones del Gráfico 3.1, se encuentran en correspondencia con la numeración de las estaciones en la Tabla 3.2.

Figura 3.4
Estaciones fluviométricas cuenca alta río Loa

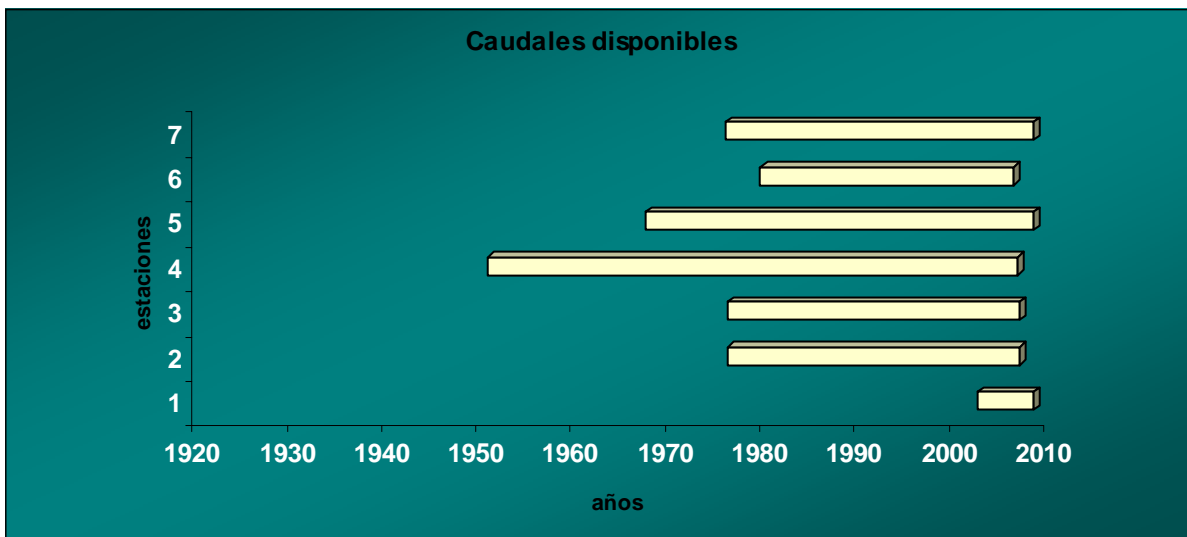


(Curvas de nivel y estaciones fluviométricas IGM. Red de drenaje y cuenca generada en WMS.)

Tabla 3.2
Estaciones fluviométricas en la zona de interés

	Estación	Mes inicio	año inicio	Mes termino	Año termino
1	Río Salado A. J. Loa	Ago	2002	abr	2008
2	Loa En Salida Embalse Conchi	Feb	1976	dic	2006
3	Salado Antes Sifón Ayquina	Ene	1976	dic	2006
4	Río Loa En Yalquincha	Oct	1950	sep	2006
5	Río Loa Antes Represa Lequena	Jul	1967	abr	2008
6	Río Loa En Alcantarilla Conchi N"2	Ago	1979	mar	2006
7	Río Salado A. J. Curti	Dic	1975	abr	2008

Gráfico 3.1

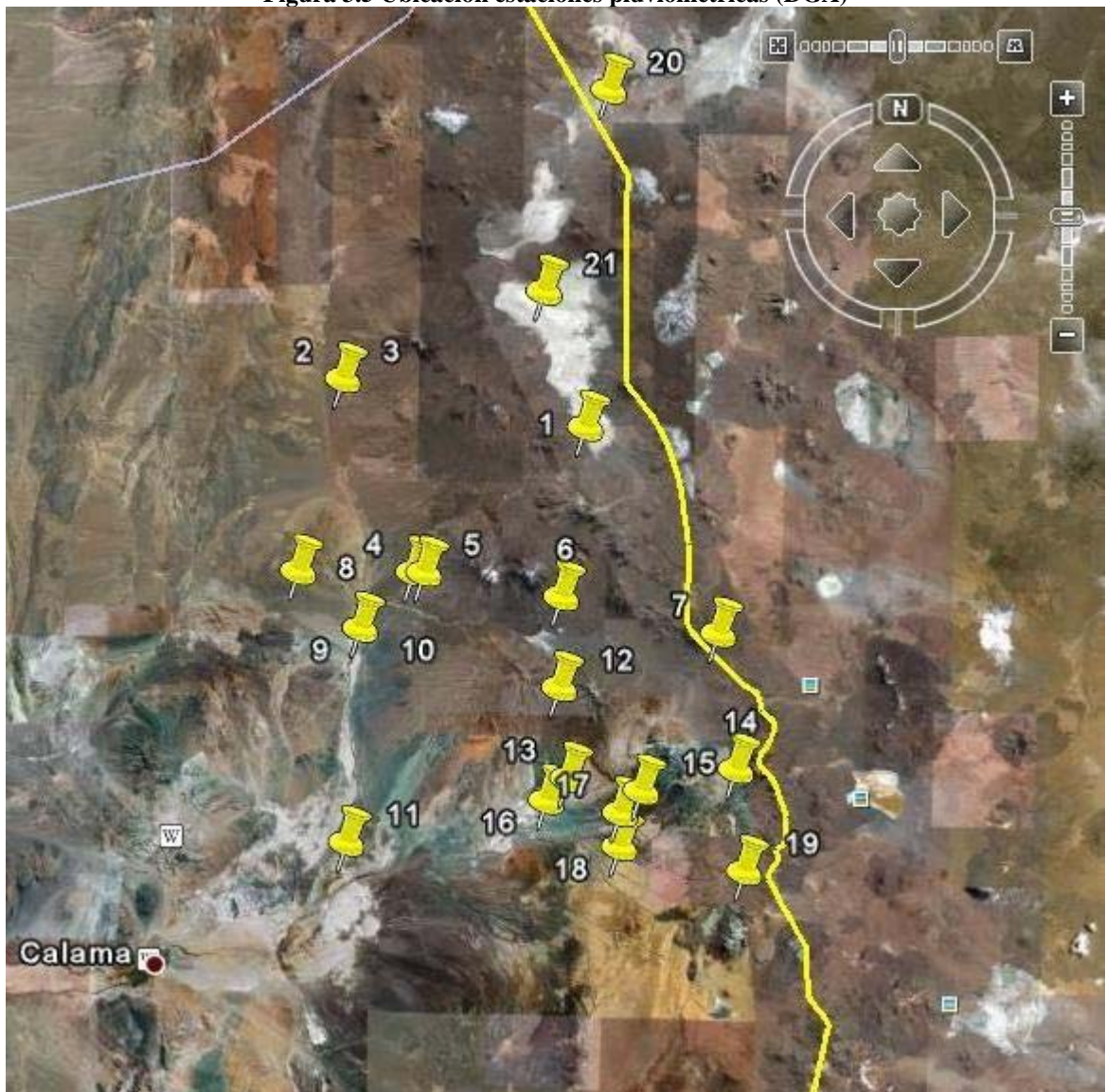


Se observa de la Tabla 3.2 que la estación Río Salado antes junta Loa (1), presenta un periodo muy pequeño de datos (6 años aproximadamente), por lo tanto se descarta para los análisis.

3.4. Registros históricos de precipitaciones disponibles en la cuenca alta del río Loa

La ubicación de las estaciones pluviométricas es presentada en la Figura 3.5 mediante el número que las representa. El listado de estas estaciones se encuentra en la Tabla 3.3, mientras que en el Gráfico 3.2 se presenta los periodos con información disponible en cada una de éstas, donde la numeración de las estaciones es la misma para la figura, la tabla y el gráfico.

Figura 3.5 Ubicación estaciones pluviométricas (DGA)

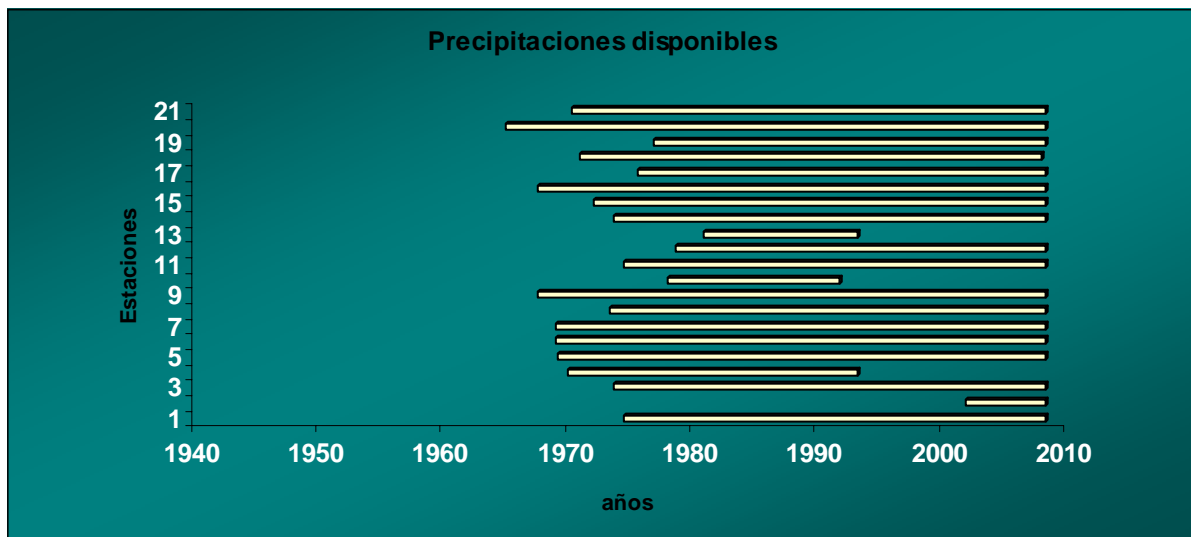


(Google Eart, Coordenadas estaciones: DGA,)

Tabla 3.3
Estaciones pluviométricas en la zona de interés

	Estación	Mes inicio	año inicio	Mes termino	Año termino
1	Ascotán	Ago	1974	jun	2008
2	Río Loa Antes Represa Lequena	Ene	2002	jun	2008
3	Lequena	Nov	1973	jun	2008
4	San Pedro De Conchi	Feb	1970	abr	1993
5	Parshall N 2	Abr	1969	jun	2008
6	Ojos San Pedro	Mar	1969	jun	2008
7	Inacaliri	Feb	1969	jun	2008
8	Conchi Viejo	Jul	1973	jun	2008
9	Conchi Embalse	Sep	1967	jun	2008
10	Conchi Muro Embalse	Feb	1978	dic	1991
11	Chiu-Chiu	Ago	1974	jun	2008
12	Cupo	Nov	1978	jun	2008
13	Turi	Ene	1981	may	1993
14	Linzor	Nov	1973	jun	2008
15	Toconce	Mar	1972	jun	2008
16	Ayquina	Sep	1967	jun	2008
17	Salado Embalse	Oct	1975	jun	2008
18	Caspana	Ene	1971	feb	2008
19	El Tatio	Jun	1977	jun	2008
20	Ollague	Nov	1971	jun	2008
21	Cebollar	Oct	1975	dic	2006

Gráfico 3.2



De lo observado se descartan las estaciones: río Loa antes represa Lequena (2), Conchi muro Embalse (10) y Turi (13), debido a que no contienen información con periodos suficientes.

3.5. Antecedentes generales sobre derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y usos de recursos hídricos en la cuenca alta del río Loa

Las extracciones de los recursos hídricos de la cuenca del río Loa corresponden a los antecedentes necesarios para poder obtener valores de caudales en régimen natural, que es la manera en que se debe trabajar los datos fluviométricos. Además, obtener la información sobre derechos de aguas superficiales otorgados de la manera más completa posible es un factor de importancia en la cuenca del río Loa, debido al conflicto entre demanda y disponibilidad de recursos hídricos superficiales. Esto queda ilustrado con el hecho de que en el año 2000 el río Loa y sus afluentes fue declarado agotado mediante Resolución D.G.A. N°197 (24 de enero de 2000), para la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento consuntivo, de ejercicio permanente. (DGA, 2005). Considerando el fenómeno de cambio climático, el conflicto respecto a la disponibilidad de recurso puede agravarse.

Respecto a la necesidad de obtener información sobre derechos de aguas en la cuenca del río Loa, se cuenta con dos informes realizados por la DGA. El primero de ellos (DGA, 2005), corresponde a un informe público y oficial que comprende un completo análisis de los derechos de aguas otorgados en el río Loa. El segundo (DGA, 2003), además de contener la misma información del primero, contempla información sobre derechos otorgados en aguas subterráneas. Ambos informes presentan listados de estos derechos de agua y características de ellos como: caudal otorgado, ubicación (localidad), tipo de derecho. Basándose en la información proporcionada en dichos listados se confecciona la Tabla 3.4, en la cual se presenta un resumen con derechos de aguas superficiales pertenecientes a la cuenca alta del río Loa, ubicada aguas arriba de la junta del río Loa y el río Salado (Figura 3.2). La información se obtiene principalmente del listado de la referencia DGA, 2003, debido a que corresponde a la versión más completa de ambos listados en relación a los derechos de aguas superficiales otorgados.

**Tabla 3.4 Derechos de aguas superficiales en cuenca del río Loa
(Solicitados hasta Enero de 2000)
(Fuente: DGA, 2003)**

Nº	Usuario	Fuente	Sector o subafluente	Derechos		Total Uso	Uso	Tipo derecho
				Cantidad	Unidad	l/s		
Alto Loa hasta Conchi								
1	ESSAN S.A.	Río Loa	Lequena	550	l/s			
2	ESSAN S.A.	Río Loa	Quinchamale	300	l/s	850	Agua potable	Permanente
57	F.C.A.B (Ferrocarril Antofagasta Bolivia)	Vertiente Polapi	Polapi, Loa Alto	16,61	l/s	16,61	Industria/Minería	Permanente
52	Comunidad Quechua de Ollague	Río Loa	Río Chela	7	l/s			
53	Comunidad Quechua de Ollague	Río Loa	Río Chauhuiri?	4	l/s			
54	Comunidad Quechua de Ollague	Río Loa	Río Casicsa?	1	l/s			

(Continuación Tabla 3.4)
Derechos de aguas superficiales en cuenca del río Loa
(Solicitados hasta Enero de 2000)
(Fuente: DGA, 2003)

54	Comunidad Quechua de Ollague	Río Loa	Río Casicsa?	1	l/s			
55	Comunidad Quechua de Ollague	Río Loa	Río Blanco	1	l/s			
56	Comunidad Atacameña de Conchi Viejo	Vertiente Conchi Viejo	Conchi Viejo, Loa Alto	0,3	l/s	13,3	Riego	Permanente
San Pedro								
58	Codelco Chile	Río S.P., Inacaliri	Río San Pedro de Inacaliri	87,5	l/s			
59	Codelco Chile	Río S.P., Inacaliri	Río San Pedro de Inacaliri	450	l/s		Minería	Eventual
61	Codelco Chile	Río S.P., Inacaliri	Río Siloli	41	l/s			
62	Codelco Chile	Río S.P., Inacaliri	Río Inacaliri	31,5	l/s			
63	Codelco Chile	Río S.P., Inacaliri	Río Inacaliri	87,5	l/s			
64	Codelco Chile	Río S.P., Inacaliri	Río Colana	50	l/s	747,5	Minería	Permanente
60	F.C.A.B (Ferrocarri Antofagasta Bolivia)	Río S.P., Inacaliri	Río Siloli	121	l/s	121	Industria	Permanente
65	Matías Villada? Palacios	Río S.P., Inacaliri	Río Cabana	10	l/s	10	Riego?	Permanente
Río Loa entre San Pedro y Salado								
3	C. de A. Canal Quichiri de Lasana	Río Loa	Lasana	137332	m3/año			
4	C. de A. Canal Quichira de Lasana	Río Loa	Lasana	62550	m3/año			
5	C. de A. Buen Retiro de Lasana	Río Loa	Lasana	326928	m3/año			
6	C. de A. San Antonio de Lasana	Río Loa	Lasana	65052	m3/año			
7	C. de A. Los Ramirez de Lasana	Río Loa	Lasana	127324	m3/año			
8	C. de A. Pona de Lasana	Río Loa	Lasana	613824	m3/año			
9	C. de A. Los Perales de Lasana	Río Loa	Lasana	177086	m3/año			
10	C. de A. Canal Grande de Lasana y Chiu Chiu	Río Loa	Lasana y Chiu Chiu	822602	m3/año			
11	C. de A. Canal La Banda de Lasana y Chiu Chiu	Río Loa	Lasana y Chiu Chiu	1384718	m3/año			
12	C. de A. Canal La Banda Ramal Los Blancos de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	196824	m3/año			
13	C. de A. Canal El Pueblo de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	442576	m3/año			
14	C. de A. Canal Grande Ramal N°3 Pjar de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	98134	m3/año			
15	C. de A. Canal Grande Ramal N°4 Pulcare de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	575738	m3/año			
16	C. de A. Canal Grande Ramal N°6 San Andrés de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	168190	m3/año			
17	C. de A. Canal Grande Ramal Callejón de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	131772	m3/año			
18	C. de A. Canal Grande Ramal Triángulo de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	204608	m3/año			
19	C. de A. Canal Grande Ramal San Juan de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	275220	m3/año			
20	C. de A. Canal El Calvario de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	15012	m3/año			

(Continuación Tabla 3.4)
Derechos de aguas superficiales en cuenca del río Loa
(Solicitados hasta Enero de 2000)
(Fuente: DGA, 2003)

21	C. de A. Canal El Pueblo Ramal El Cochala de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	12788	m3/año			
22	C. de A. Canal El Pueblo Ramal San Ramón de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	193210	m3/año			
23	C. de A. Canal El Pueblo Ramal la Parroquia de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	25854	m3/año			
24	C. de A. Canal El Pueblo Ramal Santa Faustina de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	58936	m3/año			
25	C. de A. Canal El Pueblo Ramal El Pongo de Chiu Chiu	Río Loa	Chiu Chiu	285784	m3/año	203,009	Riego	Permanente
Río Salado								
66	Regantes Pueblo de Caspana	Río Salado	Río Caspana	65	l/s			
74	Comunidad Atacameña de Cupo	Río Salado	Quebarada de Cupo	17	l/s			
75	Comunidades Atacameñas de Cupo y Ayquina Turi	Río Salado	Quebarada y Socavón P.	3,9	l/s			
76	Comunidad Atacameña de Cupo y Ayquina Turi	Río Salado	Vertientes	45,7	l/s	131,6	Riego	Permanente
67	ESSAN S.A.	Río Salado	Río Caspana	0,9	l/s			
69	ESSAN S.A.	Río Salado	Río Toconce	470	l/s			
70	ESSAN S.A.	Río Salado	Río Toconce	50	l/s			
72	ESSAN S.A.	Río Salado	Río Hojalar	140	l/s			
77	Soc. Colectiva Civil Adm. de Aguas de Turi	Río Salado	Vertiente Turi	100	l/s	760,9	Agua Potable	Permanente
73	Codelco Chile	Río Salado	Río Salado	400	l/s			
68	Codelco Chile	Río Salado	Río Toconce	50	l/s			
71	Codelco Chile	Río Salado	Río Hojalar	140	l/s	590	Minería	Permanente

A modo de resumen, se expone en la Tabla 3.5 los derechos totales otorgados, y divididos según el tipo de uso. Además, en la Tabla 3.6 se agrega los porcentajes de uso de para cada uno de estos.

Tabla 3.5 Tabla resumen Derechos de aguas cuenca alta del río Loa

TOTAL DERECHOS		
Total derechos (consuntivos)	3893,92	l/s
Derechos eventuales	450	l/s
Total derechos consuntivos permanentes	3443,92	
TOTAL DERECHOS POR USO		
Total derechos Agua Potable (consuntivos)	1610,9	l/s
Total derechos Riego (consuntivos)	357,91	l/s
Total derechos Industria/Minería (consuntivos)	16,61	l/s
Total derechos Industria (consuntivos)	121	l/s
Total derechos Minería (consuntivos)	1787,5	l/s
Derechos eventuales Minería	450	l/s
Total derechos Consuntivos Permanentes, Minería	1337,5	l/s

Tabla 3.6
Porcentaje de derechos de caudales por uso

TIPO DE USO	% derechos permanentes	% derechos totales
Agua Potable	46,8	41,4
Riego	10,4	9,2
Industria/Minería	0,5	0,4
Industria	3,5	3,1
Minería	38,8	45,9

Factor de uso de los derechos otorgados

Para la obtención de caudal en régimen natural, se emplean las demandas que se encuentran aguas arriba del punto de salida de la cuenca. Se debe considerar que en muchos casos el caudal extraído es menor al derecho otorgado al usuario. Ante este hecho es necesario conocer o estimar el factor de uso de los derechos otorgados, de manera de obtener un valor de caudal extraído lo más cercano a la realidad posible.

Además los derechos presentados en la Tabla 3.4 y en la Tabla 3.5 corresponden a derechos anuales. Como es necesario conocer estos valores a nivel mensual, se supone que la demanda es constante para los diferentes meses del año, a menos que se tenga alguna información que indique una distribución diferente en el otorgamiento y/o factor de uso para los diferentes meses del año.

En el estudio DGA, 2003, se realiza una estimación de los factores de uso para los diferentes tipos de usuarios. La información otorgada en esta referencia se expone en los siguientes párrafos.

En el caso de riego, el factor de uso se calcula en función de las hectáreas efectivamente regadas, las cuales corresponden a áreas de regadío ancestrales, que se estima, no han variado mayormente en el tiempo. El valor estimado es de 16.000 m³/ha/año, equivalente a 0,5 l/s/ha. En los sectores en que no se conoce las hectáreas regadas, se supone que el derecho otorgado se destina completamente a riego. En el estudio se presenta una tabla que contiene un resumen de las hectáreas regadas y usos efectivos para cada subcuenca, información que es presentada en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Áreas regadas y uso efectivo en riego

Sector	Hectáreas regadas	Uso efectivo l/s
Loa Alto		13,3
Cuenca río San Pedro		10
Lasana-ChiuChiu	230,3	116,8
Cuenca río Salado	50	25,4
Calama	1103	559,6
Loa-San Salvador		100
Quillagua	120	60
Quebrada Amarga		

(DGA, 2003)

Para el consumo de agua potable se considera un factor de uso equivalente a 0,66. Este valor es calculado a partir de valores inscritos en la Junta de Vigilancia respectiva, valores correspondientes a 1611 l/s (muy similar al valor de producción en fechas cercanas a la realización del estudio, igual a 1619 l/s) y 1055,8 l/s para la demanda efectiva. La fuente de información de estos valores corresponde a ESSAN S.A., Empresa de Servicios Sanitarios de Antofagasta, según lo especificado en la referencia DGA, 2003.

En el caso de la minería, se menciona el uso de datos sobre extracciones reales en cada uno de los derechos en que se pueda acceder a esta información. En caso de no poder hacerlo, se considera un factor de uso de 0,75, factor usualmente empleado para usos mineros. Debido a que para la realización del presente estudio no se conocen esos valores, se emplea el factor de uso igual a 0,75.

Conocido lo anterior, se puede notar que existe una gran cantidad de extracciones presentes en la cuenca, y que además, el grado de incertidumbre que presentarían los valores de extracciones de caudales sería muy alto, debido a que los respectivos factores de usos con los cuales se obtienen los valores de extracción, a partir de los caudales otorgados, son muy aproximados. Debido a esto, se decide escoger una subcuenca de trabajo, perteneciente a la cuenca de interés, que presente la menor cantidad de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales.

3.6. Selección de series de precipitaciones y caudales para la modelación y definición de la cuenca de estudio

Conocida la información fluviométrica y pluviométrica disponible, y el derechos de aprovechamientos de recursos hídricos otorgados en la cuenca, se seleccionan las series pertenecientes a las estaciones Río Loa antes represa Lequena, la cual define la subcuenca de estudio y la estación Lequena para el caso de las precipitaciones. Se trabaja con esta subcuenca, debido a que es la que presenta un grado de intervención menor dentro de una cuenca muy intervenida, lo cual genera la necesidad de realizar correcciones a fin de poder trabajar en régimen natural. Con esto, se evita generar corrección a los datos, aumentando la incertidumbre de su valor.

Las series seleccionadas son presentadas en el Gráfico 3.3 y en la Tabla 3.8 y la Tabla 3.9.

Gráfico 3.3 Q medio mensual estación Río Loa antes represa Lequena y pp medias mensuales estación Lequena

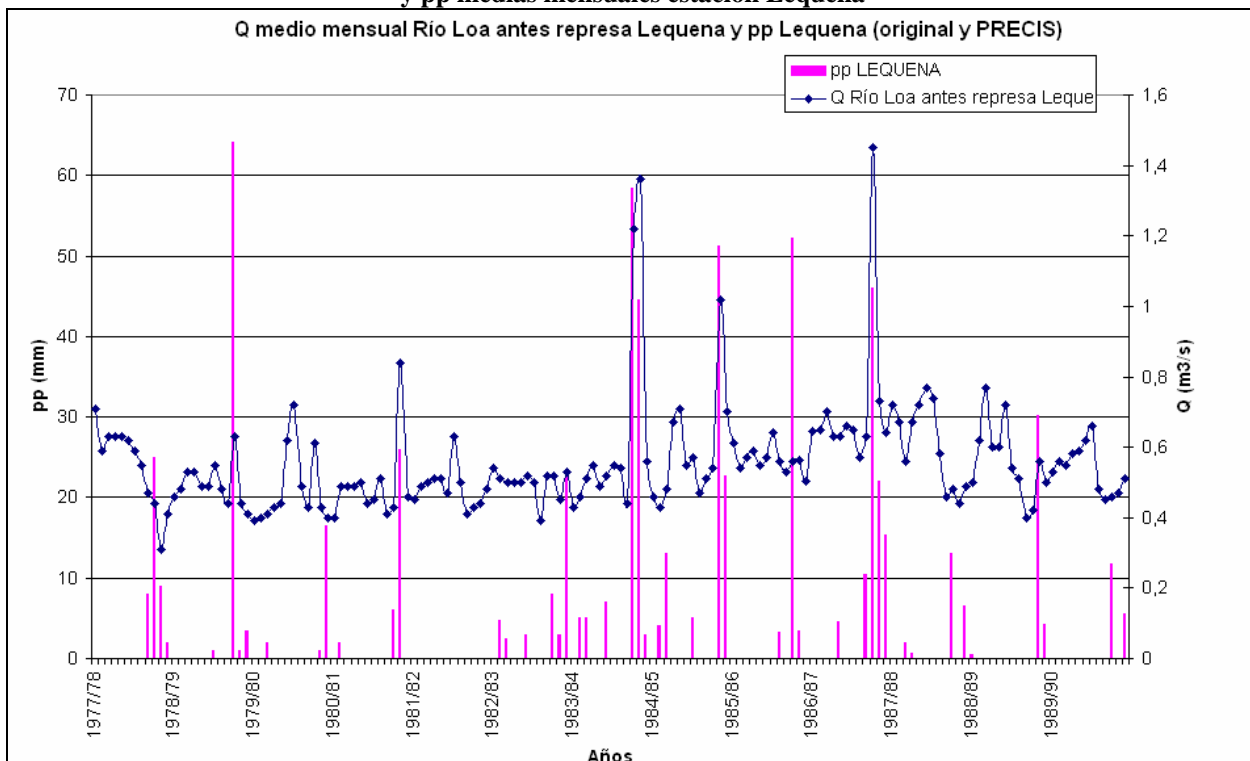


Tabla 3.8 Serie de precipitaciones estación Lequena

AÑOS	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
1977/78	0	0	0	0	0	0	0	0	8	25	9	2	44
1978/79	0	0	0	0	0	0	1	0	0	64,1	1	3,5	69,6
1979/80	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	16,5	19,5
1980/81	0	2	0	0	0	0	0	0	0	6	25,9	0	33,9
1981/82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1982/83	0	4,8	2,4	0	0	3	0	0	0	8	3	23	44,2
1983/84	0	5	5	0	0	7	0	0	0	58,4	44,5	3	122,9
1984/85	0	4	13,1	0	0	0	5	0	0	0	51,3	22,6	96
1985/86	0	0	0	0	0	0	0	3,2	0	52,2	3,5	0	58,9
1986/87	0	0	0	0	4,5	0	0	0	10,5	46	22	15,3	98,3
1987/88	0	0	2	0,7	0	0	0	0	0	13	0	6,5	22,2
1988/89	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,2	4,3	35
1989/90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,7	0	5,5	17,2

(DGA)

Tabla 3.9 Serie de caudales estación Río Loa antes represa Lequena

AÑO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
1975/76	0,59	0,55	0,57	0,57	0,54	0,48	0,48	0,48	0,46	0,44	0,57	0,51	0,52
1976/77	0,4	0,42	0,57	0,58	0,56	0,51	0,52	0,61	0,46	0,5	1,57	1,72	0,70
1977/78	0,71	0,59	0,63	0,63	0,63	0,62	0,59	0,55	0,47	0,44	0,31	0,41	0,55
1978/79	0,46	0,48	0,53	0,53	0,49	0,49	0,55	0,48	0,44	0,63	0,44	0,41	0,49
1979/80	0,39	0,4	0,41	0,43	0,44	0,62	0,72	0,49	0,43	0,61	0,43	0,4	0,48
1980/81	0,4	0,49	0,49	0,49	0,5	0,44	0,45	0,51	0,41	0,43	0,84	0,46	0,49
1981/82	0,45	0,49	0,5	0,51	0,51	0,47	0,63	0,5	0,41	0,43	0,44	0,48	0,49
1982/83	0,54	0,51	0,5	0,5	0,5	0,52	0,5	0,39	0,52	0,52	0,45	0,53	0,50
1983/84	0,43	0,46	0,51	0,55	0,49	0,52	0,55	0,54	0,44	1,22	1,36	0,56	0,64
1984/85	0,46	0,43	0,48	0,67	0,71	0,55	0,57	0,47	0,51	0,54	1,02	0,7	0,59
1985/86	0,61	0,54	0,57	0,59	0,55	0,57	0,64	0,56	0,53	0,56	0,56	0,50	0,57
1986/87	0,64	0,65	0,7	0,63	0,63	0,66	0,65	0,57	0,63	1,45	0,73	0,64	0,72
1987/88	0,72	0,67	0,56	0,67	0,72	0,77	0,74	0,58	0,46	0,48	0,44	0,49	0,61
1988/89	0,5	0,62	0,77	0,6	0,6	0,72	0,54	0,51	0,4	0,42	0,56	0,5	0,56
1989/90	0,53	0,56	0,55	0,58	0,59	0,62	0,66	0,48	0,45	0,46	0,47	0,51	0,54
1990/91	0,58	0,61	0,69	0,57	0,61	0,62	0,6	0,5	0,55	0,53	0,48	0,56	0,58
1991/92	0,54	0,62	0,6	0,64	0,61	0,8	0,56	0,57	0,5	0,48	0,47	0,48	0,57
1992/93	0,51	0,54	0,63	0,72	0,64	0,64	0,79	0,55	0,48	0,76	0,47	0,57	0,61
1993/94	0,54	0,55	0,53	0,57	0,6	0,71	0,94	0,63	0,67	0,56	0,5	0,51	0,61
1994/95	0,51	0,52	0,55	0,56	0,58	0,6	0,52	0,49	0,47	0,6	0,46	0,48	0,53
1995/96	0,5	0,54	0,52	0,52	0,54	0,71	0,92	0,58	0,51	0,52	0,54	0,54	0,58
1996/97	0,53	0,53	0,56	0,61	0,65	0,64	0,52	0,46	0,44	0,53	0,86	0,69	0,59
1997/98	0,7	0,74	0,74	0,68	0,7	0,84	0,55	0,52	0,46	0,73	0,49	0,44	0,63
1998/99	0,47	0,48	0,52	0,53	0,54	0,63	0,62	0,45	0,45	0,45	1,33	0,9	0,61
1999/00	0,64	0,69	0,59	0,54	0,54	0,52	0,53	0,62	0,51	1,91	0,65	0,78	0,71
2000/01	0,7	0,72	0,75	0,62	0,63	0,63	0,84	0,72	0,56	0,71	3,89	1,09	0,99
2001/02	0,33	0,34	0,35	0,39	0,37	0,35	0,33	0,31	0,32	0,31	0,22	0,25	0,32
2002/03	0,44	0,53	0,51	0,59	0,57	0,59	0,55	0,54	0,46	0,44	0,47	0,51	0,52
2003/04	0,53	0,54	0,57	0,59	0,56	0,54	0,57	0,52	0,49	0,5	1,06	0,47	0,58
2004/05	0,49	0,58	0,6	0,55	0,53	0,52	0,5	0,42	0,42	0,83	0,56	0,54	0,55
2005/06	0,5	0,5	0,57	0,59	0,58	0,55	0,5	0,49	0,5	0,62	1,28	0,55	0,60
2006/07	0,52	0,52	0,5	0,55	0,54	0,52	0,49	0,48	0,45	0,49	0,57	0,49	0,51
2007/08	0,5	0,49	0,52	0,52	0,51	0,49	0,49	0,48	0,47	0,69	0,39	0,39	0,50

(DGA)

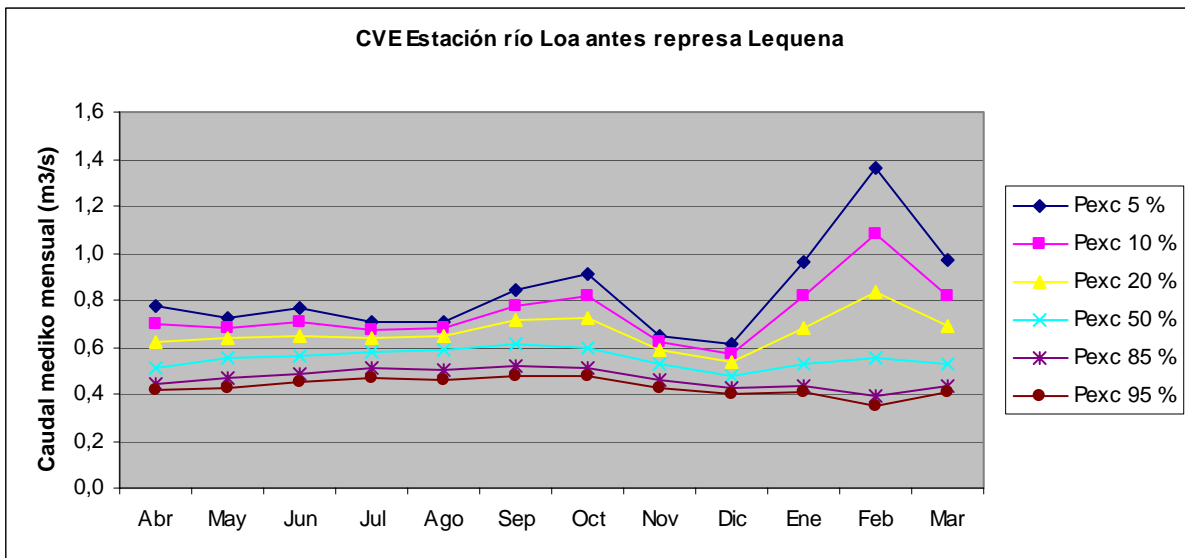
En relación a la cuenca seleccionada, en Cade-idepe (2004) se presentan algunos antecedentes relativos a la curva de variación estacional para la serie de caudales. Los valores de esta curva son presentados en la Tabla 3.10 y son representadas en el Gráfico 3.4.

Tabla 3.10 Prob. Exc. Caudales medios mensuales (m³/s) Estación río Loa antes represa Lequena

Pexc (%)	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
5	0,778	0,723	0,762	0,704	0,706	0,843	0,910	0,649	0,610	0,964	1,360	0,971
10	0,696	0,682	0,707	0,674	0,679	0,778	0,814	0,620	0,573	0,814	1,078	0,820
20	0,618	0,635	0,649	0,639	0,646	0,711	0,722	0,586	0,534	0,681	0,833	0,686
50	0,514	0,555	0,562	0,577	0,583	0,609	0,600	0,526	0,476	0,526	0,554	0,528
85	0,440	0,470	0,485	0,509	0,506	0,519	0,512	0,460	0,424	0,434	0,395	0,435
95	0,413	0,426	0,450	0,472	0,460	0,477	0,480	0,426	0,401	0,406	0,349	0,406
Dist	L3	L2	G	L2	N	G	L3	L2	G	L3	L3	L3

(Cade-idepe, 2004)

Gráfico 3.4 Curvas de Variación Estacional de Estación río Loa antes represa Lequena



(Cade-idepe, 2004)

La estación fluviométrica río Loa antes represa Lequena se ubica a 3020 m.s.n.m, 1 km. aguas arriba de la represa Lequena (Cade-idepe, 2004).

En la referencia Cade-idepe (2004) se comenta en relación a los caudales y sus respectivas probabilidades de excedencia, presentados en el Gráfico 3.4 y a la Tabla 3.10. Se menciona que para años húmedos los máximos caudales se presentan entre enero y marzo, producto de las precipitaciones del invierno Altiplánico, presentándose los máximos caudales en el mes de febrero, notando además que los meses anteriores a ese periodo (noviembre y diciembre), presentan caudales bajos. Se puede notar además que para estos mismos años (años húmedos) existe un aumento de precipitaciones en los meses Sep – Octubre, las cuales pueden deberse principalmente a precipitaciones de invierno.

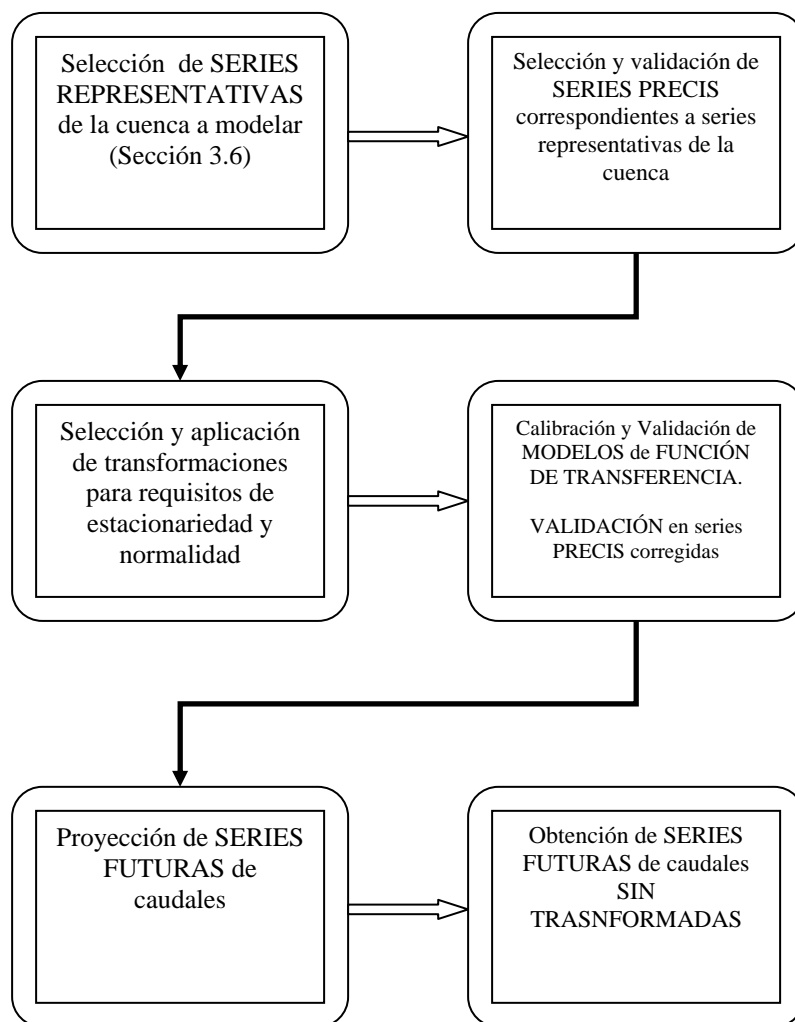
En relación a los años secos, se menciona que los caudales permanecen relativamente constantes, presentando una disminución en los meses entre enero y marzo, precisamente en los meses que en los años húmedos estos valores son máximos. Se atribuye esta disminución a la ausencia de precipitaciones estivales en años secos.

Debe notarse además que en los meses de septiembre y octubre se produce un leve aumento de los caudales en los años húmedos, justo antes de presentarse una disminución en los meses de noviembre y diciembre, y que posteriormente aumenta sus valores en los meses de precipitaciones estivales (enero a marzo).

4. Metodología

Este capítulo explicita los pasos necesarios para realizar la modelación y posterior proyección de series de caudales futuros. Estas etapas se resumen en la Figura 4.1.

Figura 4.1 Etapas de modelación de caudales futuros PRECIS a mediante de Función de Transferencia



4.1. Selección y validación de series de precipitaciones PRECIS

Consiste en la selección de la serie de precipitaciones PRECIS que sea representativa de la serie de precipitaciones observadas y seleccionada para la modelación, las cuales se encuentran presentadas en la sección 3.6. El criterio de selección de las series PRECIS se basa en la ubicación planimétrica de la estación de precipitaciones observadas, y de los nodos de la grilla del modelo PRECIS que presenten

información de precipitaciones, escogiendo el nodo más cercano a la estación. En caso que se considere más de un nodo como el más cercano a la estación de precipitaciones, se elige el mejor entre ellos a través de la comparación de las series de precipitaciones PRECIS y observadas.

La validación consiste en la comparación de las series observadas y las series PRECIS, mediante gráficos, estadísticos y correlaciones. En caso de detectar diferencias entre ambas, se debe generar funciones de corrección con las cuales obtener series de precipitaciones PRECIS corregidas, que sean estadísticamente representativas de las series observadas. Estas funciones de corrección deben definirse de manera que puedan ser aplicadas en las series PRECIS de periodo futuro, debido a lo cual, la variable independiente de dichas funciones deben ser las series PRECIS.

4.2. Selección y aplicación de transformaciones para aseguramiento de Estacionariedad y Normalidad

La estacionariedad y el ajuste a una distribución de probabilidades normal (normalidad) por parte de las series con las que se trabaja en los modelos de función de transferencia, son requisitos importantes para el cumplimiento de los supuestos teóricos empleados en la etapa de identificación de estos modelos. Específicamente, en la etapa de obtención de la función impulso – respuesta seguida por las series correspondientes, a partir de su función de correlación cruzada. Es muy probable que estos requisitos no sean cumplidos por las series, más aún, si ellas presentan muchos valores nulos, como ocurre con las series de precipitación mensual de la cuenca alta del río Loa.

Considerando el ejemplo antes mencionado, para el caso de las series de precipitaciones y caudales de la cuenca de estudio, es necesario considerar el uso de funciones de transformación de las series originales en series transformadas que sí cumplan estos requisitos. Se debe tener en cuenta además, que en caso de ser necesario, se puede llegar aplicar más de una corrección sobre las series mediante una secuencia de transformadas. En relación a estas funciones de corrección existen funciones ya estudiadas y recomendadas en la bibliografía, las cuales se exponen a continuación.

4.2.1 Obtención de serie normalizada

Existen varias funciones con las cuales es posible obtener series transformadas con mejor ajuste a una distribución normal. Las funciones más comunes corresponden a las siguientes:

$$\sqrt{(x+c)}, \quad 1/(x+c), \quad \ln(x+c), \quad x^2, \quad \arcsen \sqrt{x},$$

y la transformada de Box- Cox que presenta la siguiente forma $\frac{(x+c)^\lambda - 1}{\lambda}$.

El tipo de corrección que se obtiene con cada una de estas funciones se expone en mayor detalle en la referencia bibliográfica Molinero, 2003. Algunas de sus características se exponen a continuación.

Para series con distribución asimétrica donde los datos se concentran a la izquierda del histograma que las representa, las funciones $\sqrt{(x+c)}$, $1/(x+c)$, $\ln(x+c)$ corrigen la asimetría de la distribución. Esto se produce al concentrar los valores altos y expandir los valores bajos. Ordenando en forma creciente la efectividad de estas funciones en cuanto a la comprensión de valores altos y expansión de valores bajos, se tiene que la función $\sqrt{(x+c)}$ es la menos efectiva, seguida por la función $\ln(x+c)$ y finalmente la función $1/(x+c)$ logra variaciones mayores.

En caso que la asimetría se origine por concentraciones en los valores altos, es decir, asimetría negativa, la función x^2 corrige la asimetría expandiendo los valores altos y concentrando los valores bajos.

La función $\arcsen \sqrt{x}$ corrige series cuyos datos son proporciones o porcentajes de una distribución binomial.

Molinero (2003) menciona que en general, para series hidrológicas, se obtienen buenos resultados con la función logaritmo natural ($\ln(x)$).

Mayores detalles de estas exigencias y transformaciones se encontrar en lo expuesto por Salas (1983), Naim (1989), Sandoval (1988) y Juan Fernández (2006).

4.2.2 Obtención de estacionariedad

Las transformaciones necesarias para lograr que una serie sea estacionaria son aquellas orientadas a eliminar los comportamientos no homogéneos que ésta pueda presentar, de manera que los estadísticos puedan considerarse constantes para toda la serie. Esto, significa eliminar cambios en la magnitud o en la tendencia de las series.

En general, las variaciones incrementales de las variables, obtenidas mediante la diferenciación de sus series originales, remueven estos cambios en 1 o 2 pasos. Estas diferenciaciones están representadas por la Ecuación 2.6 y la Ecuación 2.7. En una primera diferenciación la serie resultante es independiente

de la magnitud del proceso, y en una segunda diferenciación se obtiene independencia en la magnitud y la tendencia del proceso. (Salas, 1983)

Por otro lado, pueden existir correlaciones o tendencias en la serie que se repiten en forma cíclica. Este es el caso de una tendencia estacional, la cual esta presente en series periódicas. Por tanto, se considera como serie periódica aquella en que la media, la varianza y/o el coeficiente de asimetría presentan un comportamiento periódico, además de una estructura de correlación que puede ser constante o periódica, o ambas. Este es el caso de las series diarias, semanales, estacionales y mensuales. (Salas et al., 1980). En hidrología esta tendencia generalmente presenta un ciclo anual. Para el caso particular de las series mensuales este ciclo es de 12 meses.

La tendencia estacional se puede remover mediante diferenciaciones, estandarizaciones o transformaciones en que se consideren parámetros diferentes para cada componente del ciclo. Es decir, se aplica una transformada, la cual presenta variaciones para cada etapa del ciclo. En el caso del presente trabajo, para cada uno de los 12 meses.

4.2.3 Verificación del cumplimiento de los requisitos

A modo de resumen, en el siguiente listado se menciona las diferentes maneras de verificar el cumplimiento de los requisitos de las series, algunas de las cuales se emplean en el presente estudio.

Verificación de estacionariedad:

- Revisión de la función de autocorrelación (ACF) de la serie. Si sus valores convergen rápidamente a cero, antes de desfase $N/4$, se considera estacionaria. (N es el largo de la serie). En caso contrario, debe seguir corrigiendo los problemas de no estacionariedad.

En forma adicional, se puede detectar el cumplimiento de estacionariedad mediante:

- Revisión de la gráfica de la serie.
- Calculo de media y varianza para diferentes secciones de la serie.

Verificación de normalidad:

- Comparación de distribución normal esperada para los estadísticos media y varianza de la serie, y un histograma de la misma. Este paso es uno de los resultados que se puede obtener mediante el software Statistica 7. Este método de verificación es principalmente gráfico.
- Aplicación de un test de bondad de ajuste.

4.3. Identificación y calibración de modelos de función de transferencia

Para esta etapa se trabaja con las series observadas de precipitaciones y caudales seleccionadas, en un periodo de tiempo común entre estas series, y al periodo de línea de base (BL) de las series de precipitaciones PRECIS. Además, se contempla que el periodo común tenga años hidrológicos completos (de abril a marzo). Una vez conocido el periodo total disponible para calibración y validación, las series se dividen en dos periodos diferentes en una proporción de 2/3 y 1/3 respectivamente.

Esta etapa contempla la determinación de los valores b , r , s y los parámetros δ_i y ω_j que definen la parte determinística del modelo de función de transferencia que se quiere modelar, además de la determinación de los valores p y q , y los respectivos parámetros ϕ_i y θ_j que definen el modelo ARMA seguido por la serie de ruido de dicho modelo de función de transferencia.

Lo expuesto en el párrafo anterior se lleva cabo realizando una serie de etapas, las que contemplan la definición de la función impulso – respuesta representativa de la serie, la calibración de los parámetros del modelo, tanto en su parte determinística como en la componente de ruido η_t , y una simulación realizada con el modelo obtenido para ser comparada con la serie de caudales observada transformada.

4.3.1 Identificación de función impulso - respuesta

Para poder obtener la función impulso – respuesta que representa las series de entrada y salida del modelo de FT que se quiere identificar, mediante su función de correlaciones cruzadas y según lo descrito por Juan Fernandez (2006), es necesario que estas series cumplan requisitos de estacionariedad y normalidad.

Además, ambas variables deben tener media igual a cero, y la variable de entrada debe ser una serie de ruido blanco. Debido a que es poco probable que la variable de entrada sea un ruido blanco, entonces se exige que esta serie siga un modelo ARMA cuya serie residual α_t sea una serie de ruido blanco, y así poder trabajar con esta serie residual. Según Juan Fernandez (2006), el modelo de función de transferencia que relaciona las series de entrada y salida, es el mismo modelo que relaciona la serie de ruido α_t de la variable de entrada y el residuo β_t de la variable de salida, al aplicar la inversa del modelo ARMA seguido por la serie de entrada. De esta forma, si la variable de entrada sigue un modelo ARMA

cuyo residuo α_t es una serie de ruido blanco, basta con obtener la serie β_t correspondiente y a partir de estas series generar la función impulso – respuesta representativa de ellas y de las variables originales.

Considerando que las series cumplen con los requisitos antes mencionados (estacionariedad, normalidad y que la serie de entrada o α_t correspondan a un ruido blanco, y los valores de las series son igual a cero), entonces se puede establecer la relación entre los ponderadores de la función impulso - respuesta y los valores de la función de correlación cruzada entre β_t y α_t según la Ecuación 4.1. (Juan Fernández, 2006).

$$\rho_{yx}(k) = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot v_k$$

Ecuación 4.1

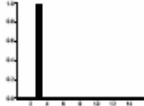
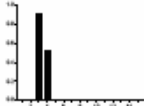

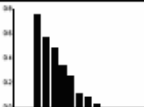
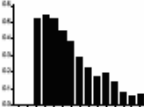
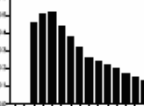

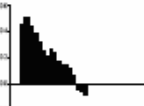
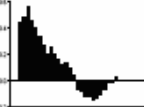
4.3.2 Obtención de parámetros y calibración de modelo de Función de Transferencia - Ruido

Una vez conocido la función impulso – respuesta, definida por los parámetros v_k , se conoce inmediatamente el valor del desfase, b , del modelo de Función de Transferencia que se quiere identificar, el cual queda definido para $b = k$ tal que, $v_k \neq 0$ y $v_i = 0 \forall i < k$.

Posteriormente, se debe estimar posibles combinaciones de valores de r y s , correspondientes al número de parámetros autorregresivos y de variable externa significativos que puede tener el modelo. Para esto, se puede usar como guía el ejemplo presentado en la Figura 4.2, en la cual se tiene un desfase $b = 3$.

Una vez seleccionadas las posibles combinaciones de valores para r y s del modelo a identificar, se puede obtener los valores óptimos de los parámetros δ_i y ω_j para $i = 1, \dots, r$, y $j = 1, \dots, s$ de los modelos definidos para cada una de estas combinaciones mediante el programa computacional FTXZ. La ecuación del modelo de función de transferencia de dicho programa incluye la función Perlog (Ecuación 2.31), la cual corrige los efectos no – lineales que no son considerados en el modelo determinístico de su definición original, según la Ecuación 2.30. Luego, conocidos los parámetros de la parte determinística del modelo, se puede calcular la serie de ruido η_t (Ecuación 2.26), y estimar el modelo ARMA seguido por ésta. Con este último cálculo, se conoce la forma y los parámetros del modelo de función de transferencia – ruido, en forma completa.

Figura 4.2 Ejemplos de Función Impulso – Respuesta para diferentes combinaciones de r y s

(b, r, s)	Función de Transferencia	Ponderaciones de respuesta al impulso
$r = 0$		
$(3, 0, 0)$	$v(B)x_t = \omega_0 x_{t-3}$	
$(3, 0, 1)$	$v(B)x_t = (\omega_0 - \omega_1 B)x_{t-3}$	
$(3, 0, 2)$	$v(B)x_t = (\omega_0 - \omega_1 B - \omega_2 B^2)x_{t-3}$	
$r = 1$		
$(3, 1, 0)$	$v(B)x_t = \frac{\omega_0}{(1-\delta_1 B)} x_{t-3}$	
$(3, 1, 1)$	$v(B)x_t = \frac{(\omega_0 - \omega_1 B)}{(1-\delta_1 B)} x_{t-3}$	
$(3, 1, 2)$ <td $v(B)x_t = \frac{(\omega_0 - \omega_1 B - \omega_2 B^2)}{(1-\delta_1 B)} x_{t-3}$		
$r = 2$		
$(3, 2, 0)$	$v(B)x_t = \frac{\omega_0}{(1-\delta_1 B - \delta_2 B^2)} x_{t-3}$	
$(3, 2, 1)$	$v(B)x_t = \frac{(\omega_0 - \omega_1 B)}{(1-\delta_1 B - \delta_2 B^2)} x_{t-3}$	
$(3, 2, 2)$	$v(B)x_t = \frac{(\omega_0 - \omega_1 B - \omega_2 B^2)}{(1-\delta_1 B - \delta_2 B^2)} x_{t-3}$	

(Juan Fernández, 2006)

Debido a que la estimación de los parámetros óptimos de los modelos de función de transferencia es realizada mediante el programa computacional FTXZ (ver sección 2.2.2), la calibración propiamente tal ya fue llevada a cabo en ese proceso. Sin embargo, es necesario validar el modelo mediante la simulación de una serie, la cual es generada a partir del modelo obtenido en el periodo de calibración, y luego es comparada con la serie de salida observada. La metodología para obtener la serie simulada es la misma empleada para la etapa de validación del modelo, y que se encuentra definida en el subcapítulo 4.4.

4.4. Validación de modelo de Función de Transferencia - Ruido

Esta etapa corresponde a la validación del modelo de función de transferencia obtenido en la etapa de identificación, según la definición teórica basada en lo expuesto por Naim (1989), donde se encuentra definida como simulación.

En esta referencia, se menciona que el principal objetivo de esta etapa es analizar el comportamiento del modelo seleccionado ante estímulos reales. Es decir, las variables de entrada al modelo para la validación corresponden a valores observados. Considerando la Ecuación 2.28, las variables de entrada $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-r}, x_{t-b}, x_{t-1-b}, \dots, x_{t-s-b}$, corresponden a valores observados.

Como no se conoce el valor a_t , y no se puede cuantificar a priori, se modifica la Ecuación 2.28 de manera que inicialmente se suponga a_t igual al valor de su media (cero). Luego, en forma posterior, se calcula el valor de a_t . La modificación realizada a dicha ecuación tiene relación con el supuesto inicial del valor de a_t , y se describe a continuación.

Se tiene la ecuación Ecuación 2.28 escrita de la siguiente forma:

$$Y_t = \delta_1 \cdot Y_{t-1} + \dots + \delta_r \cdot Y_{t-r} + \omega_0 \cdot X_{t-b} + \dots + \omega_s \cdot X_{t-b-s} + \phi_1 N_{t-1} \dots + \phi_p N_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} \dots - \theta_q a_{t-q}$$

Ecuación 4.2

Donde, reescribiendo y desarrollando la Ecuación 2.27, se tiene la Ecuación 4.3.

$$N_t = \phi_1 N_{t-1} \dots + \phi_p N_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} \dots - \theta_q a_{t-q}$$

Ecuación 4.3

Suponiendo que el valor de entrada a_t es igual a cero, se definen las siguientes modificaciones a la Ecuación 4.2 y la Ecuación 4.3.

$$\tilde{N}_t = \phi_1 N_{t-1} \dots + \phi_p N_{t-p} - \theta_1 a_{t-1} \dots - \theta_q a_{t-q}$$

Ecuación 4.4

$$\tilde{Y}_t = \delta_1 \cdot Y_{t-1} + \dots + \delta_r \cdot Y_{t-r} + \omega_0 \cdot X_{t-b} + \dots + \omega_s \cdot X_{t-b-s} + \tilde{N}_t$$

Ecuación 4.5

Con:

$$N_t = \tilde{N}_t + a_t$$

Ecuación 4.6

$$Y_t = \tilde{Y}_t + a_t$$

Ecuación 4.7

En la Ecuación 4.7 Y_t corresponde al valor de la serie observada, mientras que en la Ecuación 4.6 N_t corresponde a la diferencia entre la serie Y_t observada e Y_t^* (Ecuación 2.2), correspondiente a la serie calculada con la componente determinística del modelo de Función de Transferencia.

Con esta modificación en las ecuaciones, y con $a_t = 0$, se calcula \tilde{N}_t (Ecuación 4.4) e \tilde{Y}_t (Ecuación 4.5). Luego, se obtiene a_t de la Ecuación 4.7 y N_t de la Ecuación 4.6, secuencia que se sigue repitiendo hasta obtener la serie \tilde{Y}_t , considerada como la serie simulada. Respecto a ésta serie se realiza la validación del modelo Función de Transferencia – Ruido, al ser comparada con la serie observada Y_t .

Posteriormente, para verificar la eficiencia del modelo, se calcula el coeficiente de Nash-Sutcliffe dado por la Ecuación 4.8.

$$Coef.Nash - Sutcliffe = 1 - \frac{\sum (y - x)^2}{\sum (x - x_m)^2}$$

Ecuación 4.8

Donde:

y : serie simulada

x : serie observada

x_m : promedio de los valores observados

Los resultados de la eficiencia del modelo, según los valores obtenidos por el coeficiente de Nash-Sutcliffe corresponden a los de la Tabla 4.1.

Tabla 4.1

Resultados de valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe y su significado	
Valor	Significado
Negativo	Malo
Entre 0 y 1	Bueno
1	Perfecto

4.5. Validación de modelos de Función de Transferencia para series PRECIS corregidas

La validación de las series PRECIS corregidas y transformadas se realiza para el periodo de línea de base (BL) de éstas, mediante la generación de una serie simulada de caudales. Esta serie simulada es obtenida a partir del modelo de función de transferencia calibrado y validado en la etapa anterior, siguiendo la metodología descrita en el punto 4.4, y considerando el periodo común entre las series PRECIS y las series históricas de precipitaciones y caudales, equivalente al periodo de calibración y validación realizada con estas últimas series.

Luego, la validación entre la serie de caudales simulada transformada y la serie de caudales observada transformada, se realiza en base comparaciones estadísticas, gráficos y correlaciones para igual probabilidad de excedencia similares a los empleados en la corrección de las series PRECIS (sección 4.1). Cualquier otra comparación que se requiera, debe considerar que las series observadas de precipitación y las series PRECIS no presentan correspondencia cronológica.

4.6. Proyección de series de caudales futuras transformadas

Para esta etapa se realiza una generación aleatoria de la serie de ruido blanco a_t , correspondiente al residuo del modelo ARMA que sigue la serie de ruido η_t . Luego, teniendo como variables de entrada la serie a_t y la serie de precipitaciones PRECIS corregida y transformada, de periodo futuro (A2), se emplea el modelo de función de transferencia validado en la etapa anterior para generar una serie de caudales transformada de periodo futuro.

Antes de obtener la serie de caudales futuros sin transformar, se realizan algunas comparaciones, entre la serie futura transformada y la correspondiente serie de periodo de línea de base transformada, de manera de estimar las diferencias entre ambas, y poder evaluar los resultados obtenidos directamente desde el modelo de función de transferencia. Esto se realiza principalmente mediante la comparación ambas series de caudales sin transformar, con las series de precipitaciones respectivas.

4.7. Obtención de series futuras de caudales sin transformadas

Consiste únicamente en la aplicación de las funciones inversas a las transformadas aplicadas a las series originales de caudales observados. En algunos casos se debe realizar supuestos de valores iniciales, los cuales pueden arrojar series resultantes con estadísticos diferentes, dependiendo del valor inicial dado. Debido a esto, se debe considerar una posible sistematización en la elección de estos valores iniciales, de manera que no sean elegidos forma arbitraria, evitando generar resultados arbitrarios.

5. Resultados

5.1. Selección y Validación de Series de precipitación PRECIS

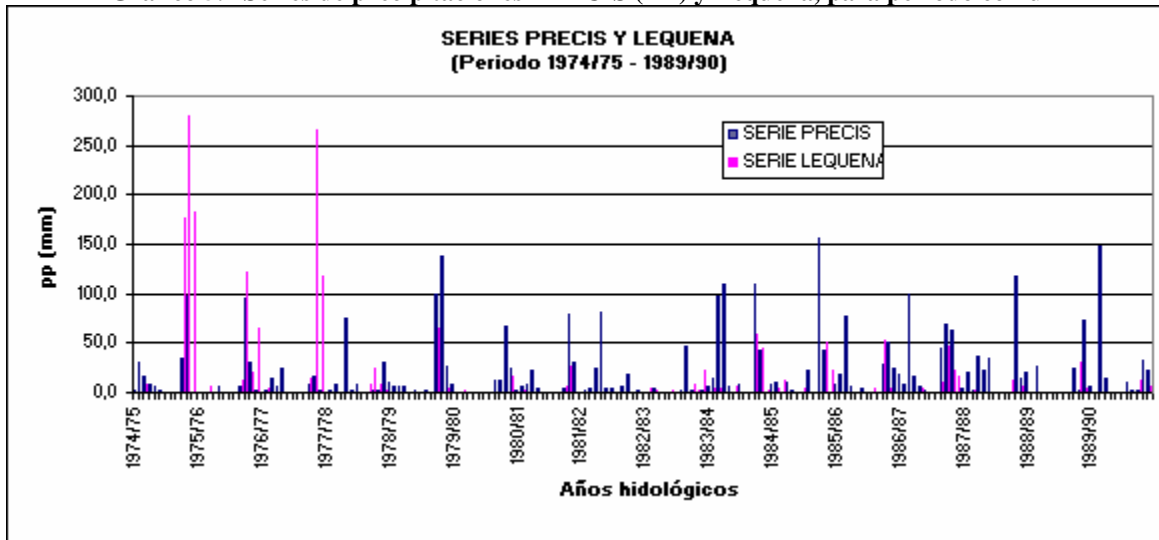
5.1.1 Selección de series PRECIS y comparación con serie de precipitaciones observada

La selección de la serie PRECIS, representativa de la serie de precipitaciones de la estación meteorológica Lequena, se realiza por coincidencia espacial entre nodos de las series PRECIS y la ubicación de dicha estación. La serie escogida se ubica en el nodo de coordenadas geográficas: Latitud 21,75° S y Longitud 68,75° W, mientras que la estación Lequena se ubica en las coordenadas: Latitud 21,65° S y Longitud 68,65° W.

Es importante tener en cuenta que, si la generación de las variables meteorológicas del modelo PRECIS no requiere el empleo de las series históricas correspondientes como información para su generación, se espera que no exista correspondencia cronológica entre las series PRECIS y las correspondientes series históricas a las cuales representan. Sin embargo, sí se espera que se conserven algunas relaciones estadísticas entre ellas, relaciones que podrían perderse o empeorar, debido a la falta de coincidencia de las coordenadas planimétricas de la estación Lequena y del nodo de la serie PRECIS representativa. Ante esta situación, se deben realizar las comparaciones y correcciones necesarias, correspondientes a la etapa de validación.

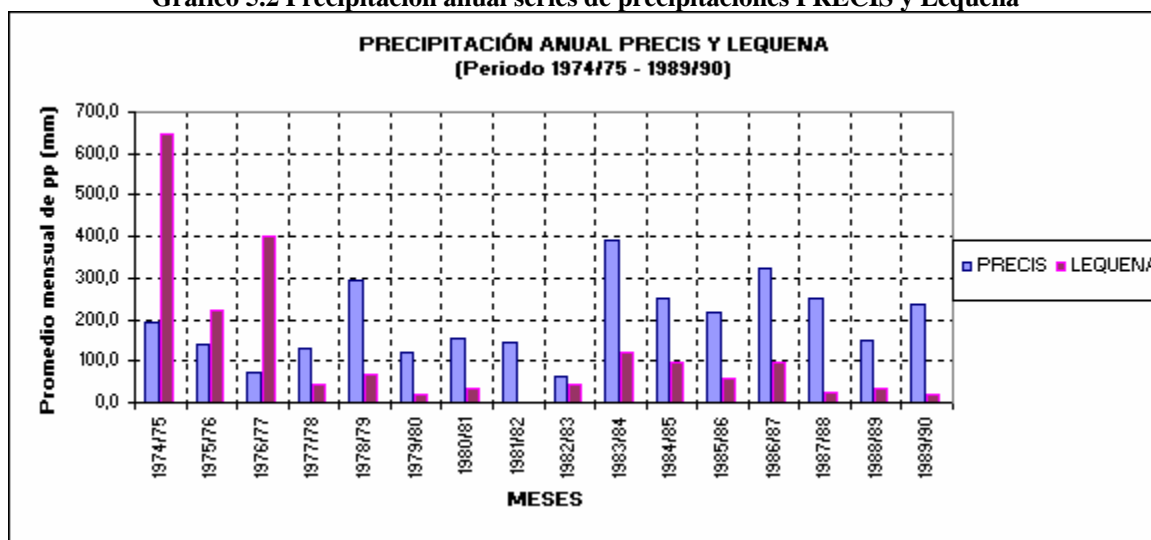
Para llevar a cabo la validación de la serie de precipitaciones PRECIS, seleccionada como representativa de la serie de la estación Lequena, es necesario trabajar en el periodo común de ambas series, el cual se encuentra entre los meses noviembre - 1973 y noviembre 1990, periodo que luego es redefinido para años hidrológicos completos entre los años 1974/75 y 1989/90. Estas series son presentadas en el Anexo Digital 01 y en el Gráfico 5.1.

Gráfico 5.1 Series de precipitaciones PRECIS (BL) y Lequena, para periodo común



En el Gráfico 5.1 se observa que existen dos comportamientos diferentes antes del año hidrológico 1977/78 y después de éste. En la primera parte se observa que, al menos para los valores máximos de cada año hidrológico, las precipitaciones de la serie Lequena presentan valores mayores que los de la serie PRECIS, mientras que en la segunda, la serie PRECIS sobreestima los valores de la serie Lequena. Esta misma diferencia se observa para los valores anuales de precipitación, presentados en el Gráfico 5.2. Se tiene además como información, que según los resultados del estudio DGF (2006) en el sector ubicado entre la franja 17°S – 23°S, sector al cual pertenece la cuenca (Figura 2.5), las precipitaciones proyectadas por PRECIS sobreestiman los valores observados, y que además, para los sectores de altura en general las precipitaciones PRECIS están sobreestimadas. Considerando esta información, y el hecho que, es mayor la cantidad de años en que los valores de la serie PRECIS sobreestiman los valores de las precipitaciones observadas, se descartan de la validación y de las etapas posteriores del estudio los tres primeros años de periodo común (entre 1974/75 hasta 1976/77).

Gráfico 5.2 Precipitación anual series de precipitaciones PRECIS y Lequena



Considerando el nuevo periodo común, para este periodo las series se representan en el Gráfico 5.3, mientras que el Gráfico 5.4 corresponde a un gráfico de dispersión de ellas. Además, en la Tabla 5.1 se presentan los estadísticos de ambas series para el periodo común.

Gráfico 5.3 Series de precipitaciones PRECIS (BL) y Lequena. Periodo 1977/78 – 1989/90

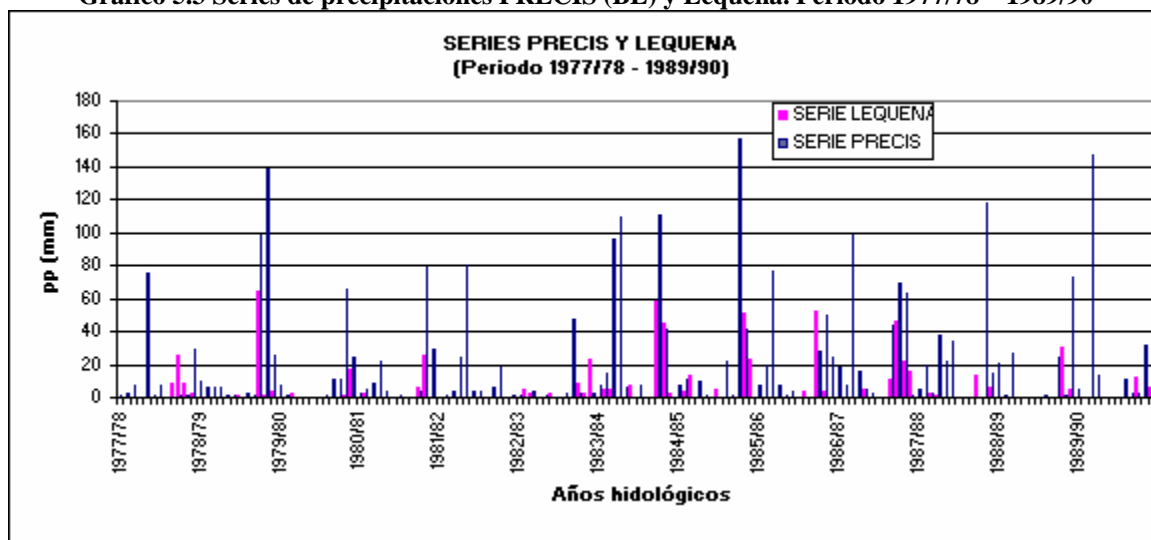


Gráfico 5.4 Gráfico de dispersión de precipitaciones PRECIS (BL) v/s Lequena para periodo común

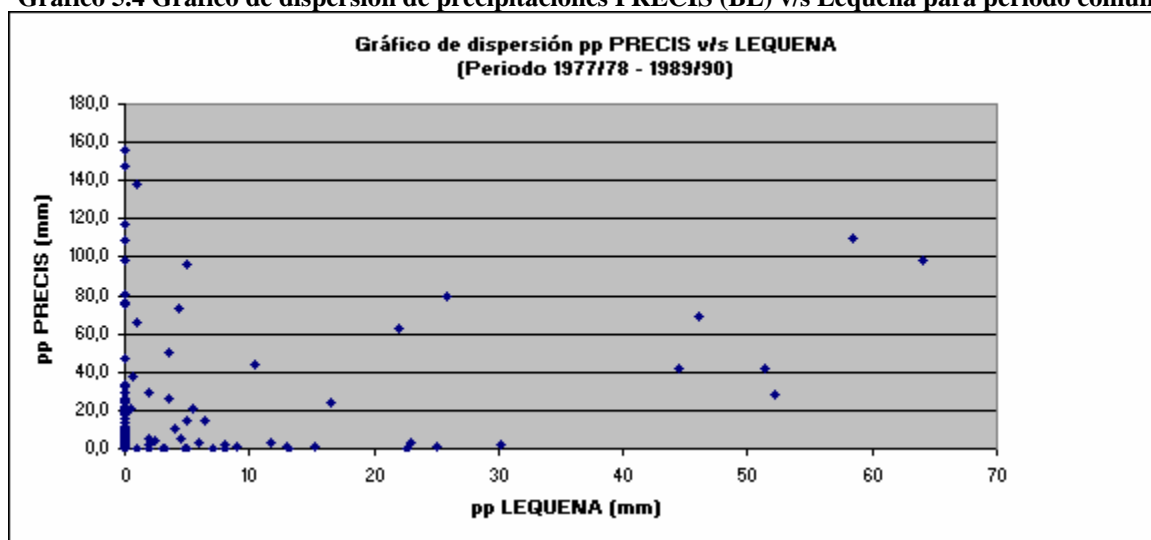


Tabla 5.1 Estadísticos serie completa pp mensual PRECIS y Lequena

Periodo 1977/78 1989/90	PRECIS PP mm	LEQUENA PP mm
PROM	17,46	4,24
DESV. ESTAND.	31,45	11,24
Coef. Asimet.	2,50	3,58
Curtosis	6,08	13,13
Valor Máx.	156,4	64,1
Valor Mín.	0,0	0,0
VAR	988,90	126,44

En términos generales, de la Tabla 5.1 y el Gráfico 5.3, se destaca el hecho que el valor promedio de la serie completa de precipitaciones medias mensuales PRECIS sobrestima el valor promedio de las series de precipitaciones de la estación Lequena para el periodo común. Esta sobreestimación también se observa a nivel anual para todos los valores de precipitaciones del periodo común 1977/78 - 1989/90 (Gráfico 5.2). En el Gráfico 5.3, se observa además que ambas series representan bien el ciclo anual de precipitaciones, en el sentido que en los meses de verano (enero, febrero y marzo) se presentan las mayores precipitaciones, las cuales disminuyen para los meses restantes, presentando un valor promedio relativamente constante y comparativamente menor a las precipitaciones de los meses de verano. Una excepción corresponde a las precipitaciones proyectadas en las series PRECIS para los meses de invierno junio, julio y agosto, las cuales son menores a las de verano pero comparables a éstas, y en algunos casos, mucho mayores al promedio observado de los meses diferentes a los de verano. Esto representa un comportamiento diferente a las series de la estación Lequena, donde durante esos meses de invierno no se observan precipitaciones comparables a las del periodo de verano.

A pesar que los ciclos anuales se representan relativamente bien, si compara solamente las precipitaciones de los meses de verano (enero, febrero y marzo) entre diferentes años, se observa que no siempre existe correspondencia entre los años con mayor precipitación estival en la serie observada y la serie PRECIS. Por ejemplo, los meses de verano de fines del año 1987/88 presentan uno de los valores menores de precipitación estival en la estación Lequena, sin embargo, en la serie PRECIS esos meses presentan precipitaciones que se encuentran dentro de los valores máximos de dicho periodo del año. Esta situación corresponde a lo mencionado con anterioridad respecto a que no se espera que exista correspondencia cronológica entre las series PRECIS y las series históricas respectivas, lo cual se observa también en el Gráfico 5.4.

En relación a la representación del ciclo anual de precipitaciones PRECIS y Lequena, este ciclo puede ser caracterizado de mejor manera en el Gráfico 5.5, el cual contiene los promedios mensuales de ambas series, representados en la Tabla 5.2 y la Tabla 5.3, tablas en las que además se presentan otros estadísticos tanto a nivel mensual, como anual.

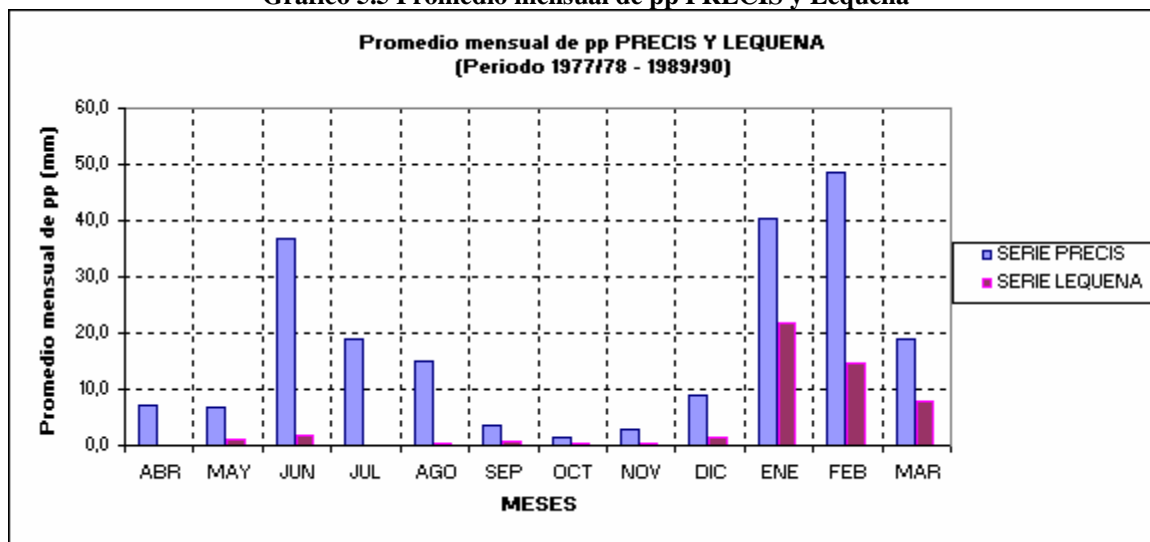
Tabla 5.2 Estadísticos mensual y anual pp mensual PRECIS

SERIES PRECIS (Periodo 1974/75 – 1989/90)													
Lat = -21.75	Lon = -68.75			topo = 3605.14									
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
Media	7,0	6,8	36,7	18,8	15,1	3,5	1,6	3,0	8,8	40,4	48,6	19,1	209,6
Desv. Estand.	6,3	7,1	49,9	29,4	28,5	9,1	2,9	6,3	16,8	51,4	44,5	20,2	93,7
Coef. Asimet.	1,2	0,9	1,3	2,8	2,0	3,5	1,8	2,6	2,0	1,3	0,7	1,6	0,4
Curtosis	1,0	-0,5	0,3	8,4	2,7	12,3	1,7	6,9	2,8	0,6	-0,1	3,7	-0,4
Valor Máx.	20,6	20,0	147,7	109,2	80,3	33,5	7,8	21,6	47,6	156,4	138,1	73,5	392,1
Valor Mín.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	60,7

Tabla 5.3 Estadísticos mensual y anual pp mensual Lequena

Estación: LEQUENA (Periodo 1974/75 – 1989/90)													
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
Media	0,0	1,2	1,9	0,1	0,3	0,8	0,5	0,2	1,4	21,9	14,7	7,9	50,9
Desv. Estand.	0,1	2,0	3,7	0,2	1,2	2,0	1,4	0,9	3,5	24,4	18,2	8,5	36,6
Coef. Asimet.	3,6	1,3	2,7	3,6	3,6	2,8	3,4	3,6	2,3	0,8	1,0	0,9	0,7
Curtosis	13,0	-0,2	7,9	13,0	13,0	8,1	11,7	13,0	4,0	-1,2	-0,3	-0,6	-0,4
Valor Máx.	0,5	5,0	13,1	0,7	4,5	7,0	5,0	3,2	10,5	64,1	51,3	23,0	122,9
Valor Mín.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Gráfico 5.5 Promedio mensual de pp PRECIS y Lequena



En la Tabla 5.2, la Tabla 5.3 y en el Gráfico 5.5 se observa que existe sobreestimación de los promedios mensuales de las precipitaciones PRECIS respecto a los correspondientes valores de la estación Lequena, para todos los meses, sobreestimación cuyo porcentaje (o proporción) es diferente para cada uno de los meses.

Considerando las observaciones anteriores y buscando determinar una metodología de corrección de la sobreestimación de las precipitaciones de la serie PRECIS respecto a la serie de precipitaciones Lequena, de manera que ambas series sean comparables estadísticamente, se decide emplear las curvas de duración de ambas series como herramienta de comparación y corrección. Esto, debido a que la curva de duración relaciona valores de precipitación para igual probabilidad de excedencia, debido a lo cual no es necesaria la existencia de correspondencia cronológica entre los valores de ambas series.

Una vez definida la curva de duración como herramienta de comparación y corrección de la sobreestimación de las series PRECIS respecto a las series de la estación Lequena, y teniendo en cuenta las observaciones realizadas en relación a los gráficos y tablas presentadas en esta sección, inicialmente se estima la conveniencia de realizar correcciones en forma diferenciada para cada mes. Esto, considerando la buena representación del ciclo anual de la serie PRECIS respecto a la serie Lequena, y a la diferencia de proporción en la sobreestimación de los valores promedios mensuales de cada mes. Finalmente, ésta opción se descarta debido la poca cantidad de datos no nulos presentes en los meses de menores precipitaciones, situación que no permite generar relaciones consistentes entre ambas series.

A pesar de descartar la posibilidad de realizar la validación de las series PRECIS en forma diferenciada para cada mes, se evalúa la forma de agrupar algunos meses, para los cuales generar curvas de duración en forma conjunta, intentando que los valores de estos grupos presenten características estadísticas y/o hidrometeorológicas similares entre sí. De esta manera, tomando en cuenta la similitud en el origen de las precipitaciones de los diferentes meses, se decide dividir el ciclo anual en dos partes. La primera parte, corresponde a los meses de precipitaciones del invierno Altiplánico, y la segunda, considera el resto de los meses. La primera parte incluye los meses de Diciembre a Marzo, en tres de los cuales ocurren las máximas precipitaciones de todo el ciclo anual, y en el cual además se incluye el mes de Diciembre, debido a que, a pesar de presentar magnitudes similares al promedio del resto de los meses del año, en la referencia Aceituno (1996) se le considera dentro de los meses en que ocurre este tipo de precipitaciones convectivas.

5.1.2 Obtención de función de corrección de series PRECIS

Por simplicidad, se definen las curvas de duración, de cada uno de los grupos de meses definidos en la sección anterior, a partir de la probabilidad de excedencia de Weibull. Por lo tanto, la relación entre un valor y otro, para cada par de series, depende del orden en que se encuentre dentro de ella. Las tablas y gráficos para la obtención de las curvas de duración de cada grupo de meses se encuentran en el Anexo Digital 02. En el Gráfico 5.6 y en el Gráfico 5.7 se presentan las funciones pp Lequena v/s pp PRECIS, las cuales relacionan pares de valores con igual probabilidad de excedencia, en cada grupo de meses. A estos últimos gráficos, se ajustan curvas a la nube de puntos resultantes, las cuales corresponden a las funciones de corrección de las series PRECIS, obteniendo así una ecuación del tipo $ppPRECIS_{\text{corregida}} = fn(ppPRECIS) \approx ppLequena$. Un resumen de las funciones de corrección definidas es presentado en la Tabla 5.4, y su detalle se encuentra en el Anexo Digital 02.

Gráfico 5.6 pp Lequena v/s pp PRECIS (meses Abril-Noviembre)

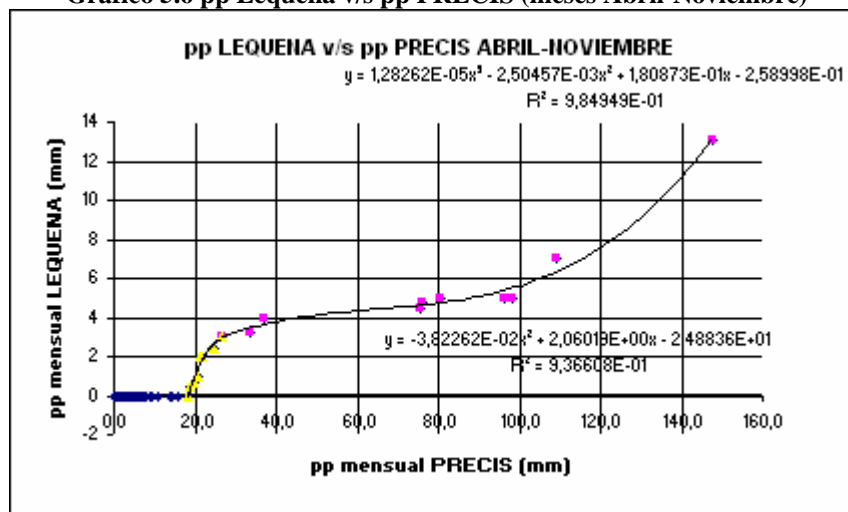


Gráfico 5.7 pp Lequena v/s pp PRECIS (meses Diciembre-Marzo)

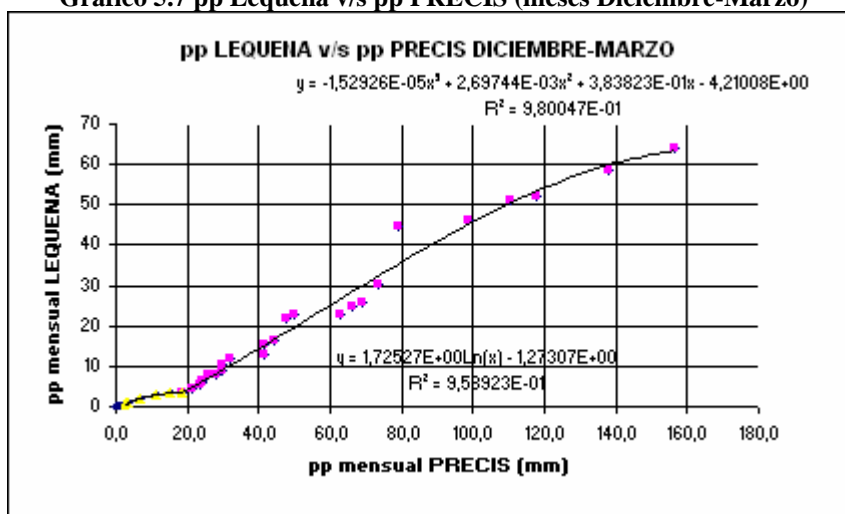


Tabla 5.4 Funciones de corrección de pp PRECIS para ambos grupos (Abr-Nov y Dic-Mar)

RESUMEN FUNCIONES DE CORRECCIÓN			
Meses	FUNCIÓN CORREC.	LIMITES CORRECCIÓN	
		PRECIS	PRECIS
		INICIO	FIN
ABR-NOV	0	0	< 18,2
	$3,82262E-02 * X^2 + 2,06019E+00 * X - 2,48836E+01$	>= 18,2	<= 26,6
	$1,28262E-05 * X^3 - 2,50457E-03 * X^2 + 1,80873E-01 * X - 2,58998E-01$	> 26,6	147,7 o más
DIC-MAR	0	0	<= 2,8
	$1,72527E+00 * \ln(X) - 1,27307E+00$	> 2,8	< 18,3
	$-1,52926E-05 * X^3 + 2,69744E-03 * X^2 + 3,83823E-01 * X - 4,21008E+00$	>= 18,3	156,4 o más

Las series de precipitaciones PRECIS corregidas, sin corregir y las precipitaciones de la estación Lequena se encuentran en el Anexo Digital 03. Los estadísticos de las tres series completas se presentan en la Tabla 5.5, mientras que los estadísticos para cada mes de dichas series son presentados en la Tabla 5.6.

Tabla 5.5 Estadísticos series de pp mensual PRECIS, PRECIS corregida y estación Lequena

	PRECIS	PRECIS CORREG.	LEQUENA
	PP	PP	PP
	mm	mm	Mm
PROM	17,46	4,24	4,24
DESV. ESTAND.	31,45	11,20	11,24
Coef. Asimet.	2,50	3,56	3,58
Curtosis	6,08	13,07	13,13
Valor Máx.	156,4	63,3	64,1
Valor Mín.	0,0	0,0	0,0
VAR	988,90	125,34	126,44

**Tabla 5.6 Resumen estadísticos mensuales y anuales
series de pp mensual PRECIS, PRECIS corregida y estación Lequena**

SERIES PRECIS													
Lat = -21.75	Lon = -68.75			topo = 3605.14									
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
PROM	7,0	6,8	36,7	18,8	15,1	3,5	1,6	3,0	8,8	40,4	48,6	19,1	209,6
DESV. ESTAND.	6,3	7,1	49,9	29,4	28,5	9,1	2,9	6,3	16,8	51,4	44,5	20,2	93,7
Coef. Asimet.	1,2	0,9	1,3	2,8	2,0	3,5	1,8	2,6	2,0	1,3	0,7	1,6	0,4
Curtosis	1,0	-0,5	0,3	8,4	2,7	12,3	1,7	6,9	2,8	0,6	-0,1	3,7	-0,4
Valor Máx.	20,6	20,0	147,7	109,2	80,3	33,5	7,8	21,6	47,6	156,4	138,1	73,5	392,1
Valor Mín.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	60,7
VAR	39,3	50,5	2494,4	867,0	814,1	82,9	8,6	39,5	281,9	2637,4	1976,7	409,7	8775,4
SERIES PRECIS CORREGIDA													
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
PROM	0,1	0,1	2,4	1,1	0,9	0,3	0,0	0,1	3,1	16,3	20,4	6,1	50,9
DESV. ESTAND.	0,4	0,3	3,9	2,0	1,8	1,0	0,0	0,5	6,5	22,7	20,0	8,7	30,2
Coef. Asimet.	3,6	2,8	1,9	1,8	1,9	3,6	-----	3,6	2,1	1,2	0,8	2,6	0,5
Curtosis	13,0	8,1	3,9	3,0	2,3	13,0	-----	13,0	3,1	-0,1	-0,1	8,0	-0,4
Valor Máx.	1,3	1,0	13,2	6,3	4,8	3,5	0,0	1,8	18,5	63,3	60,0	32,5	112,4
Valor Mín.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,2
VAR	0,1	0,1	15,5	4,0	3,1	0,9	0,0	0,2	42,4	514,3	400,1	75,2	914,5
Estación LEQUENA													
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ANUAL
PROM	0,0	1,2	1,9	0,1	0,3	0,8	0,5	0,2	1,4	21,9	14,7	7,9	50,9
DESV. ESTAND.	0,1	2,0	3,7	0,2	1,2	2,0	1,4	0,9	3,5	24,4	18,2	8,5	36,6
Coef. Asimet.	3,6	1,3	2,7	3,6	3,6	2,8	3,4	3,6	2,3	0,8	1,0	0,9	0,7
Curtosis	13,0	-0,2	7,9	13,0	13,0	8,1	11,7	13,0	4,0	-1,2	-0,3	-0,6	-0,4
Valor Máx.	0,5	5,0	13,1	0,7	4,5	7,0	5,0	3,2	10,5	64,1	51,3	23,0	122,9
Valor Mín.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
VAR	0,0	4,1	13,7	0,0	1,6	4,2	1,9	0,8	12,3	597,4	330,4	71,6	1337,4

El Gráfico 5.8 presenta las curvas de duración de las series Lequena, PRECIS y PRECIS corregida, mientras que en el Gráfico 5.9 se compara únicamente las series de precipitaciones Lequena y PRECIS corregida. En el Anexo Digital 03 se presenta una tabla con los valores de éstas curvas de duración.

Gráfico 5.8 Curvas de Duración precipitaciones PRECIS (BL), PRECIS (BL) corregida y LEQUENA

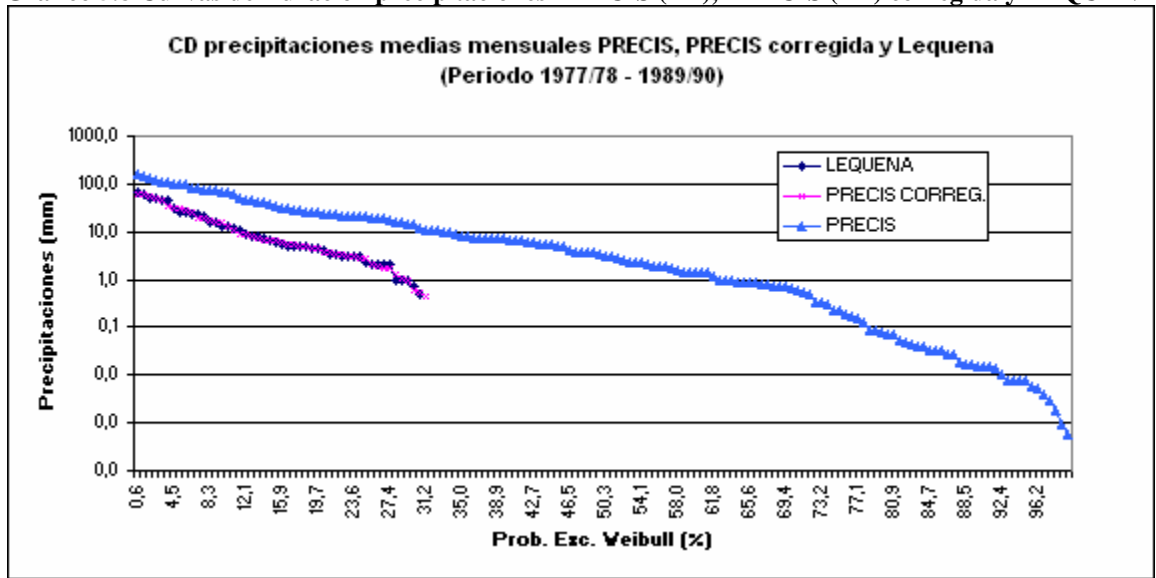
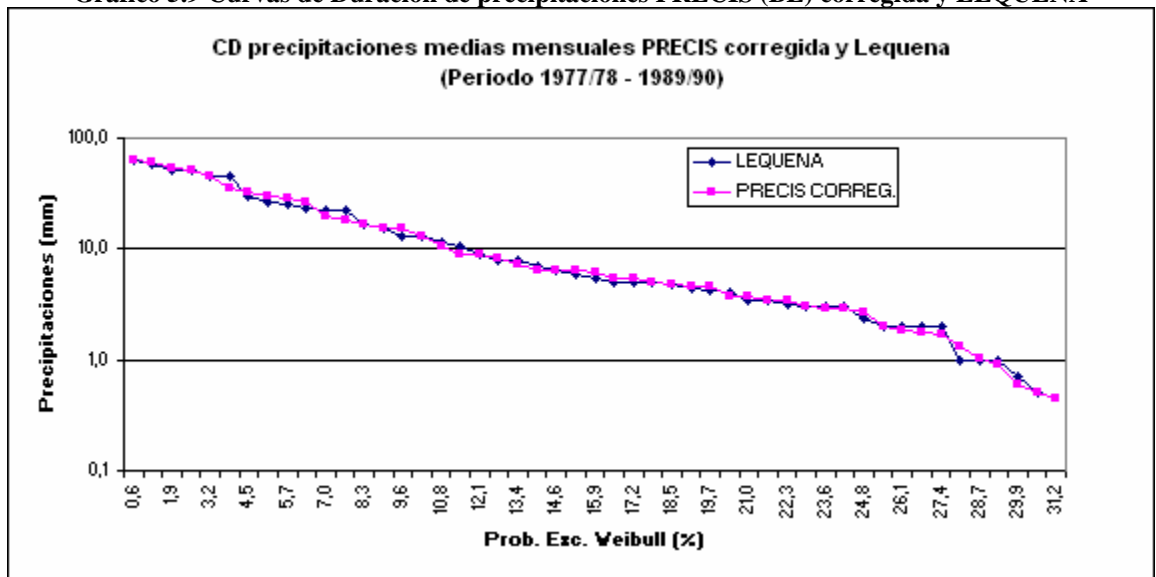


Gráfico 5.9 Curvas de Duración de precipitaciones PRECIS (BL) corregida y LEQUENA



En la Tabla 5.5 se observa que los cuatro primeros estadísticos la serie PRECIS corregida difieren de los correspondientes valores de la serie Lequena en menos de 1%. Por otra parte, en el Gráfico 5.9 se observa una mejora en la correspondencia entre las serie PRECIS corregida y la serie Lequena, en cuanto a que las probabilidades de excedencia de la serie completa son muy similares.

En cuanto a la distribución de precipitaciones en el ciclo anual, en el Gráfico 5.10 se presentan los promedios mensuales para la serie PRECIS, la serie PRECIS corregida y la serie Lequena, en tanto, en el Gráfico 5.11 son presentadas únicamente las series PRECIS corregida y Lequena.

Gráfico 5.10 Promedio mensual de precipitaciones PRECIS, PRECIS corregida y Lequena

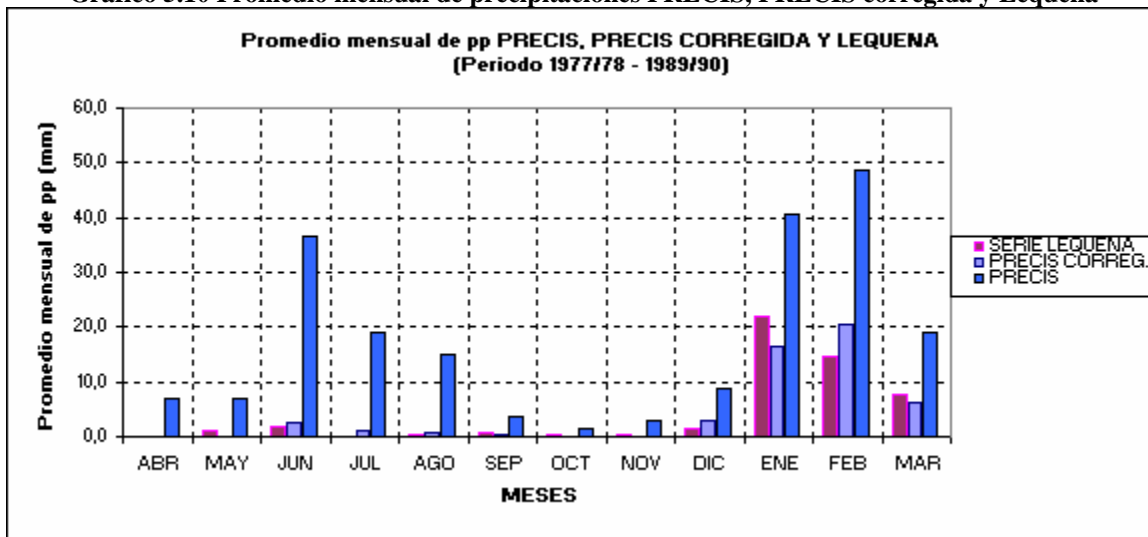
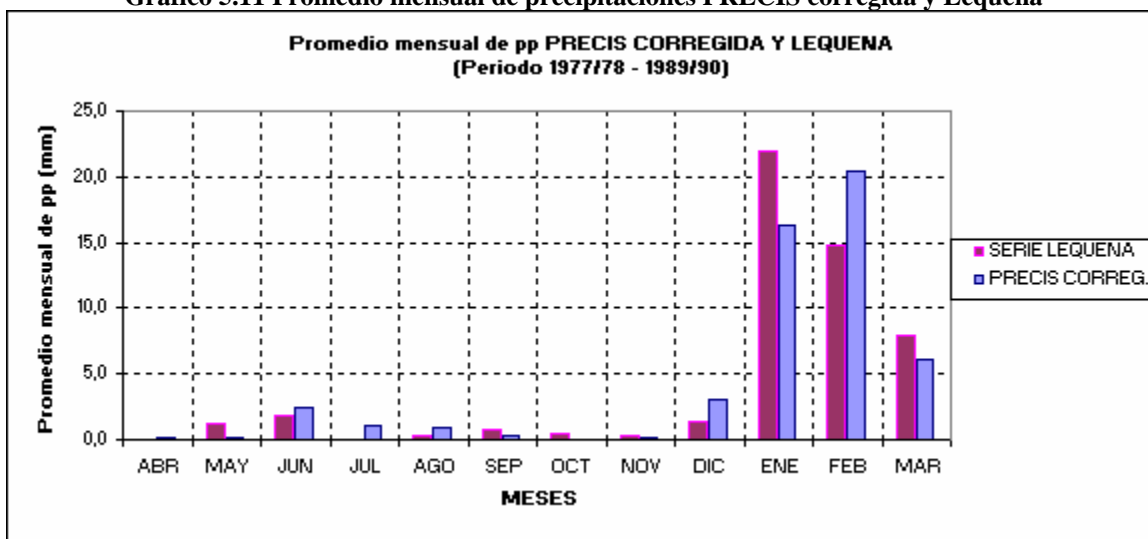


Gráfico 5.11 Promedio mensual de precipitaciones PRECIS corregida y Lequena



En ambos gráficos (Gráfico 5.10 y Gráfico 5.11) se puede apreciar que también existe una mejorara de la serie PRECIS para la distribución del ciclo anual, en cuanto a que el promedio de cada mes se asemeja al promedio de la serie Lequena. Específicamente en relación a la sobreestimación de los valores promedio mensuales de los meses junio, julio y agosto, se consideran satisfactorios los resultados de la corrección, debido a que adquieren valores en el mismo orden de magnitud que los de los meses de precipitaciones no originadas por el invierno Altiplánico (Abr - Nov).

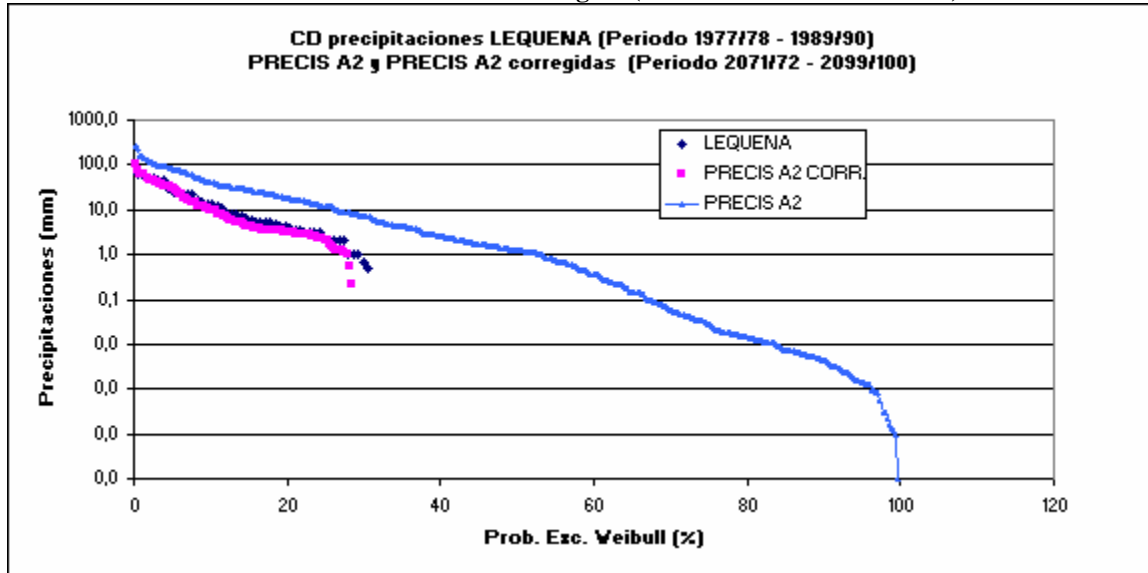
A modo de resumen se puede decir que las funciones de corrección logran generar una serie de precipitaciones PRECIS que representa de manera aceptable la serie histórica de la estación Lequena, en cuanto a la semejanza de los valores de los estadísticos principales de ambas series, la similitud de la curva de duración de la serie completa, y una buena representación del ciclo anual, en el cual se logra diferenciar dos periodos con orden de magnitudes de precipitaciones diferentes, uno para las precipitaciones del Invierno Altiplánico y otro para las precipitaciones de los meses restantes (abril a noviembre). Con esto, se considera que la serie de la estación Lequena queda bien representada por la serie PRECIS corregida, por lo tanto se validan las funciones de corrección para corregir las series PRECIS de periodo futuro.

Definido lo anterior, se corrige la serie PRECIS de periodo futuro A2 empleando las funciones de corrección de la Tabla 5.4. Algunos resultados de la serie obtenida se exponen a continuación. En el Gráfico 5.12 se presenta las curvas de duración de la serie PRECIS A2, su versión corregida y la curva de duración de la serie de precipitaciones de la estación Lequena. El Gráfico 5.13 y el Gráfico 5.14 sólo presentan las curvas de duración de la serie PRECIS A2 corregida y Lequena. En el primer caso se considera el periodo de todos los años hidrológicos completos de la serie PRECIS A2 corregida, y en el segundo caso, la misma curva de duración comprende un número de años hidrológicos equivalente al que contiene la serie de precipitaciones de la estación Lequena (13 años).

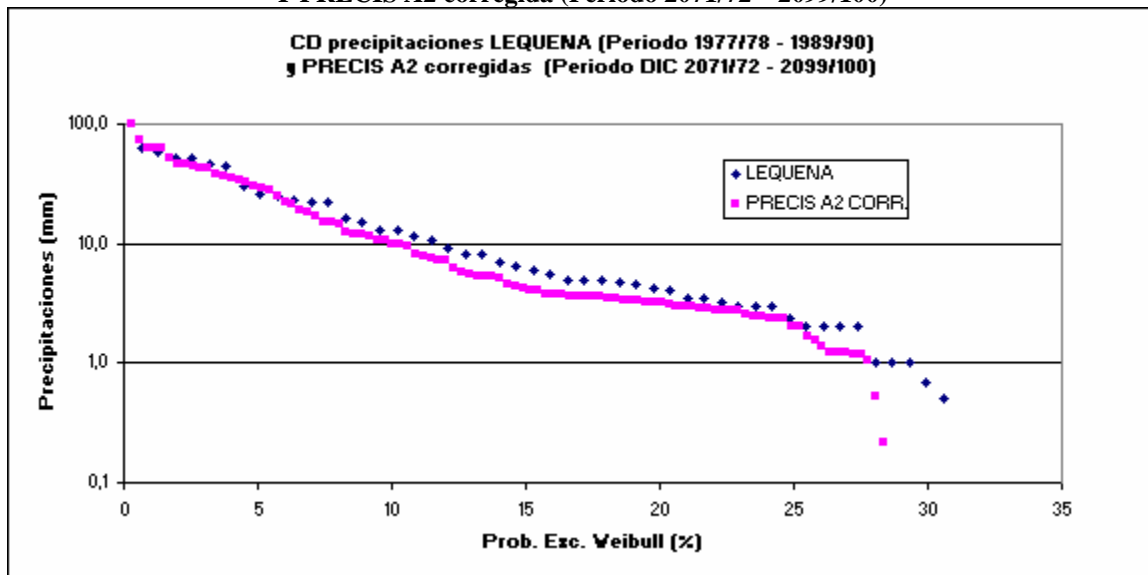
En el Gráfico 5.12 se observa que la corrección para la serie PRECIS de periodo futuro genera una serie corregida con valores que presentan órdenes de magnitud comparables a los de la serie Lequena, para igual probabilidad de excedencia. En el Gráfico 5.13 se compara con mayor detalle ambas series, observándose que en general la serie PRECIS A2 corregida presenta valores un poco menores a los valores de precipitaciones de la serie Lequena. La excepción corresponde a los valores con probabilidades de excedencia menores a 6,5% en que ambas series presentan valores similares. Debido a que la serie de precipitaciones PRECIS A2 corregida, del Gráfico 5.13, presenta un número mayor de años hidrológicos que los de la serie Lequena, con la cual se está comparando (29 años v/s 13 años hidrológicos de la serie Lequena), se realiza otra curva de duración con los valores de la serie PRECIS A2 corregida, pero para un periodo equivalente al de la serie Lequena (13 años). Esta nueva curva de duración corresponde a la del Gráfico 5.14. En este caso se observa que los valores de precipitaciones para igual probabilidad de excedencia son muy similares en ambas series. Para probabilidades de excedencia bajas las precipitaciones PRECIS A2 corregidas son levemente mayores, mientras que para probabilidades de excedencia altas, esta misma serie presenta valores de precipitación de caudales mayores a los de la serie

Lequena. La diferencia observada en los dos últimos gráficos, muestra que considerar periodos de valores diferentes arroja resultados diferentes.

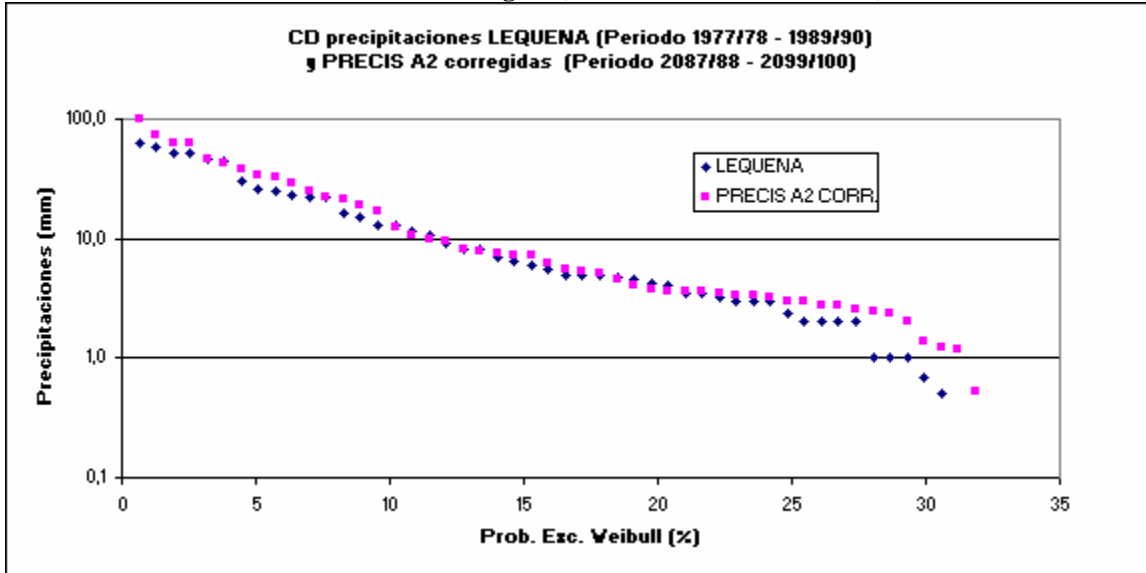
**Gráfico 5.12 Curvas de Duración precipitaciones LEQUENA (Periodo 1977/78 – 1989/90)
PRECIS A2 Y PRECIS A2 corregida (Periodo 2071/72 – 2099/100)**



**Gráfico 5.13 Curvas de Duración precipitaciones LEQUENA (Periodo 1977/78 – 1989/90)
Y PRECIS A2 corregida (Periodo 2071/72 – 2099/100)**

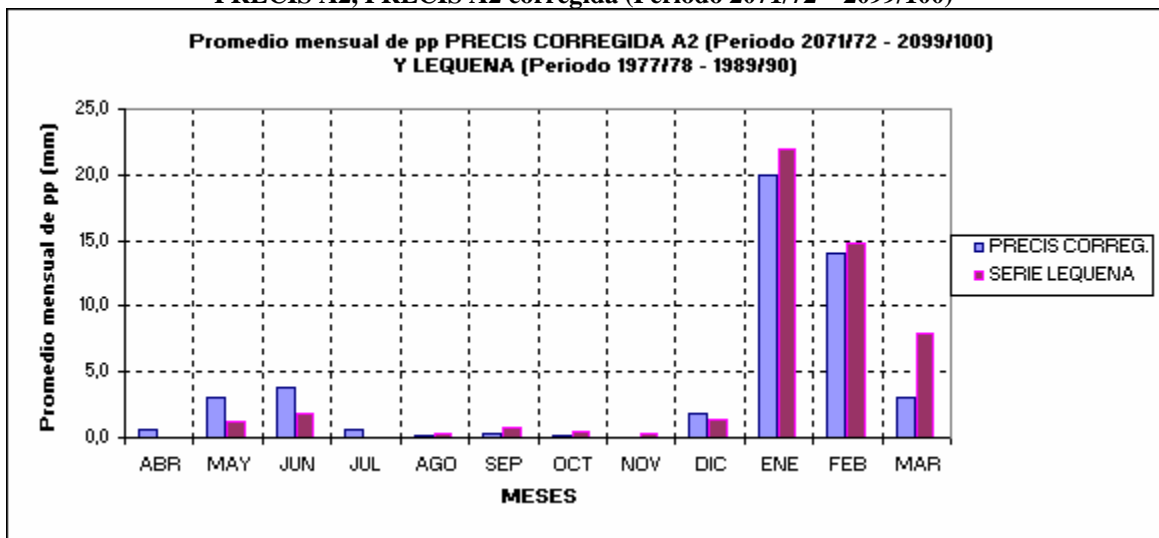


**Gráfico 5.14 Curvas de Duración precipitaciones LEQUENA (Periodo 1977/78 – 1989/90)
Y PRECIS A2 corregida (Periodo 2087/88 – 2099/100)**

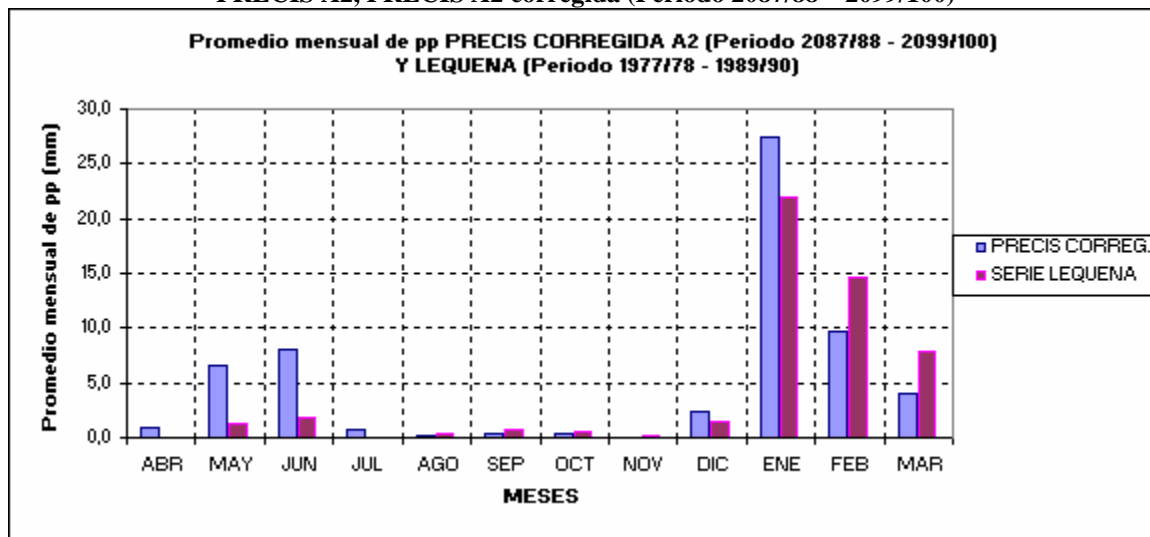


En relación al ciclo anual, el Gráfico 5.15 y el Gráfico 5.16 presentan los promedios mensuales de las series PRECIS A2 corregida y Lequena. En el primero de estos gráficos se considera el periodo de años hidrológicos completos de la serie PRECIS A2 corregida, mientras que en el segundo, los promedios mensuales corresponden al periodo 2087/88 – 2099/100.

**Gráfico 5.15 Promedio mensual de precipitaciones Lequena (Periodo 1977/78 – 1989/90)
PRECIS A2, PRECIS A2 corregida (Periodo 2071/72 – 2099/100)**



**Gráfico 5.16 Promedio mensual de precipitaciones Lequena (Periodo 1977/78 – 1989/90)
PRECIS A2, PRECIS A2 corregida (Periodo 2087/88 – 2099/100)**



Se observa en el Gráfico 5.15 y el Gráfico 5.16 que en los tres meses de mayores precipitaciones, el valor promedio para la serie PRECIS A2 corregida es menor al de la serie Lequena, con excepción del mes de enero, para el caso de la serie PRECIS en que se consideran 13 años hidrológicos (Gráfico 5.16). En los meses restantes, en general, los valores son bastante menores en magnitud a los meses de mayor precipitación, y presentan valores promedio similares en ambas series, a excepción de los meses de abril, mayo y junio. En estos meses, la serie PRECIS A2 corregida presenta valores mucho mayores a los de la serie Lequena, llegando incluso a ser mayores que el valor promedio de marzo, uno de los tres meses con precipitaciones mayores en el ciclo anual.

En síntesis, se puede decir que la serie PRECIS de periodo futuro A2 corregida, presenta valores de probabilidad de excedencia muy cercanos a la serie de precipitaciones Lequena, presentando en algunos tramos de probabilidad de excedencia valores algo menores que los de la serie Lequena, y a veces mayores, dependiendo del tramo que se considere y del número de años hidrológicos considerado. Respecto al ciclo anual, se observa que éste se conserva respecto a la serie Lequena, presentando las mayores precipitaciones en los meses de enero, febrero y marzo, y valores comparativamente menores en el resto de los meses, con excepción de los meses abril, mayo y junio, los cuales presentan valores mucho mayores a los de la serie Lequena, llegando incluso a ser similares a alguno de los tres meses de mayores precipitaciones.

Respecto al aumento de precipitaciones para los meses de abril mayo y junio, esto podría significar que efectivamente el modelo meteorológico PRECIS proyectaría un aumento de las

precipitaciones para esos meses, respecto a los valores del periodo de línea de base de la estación Lequena. Pero considerando que las correcciones se realizan de manera conjunta para todos los meses que no presentan precipitaciones correspondientes al invierno Altiplánico, ese aumento podría distribuido de manera diferente para ese conjunto de meses.

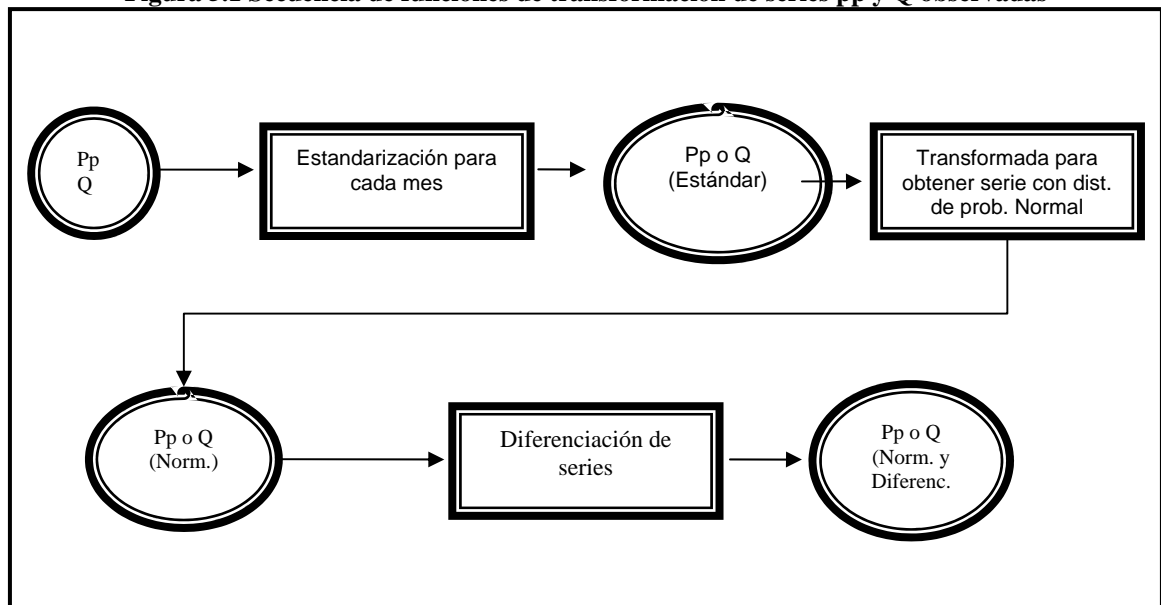
5.2. Transformadas de Series para obtención de Estacionariedad y Normalidad

Las funciones transformadas necesarias para cumplir con los requisitos de normalidad y estacionariedad, requisitos con los cuales resultan válidos los supuestos teóricos empleados en la aplicación de modelos de Función de Transferencia, fueron determinadas para las series observadas de precipitación y caudal en forma paralela, debido a que son las series con las cuales se genera y calibra el modelo de función de transferencia. Posteriormente, la misma secuencia de transformadas encontrada para las precipitaciones históricas, se aplica sobre las series de precipitaciones PRECIS, tanto de periodo de línea de base (BL), como de periodo futuro (A2).

5.2.1 Obtención de series transformadas para precipitación y caudales observados

La secuencia de transformadas para la cual se logra cumplir, o acercarse, de mejor manera a la obtención de los requisitos, se presenta en la Figura 5.1.

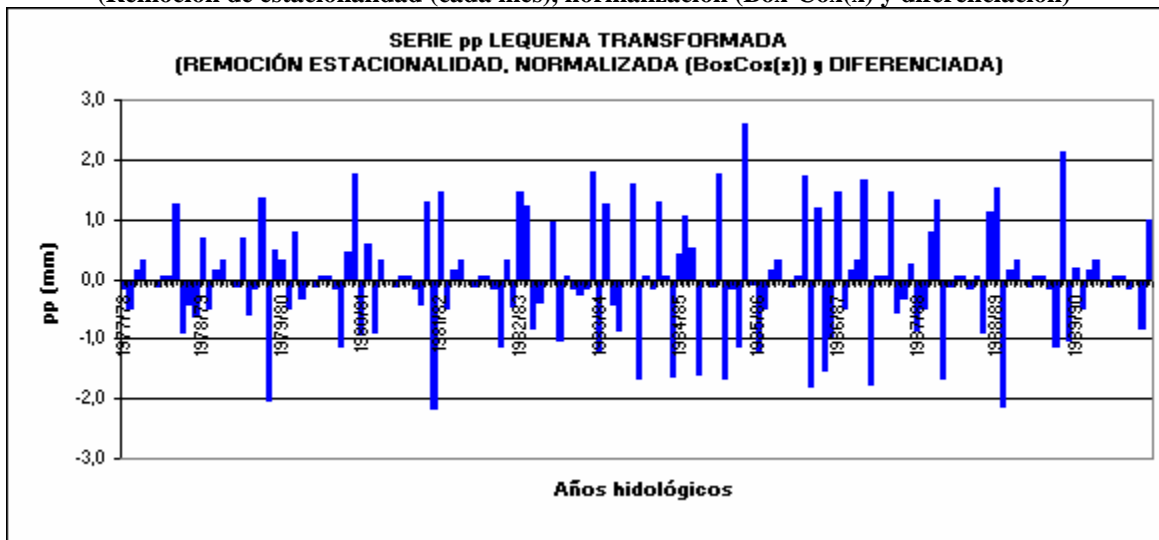
Figura 5.1 Secuencia de funciones de transformación de series pp y Q observadas



La función de transformación empleada para obtener una serie con distribución normal, en el caso de los caudales corresponde a la función logaritmo ($\ln(x)$), mientras que para las precipitaciones se utiliza la transformada de Box – Cox. Es importante notar que, considerando que el valor de lambda (λ) empleado en la función de Box – Cox para la transformación de la serie de precipitaciones es muy cercano a cero (10^{-14}), es equivalente a haber empleado la función \log_{10} .

La secuencia y número de transformaciones presentada en la Figura 5.1 queda definida cuando se logra cumplir con los dos requisitos solicitados. En el caso de las precipitaciones observadas, nunca se logra cumplir ambos requisitos, donde, aquel que presenta mayor dificultad de lograrse corresponde a la normalización. Este requisito mejora en la serie diferenciada, respecto a la serie normalizada. En una segunda diferenciación, empeora la estacionariedad, debido a que la varianza acumulada comienza a ser creciente y alcanza valores mayores que en la primera diferenciación. Debido esto, se decide llegar sólo hasta una primera diferenciación e intentar buscar una función de transformación para normalización que entregue el mejor resultado posible para la serie diferenciada, luego de ser aplicada la función de normalización. Una representación de la serie de precipitaciones obtenida se encuentra en el Gráfico 5.17.

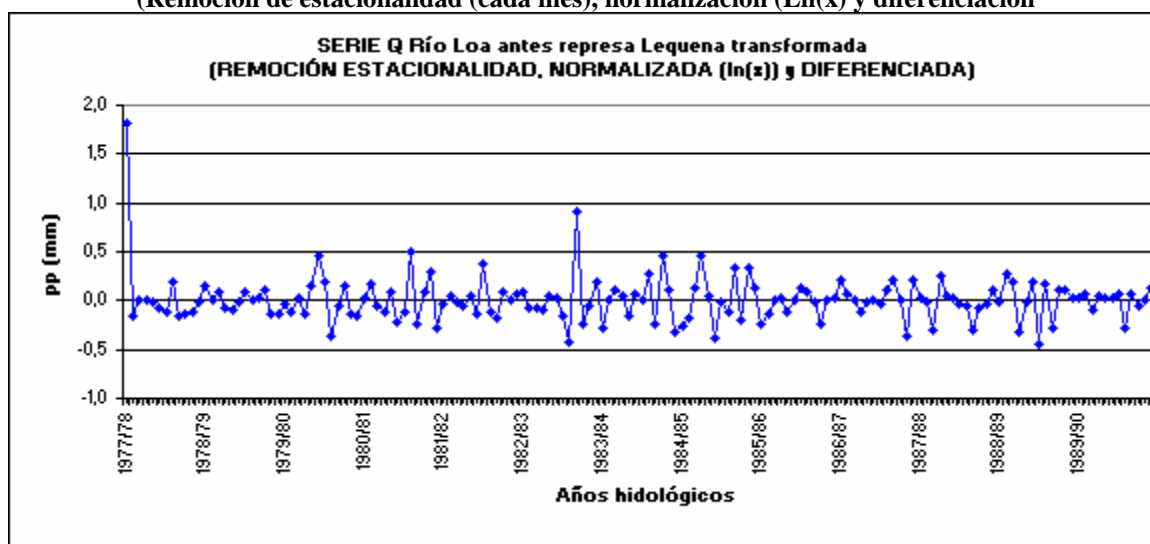
Gráfico 5.17 Serie de precipitaciones Lequena transformada (Remoción de estacionalidad (cada mes), normalización (Box-Cox(x) y diferenciación)



En el caso de los caudales observados, se logra cumplir con el requisito de normalidad al aplicar la función respectiva, pero no se logra la estacionariedad, debido a que la ACF (función de autocorrelación) no decae rápidamente dentro de los $N/4$ desfases (con N igual al número de datos de la serie). Al

diferenciar esta serie ($Q_{std.}$ y $Norm$), se deja de cumplir el requisito de normalidad, pero la ACF resulta prácticamente nula, y las media y varianza acumulada decaen, con lo cual se puede concluir que la serie se puede considerar estacionaria. A pesar que el test de normalidad es rechazado, el valor del test no se aleja en gran medida del valor límite, y gráficamente se podría considerar que la serie sigue una distribución normal. Teniendo en cuenta todo lo anterior, se considera que en la serie de caudales se cumple mejor los dos requisitos una vez diferenciada la serie ya normalizada. En el Gráfico 5.18 se presenta la serie de caudales resultante de estas transformaciones.

Gráfico 5.18 Serie Caudales estación Río Loa antes represa Lequena, transformada (Remoción de estacionalidad (cada mes), normalización $\ln(x)$ y diferenciación



Además, se comprobó empíricamente la importancia de que en ambas series se aplique, al menos, el mismo número de transformadas (mejor aún: el mismo tipo de transformación), debido a que si una de ellas presenta menos transformaciones, es posible que se pierda la correlación existente entre ambas series, con lo cual no se puede obtener una relación a través de una función impulso - respuesta. Esto fue verificado empíricamente al intentar encontrar la función impulso – respuesta entre la serie de caudales normalizadas y la serie de precipitaciones diferenciada después de la normalización, al encontrar que la función de correlación cruzada presenta valores nulos.

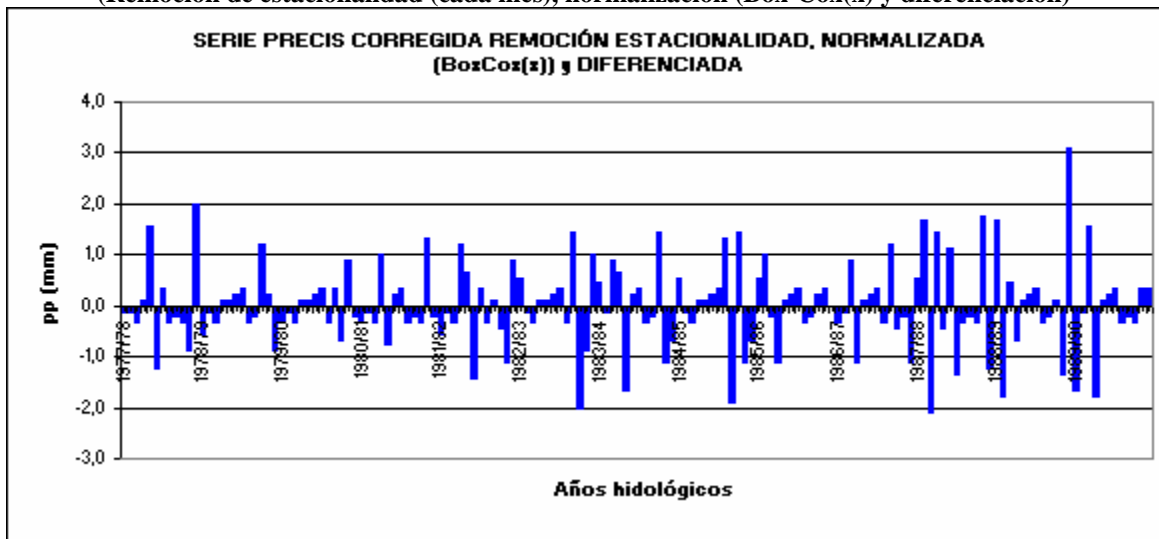
Los gráficos recién expuestos, junto a otros gráficos, datos y figuras mencionadas en relación a las transformaciones realizadas en la serie de precipitaciones, se encuentran en el Anexo Digital 05, y en el caso de los caudales, estos se encuentran en el Anexo Digital 06.

5.2.2 Obtención de series transformadas para precipitaciones PRECIS corregidas (periodo BL y A2)

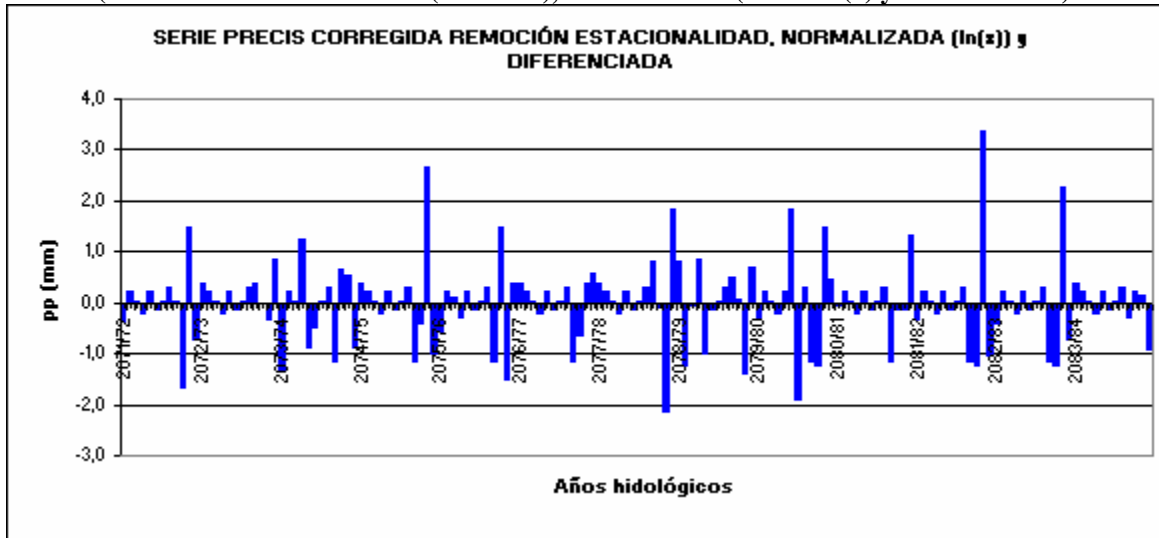
Aplicando sobre las series PRECIS corregidas de periodo de línea de base (BL) y de periodo futuro (A2), las mismas transformaciones aplicadas a la serie de precipitaciones observadas en la estación Lequena, pero variando únicamente las constantes de las transformadas de Box – Cox, se obtienen resultados similares para ambas series. Es decir, se tiene que la serie que mejor se acerca a una distribución normal, es aquella en que se aplica una diferenciación luego de la función de normalización de Box – Cox con lambda (λ) igual a 10^{-14} . Además, esta serie se puede considerar estacionaria, ya que su función de autocorrelación (ACF) decae rápidamente, y la media y varianza acumulada se estabiliza.

En el Gráfico 5.19 se presenta la serie PRECIS BL transformada, mientras que en el Gráfico 5.20 se muestra la serie PRECIS A2 transformada. Los demás gráficos, series y estadísticos asociados a los cálculos realizados para la serie de precipitaciones PRECIS BL se encuentran en el Anexo Digital 07. Para las precipitaciones PRECIS A2, se encuentran en el Anexo Digital 08.

Gráfico 5.19 Serie de precipitaciones PRECIS BL transformada (Remoción de estacionalidad (cada mes), normalización (Box-Cox(x) y diferenciación)



**Gráfico 5.20 Serie de precipitaciones PRECIS A2 transformada
(Remoción de estacionalidad (cada mes), normalización (Box-Cox(x) y diferenciación)**



5.3. Identificación y calibración de modelo de Función de Transferencia

Para poder llevar a cabo esta etapa, se divide el periodo de tiempo común de las series de trabajo (1977/78 – 1989/90) en los periodos de calibración y validación, buscando inicialmente mantener una proporción de 2/3 y 1/3 respectivamente. Sin embargo, el programa computacional empleado para la calibración (FTXZ) trabaja con un máximo de 90 datos, lo cual representa una limitante para conservar dicha proporción. Considerando esta restricción y seleccionando años hidrológicos completos se prefiere trabajar con años hidrológicos completos. Con esto se define el periodo de calibración entre los años 1977/78 – 1983/84 y el periodo de validación entre 1984/85 – 1989/90.

5.3.1 Obtención de función impulso - respuesta

a) Obtención de modelo ARMA de la serie transformada de precipitaciones observadas

Como se define en la metodología, en primer lugar se debe encontrar un modelo ARMA seguido por la serie transformada de precipitaciones de la estación Lequena, y verificar que su residuo α_t , sea una serie de ruido blanco.

El modelo seleccionado empleando el programa Statistica 7, es un modelo ARMA (0,1) cuyos parámetros se exponen en la Tabla 5.7. Los estadísticos de la serie de ruido α_t se encuentran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.7 Parámetros modelo ARMA (0,1) serie pp transf.ormada Lequena

	Valor estimado	Error estándar
q(1) =	0,91599	0,05212

Tabla 5.8 Estadísticos de la serie de ruido α_t

PROM	0,04
DESV. ESTAND.	0,60
Coef. Asimet.	0,41
Curtosis	0,73
Valor Máx.	1,6
Valor Mín.	-1,4
VAR	0,36

Para verificar que la serie α_t sea un ruido blanco, se debe comprobar el cumplimiento de sus requisitos: en cuanto a presentar una media igual a cero, seguir una distribución normal, y presentar una función de autocorrelación (ACF) con valores nulos, los cuales además deben ser nulos en forma conjunta, según el test de Ljung – Box. (Anexos).

Los gráficos y cálculos respectivos se encuentran en el Anexo Digital 09, verificándose en ellos el cumplimiento de todos los requisitos, a excepción del test de normalidad, el cual es rechazado. Pero de todas maneras se decide considerarlo válido, ya que el gráfico de ajuste a una distribución normal se considera cercano a lo esperado (Gráfico 5.21). En cuanto a una media igual cero, se considera que el valor 0,04 cumple con dicho requisito. Con todo esto, se considera la serie α_t como ruido blanco.

En la Tabla 5.9 son presentados algunos estadísticos de la serie α_t , y en el Gráfico 5.22 se presenta su función de autocorrelación (ACF). En éste gráfico, se observa con claridad que todos los valores son significativamente iguales a cero, a excepción del valor del desfase 11, el cual presenta una diferencia muy pequeña con el valor límite para que este sea considerado igual a cero.

Gráfico 5.21 Curva de ajuste a distribución de probabilidad normal de la serie α_t

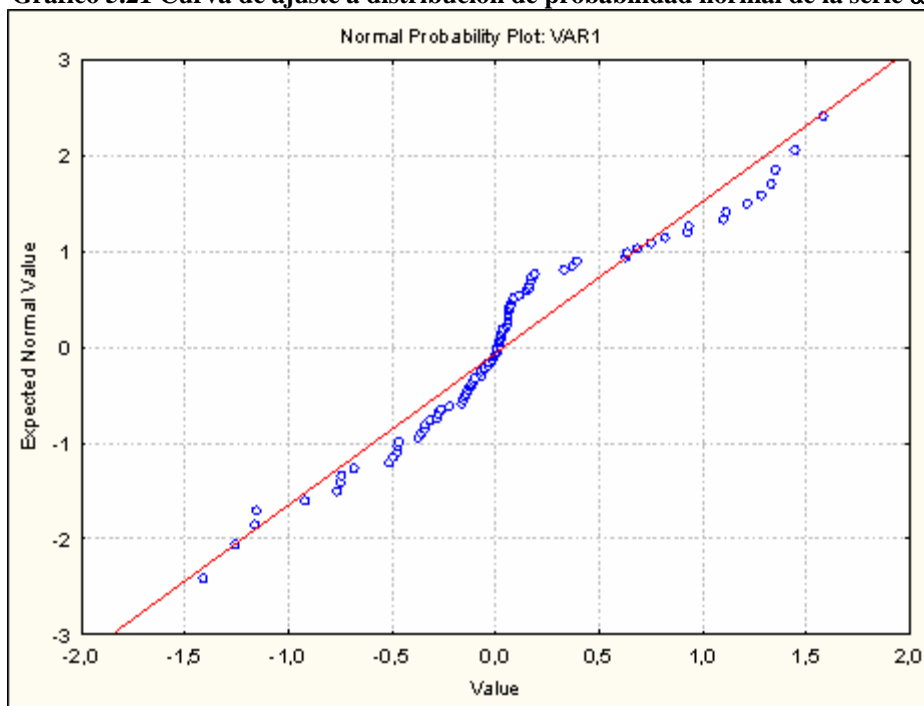
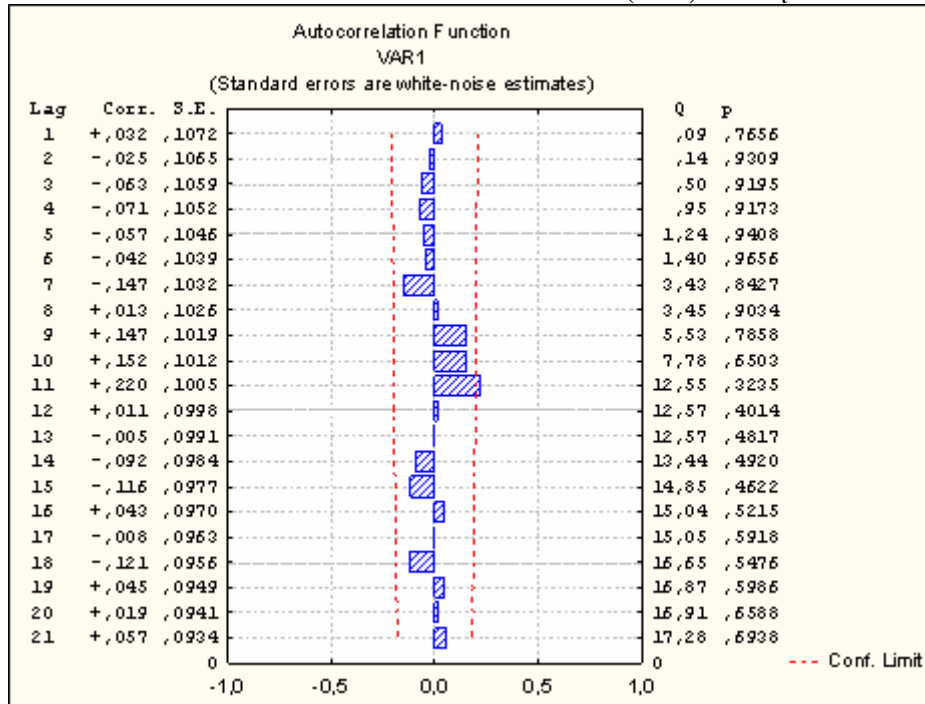


Tabla 5.9 Estadísticos de serie α_t

PROM	0,04
DESV. ESTAND.	0,60
Coef. Asimet.	0,41
Curtosis	0,73
Valor Máx.	1,6
Valor Mín.	-1,4
VAR	0,36

Gráfico 5.22 Función de autocorrelación (ACF) serie α_t



b) Obtención de Función Impulso - Respuesta mediante Función de Correlaciones Cruzadas

Una vez conocido el modelo ARMA de la serie de precipitaciones transformadas y la serie de ruido blanco α_t , se obtiene la serie β_t , correspondiente al residuo que se obtiene al aplicar la inversa del modelo ARMA recién encontrado para la serie de caudales observados transformada. Los estadísticos de la serie β_t se presentan en la Tabla 5.10. Otros estadísticos considerados para la serie β_t , se encuentran en el Anexo Digital 10.

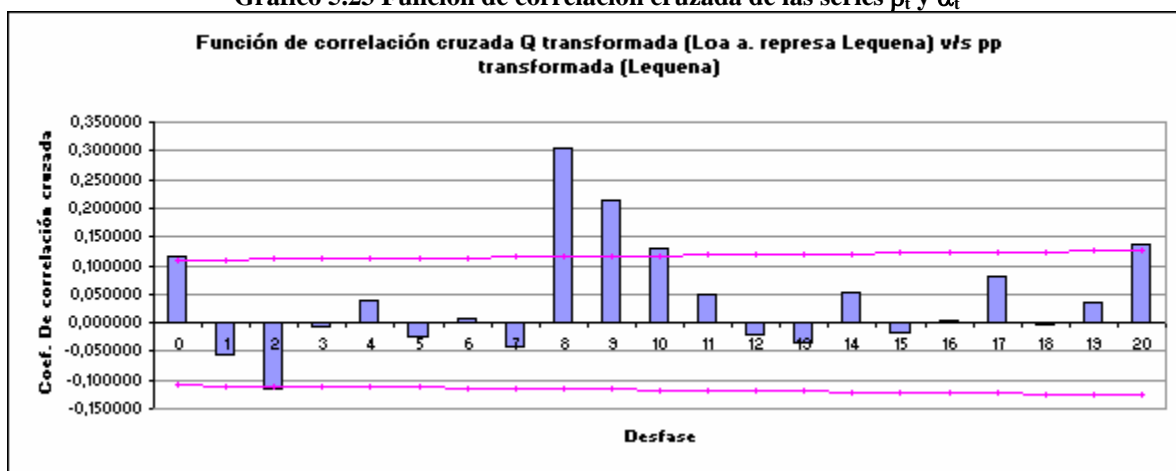
Tabla 5.10 Estadísticos de las series de ruido α_t y β_t

	α_t	β_t
	Residuo pp ARMA	Residuo Q ARMApp
$\mu =$	0,04	-0,01
$\sigma =$	0,60	0,19
coeficiente de asimetría	0,41	0,24
curtosis	0,69	1,29
MIN =	-1,41	-0,59
MAX =	1,58	0,53

Conocidos α_t y β_t , con el programa Statistica 7 se calcula la función de correlación cruzada de ambas series, donde la serie β_t depende de la serie α_t . El resultado se muestra en el Gráfico 5.23. En éste

gráfico se observa que los valores que pueden ser considerados significativos corresponden a los de los desfases 8 y 9. Teniendo en cuenta que el régimen de la cuenca es pluvial, se deduce que la precipitación caída en determinado mes, se expresa en caudal 8 meses después, dentro de la misma cuenca. Las posibles interpretaciones que pueden darse a este resultado es que éste es erróneo, o en caso de considerarlo correcto, como un posible efecto de almacenamiento de las precipitaciones, por infiltración, en un acuífero presente en la cuenca y posterior afloramiento de esas precipitaciones, con 8 meses de diferencia. Esta última interpretación es posible debido a que, según los antecedentes expuestos en Cade-idepe (2004), en la subcuenca de estudio existe un acuífero que sigue la misma dirección del río.

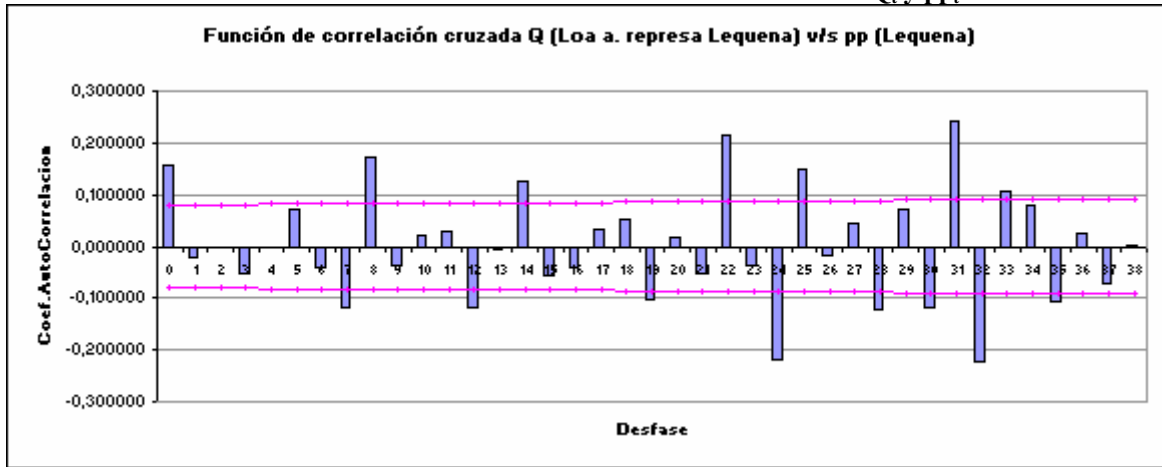
Gráfico 5.23 Función de correlación cruzada de las series β_t y α_t



A pesar que en el Gráfico 5.23 se considera que sólo desde el desfase 8 comienza a haber valores no nulos de la función de correlación cruzada, debido a que superan en forma suficiente el límite en que los valores son considerados significativamente diferentes a cero (son mayores o cercanos del doble de ese valor límite), en el caso del desfase cero, ese valor puede ser reconsiderado como significativo. En el Gráfico 5.23, el valor en el desfase 0 (cero) apenas sobrepasa el límite en que el valor se considera nulo, y por lo tanto debe ser considerado igual a cero, pero según lo observado en el Gráfico 3.3 en muchos casos se puede apreciar una respuesta inmediata de los valores de caudales ante el aumento del valor de las precipitaciones en los meses de mayor valor.

Como una manera de corroborar esta respuesta inmediata de las variaciones en los valores de caudales medios mensuales ante las variaciones de valores de precipitaciones mensuales, se calcula la función de correlación cruzada para las series de caudales respecto a las serie de precipitaciones, ambas sin transformar. El resultado es presentado en el Gráfico 5.24.

Gráfico 5.24 Función de correlación cruzada de las series Q_t y pp_t



En el Gráfico 5.24 se observa claramente que para el valor del desfase cero es significativamente diferente a cero. Por lo tanto sería correcto probar modelos de función de transferencia considerando un desfase igual a cero, y no sólo casos para un desfase igual a ocho. Debido a que estas consideraciones fueron realizadas en forma posterior a la obtención del modelo de función de transferencia obtenido para el presente trabajo y cuyos resultados son presentados en las secciones siguientes de este capítulo, se plantea la revisión de posibles modelos nuevos, en los que se considere un desfase igual a cero, como un ejercicio posterior a lo ya desarrollado en el presente estudio.

Finalmente, considerando que el desfase de la función cruzada es igual a 8, y por consecuencia corresponde al desfase de la función impulso – respuesta, además, dada la función de correlación cruzada del Gráfico 5.23 y conocida la ecuación para obtener la función impulso-respuesta (Ecuación 4.1), se obtiene como resultado los valores presentados en la Tabla 5.11, también presentados en el Gráfico 5.25.

Gráfico 5.25 Función impulso – respuesta series β_t y α_t

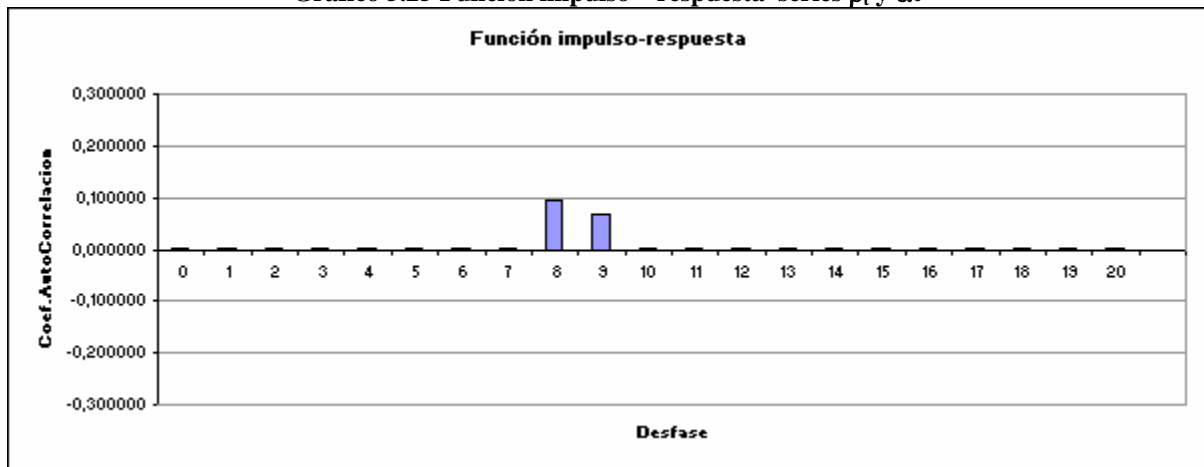


Tabla 5.11 Cálculo de Función impulso - respuesta

	Correlación cruzada		Función impulso-respuesta	
	$r\beta\alpha(k)=$	Error	v_j	v_j signif.
0	0,12	$\pm 0,11$	0,04	0,00
1	-0,06	$\pm 0,11$	-0,02	0,00
2	-0,11	$\pm 0,11$	-0,04	0,00
3	-0,01	$\pm 0,11$	0,00	0,00
4	0,04	$\pm 0,11$	0,01	0,00
5	-0,02	$\pm 0,11$	-0,01	0,00
6	0,01	$\pm 0,11$	0,00	0,00
7	-0,04	$\pm 0,11$	-0,01	0,00
8	0,30	$\pm 0,12$	0,10	0,10
9	0,21	$\pm 0,12$	0,07	0,07
10	0,13	$\pm 0,12$	0,04	0,00
11	0,05	$\pm 0,12$	0,02	0,00
12	-0,02	$\pm 0,12$	-0,01	0,00
13	-0,03	$\pm 0,12$	-0,01	0,00
14	0,05	$\pm 0,12$	0,02	0,00
15	-0,02	$\pm 0,12$	-0,01	0,00
16	0,00	$\pm 0,12$	0,00	0,00
17	0,08	$\pm 0,12$	0,03	0,00
18	0,00	$\pm 0,12$	0,00	0,00
19	0,04	$\pm 0,13$	0,01	0,00
20	0,14	$\pm 0,13$	0,04	0,00

5.3.2 Estimación de parámetros y calibración del modelo de Función de Transferencia

Como ya se adelantó en la sección anterior, con los resultados obtenidos se determina de forma inmediata el valor del desfase b del modelo de función de transferencia, el cual se define equivalente al desfase de la función impulso-respuesta, con lo cual se tiene $b = 8$. Falta determinar entonces los parámetros r y s , referentes al número de parámetros autoregresivo de la serie de caudal transformada y al número de variables parámetros de la variable exógena (precipitaciones transformadas observadas), respectivamente.

A partir de las pautas entregadas en Juan Fernández (2006), en relación a la definición de posibles valores de r y s a partir de la forma de la función impulso - respuesta (Figura 4.2), se definen una combinación de parámetros r y s presentados en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12 parámetros del modelo de FT definidos a priori

b = 8	r = 0	s = 1
-------	-------	-------

Asignados los valores de la Tabla 5.12, la forma del modelo de Función de Transferencia es conocida y por lo tanto sólo resta estimar los valores óptimos de sus parámetros (ω_0 y α para el caso de los datos de la Tabla 5.12). Esto se realiza mediante el programa computacional FTXZ, en el cual se ingresan los valores b, r, s, y valores iniciales de ω_0 y α . Luego, a través de iteraciones sucesivas realizadas por el programa se obtienen los valores presentados en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13 Parámetros calibrados por FTXZ

$\omega_0 =$	0,109
$\omega_1 =$	0,047
$\alpha =$	0

Conocido el modelo, se calcula la serie transformada de caudales observados, correspondiente a la parte determinística del modelo definido. La serie obtenida se presenta en el Anexo Digital 11 y se contrasta gráficamente con la serie Q observada transformada en el Gráfico 5.26, mientras que en el Gráfico 5.27 se correlacionan ambas series.

Gráfico 5.26 Serie Q histórica transformada y Q determinística transformada (modelo FT)

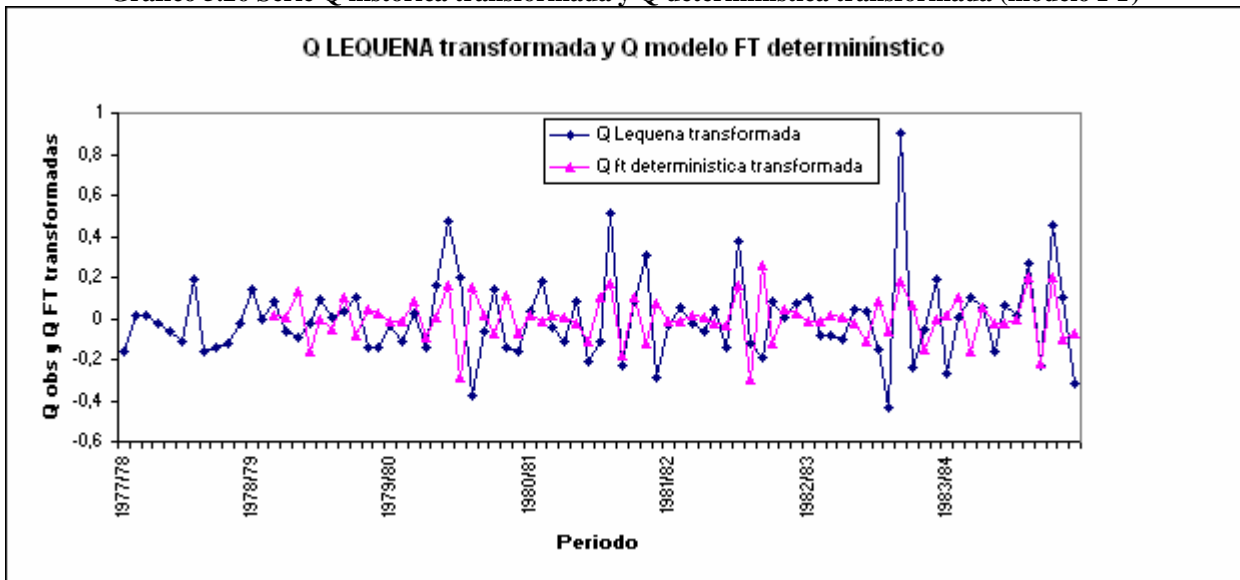
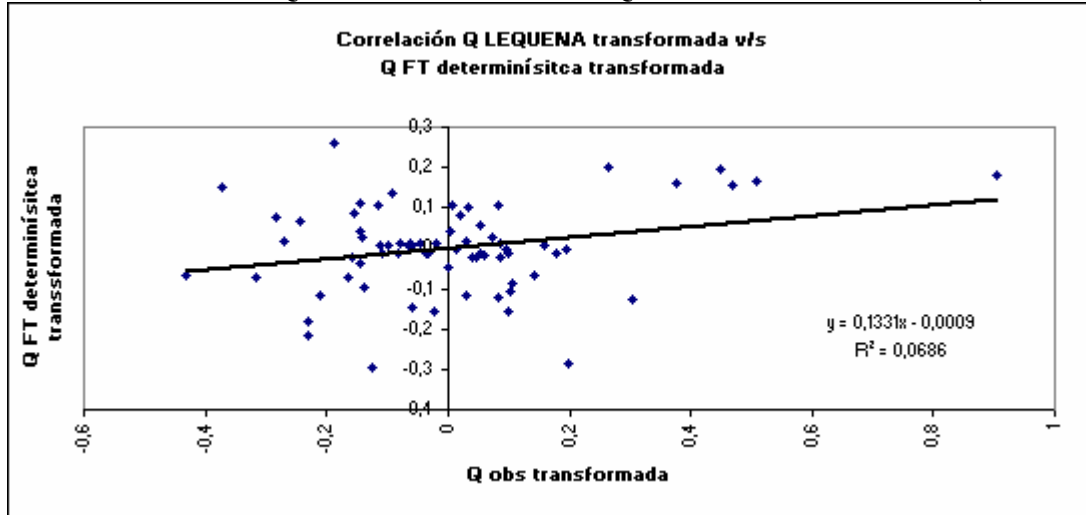


Gráfico 5.27 Correlación Q histórica transformada v/s Q determinística transformada (modelo FT)



En el Gráfico 5.27 se observa que no existe una buena correlación entre la serie de caudales observada transformada, y la serie equivalente obtenida con el modelo de función de transferencia, correspondiente a la parte determinística de la serie de caudales. En el Gráfico 5.26 tampoco se observa una buena coincidencia entre ambas series.

Por otra parte, se obtiene la serie η_t (serie ruido del modelo de Función de Transferencia) como la diferencia entre la serie de caudales observados transformados y la serie obtenida con la parte determinística del modelos de función de transferencia (Ecuación 2.26), la cual también es presentada en el Anexo Digital 11, y cuyos estadísticos se presentan en la Tabla 5.14. En el Gráfico 5.28 es contrastada con la serie de caudales observados transformados, mientras que en el Gráfico 5.29 se presenta la correlación entre ambas series.

Tabla 5.14 Estadísticos serie η_t

PROM	0,00
DESV. ESTAND.	0,21
Coef. Asimet.	0,37
Curtosis	1,36
Valor Máx.	0,7
Valor Mín.	-0,5
VAR	0,05

Gráfico 5.28 Serie Q histórica transformada y η_t (serie de ruido modelo FT)

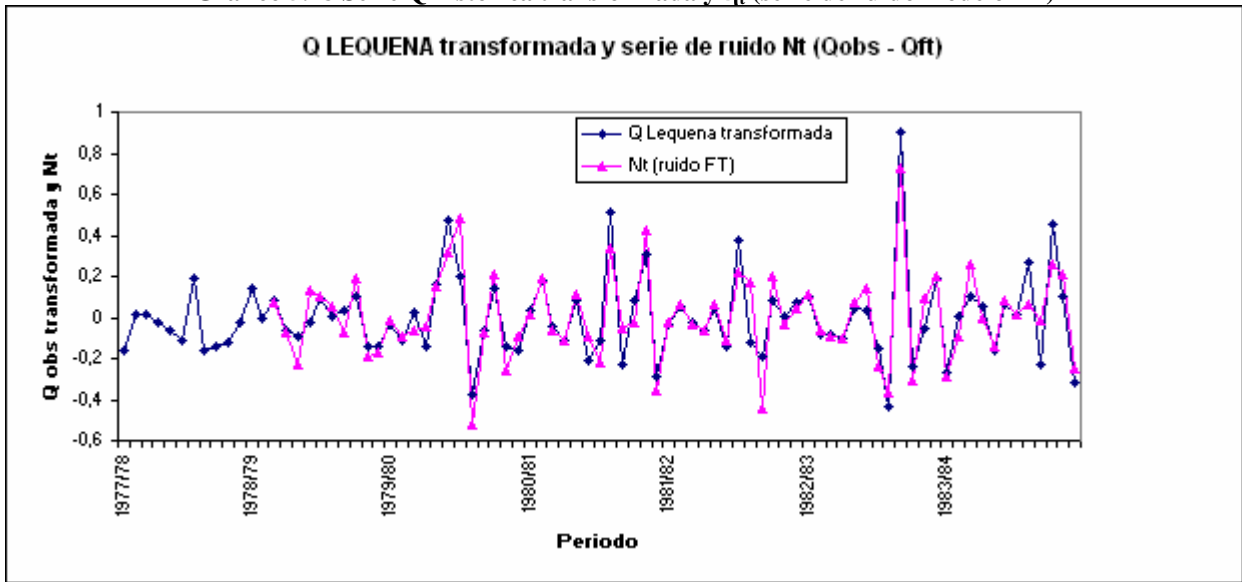
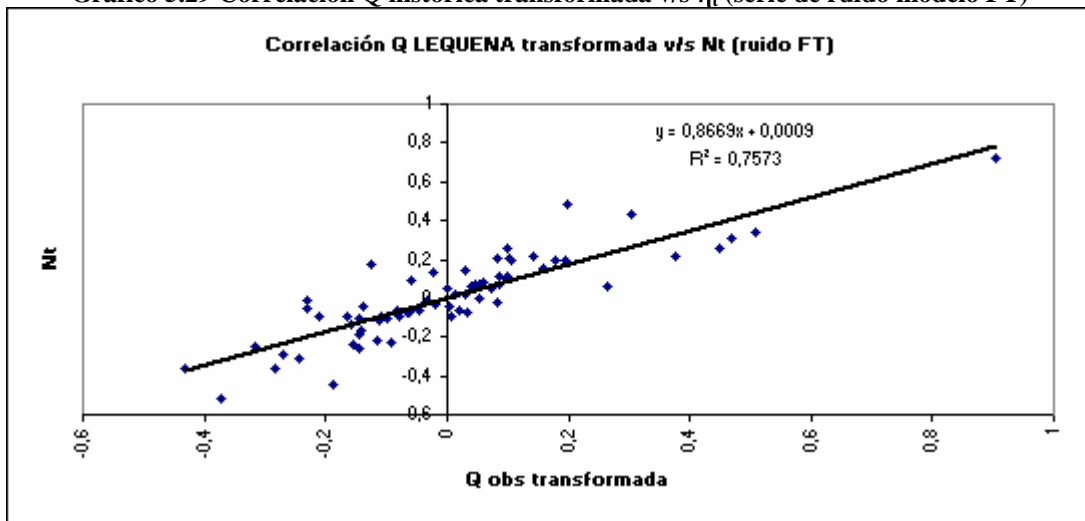


Gráfico 5.29 Correlación Q histórica transformada v/s η_t (serie de ruido modelo FT)



Se puede observar tanto en el Gráfico 5.28 como en el Gráfico 5.29 que la serie de ruido η_t presenta un muy buen ajuste respecto a la serie de caudales observada y transformada, lo cual se confirma con el valor del coeficiente de correlación lineal $r^2 = 0,76$.

Estos resultados estarían dando cuenta que el modelo de función de transferencia, en su parte determinística, no predice la serie observada. Además, si la serie de ruido η_t presenta un buen ajuste y una buena correlación con la serie observada, puede significar que la parte determinística del modelo es muy poco importante en cuanto a órdenes de magnitud. Esto se refleja en el orden de magnitud de los

parámetros ω_0 y ω_1 . Si se considera que la parte determinística del modelo es poco importante, entonces podría significar que el modelo de función de transferencia estaría definido principalmente por el modelo ARMA seguido por la serie de ruido η_t , cuyo resultado es presentado a continuación.

Los parámetros del modelo ARMA seguido por las serie η_t son presentados en la Tabla 5.15, con lo cual la forma de dicho modelo corresponde a la presentada en la Ecuación 5.1.

Tabla 5.15 parámetros modelo ARMA de serie de ruido η_t

ARMA (0,2)	
θ_1	0,54
θ_2	0,39

$$\eta_t = a_t - \theta_1 \cdot a_{t-1} - \theta_2 \cdot a_{t-2}$$

Ecuación 5.1

Con todos los resultados anteriores se conoce el modelo de función de transferencia – ruido que modela las series de precipitaciones y caudales observadas transformadas. La forma del modelo está dada por la Ecuación 5.2, y un resumen de sus parámetros es presentado en la Tabla 5.16.

$$Y_t = \omega_0 \cdot X_{t-b} + \omega_1 \cdot X_{t-b-1} + \alpha \cdot Pl_{t-j} + a_t - \theta_1 \cdot a_{t-1} - \theta_2 \cdot a_{t-2}$$

Ecuación 5.2

Tabla 5.16 Resumen de parámetros de FT - Ruido

MODELO FT Y MODELO RUIDO Nt					
MODELO FT (parte determinística)			MODELO de ruido Nt		
b = 8	r = 0	s = 1	ARMA (0,2)	p = 0	q = 2
$\omega_0 =$	0,109			Param.	Asympt. Std.Err.
$\omega_1 =$	0,047		q(1)	0,54	0,14
$\alpha =$	0		q(2)	0,39	0,14

Como se puede observar en la Ecuación 5.1 y en la Tabla 5.16, la componente de ruido del modelo de función de transferencia (modelo ARMA), no presenta términos autorregresivos ($p = 0$). Esto significa que la serie η_t sólo depende de los valores de la serie de ruido blanco a_t . Este hecho, sumado a lo comentado con anterioridad, respecto a que el modelo de función de transferencia estaría siendo representado principalmente por el modelo de ruido, significaría que las series de caudales transformadas estarían siendo representadas principalmente por la serie de ruido blanco a_t , a través de este modelo de ruido, más que por la correspondiente serie transformada de precipitaciones. Esta situación, corresponde a

un caso particular, que ocurre para éste modelo de función de transferencia específico, por lo tanto, pudiera existir otra combinación de parámetros b , r y s , en la que la parte determinística del problema sí explicara en forma importante la serie de salida del modelo. Pensando en lo comentado en párrafos anteriores, otra combinación de esos parámetros puede corresponder a alguna cuyo valor de b sea igual a cero. Valor que se había descartado inicialmente, pero que puede ser reconsiderada para análisis posteriores. De momento, para el presente estudio, sólo se realizarán análisis para el modelo cuyos parámetros están representados en la Tabla 5.16.

Para validar el modelo representado por los parámetros de la Tabla 5.16, se sigue el procedimiento detallado en la sección 4.4, en el cual, la serie simulada de caudales transformada (\tilde{Y}_t) se calcula a partir de la adición de la serie de caudales transformada determinística, obtenida por el modelo de función de transferencia en su parte determinística, y la serie de ruido $\tilde{\eta}_t$. Ésta última, corresponde a la serie de ruido calculada con el modelo de ruido (modelo ARMA), pero suponiendo inicialmente $a_t = 0$. Luego, se calcula a_t como la diferencia entre la serie observada y la serie simulada (Ecuación 4.7). Luego, continuando con la metodología definida en la sección 4.4, la serie de caudal simulada transformada (\tilde{Y}_t) es comparada con la serie de caudales observada transformada (Y_t). En el Gráfico 5.30 se presentan ambas series, mientras que en el Gráfico 5.31 se presenta su correlación.

Gráfico 5.30 Serie Q histórica transformada y Q simulada transformada

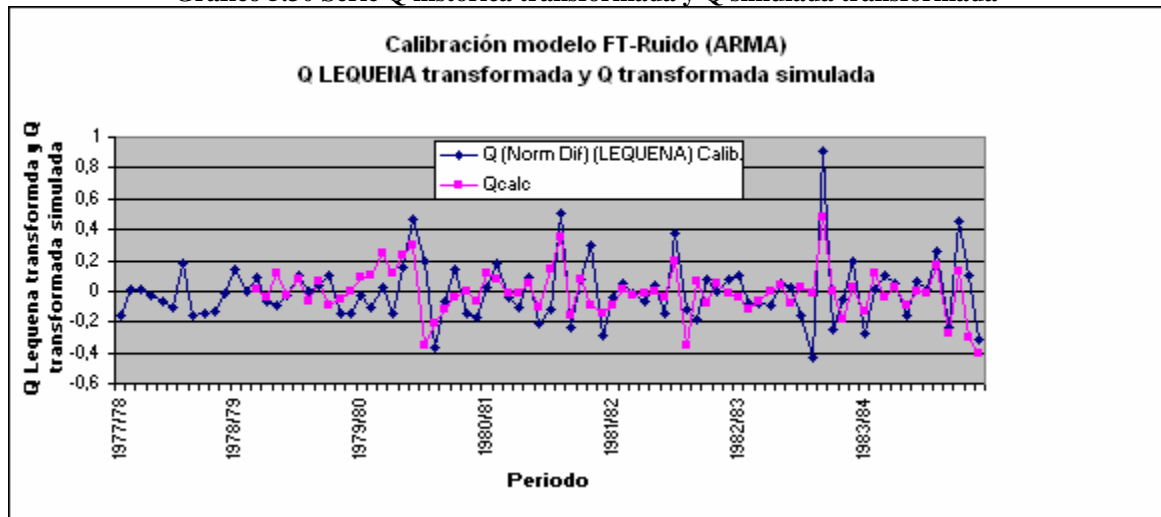
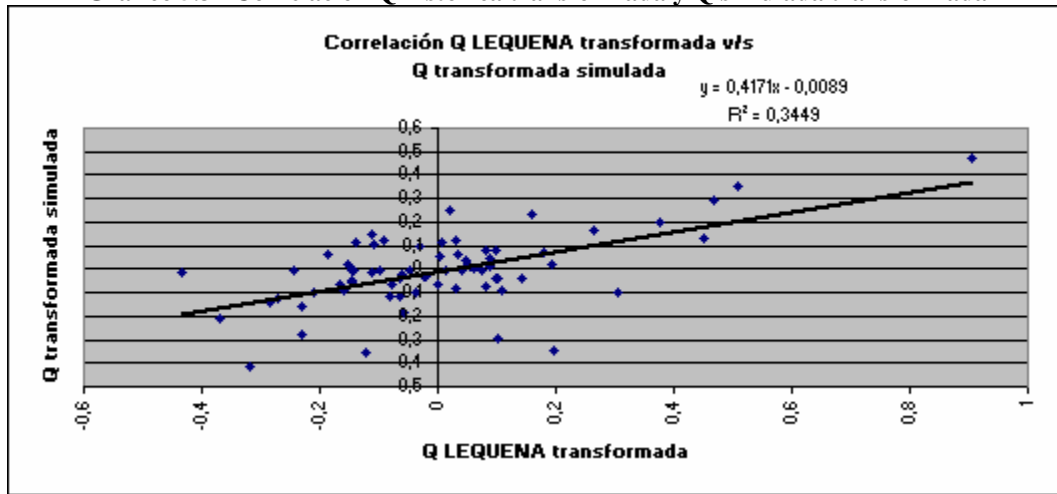


Gráfico 5.31 Correlación Q histórica transformada y Q simulada transformada



En el Gráfico 5.31 se observa cierta tendencia lineal entre la serie de caudales histórica transformada y la serie simulada transformada, pero esa tendencia no es suficiente para poder afirmar que ambas series presentan una buena correlación, dado el valor del coeficiente de correlación ($r^2 = 0,35$). Por lo tanto, se concluye que el modelo no reproduce de manera esperable la serie de caudales históricas transformadas.

Por otro lado, se calcula el valor del coeficiente de Nash- Sutcliffe, al comparar la serie simulada transformada y la serie histórica transformada. El valor obtenido es 0,33. Debido a que el valor es positivo, se considera que la eficiencia del modelo es aceptable, aun que no cercano al óptimo, lo que ocurre cuando el coeficiente es cercano a 1.0. A pesar que según éste último criterio, la eficiencia del modelo se puede considerar aceptable, dado el resultado presentado en el Gráfico 5.31, se considera que el modelo no reproduce de manera aceptable las series caudales observadas transformada, a través de las series simuladas transformadas. A pesar de esto, se continúan analizando el modelo en las siguientes etapas.

5.4. Validación del modelo de Función de Transferencia - Ruido

Siguiendo la metodología descrita en la sección 4.4, se debe obtener la serie simulada para la validación. Para ello, se toma como valores iniciales de la serie a_i de ésta etapa, los últimos valores de la misma serie, pero calculados en la etapa de calibración, correspondientes a los valores en tiempos

anteriores de la serie a_t de validación. La serie resultante es presentada en el Gráfico 5.32. En el Gráfico 5.33, en tanto, se presenta la correlación de la serie simulada, respecto a la serie observada transformada.

Gráfico 5.32

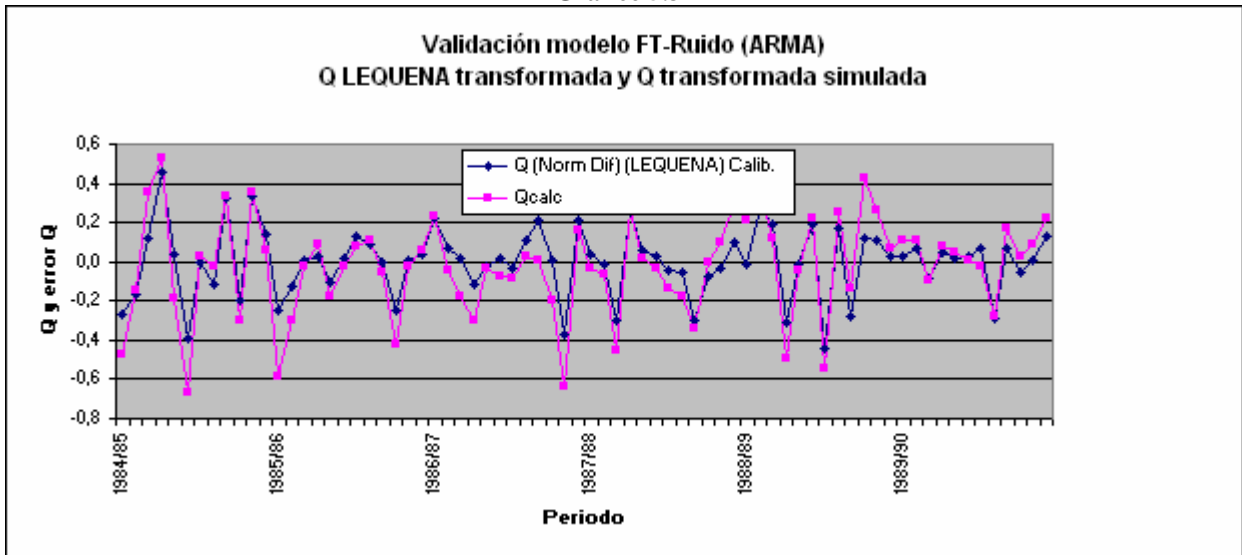
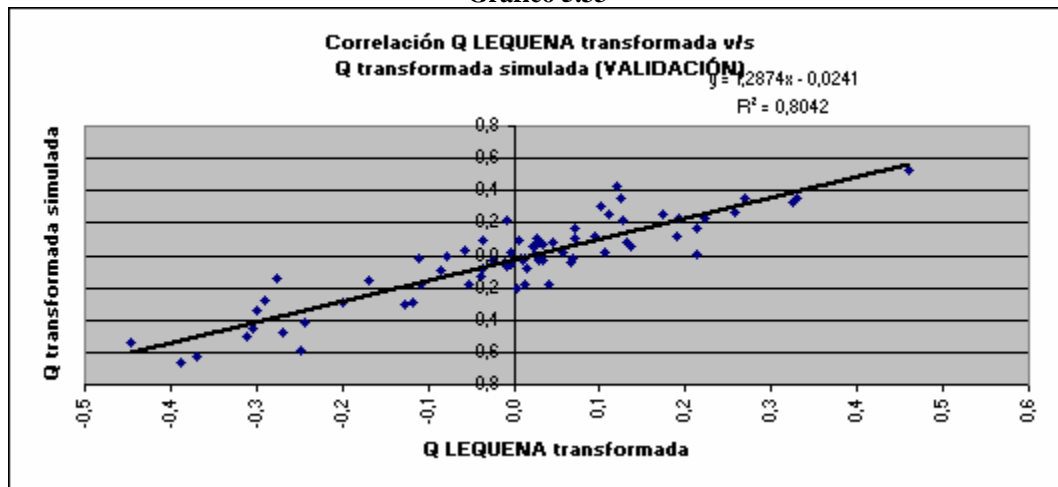


Gráfico 5.33



En el Gráfico 5.33 se observa que las series de caudales simulada transformada y simulada observada presentan un buen ajuste, reflejado en el valor del coeficiente de correlación. ($r^2 = 0,80$). Luego, se realiza la misma validación, pero esta vez se asignan valores iniciales de la serie a_t iguales a cero. En este caso el ajuste de ambas series y su correlación, presenta malos resultados ($r^2 = 0,14$).

Comparando los resultados de ambas validaciones, se puede decir que la diferencia entre ellos indicaría que las series simuladas dependen de los valores iniciales escogidos para la serie de ruido blanco

a. En el caso que la serie sea suficientemente larga, los valores simulados deberían comenzar a independizarse del efecto producido por dichos valores iniciales. Esto podría indicar que la cantidad de años con los cuales se trabaja, 6 años correspondientes al periodo común entre las series de precipitaciones PRECIS, de precipitaciones históricas y de caudales, es un periodo más corto de lo necesario para independizarse del efecto de los valores iniciales.

5.5. Validación del modelo de Función de Transferencia para la serie PRECIS corregida (BL)

Esta validación, se realiza para todo el periodo común definido por la serie de precipitaciones PRECIS (BL) transformada y las series históricas de precipitación y caudal, empleando la metodología definida en la sección 4.5. Debido a que la correspondencia de las series PRECIS con las series históricas de precipitaciones existe sólo para igual probabilidad de excedencia, ambas series son comparadas mediante sus curvas de duración. Estas curvas son presentadas en el Gráfico 5.34, en tanto en el Gráfico 5.35 se muestra la correlación entre ambas series.

Gráfico 5.34 CD serie transformada de Q observados y Q simulada con pp PRECIS (BL)

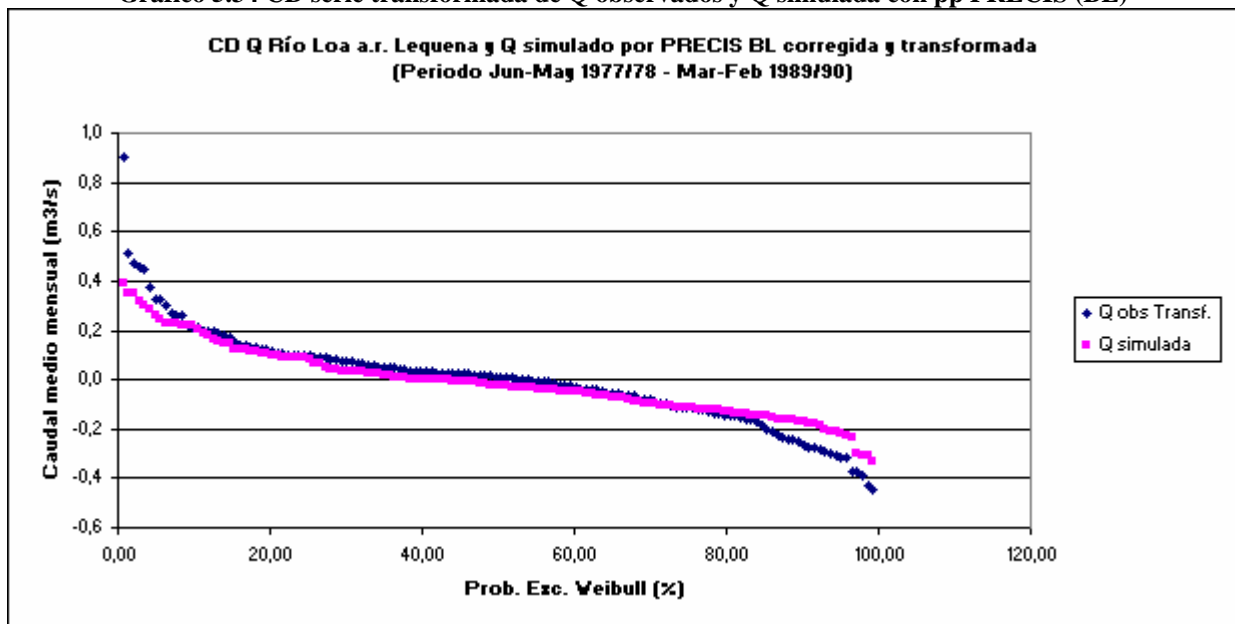
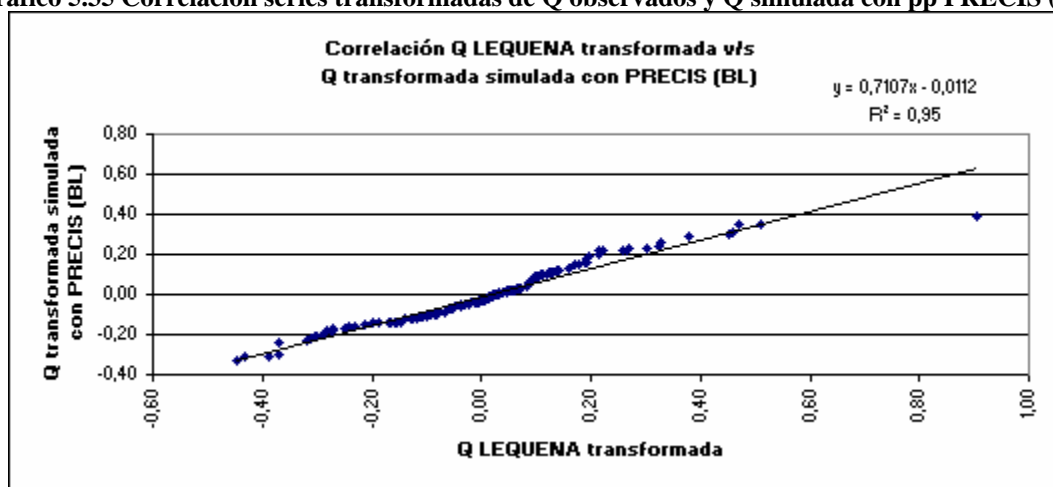


Gráfico 5.35 Correlación series transformadas de Q observados y Q simulada con pp PRECIS (BL)



En el Gráfico 5.34 se puede observar que para valores medios de probabilidades de excedencia, los valores de caudales son muy similares en ambas curvas de duración, pero que para valores extremos (máximos y mínimos), la serie simulada presenta una variabilidad menor que los valores de caudales observados correspondientes. Es decir, para valores de caudales altos, la serie simulada presenta valores menores, y para caudales bajos, esta serie presenta valores mayores a los de la serie observada transformada. Observando además los resultados del Gráfico 5.35, se puede apreciar que estos presentan una buena correlación. En relación a esto, se debe notar que es esperable que las correlaciones de las series de una curva de duración presenten poca dispersión de puntos a lo largo de una línea de tendencia debido a que sus valores se encuentran ordenados de mayor a menor, debido a lo cual, en este caso un buen ajuste correspondería a aquel que presente pocos cambios de pendiente en la recta. En este caso, se distinguen algunos cambios de pendiente en los cuales podrían diferenciarse tres zonas, pero se pueden considerar poco importantes debido a que se mantienen cercanos a la línea recta con la que se ajusta dichos valores. Sólo en el tramo de valores mayores se observa una tendencia lineal un poco diferente al resto.

En síntesis, de lo observado en el Gráfico 5.34 y el Gráfico 5.35 se puede concluir que a pesar de las diferencias en los valores extremos de las series, para los valores medios, las curvas de variación estacional presentan un buen ajuste. Por lo tanto, se puede considerar que el modelo representa bien a los valores medios.

5.6. Proyección de series de caudales futuras transformadas

Siguiendo la metodología descrita en la sección 4.6, se genera una serie aleatoria a_t , que cumpla las condiciones de una serie de ruido blanco a_t obtenida en la etapa de calibración del modelo de función de transferencia. Posteriormente, la serie a_t , en conjunto con la serie transformadas de precipitaciones PRECIS, de periodo futuro A2 (corregida y transformada), corresponden a las variables de entrada del modelo de función de transferencia para la obtención de una serie de caudales futura transformada, asociada al escenario climático representado por la serie PRECIS A2.

Una vez obtenida esta serie transformada de caudales, se compara con la serie transformada de caudales observados mediante sus respectivas curvas de duración. La comparación ambas curvas de duración se encuentran en el Gráfico 5.36, en el cual, la curva de duración de la serie futura de caudales fue calculada para el periodo completo de la serie, descartando los primeros datos debido al requerimiento del modelo de función de transferencia, en cuanto a valores iniciales de precipitaciones en tiempos anteriores. En el Gráfico 5.37 se presentan las mismas curvas de duración, pero seleccionando sólo un tramo del periodo total de la serie futura proyectada, de manera que ambas curvas de duración representen un periodo equivalente, en cuanto a cantidad de meses.

Gráfico 5.36 CD Serie Q transformada observada (Periodo Jun-May 1978/79-1989/90) y Q transformada futura (A2) (Periodo Jun-May 1972/73-2099/100)

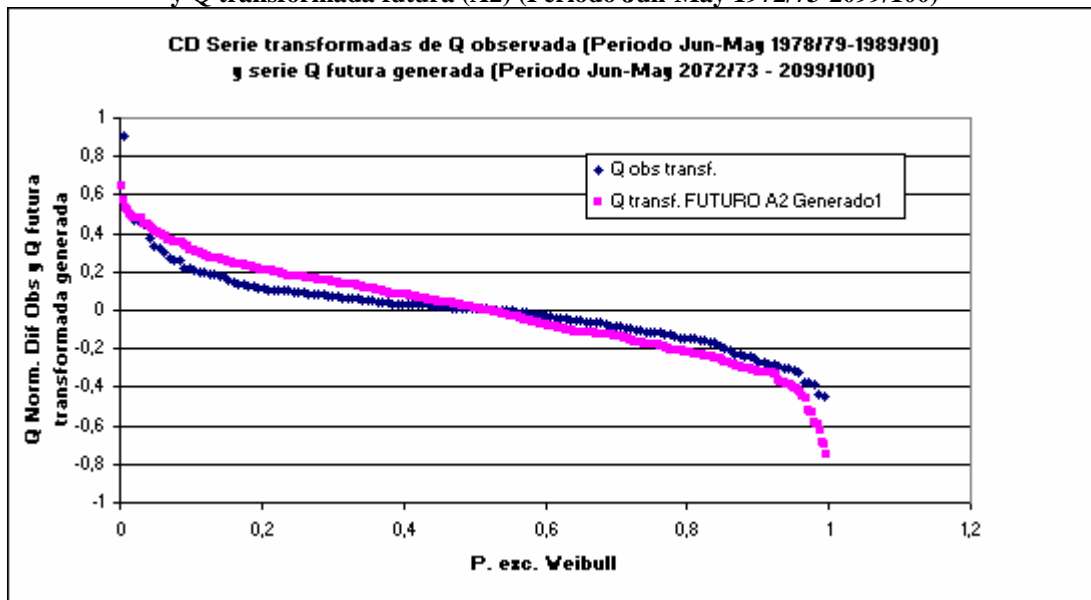
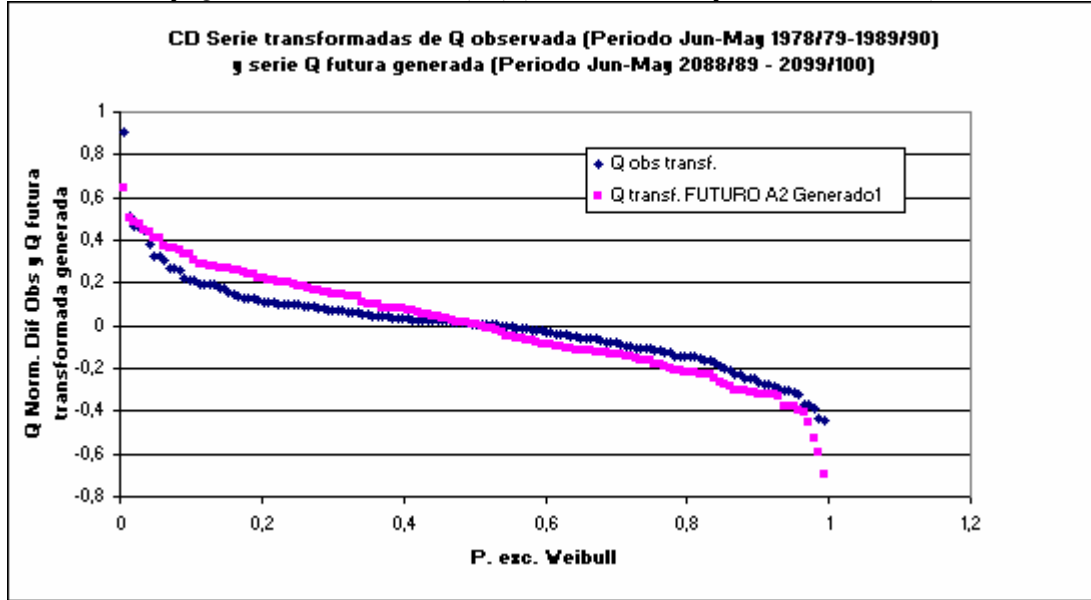


Gráfico 5.37 CD Serie Q transformada observada (Periodo Jun-May 1978/79-1989/90)
y Q transformada futura (A2) (Periodo Jun-May 2088/89-2099/100)



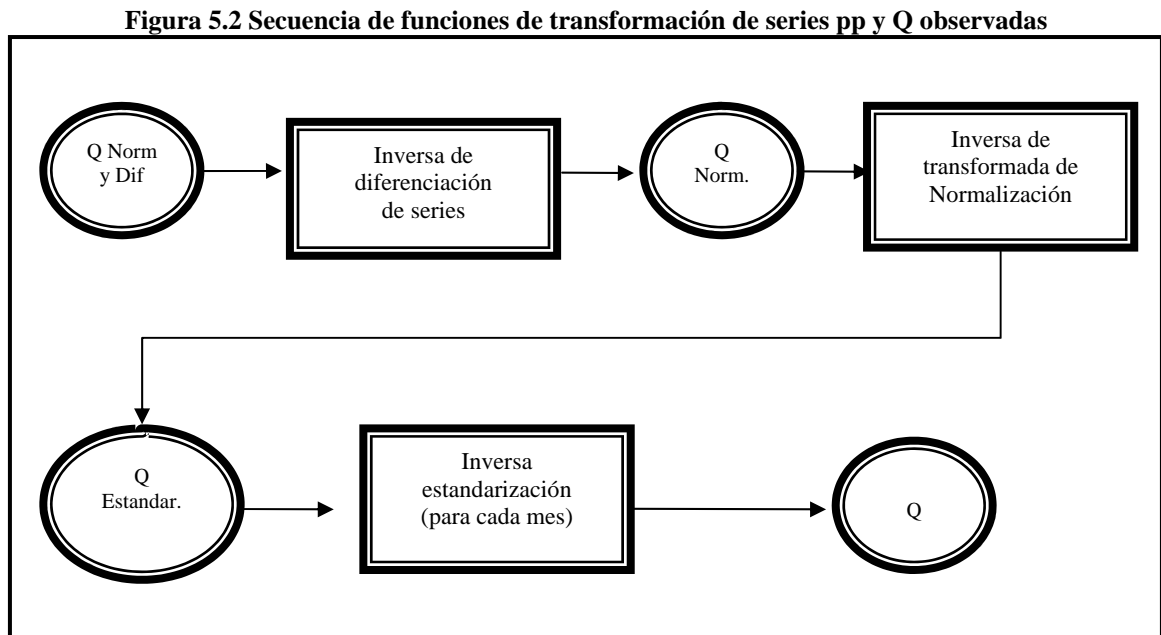
En primero lugar, se puede observar en el Gráfico 5.36 y el Gráfico 5.37, que la relación entre las curvas de duración de la serie futura y la serie observada se conserva a pesar que el periodo de tiempo considerado para las series futuras es diferente en los dos gráficos. En ambos casos se observa que para ambas curvas se cruzan en un valor de probabilidad de excedencia aproximadamente igual 50%. Para valores de probabilidad de excedencia menor (caudales transformados son mayores), la serie futura presenta valores levemente mayores, y en el caso contrario, para caudales transformados menores, la serie observada presenta caudales levemente mayores.

También se puede observar que en ambos casos, la serie futura presenta una variabilidad de valores extremos levemente mayor a la que presenta la serie de caudales transformada observada. Esto corresponde a un comportamiento opuesto a lo que sucede con la curva de duración de la serie de caudales simulados a partir de las series de precipitaciones PRECIS BL (Gráfico 5.34).

De lo descrito, resulta difícil establecer un comportamiento común entre los casos de caudales transformados de periodo futuro y caudales transformados simulados con la serie PRECIS BL. Sí tienen en común, el hecho de que en ninguna de las dos series la curva de duración es explícitamente mayor o menor que la curva de duración de la serie transformada de caudales observados, sino que presentan ciertos rangos de valores que son mayores, otros menores y otros similares, pero no coinciden en un criterio común sobre como se dan esas diferencias.

5.7. Obtención de series futuras de caudales sin transformadas

Con los resultados anteriores, se comienza a aplicar las funciones inversas de las transformadas aplicadas a las series de precipitaciones, en orden inverso a como fueron aplicadas, de manera de obtener una proyección de caudales futuros. Con esto, se tiene que la secuencia de aplicación de inversas es la presentada en la Figura 5.2.



De estas funciones, sólo la inversa de la transformada para la normalización se aplica en forma directa. Las otras dos, requieren la suposición de valores iniciales.

En el caso de la inversa de la diferenciación, se requirió definir un valor inicial para el primer mes de la serie, a partir de los cuales se calculan los demás. Debido a que el valor de este parámetro determina los valores de toda la serie de igual manera, resulta importante la elección de éste. Para que esta elección no fuera arbitraria, se decide escogerlo a partir de alguna relación entre la serie de caudales diferenciada y la serie de caudales normalizada, o valores u estadísticos de ellas. En este caso, se decidió escoger un valor tal, que conserve la relación entre las medias y las desviaciones estándar de la serie observada de caudales transformada hasta la etapa de diferenciación, y la serie observada de caudales transformada hasta la etapa de normalización. La relación entre las medias se establece mediante la diferencia entre ellas, mientras que la relación entre las desviaciones estándar se define a través de su cociente, donde, esta diferencia y este cociente, es lo que se busca conservar entre las respectivas series de caudales proyectadas para periodo futuro, en un escenario A2. Con esto se van asignando diferentes valores

iniciales, hasta lograr obtener los valores esperado para la media y/o la desviación estándar. Como no se pudo conservar al mismo tiempo la diferencia de medias y el cociente entre desviaciones estándar, se prefirió conservar la diferencia de medias, obteniéndose un resultado de cociente de desviaciones estándar cercano al que se quería conservar.

En el caso de la inversa de la estandarización mensual, se necesita como valores iniciales los promedios y desviaciones estándar de cada mes de la serie de caudales futuros sin transformar, ya que corresponden al factor de corrección, pero no se pueden conocer a priori porque corresponden a los estadísticos de la serie que se quiere obtener. Por lo tanto, éstos valores se estimaron bajo el mismo supuesto definido para la función inversa a la diferenciación, según el cual, para la serie de caudales observada, la diferencia entre las respectivas medias mensuales de la serie sin transformadas y la serie estandarizada mensualmente, se conserva para las series de caudales futuras. Lo mismo se supone para las desviaciones estándar, pero suponiendo que se conservan los cocientes. Con esto, al conocer la diferencia entre medias de la serie sin transformar y la serie estandarizada mensualmente, es posible estimar un valor de la media y la desviación estándar de cada mes.

Finalmente, aplicando las funciones inversas en forma secuencial y considerando los supuestos antes descritos, se obtiene la serie de caudales sin transformada para periodo futuro A2. En el Gráfico 5.38 se presenta una comparación entre las curvas de duración de esta serie y las serie de caudales observados en la estación Lequena (sin transformar) para el periodo completo de ambas series. Además, el Gráfico 5.39 se presenta el mismo gráfico anterior, pero considerando periodos con una cantidad de años equivalentes en ambas series, mientras que, los resultados obtenidos en las diferentes etapas de la aplicación de funciones inversas se encuentran en el Anexo Digital 15.

En primero lugar, se debe hacer notar que no se observan mayores diferencias en los resultados de la curva de duración de la serie de caudales futura A2 al considerar diferentes periodos, según lo presentado en el Gráfico 5.38 y el Gráfico 5.39. Por lo tanto, los comentarios siguientes corresponden indistintamente a cualquiera de los resultados de los dos gráficos. En estos gráficos se observa que la relación entre la curva de duración de la serie de caudales futuros y la correspondiente a la serie de caudales observados, es muy similar a la relación entre las curvas de las mismas series pero para el caso en que se encuentran transformadas.

Gráfico 5.38

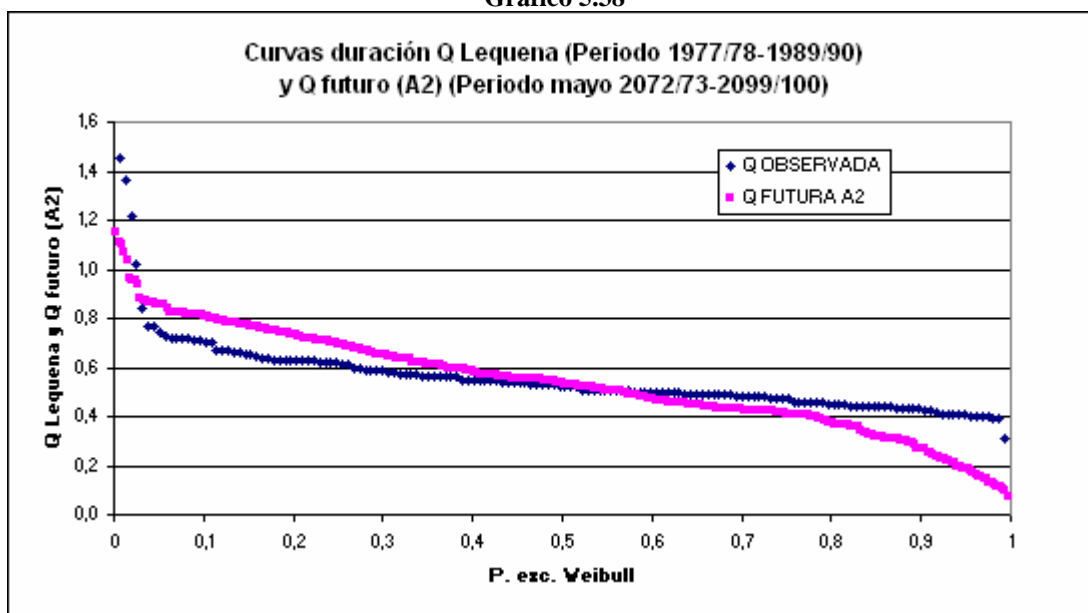
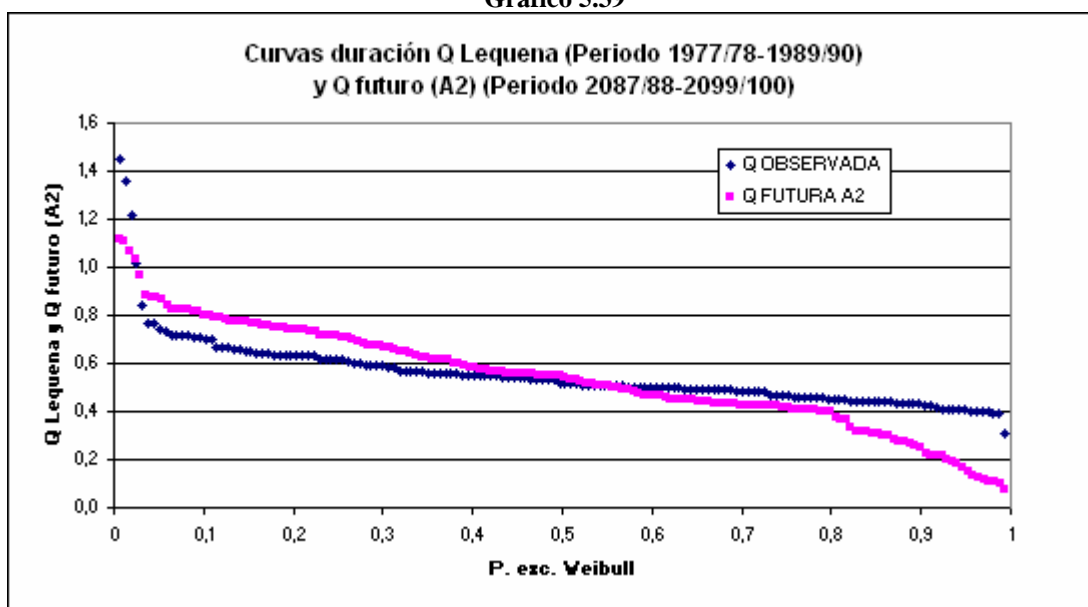


Gráfico 5.39

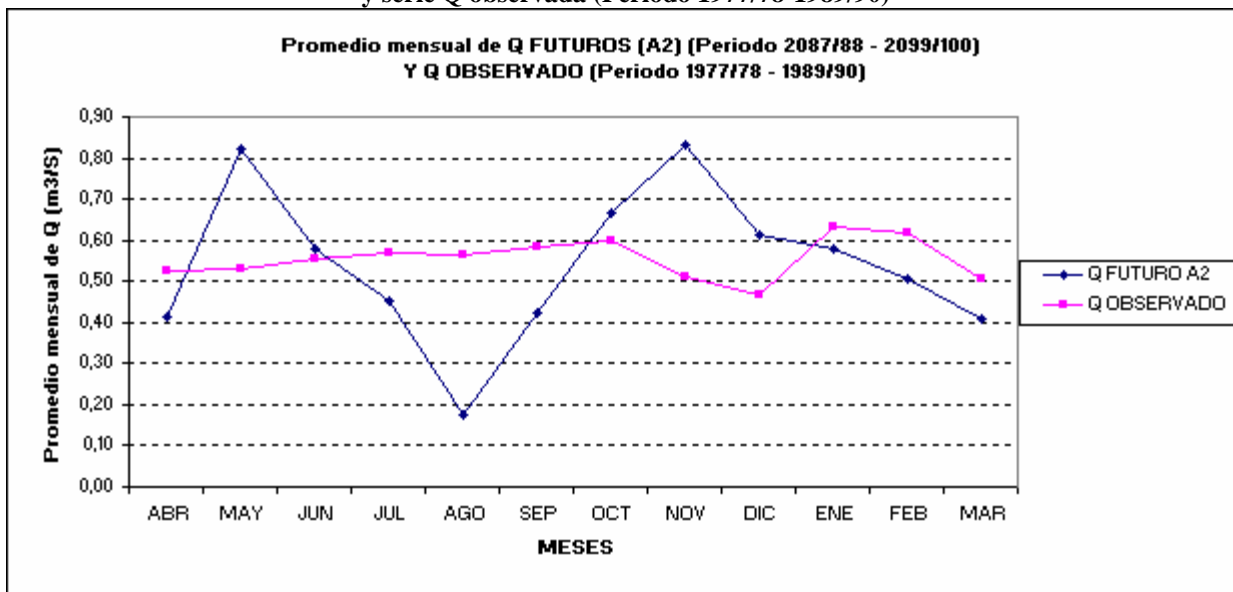


Si se quiere comparar este resultado con las curvas de duración de las series de las precipitaciones correspondientes a ellas (en cuanto a periodo y origen de la serie), estas corresponderían a las presentadas en el Gráfico 5.13 y Gráfico 5.14, cuyos valores corresponden a las series de precipitación Lequena y PRECIS A2 corregida. Debido a que en las curvas de duración de precipitaciones no se establece un comportamiento claro y definido como ya se comentó en la sección correspondiente, resulta difícil establecer una relación entre los valores de la curva de duración de las precipitaciones y de los caudales

resultantes. Si se puede decir que los resultados son coherentes en cuanto a que, las curvas de duración de las series PRECIS (precipitaciones y proyecciones de caudales) en ciertos tramos son menores a las correspondientes curvas de las series observadas, y en otros mayores, pero no ocurre que los valores de las series PRECIS (para igual probabilidad de excedencia) sean claramente mayores o menores, en su totalidad respecto a las series observadas.

Para observar que sucede a nivel de distribución del ciclo anual, en el Gráfico 5.40 se presentan los promedios mensuales para las series de caudales futuros A2 y observados. Se puede notar claramente que las series futuras presentan mayor variabilidad de valores de caudales observados, tal como se aprecia en las curvas de duración respectivas, pero en el Gráfico 5.40 se observa que no responden a una buena distribución de los caudales en el ciclo anual, dado que los valores máximos y mínimos no corresponden al comportamiento de la serie de caudales observados. Esta no correspondencia se produce tanto a nivel de distribución de los caudales máximos y mínimos, como en las magnitudes de éstos últimos.

Gráfico 5.40 Promedio mensual serie Q futuros (A2) (Periodo 2087/88-2099/100) y serie Q observada (Periodo 1977/78-1989/90)



Además de lo anterior, en la Tabla 5.17 se presentan algunos estadísticos de la serie de caudales futuros y la serie observada, en la cual se puede observar que el valor promedio de ambas series es muy similar (con una diferencia menor a 5%), donde el valor promedio de la serie futura es levemente mayor a la otra. El valor de la desviación estándar es mayor en la serie de caudales, lo cual da cuenta de la mayor variabilidad de valores que presenta respecto a la serie de caudales observados.

Tabla 5.17 Estadísticos series Q futura (A2) Q observada (BL)

	Q FUTURO A2	Q OBSERVADAS
	m3/s	m3/s
PROM	0,54	0,56
DESV. ESTAND.	0,21	0,15
Coef. Asimet.	0,11	3,10
Curtosis	-0,16	14,22
Valor Máx.	1,1	1,5
Valor Mín.	0,1	0,3
VAR	0,05	0,02

Considerando los comentarios realizados en relación a la serie futura obtenida, se puede decir que en forma general su resultado es relativamente confiable en cuanto a que se obtuvieron valores positivos, algo coherente a lo esperado para valores de caudales, pero no ocurre así para el valor mínimo, correspondiente a 300 l/s, debido a que es muy pequeño como para considerarlo un valor aceptable. Los resultados también son coherentes en lo relativo a las curvas de duración de caudales y de precipitaciones, según lo ya comentado en las secciones anteriores, en las cuales se nota el hecho que, para ciertas probabilidades de excedencia una serie presenta valores mayores y en otra ocurre lo contrario, teniendo además valores similares, lo cual resulta coherente con el hecho de que el valor promedio de ambas series sea similar. Pero si se considera que no existe una buena distribución a nivel anual, con valores máximos y mínimos mucho más lejanos de los valores medios que la serie observada, se considera que el desglose de los resultados a nivel mensual no es coherente a lo esperado, pero sería aun si se intentará considerar la validez de los valores por sí sólo.

En síntesis, a nivel de valores promedio, se puede apreciar cierta coherencia de los valores obtenidos en la serie de caudales futura, pero si se requiere analizar el ciclo anual, o detalles mayores, los resultados no serían válidos.

6. Conclusiones

Respecto a la serie de caudales obtenida y lo analizado en la sección 5.7, se concluye que esta serie se puede considerar coherente en cuanto a la similitud de su valor promedio y el respectivo valor de la serie observada, comparadas con la semejanza de las curvas de duración de las respectivas series de precipitaciones. Sin embargo, la serie de precipitaciones presenta varios problemas. Uno de ellos corresponde a la distribución a nivel anual, aspecto que sí fue corregido de manera aceptable en las series de precipitaciones PRECIS BL, pero que en la serie A2 algunos meses del periodo de invierno presentaban valores promedio semejantes a los meses de verano (Gráfico 5.16) situación que no se espera ocurra así, y que más bien se asocia a un error de corrección.

Otro problema asociado a la mala distribución de valores del ciclo anual, es la falta de coherencia entre la serie de caudales futura resultante y el valor de la serie de precipitaciones PRECIS empleada como variable de entrada al modelo, precisamente debido a que la serie PRECIS A2 presenta una distribución de valores en el año muy diferente a lo que ocurre en el periodo de línea de base para las precipitaciones de la estación Lequena.

Además, también en relación a la distribución del ciclo anual, se observa que las magnitudes máximas y mínimas exceden los valores extremos de la serie de caudales observada con diferencias de magnitud bastante grandes en relación a diferencia entre el máximo y el mínimo que presenta la serie de caudales observados. (Aproximadamente $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ es la diferencia entre máximo y mínimo de la serie de caudales observados, mientras que los valores promedios de la serie futura exceden a la serie observada en $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ en el caso de valores máximos, y en $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ en el caso de valores mínimos, según Gráfico 5.40). Esta excedencia en la proyección de valores extremos, no se justifica en ningún caso según los resultados de la curva de duración de la serie de precipitaciones PRECIS A2 (Gráfico 5.13 y Gráfico 5.14), debido a que estas son muy semejantes a la curva de duración de la serie de precipitaciones Lequena, incluso para los valores máximos y mínimos. La única excepción correspondería la diferencia entre valores mínimos, para igual probabilidad de excedencia, en el Gráfico 5.13. Sin embargo, los resultados de la validación del modelo de función de transferencia con el cual se trabajó para las series PRECIS indican que el modelo reproduce de buena manera los valores de los caudales medios, pero no los valores extremos (Sección 5.5). Esto explicaría los problemas presentados en cuanto a las magnitudes de los resultados máximos y mínimos.

Intentando encontrar una posible causa al problema de la poca representatividad en la distribución del ciclo anual de los valores promedio mensuales de los caudales futuros proyectados, se pueden pensar en dos hipótesis. La primera y la más directa, tiene relación con el tipo de modelo de función de transferencia empleado, en el sentido que en el presente estudio no fueron contempladas componentes estacionales dentro del modelo. Éstas, corresponden a ponderadores los cuales afectan a los valores de la serie con un desfase constante. Es decir, para el caso del presente estudio, estos ponderadores estacionales estarían asociados a un desfase igual a 12 de manera que afectan valores de uno mismo mes, pudiendo existir 12 ponderadores diferentes, uno para cada mes.

La segunda hipótesis que intentaría explicar los problemas en la distribución del ciclo anual tiene relación con una posible incompatibilidad entre los modelos de función de transferencia y el uso de series PRECIS como variables de entrada. En las series PRECIS hay correspondencia estadística, no cronológica con las series observadas, y el modelo de función de transferencia necesita entradas ordenadas en el tiempo.

Referencias Bibliográficas

ACEITUNO, Patricio. Elementos del clima en el altiplano Sudamericano. Revista Geofísica. Enero –Junio 1996. [en línea]

<[http://www.aic.cl/pdf/1017%20DGA_Q%20ecol%20aic%202004%20\(Gonzalo%20Benavides\).pdf](http://www.aic.cl/pdf/1017%20DGA_Q%20ecol%20aic%202004%20(Gonzalo%20Benavides).pdf)> (consulta: 04 Septiembre 2010)

CADE-IDEPE. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca río Loa. Dirección General de Aguas. 2004

JUAN FERNÁNDEZ, Aranzazu de. Modelos de Función de Transferencia. 2006 [en línea]

< http://www.uam.es/personal_pdi/economicas/arantxa/funcion_transferencia.pdf> (consulta: 23 Septiembre 2008)

DGA. Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos. Santiago, Chile. Dirección General de Aguas.2002

DGA. Evaluación de los Recursos Hídricos. Sectores Calama y Llalqui. Cuenca del río Loa. Chile. Mayo 2003

DGA. Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del río Loa. Santiago, Chile. 2005

DGF Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI”. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2006

ESPILDORA, Basilio; Brown, Ernesto; Cabrera Guillermo; Isensee, Pablo. Elementos de hidrología. Centro de Recurso Hidráulicos, Universidad de Chile,1975.

ESPILDORA, Basilio; Brown, Ernesto; Castillo, Jorge. Estudio hidrológicoy operacional del sistema de embalse Chonchi – Río Loa. Dirección de riego, Ministerio de Obras Publicas, 1979.V1

LEDERMANN Araneda, Jimena Eliana. Efecto del cambio climático global en el diseño de un embalse de riego. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2001

Moliner, Luis. ¿Y si los datos no siguen una distribución normal?... Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión. Liga Española para la lucha contra la Hipertensión Arterial. 2003. [en línea] <<http://www.seh-lilha.org/pdf/noparame.pdf>> (consulta: 06 Agosto 2008)

NAIM Pajundakis, Abdón Darvish. Un modelo estocástico de simulación de caudales medios mensuales. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 1989.

RIESTRA, Francisco; Benavides, Gonzalo. Caudales ecológicos: Perspectivas desde la Dirección General de Aguas. [en línea]
<[http://www.aic.cl/pdf/1017%20DGA_Q%20ecol%20aic%202004%20\(Gonzalo%20Benavides\).pdf](http://www.aic.cl/pdf/1017%20DGA_Q%20ecol%20aic%202004%20(Gonzalo%20Benavides).pdf)> (Consulta: 15 Septiembre 2009)

SALAS Cruchaga., Juan Pablo. Selección de modelos ARIMA para series de tiempo hidrológicas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 1983.

SALAS, J.D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., Lane, W.L. Applied Modelling of Hidrologic Time Series. Water Resources Center Archives, University of California, Los Ángeles, Water Resources Publications, 1980.

SANDOVAL Calderón, Germán. Simulación del proceso lluvia-escorrentía a través de modelos de Función de Transferencia. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 1988

UNESCO. El agua, una responsabilidad compartida, 2do informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. Sección 2: Unos sistemas naturales cambiantes. 2006 [en línea]

<http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr2/pdf/wwdr2_section_2_es.pdf> (consulta: 03 Abril 2008)

USGS. HydroSHEDS [en línea] < <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/>> (consulta: 01 Septiembre 2008)