



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA

ESCUELA DE POSTGRADO
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

“USO DE LÓGICA DIFUSA PARA LA ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RIESGO Y
FALLA DE OBRAS HIDRÁULICAS EN TIEMPO REAL”

ARNALDO AUGUSTO SANTANDER HORTA

| | |
|----------------------|--------------------|
| TUTOR | Sra. XIMENA VARGAS |
| PROFESOR DE COMISIÓN | Sr. ERNESTO BROWN |
| PROFESOR DE COMISIÓN | Sr. EDUARDO VARAS |

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA,
MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

SANTIAGO, CHILE
ABRIL 2004

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA

ESCUELA DE POSTGRADO
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

“USO DE LÓGICA DIFUSA PARA LA ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RIESGO Y
FALLA DE OBRAS HIDRÁULICAS EN TIEMPO REAL”

ARNALDO AUGUSTO SANTANDER HORTA

CALIFICACIONES

| Comisión | Nombre | Firma | Nota |
|-------------------------|--------------------|--------------|-------------|
| Tutor | Sra. Ximena Vargas | | |
| Profesor de Comisión | Sr. Ernesto Brown | | |
| Profesor de Comisión | Sr. Eduardo Varas | | |
| | Nota | | |

SANTIAGO, CHILE
2004

*Con afecto a mi Familia, Pareja y Amigos,
Quienes son el ingrediente exquisito e invaluable de mi Vida y Obra.....*

AGRADECIMIENTOS

El Autor agradece a la D.G.A. y al Fondo de Innovación del Ministerio de Obras Públicas de Chile por apoyar este estudio, a través de los datos entregados y el financiamiento otorgado al proyecto Índices de Riesgo de Inundación y Falla de Obras Hidráulicas en tiempo Real para la mitigación de efectos de temporales.

Se agradece la participación de mis amigos y/o compañeros Tesistas del programa de Magíster, Quienes con su ayuda, comentarios y discusiones han contribuido a enriquecer importantemente esta obra.

TABLA DE CONTENIDOS

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | <u>INTRODUCCIÓN</u> | 1 |
| 1.1 | MOTIVACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TESIS | 1 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 2 |
| 1.3 | METODOLOGÍA GENERAL DE TRABAJO | 3 |
| 1.3.1 | RECOPILACIÓN BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 1.3.2 | METODOLOGÍA DE ANÁLISIS | 3 |
| 1.3.3 | REVISIÓN Y RECOPILACIÓN DE ANTECEDENTES | 4 |
| 1.3.4 | ELECCIÓN DE LA “CUENCA PILOTO” | 5 |
| 1.3.5 | MODELACIÓN DE LOS ELEMENTOS BAJO RIESGO PERTENECIENTES A LA “CUENCA PILOTO” | 5 |
| 1.3.6 | IMPLEMENTACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO | 6 |
| 1.3.7 | DISEÑO DEL DESPLIEGUE DEL SISTEMA DE ALERTA EN TIEMPO REAL (SATR) | 6 |
| 1.3.8 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 6 |
| 2 | <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> | 7 |
| 2.1 | CONCEPTOS BÁSICOS DE LÓGICA DIFUSA | 7 |
| 2.1.1 | DEFINICIONES | 7 |
| 2.1.2 | FIS DE TIPO MANDAMI | 16 |
| 2.1.3 | FIS DE TIPO SUGENO | 18 |
| 2.2 | MODELOS LINEALES DE PRONÓSTICO DE CAUDALES | 19 |
| 2.3 | CALIBRACIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS (G.A.) | 21 |
| 2.4 | CONCEPTOS GENERALES PARA LA DEFINICIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO | 23 |
| 3 | <u>METODOLOGÍA DE ANÁLISIS</u> | 27 |
| 3.1 | DEFINICIÓN DEL SATR Y CRITERIOS GENERALES | 27 |
| 3.1.1 | CRITERIOS DE FACTIBILIDAD DE MODELACIÓN DE LOS ELEMENTOS BAJO RIESGO | 27 |
| 3.1.2 | CRITERIOS DE ASIGNACIÓN DEL UMBRAL DE FALLA. | 28 |
| 3.2 | DEFINICIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO | 29 |
| 3.3 | USO DE LOS MODELOS LINEALES Y FIS PARA EL PRONÓSTICO DE CAUDALES | 32 |
| 3.3.1 | MODELOS LINEALES DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA EL PRONÓSTICO DE CAUDALES. | 33 |
| 3.3.2 | EMPLEO DE LOS FIS PARA EL PRONÓSTICO DE CAUDALES | 37 |
| 3.3.3 | CALIBRACIÓN DE LOS FIS (TIPO SUGENO) MEDIANTE EL USO DEL ALGORITMO GENÉTICO (G.A.) | 40 |
| 3.4 | USO DE LOS FIS PARA ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RIESGO AGREGADOS | 53 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4 | <u>CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</u> | 57 |
| 4.1 | ZONA DE ESTUDIO | 57 |
| 4.2 | RECOPILACIÓN Y PROCESO DE LA INFORMACIÓN BÁSICA | 61 |
| 4.2.1 | CATASTRO ZONAS AMAGADAS | 61 |
| 4.2.2 | SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS INCORPORABLES AL SATR | 62 |
| 4.2.3 | RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN FLUVIOMÉTRICA BASE | 64 |
| 4.2.4 | RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA BASE | 66 |
| 4.3 | CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORRENTÍA MENSUAL EN LAS CUENCAS MODELADAS | 69 |
| 4.3.1 | SUBCUENCAS PERTENECIENTES A LA CUENCA DEL RÍO MATAQUITO | 69 |
| 4.3.2 | SUBCUENCAS PERTENECIENTES A LA CUENCA DEL RÍO MAULE | 74 |
| 4.4 | CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS MODELADOS | 89 |
| 4.4.1 | HOYA DEL RÍO MATAQUITO | 89 |
| 4.4.2 | HOYA DEL RÍO MAULE | 99 |
| 4.4.3 | PARÁMETROS RELEVANTES DE LOS ELEMENTOS INCLUIDOS EN EL SATR | 108 |
| 4.5 | ELECCIÓN DE LA “CUENCA PILOTO” | 109 |
| 5 | <u>APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</u> | 111 |
| 5.1 | PRONÓSTICO DE CAUDALES EN LA CUENCA PILOTO | 111 |
| 5.1.1 | MODELOS LINEALES DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA EL PRONÓSTICO DE CAUDALES. | 111 |
| 5.1.2 | EMPLEO DE LOS FIS PARA EL PRONÓSTICO DE CAUDALES | 129 |
| 5.1.3 | ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS MODELOS DE PRONÓSTICO DE CAUDALES EN LA CUENCA PILOTO | 147 |
| 5.2 | ÍNDICES DE RIESGO COMUNALES EN LA CUENCA PILOTO | 154 |
| 5.2.1 | ESTRUCTURA DE LOS ÍNDICES DE RIESGO COMUNALES | 156 |
| 5.2.2 | RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS ÍNDICES DE RIESGO COMUNALES | 161 |
| 5.2.3 | ANÁLISIS DEL USO DE LOS ÍNDICES COMUNALES | 166 |
| 5.3 | PRONÓSTICO DE CAUDALES EN LAS CUENCAS UBICADAS FUERA DE LA CUENCA PILOTO | 169 |
| 5.3.1 | RÍO CLARO EN TALCA | 170 |
| 5.3.2 | ESTERO LOS PUERCOS | 174 |
| 5.3.3 | RÍO MAULE EN FOREL | 177 |
| 5.3.4 | RÍO LONGAVÍ EN LA QUIRIQUINA | 181 |
| 5.3.5 | RÍO CAUQUENES EN ARRAYÁN | 184 |
| 5.3.6 | RÍO PERQUILAUQUÉN EN SAN MANUEL | 187 |
| 5.3.7 | RÍO ANCOA EN EL MORRO | 190 |
| 5.3.8 | RÍO ACHIBUENO EN LA RECOVA | 193 |
| 5.3.9 | ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS LINEALES | 197 |
| 5.4 | DISEÑO GRÁFICO PARA EL DESPLIEGUE Y OPERACIÓN DEL SATR | 200 |

| | |
|--|------------|
| 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 205 |
| 6.1 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS | 205 |
| 6.1.1 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES Y CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO | 205 |
| 6.1.2 USO DE LÓGICA DIFUSA | 206 |
| 6.1.3 MODELOS LINEALES DE PRONÓSTICO DE CAUDALES | 208 |
| 6.1.4 APLICABILIDAD DEL SATR | 209 |
| 6.2 RECOMENDACIONES | 209 |
| BIBLIOGRAFÍA | 211 |

ANEXOS

A ANEXOS IMPRESOS

A.1 CATASTRO SECTORES AMAGADOS EN LA VII REGIÓN (1990-2001)

A.2 ANTECEDENTES DE INUNDACIONES Y FALLAS DE OBRAS HIDRÁULICAS EN LA VII REGIÓN (1990-2001)

A.3 CORRELACIÓN DE PRECIPITACIONES DIARIAS ENTRE LAS ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS UTILIZADAS POR LOS MODELOS DE PRONÓSTICO.

B ANEXOS CD

B.1 CATASTRO DE INUNDACIÓN EN LA VII REGIÓN

B.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

B.3 DOCUMENTACIÓN

RESUMEN

Uno de los principales problemas que enfrentan las autoridades gubernamentales, particularmente organismos de emergencia, para adoptar medidas de mitigación adecuadas durante la ocurrencia de un temporal es la carencia de información precisa. En este sentido, es útil contar con sistemas de alerta de crecidas, los cuales son un complemento de las medidas estructurales de prevención de inundaciones (espigones, gaviones, etc.).

La Tesis trata sobre la confección de un Sistema Alerta Temprana por Inundaciones o falla de Obras Hidráulicas a nivel Regional, y tiene como propósito el uso de dos técnicas de incipiente empleo en el área de la Hidrología; Lógica Difusa y Algoritmo Genético, las cuales se enmarcan en el campo de los Sistemas Expertos o también denominado Inteligencia Artificial.

Se realizó una revisión del marco teórico y estado del arte de las técnicas empleadas. En particular, Lógica Difusa, Algoritmo Genético, Generación de índices de Riesgo y modelos lineales de Función Transferencia. Bajo este esquema se materializó la metodología de análisis y definición de los conceptos propuestos.

El diseño del Sistema en su conjunto involucró entre otros aspectos, el pronóstico de caudales, definición de Índices de Riesgo y modo de implementación, efectuándose la recolección de antecedentes correspondiente y caracterización de la Zona de Estudio. Mediante el tratamiento en profundidad de estos tópicos se define y analizan tanto los alcances del uso de Lógica Difusa, como del resto de los métodos empleados.

Se utilizó Lógica Difusa para dos implementaciones tipo, la primera consiste el uso del Esquema general planteado por Sugeno (Sugeno, 1985) aplicado al pronóstico de caudales, este tipo de modelos fue calibrado con un Algoritmo Genético. Para analizar, mediante comparación, los modelos de Lógica Difusa se identifican modelos de pronóstico de caudales del tipo Función de Transferencia. La segunda implementación de los modelos de Lógica Difusa tuvo por objeto la generación de Índices de Riesgo Agregados por zonas geográficas (comunas), empleando en este caso el esquema conceptual base planteado por Mandami (Mandami et al., 1975).

Se concluye la validez y conveniencia del uso de Lógica Difusa para la generación de Índices de Riesgo Agregados, esta metodología permite interpretar los Índices de Riesgo de manera global, los cuales tienen como propiedad ser continuos o discretos, según se requiera, y con una escala fija. Los modelos de Lógica Difusa para el pronóstico de caudales no aportan una mejora significativa con respecto a los modelos de función de transferencia. La calibración mediante el uso del Algoritmo Genético no asegura la obtención de parámetros “óptimos” de los modelos de Lógica Difusa ajustados. Se constata que el desempeño del Algoritmo Genético está altamente sujeto al operador evolutivo “Mutación”.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA TESIS

En el campo de la gestión y manejo de desastres naturales existe un creciente interés por los sistemas de alerta temprana, en particular para advertir inundaciones y fallas de obras hidráulicas, en vista de las tecnologías disponibles para transmitir información en tiempo real. Lógicamente, resulta ventajoso disponer información anticipada durante episodios de emergencia, con la finalidad de prevenir desastres (daños a bienes y pérdidas de vidas humanas).

En consecuencia, el desarrollo en este ámbito puede derivar en sistemas de alerta que permitan una gestión más eficiente y planificada de los recursos disponibles durante eventos de emergencia.

En lo que respecta a la falla de obras hidráulicas, si bien se puede estimar la capacidad máxima de diseño de un elemento, generalmente el caudal asociado a cierta probabilidad de excedencia, la incertidumbre en la falla se manifiesta en el desconocimiento del valor exacto que la ocasiona, producto de singularidades del evento que generan el siniestro; singularidades que en general, no pueden ser modeladas de forma determinística.

Un ejemplo donde se manifiestan las incertidumbres en la falla de una obra hidráulica, sería considerar un puente construido con un cierto caudal de diseño "Q"; si se observan posibles eventos hidrológicos que pueden hacer que este falle, existe la posibilidad que la falla se produzca con la ocurrencia de un caudal un poco menor al de diseño producto de una "singularidad del fenómeno". Por ejemplo debido al impacto de troncos de árboles transportados por el río durante la crecida o tal vez reparaciones menores en el sector, que pueden alterar la socavación de las cepas del puente, entre otras múltiples "Posibles Causas".

Para el desarrollo del sistema de alerta temprana se vislumbra que los esquemas no convencionales pueden manejar adecuadamente la incertidumbre que existe al diagnosticar una falla, a la escala de aplicación de los sistemas de alerta.

Como se verá posteriormente, debido a la naturaleza de la Lógica Difusa, donde las causas (variables de entrada) que producen cierto efecto (variable de salida) pueden variar dentro de cierto rango sin que este efecto se altere mayormente, es al menos intuitivamente rápido asociar la aplicación de esta metodología con el problema planteado.

La Tesis consiste en el diseño de un sistema de pronóstico y generación de índices de riesgo por inundaciones y fallas de obras hidráulicas en tiempo real,

realizando una evaluación del empleo de metodologías “tradicionales” y “emergentes” en el campo de la Hidrología, en particular Lógica Difusa.

Es posible Desarrollar esta Tesis en Chile, dado que la Dirección General de Aguas (D.G.A.) dispone de una red de monitoreo en tiempo real, compuesta por estaciones meteorológicas que envían los datos registrados vía satélite a una sala de recepción ubicada en Santiago. Dichas estaciones poseen sensores que registran datos pluviométricos, pluviométricos, de temperatura, entre otros parámetros.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo es la aplicación y análisis del uso de los sistemas difusos en la generación de Índices de Riesgo de falla o inundación, mediante el desarrollo de un sistema de alerta de inundaciones y falla de obras hidráulicas en tiempo real. Con este fin, y en vista de la concepción del problema en su conjunto, se estudiará y discutirá acerca de los procedimientos y metodologías de modelación involucradas para la generación de los índices de riesgo.

Así también, se evaluará el desempeño y aplicabilidad de técnicas que emplean el uso de Algoritmos Genéticos para la calibración de los modelos de pronóstico de caudales.

Para el desarrollo del trabajo, dado el objetivo principal, se contempla el tratamiento de los siguientes los objetivos parciales:

- Definición del Sistema de Alerta en Tiempo Real (SATR).
- Definición del Índice de Riesgo y sus componentes.
- Evaluación del uso de modelos Función de Transferencia para el pronóstico de caudales.
- Análisis de la aplicabilidad de la Lógica Difusa al pronóstico de caudales.
- Análisis del uso de Algoritmo Genético para la calibración de los modelos de pronóstico de caudales que emplean Lógica Difusa.
- Evaluación comparativa entre la aplicación de los modelos de Función de Transferencia y Lógica Difusa al pronóstico de caudales.
- Uso de Lógica Difusa en la obtención de índices de riesgo agregados por zonas geográficas.
- Diseño del despliegue del Sistema de Alerta en Tiempo Real (SATR).

1.3 METODOLOGÍA GENERAL DE TRABAJO

La Tesis se abordó siguiendo el siguiente procedimiento general:

1.3.1 Recopilación bibliográfica

En esta etapa se estudiaron las distintas formas de afrontar el problema del pronóstico de caudales y generación de índices de riesgo sugeridas por la literatura, entre las técnicas consultadas están los modelos de función de transferencia y Lógica Difusa. Esto discriminando la metodología más apropiada a ser aplicada en cada caso. Adicionalmente, se plantean y analizan las adecuaciones de los esquemas teóricos que permiten su posterior aplicación.

También se realiza una revisión de la literatura especializada en el tema de sistemas expertos, particularmente la que refiere sobre Lógica Difusa y esquemas de optimización de funciones no lineales mediante el uso de Algoritmos Genéticos (G. A.), los cuales son empleados en la calibración de los modelos que emplean Lógica Difusa para el pronóstico de caudales, mediante la minimización de funciones de error. Se presentan antecedentes sobre las propiedades, ventajas y defectos del uso de dicho esquema de calibración.

Además, el análisis bibliográfico contempla la revisión de metodologías de generación de índices de riesgo. Estos criterios contemplan una jerarquización de los distintos tipos de elementos vulnerables, según su grado de exposición a eventos extremos e importancia relativa.

Todos estos aspectos son tratados en el capítulo 2.

1.3.2 Metodología de Análisis

A este nivel se presentan aplicaciones genéricas de las técnicas consultadas, en la revisión bibliográfica, al problema de generación y pronóstico de índices de riesgo. Se realizan consideraciones generales sobre el uso de dichas metodologías en las aplicaciones realizadas.

Además, en esta parte se define por el Autor los conceptos, relaciones y estructuras necesarios para el uso y análisis de las técnicas consideradas.

La Metodología de Análisis se presenta en el capítulo 3.

1.3.3 Revisión y recopilación de antecedentes

Se realizó una revisión exhaustiva de la prensa escrita de la Séptima Región (zona de estudio), para identificar las tormentas que, durante el período 1990-2001, causaron sectores inundados, aislados o provocaron situaciones de emergencia. Además, se localizaron explícitamente los lugares donde existen problemas, señalando la envergadura de éstos.

Las fuentes consultadas fueron:

- Biblioteca Nacional. En la sección de archivo de periódicos, se revisó el diario “El Centro de Talca”.
- ONEMI CENTRAL (Oficina Nacional De Emergencias). Revisión de los compilados de noticias de “Temporales e Inundaciones” de la VII Región.

En forma complementaria se recopiló información de otras instituciones relacionadas con el tema, como es la **Dirección de Vialidad VII Región**, que proporcionó un Informe de emergencias referente a las rutas que han sido dañadas por temporales en el período en estudio.

Las zonas de inundación y obras consideradas de interés para la obtención de índices de riesgo y alerta, fueron seleccionadas tanto por su importancia como a la frecuencia de falla que presentan. Estos elementos están compuestos por diversas obras civiles (caminos, puentes, etc.), zonas pobladas, predios agrícolas y otros problemas producto de crecidas y/o desbordes de ríos y esteros.

Con la información recogida en los diferentes organismos gubernamentales se obtuvo a priori más de 160 puntos críticos (zonas) que han sido afectados en los temporales del período analizado, con lo cual se generaron fichas de sectores y obras sensibles a los temporales producidos en la región.

Con el objeto de validar la información de las zonas afectadas en los temporales de la última década, se realizó un total de cuatro campañas de terreno destinadas al levantamiento y verificación de la información. En ellas se procedió a visitar y a constatar cada uno de los puntos críticos registrados, estando estos distribuidos en su mayoría en torno a los cauces de la VII Región. En dichas visitas se obtuvo una mejor descripción de los problemas suscitados, además de fotografías y las coordenadas geográficas de los sitios catastrados.

Una vez recopilada toda la información, ésta se procesó en términos de la importancia y factibilidad de modelación de las zonas amagadas. Dicho trabajo se tradujo finalmente en un catastro con las principales tormentas que azotaron a la Séptima Región entre los años 1990 y 2001, con los respectivos lugares que fueron amagados en éstas, además de discriminar y caracterizar los sectores afectados que serán contemplados, resultados que se resumen en los anexos A2 y A1, respectivamente.

La serie estadística pluviométrica y fluviométrica, que comprende a las tormentas ocurridas en la VII Región entre los años 1990 y 2001, fue obtenida directamente de la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas.

En el capítulo 4 se presenta un resumen de los antecedentes recopilados y se realiza una caracterización de la región de estudio.

1.3.4 Elección de la “Cuenca Piloto”

Durante el desarrollo de la Tesis, se trabajó inicialmente sobre una cuenca “experimental” dentro de la Séptima Región, llamada “Cuenca Piloto”, en la cual se ensayaron y evaluaron los distintos enfoques para el pronóstico de caudales en tiempo real, determinando en esta zona las metodologías generales de modelación más apropiadas para ser extendidas al resto de la Región.

Se consideraron los siguientes aspectos en la elección de la Cuenca Piloto:

- Existencia de zonas adyacentes a cauces principales o secundarios y que periódicamente presenten problemas por crecidas. Considerando que los elementos afectados deben poseer cierta importancia, particularmente bajo criterios económicos, extensión, sociales y de riesgo de pérdidas de vidas humanas.
- Existencia de zonas urbanas, en particular ciudades que poseen una población superior a los 10.000 hab., en las que se encuentren obras civiles y de urbanización susceptibles a colapsar producto de condiciones hidrológicas adversas en los cauces presentes en las inmediaciones de éstas.
- En la Cuenca Piloto debe existir una adecuada densidad de estaciones pluviométricas (gráficas) y fluviométricas (gráficas), que entreguen información en tiempo real, así como estaciones en las que el sistema de transmisión satelital no esté implementado, pero que dispongan de información fidedigna y una aceptable longitud de su serie.

La elección de la Cuenca Piloto y argumentación específica se presenta en el acápite 4.6.

1.3.5 Modelación de los elementos bajo riesgo pertenecientes a la “Cuenca Piloto”

Una vez recopilada y procesada la información base (Capítulo 4), se procede a realizar la aplicación y análisis de las metodologías de modelación en todos los elementos contenidos en la “Cuenca Piloto”, lo que incluye la calibración y validación

de los modelos asociados a los diversos elementos afectados; obteniéndose en esta etapa un análisis global de las metodologías empleadas, producto de la comparación del comportamiento y aplicabilidad de los distintos tipos de esquemas. Este tema es abordado en el punto 5.1.

Luego, se realiza una discriminación de las metodologías más apropiadas a ser aplicadas sobre toda la zona de implementación del Sistema de Alerta en Tiempo Real (SATR), la cual corresponde a la VII región de Chile, contemplando aspectos de alcance de los esquemas conceptuales y modelos propuestos.

1.3.6 Implementación en la Zona de Estudio

En esta etapa se aplicó, sobre todas las cuencas de la VII Región que son susceptibles a ser modeladas, las metodologías de modelación seleccionadas que fueron desarrolladas durante el proceso de modelación de la Cuenca Piloto.

Este tema se desarrolla en el punto 5.2.

1.3.7 Diseño del despliegue del Sistema de Alerta en Tiempo Real (SATR)

Se propone el desarrollo de un programa (en Visual Basic) para la visualización del Sistema de Alerta en Tiempo Real, el cual, a su vez, se soporta en un Sistema de Información Geográfico (S.I.G.) que contiene las zonas amagadas en las cuales el sistema de alerta temprana en tiempo real está implementado, con su respectiva descripción. Dicho programa debe cargarse periódicamente con la información requerida; proveniente de la base de datos de la D.G.A. Estos datos corresponden a los parámetros medidos en las estaciones, limnigráficas y pluviográficas, que disponen de la infraestructura para la transmisión de los datos en tiempo real.

Se incluye este tema en la Tesis con el fin de abordar, de manera general, el problema del diseño de un sistema de alerta temprana en su conjunto.

La visualización correspondiente se muestra en el acápite 5.3 del informe.

1.3.8 Conclusiones y Recomendaciones

En el proceso de análisis de resultados y recomendaciones se concluye sobre la validez, desempeño y alcances de las aplicaciones realizadas. Estos aspectos son tratados en el Capítulo 6.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE LÓGICA DIFUSA

El concepto de Lógica Difusa apareció en 1965, en la Universidad de California en Berkeley (Zadeh, 1965). Esta tecnología no nace como una disciplina teórica, sino como una herramienta práctica que pretende describir, con el objetivo de simular, el comportamiento de ciertos fenómenos sin la necesidad de un modelamiento físico-matemático extensivo (Zadeh, 1965).

Lógica Difusa se enmarca en el área de la llamada Inteligencia Artificial y ha dado origen a sistemas expertos y sistemas de control automático, siendo ampliamente utilizada en esta área. Como ejemplo, en el campo de la computación se utiliza en el reconocimiento digital de textos manuscritos.

Las lógicas difusas, pues de hecho hay que hablar de ellas en plural, dado que existen diversas variantes en la aplicación del concepto, son multivaluadas, puesto que no imponen en las proposiciones o hipótesis valores discretos de las variables de decisión y consecuencia (*falso* o *verdadero*), como lo hace la lógica binaria.

Los esquemas que emplean Lógica Difusa o FIS (Fuzzy Inference System), procuran crear aproximaciones matemáticas en la descripción de ciertos tipos de fenómenos, con el objetivo de producir resultados exactos a partir de datos imprecisos. El adjetivo “difuso” aplicado a ellas se debe a que los valores de verdad no-deterministas utilizados tienen, por lo general, una connotación de incertidumbre. En consecuencia, lo difuso puede entenderse como la posibilidad de asignar valores de verdad intermedios entre “falso” o “verdadero”.

2.1.1 Definiciones

En la estructura básica de un sistema deductivo o FIS se distinguen las proposiciones o “reglas”, las “Variables de entrada” y las “Variables de salida”.

Los FIS (Fuzzy Inference System o modelos difusos) se basan conceptualmente en agrupar en subconjuntos las variables de entrada de respuesta similar (salida del modelo), quedando la magnitud de la respuesta determinada por el grado de cumplimiento de las variables de entrada a ciertas sentencias o reglas.

El concepto de *conjunto* se define como una colección bien definida de elementos, en la que es posible determinar para un elemento cualquiera, en un universo dado, si acaso éste pertenece o no al conjunto. En un *conjunto difuso* a cada elemento del universo se le asocia un *grado de pertenencia*: el cual es un número entre 0 y 1. Un conjunto difuso es pues una función que a cada elemento del

universo le asocia su grado de pertenencia, función cuyo dominio es el universo y cuyo recorrido es el intervalo [0,1]. Mientras el grado de pertenencia sea más cercano a 1 más pertenecerá el elemento al conjunto y en tanto el grado de pertenencia sea más cercano a 0 menos lo estará. Además estos conjuntos suelen ser no disjuntos. Mediante notación matemática se define un Conjunto Difuso MF_i , para la variable de entrada z que pertenece al universo Z , mediante la expresión señalada en la ecuación 2.1.

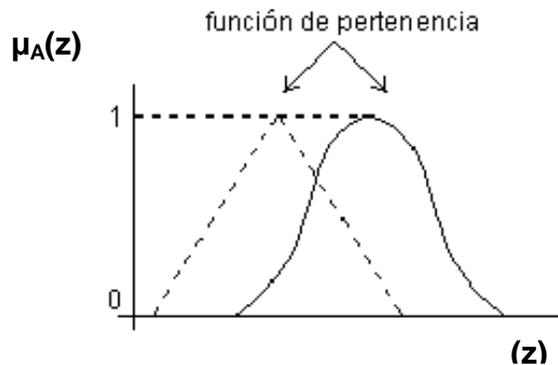
$$MF_i(z) = \{(z, \mu_A(z)) / z \in Z\}$$

$$\mu_A: Z \rightarrow [0,1]$$

EC 2.1

La función de pertenencia " μ_A " se establece de una manera arbitraria, lo cual es uno de los aspectos más flexibles de los Conjuntos Difusos. Para operar en la práctica con los Conjuntos Difusos, se suelen emplear funciones de pertenencia del tipo representado en la figura 2.1.

Figura 2.1 Ejemplos de tipos de funciones de pertenencia "MF"



En la figura 2.1, se pueden observar dos tipos de funciones de pertenencia de todos los posibles: el tipo triangular, que puede ser un caso concreto del trapezoidal en el que los dos valores centrales son iguales, y el de forma de campana Gaussiana.

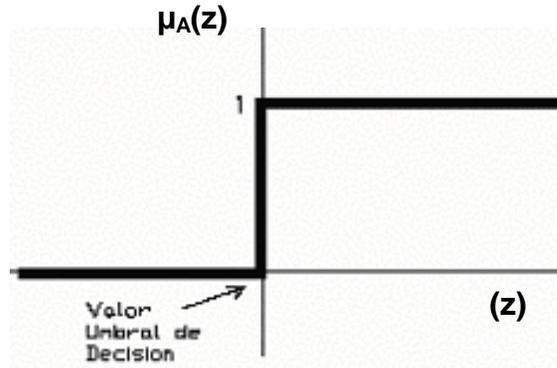
Un conjunto de la lógica tradicional (binaria o bivaluada) también es expresable mediante una función de pertenencia. De hecho, la Lógica Difusa es una extensión de la lógica tradicional y por tanto la incluye. Todas las reglas y propiedades de la Lógica Difusa son aplicables a la "tradicional". Así pues, un conjunto de la "lógica tradicional" se puede expresar mediante un conjunto difuso cuya función de pertenencia sería la señalada en la ecuación 2.2.

$$\mu_A(z) = \begin{cases} 0 & \dots z \in F \\ 1 & \dots z \notin F \end{cases} F \subseteq Z$$

EC 2.2

Es decir, una función escalón centrada en el valor umbral de decisión, tal como lo describe el esquema de la figura 2.2

Figura 2.2 Conjunto de Lógica Bivaluada



Un conjunto difuso se puede caracterizar mediante las siguientes propiedades:

- **Soporte de un Conjunto Difuso (support):** Rango de valores de z que hacen que la función de pertenencia $\mu_A(z)$ posea valores mayores que 0.

$$\text{Soporte } (\mu_A) = \{z \in Z / \mu_A(z) > 0\}$$

- **Núcleo de un Conjunto Difuso (core):** Elementos de Z que hacen que la función de pertenencia $\mu_A(z)$ sea igual a 1. Lógicamente, Núcleo (μ_A) es subconjunto de Soporte (μ_A) .

$$\text{Núcleo } (\mu_A) = \{z \in Z / \mu_A(z) = 1\}$$

- **α -Corte:** Elementos de Z con grado mínimo de pertenencia α .

$$\mu_{A_\alpha} = \{z \in Z / \mu_A(z) \geq \alpha\}$$

- **Conjunto Difuso Convexo o Cóncavo (convex, concave):** Si su función de pertenencia cumple que $\forall z_1, z_2 \in Z \quad \forall \lambda \in [0,1]$:

$$(i) \quad \text{Convexo: } \mu_A(\lambda z_1 + (1-\lambda) z_2) \geq \min \{\mu_A(z_1), \mu_A(z_2)\}$$

$$(ii) \quad \text{Cóncavo: } \mu_A(\lambda z_1 + (1-\lambda) z_2) \leq \max \{\mu_A(z_1), \mu_A(z_2)\}$$

- **Cardinalidad de un Conjunto Difuso** (*cardinality*): Es el área bajo la curva que describe el conjunto difuso, tal como se indica en la ecuación 2.3.

$$Card(\mu_A) = \int_{z \in Z} \mu_A(z) dz \quad \text{EC 2.3}$$

Por otro lado, es posible definir ciertas relaciones entre conjuntos difusos, al igual que en cualquier tipo de conjuntos, como sigue a continuación:

- **Igualdad** (*equality*): Dos conjuntos difusos, definidos en el mismo Universo, son iguales si tienen la misma función de pertenencia, ie:

$$\mu_A = \mu_B \Leftrightarrow \mu_A(z) = \mu_B(z), \forall z \in Z$$

- **Inclusión** (*inclusion*): Un conjunto difuso está incluido en otro si su función de pertenencia toma valores más pequeños:

$$\mu_A \subseteq \mu_B \Leftrightarrow \mu_A(z) \leq \mu_B(z), \forall z \in Z$$

- **Inclusión Difusa** : Es posible relajar la condición anterior para medir el grado en el que un conjunto difuso está incluido en otro (Kosko, 1992), en este caso se presenta la expresión general para el grado de inclusión de μ_A en μ_B en la ecuación 2.4.

$$S(\mu_A, \mu_B) = \frac{1}{Card(\mu_A)} \left[Card(\mu_A) - \int_{z \in Z} \text{Max}\{0, \mu_A(z) - \mu_B(z)\} dz \right] \quad \text{EC 2.4}$$

A continuación se describen los tipos más utilizados de funciones de pertenencia o también llamados conjuntos difusos:

- **Triangular**: Definido por sus límites inferior a y superior b , y el valor modal m , tal que $a < m < b$. La expresión matemática de este tipo de función de membresía se resume en la expresión de la ecuación 2.5.

$$\mu_A(z) = \max\left\{ \min\left\{ \frac{(z-a)}{(m-a)}, \frac{(b-z)}{(b-m)} \right\}, 0 \right\} \quad \text{EC 2.5}$$

- **Función G (gamma)**: Definida por su límite inferior a y el valor $k > 0$. Esta función se caracteriza por un rápido crecimiento a partir de a , cuanto mayor es el valor de k , el crecimiento es más rápido aún. Además, nunca alcanza el valor 1, aunque

presenta una asíntota horizontal en 1. La función gamma queda determinada mediante la ecuación 2.6.

$$\mu_A(z) = 1 - e^{-k(z-a)^2} \quad \text{EC 2.6}$$

- **Función S:** Definida por sus límites inferior a y superior b y el valor m, o punto de inflexión tal que $a < m < b$. Un valor típico es $m = (a+b) / 2$. Además, el crecimiento es más lento cuanto mayor sea la distancia a-b. Matemáticamente se interpreta mediante la ecuación 2.7.

$$\mu_A(z) = \begin{cases} 0 & \dots z \leq a \\ 2 \left(\frac{z-a}{b-a} \right)^2 & \dots z \in (a, m) \\ 1 - 2 \left(\frac{z-a}{b-a} \right)^2 & \dots z \in (m, b) \\ 1 & \dots z \geq b \end{cases} \quad \text{EC 2.7}$$

- **Función Gaussiana:** Definida por su valor medio μ y el valor de σ , siendo la típica campana de Gauss, cuanto menor es σ más estrecha es la campana, tal como se indica en la ecuación 2.8.

$$\mu_A(z) = e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{EC 2.8}$$

- **Función Trapezoidal:** Definida por sus límites inferior a y superior d, y los límites de su soporte, b y c, inferior y superior respectivamente. Esta función queda interpretada mediante la ecuación 2.9.

$$\mu_A(z) = \begin{cases} 0 & \dots z \leq a \vee z \geq d \\ \left(\frac{z-a}{b-a} \right) & \dots z \in (a, b) \\ 1 & \dots z \in (b, c) \\ \frac{(d-z)}{(d-c)} & \dots z \in (c, d) \end{cases} \quad \text{EC 2.9}$$

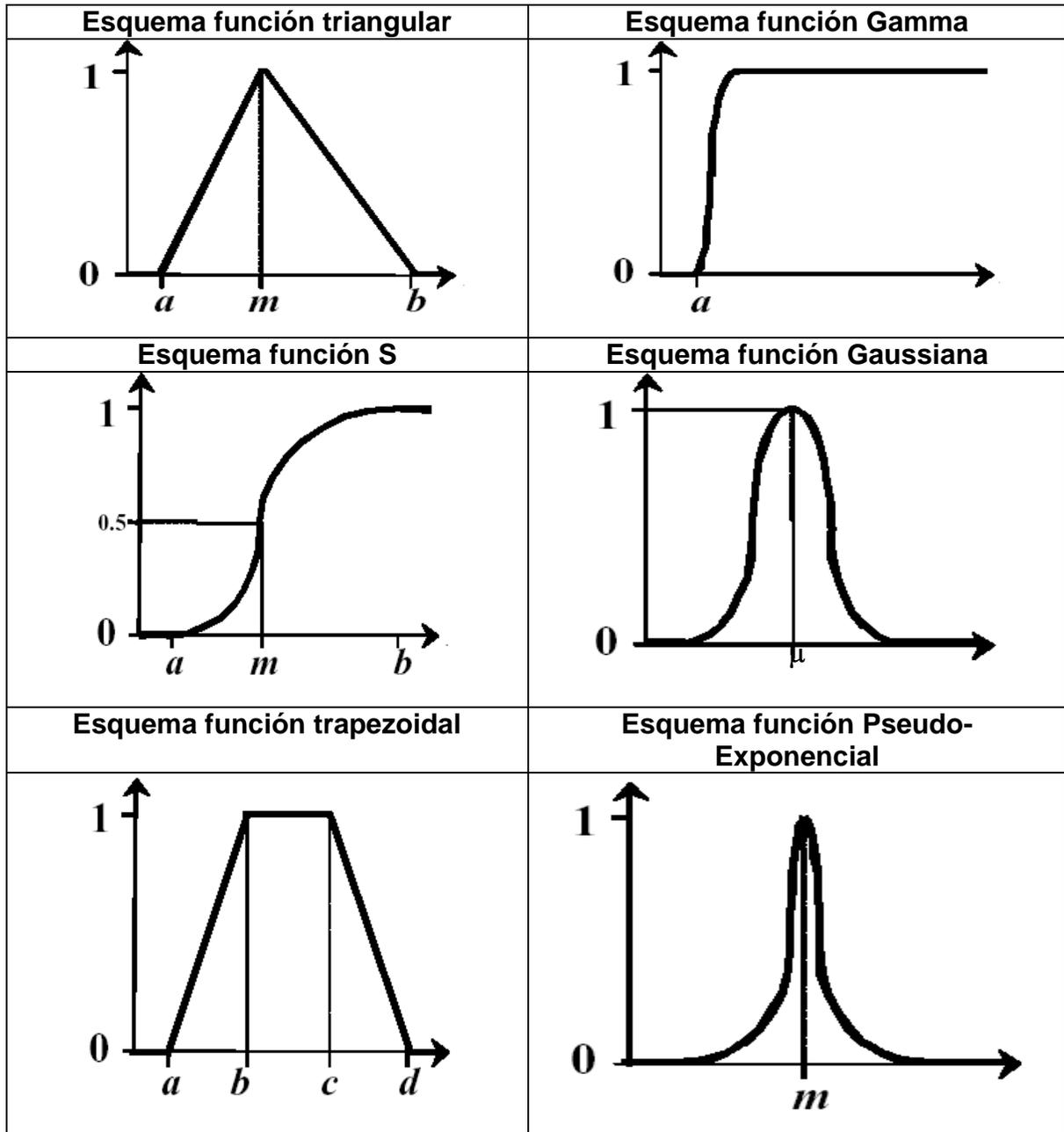
- **Función Pseudo-Exponencial:** Definida por su valor medio m y el valor $k > 1$. Cuanto mayor es el valor de k el crecimiento es más rápido aún y la “campana” es más estrecha, siendo su expresión la presentada en la ecuación 2.10.

$$\mu_A(z) = \frac{1}{1 + k(z - m)^2}$$

EC 2.10

En la figura 2.3 se presentan los esquemas que representan las funciones de pertenencia descritas anteriormente, siendo el eje de las abscisas el valor de z , mientras que en el de las ordenadas el valor de $\mu_A(z)$.

Figura 2.3 Gráficos de las funciones de pertenencia más utilizadas



Además, en Lógica Difusa existen variadas maneras de definir las operaciones básicas entre los conjuntos difusos. Estas operaciones son análogas a las que se realizan sobre cualquier tipo de conjunto, siendo estas la unión, intersección y complemento. En particular, la intersección y unión de conjuntos difusos deben satisfacer las restricciones de una T-Norma (norma triangular) Y S-Norma (co-norma triangular), respectivamente.

Como se menciona anteriormente, las T-Normas especifican un conjunto de condiciones que deben reunir aquellas operaciones que deseen ser usadas para intersectar conjuntos difusos. Estas propiedades, para la operación intersección “t” definida entre los conjuntos difusos $\mu_A(z)$, $\mu_B(z)$, $\mu_C(z)$ y $\mu_D(z)$, son las siguientes (Butnario et al., 1993):

- **Conmutatividad:**

$$\mu_A(z) \text{ t } \mu_B(z) = \mu_B(z) \text{ t } \mu_A(z)$$

- **Asociatividad:**

$$\mu_A(z) \text{ t } [\mu_B(z) \text{ t } \mu_C(z)] = [\mu_A(z) \text{ t } \mu_B(z)] \text{ t } \mu_C(z)$$

- **Monotonicidad:**

$$\text{Sea } \mu_A(z) \leq \mu_B(z), \mu_C(z) \leq \mu_D(z)$$

$$\mu_A(z) \text{ t } \mu_C(z) \leq \mu_B(z) \text{ t } \mu_D(z)$$

- **Condiciones Frontera:**

$$\mu_A(z) \text{ t } 0 = 0 \text{ y } \mu_A(z) \text{ t } 1 = \mu_A(z)$$

Las condiciones para que la operación Unión “S” sea una S-Norma, son las mismas que la de una T-Norma, salvo que en la condición de frontera cumple:

- **Condiciones Frontera:**

$$\mu_A(z) \text{ s } 0 = \mu_A(z) \text{ y } \mu_A(z) \text{ s } 1 = 1$$

El complemento o negación “¬” entre conjuntos difusos sigue las mismas propiedades que en los conjuntos clásicos. Estas propiedades son las siguientes:

- **Involución:**

$$\neg(\neg \mu_A(z)) = \mu_A(z)$$

- **Condiciones Frontera:**

$$\neg 0 = 1 \text{ y } \neg 1 = 0$$

Existe una gran cantidad de definiciones para las operaciones con conjuntos difusos. Sin embargo, para efectos prácticos, se emplean las más comunes, las cuales respetan las propiedades que deben tener las T-Normas, S-normas y el complemento para la operación entre conjuntos difusos. Por lo tanto, se emplearán las siguientes definiciones en las aplicaciones estudiadas, según sea el caso.

- **Complemento:**

$$\neg \mu_A = 1 - \mu_A(z)$$

- **Unión:**

$$\mu_A \cup \mu_B = \text{Max}\{\mu_A(z), \mu_B(z)\}$$

$$\mu_A \cup \mu_B = \text{Min}\{1, \mu_A(z) + \mu_B(z)\}$$

- **Intersección:**

$$\mu_A \cap \mu_B = \text{Min}\{\mu_A(z), \mu_B(z)\}$$

$$\mu_A \cap \mu_B = \mu_A(z) * \mu_B(z)$$

En la Figura 2.4 se presenta un esquema de los valores correspondientes a cada operación (área achurada), utilizando dos funciones de pertenencia triangulares.

La estructura de las proposiciones lógicas del sistema se pueden expresar de la forma que se describe a continuación, considerando que para todas las variables de entrada “V_k” se dispone de un número de funciones de membresía “m”, donde las “n” reglas del modelo “R_i” vienen dadas de la siguiente forma:

R_i: “Si V₁ es MF_(1,j) Y/O....Y/O V_k es MF_(k,j) Y/OY/O V_p es MF_(p,j)”

Entonces:

$$\text{Implicancia}_{i\text{-ésima}} = A_i (V_1, \dots, V_k, \dots, V_p) ”$$

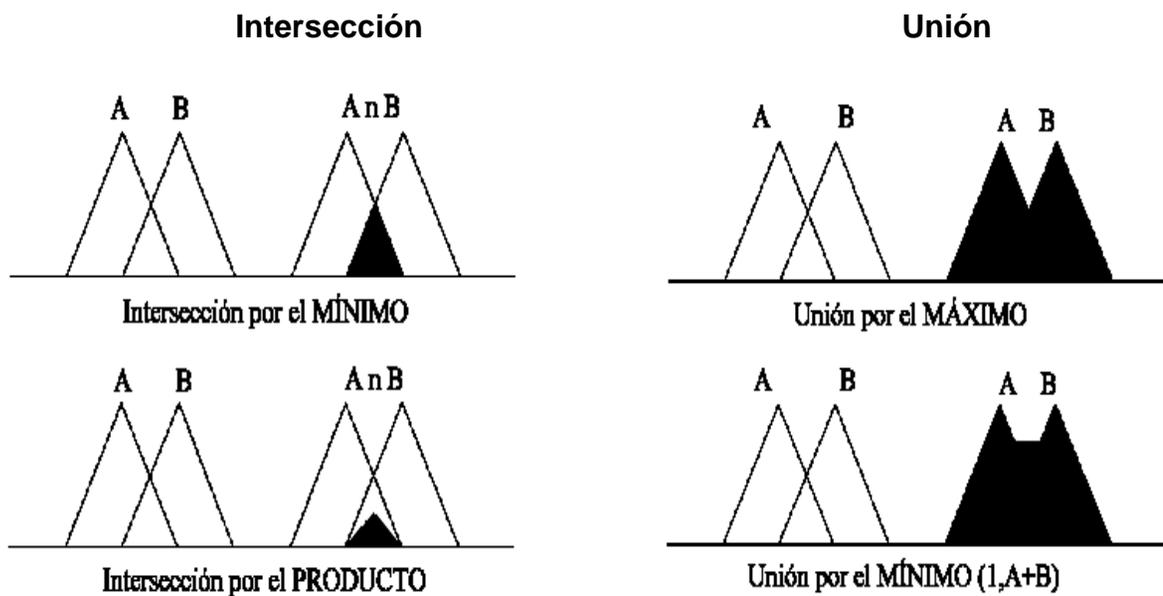
Donde:

$$i = \{1, \dots, n\} \quad j = \{1, \dots, m\} \quad k = \{1, \dots, p\} \quad ”V_k \text{ es MF}_{(k,i)} “= \text{MF}_{(k,i)}(V_k)$$

El proceso de confección de los FIS incluye la identificación de la estructura particular, que debe ser apropiada para describir el fenómeno modelado, de modo de encontrar los conjuntos de reglas y funciones de membresía (MF), asociados a las variables de entrada y salida respectivamente. Estos FIS deben ser calibrados y validados (con sus respectivos parámetros), mediante el uso de la información disponible. Las funciones de implicancia “A_i” (o de “Fuzzyficado”) se definen de maneras múltiples, dependiendo del tipo de variante de los FIS que se utilice.

En este marco, se tiene como objetivo de la Tesis estudiar el alcance de la aplicación en el campo de la Hidrología de dichos esquemas, contando como inspiración otros trabajos (Yeshewatesfa et al., 2001) que emplean esta tecnología, particularmente en modelos de generación distribuida de escorrentía.

Figura 2.4 Ejemplo de aplicación de operación Unión e Intersección en conjuntos difusos



2.1.2 FIS de Tipo Mandami

Si se utiliza el esquema de tipo Mandami (Mandami et al., 1975), cada función de implicancia “ A_i ” será un conjunto difuso, siendo el resultado de cada regla (para la regla i -ésima) el área descrita por el truncado de la función de implicancia por el valor asociado a la Intersección (operador “ Y ” = mínimo) o la Unión (operador “ O ” = Máximo) de las funciones de pertenencia, asociadas a sus respectivas variables de entrada.

En el ejemplo a continuación (figura 2.5), se esquematiza el “Fuzzificado” (implicancia difusa) tipo Mandami para dos variables de entrada, “ z ” e “ y ”, y una de salida “ x ”, quedando definido el valor de la implicancia “ A_i ” de la regla, por la Intersección de las áreas bajo la curva de pertenencia $MF_i^s(x)$ y la recta de valor $MF_i^s = MF_i^e(z)$ (operación definida como por la Intersección o “mínimo”, ie: $MF_i^e(z) < MF_i^e(x)$). En la figura 2.5 queda representada esta zona por el área sombreada.

En el esquema de la figura 2.6, el conjunto difuso resultante “ A ” (salida difusa) se define entonces para el espacio “ X ” ($n = 3$) empleando el operador Unión que se define por la ecuación 2.11.

$$A = \bigcup_{i=1}^n A_i \quad \text{EC 2.11}$$

Dado el conjunto A en el universo X , se define $Card(A)$, según la expresión de la ecuación 2.12.

$$Card(A) = \int_{x \in X} A(x) dx \quad \text{EC 2.12}$$

Para obtener el valor de las variables “desfuzzyficadas” (resultado numérico del modelo), se emplea en el caso del esquema tipo “Mandami”, el centroide de la figura formada por la unión / intersección, como se definió anteriormente, de las funciones $MF_i^s(x)$ evaluadas en todas las reglas, tal como se aprecia en el ejemplo de la figura 2.6 (considerando tres reglas y la operación unión de las implicancias A_i). El centroide “ X_G ” se determina mediante la expresión que se muestra en la ecuación 2.13.

$$x_G = \frac{\int_{x \in X} A(x) x dx}{Card(A)} \quad \text{EC 2.13}$$

Es decir, X_G corresponde a la proyección del valor esperado de A en el universo X, encontrando de esta forma que la descomposición de X_G , en el eje x, corresponde al valor de salida “desfuzzyficada” del modelo.

Figura 2.5 Ejemplo esquemático funciones de implicancia tipo “Mandami”

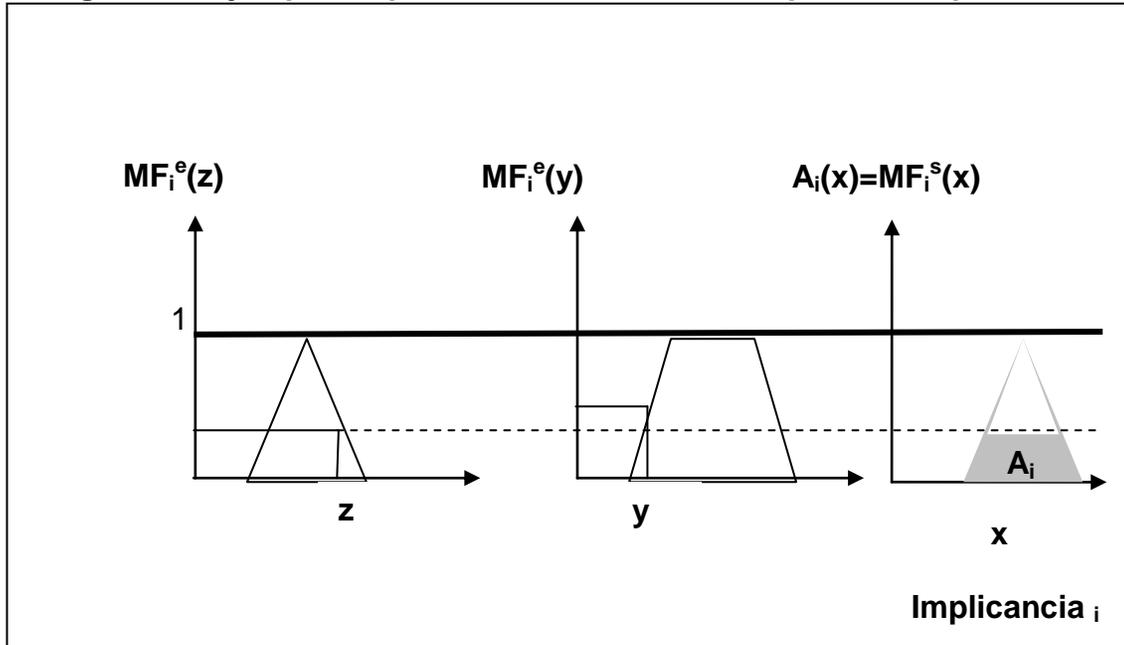
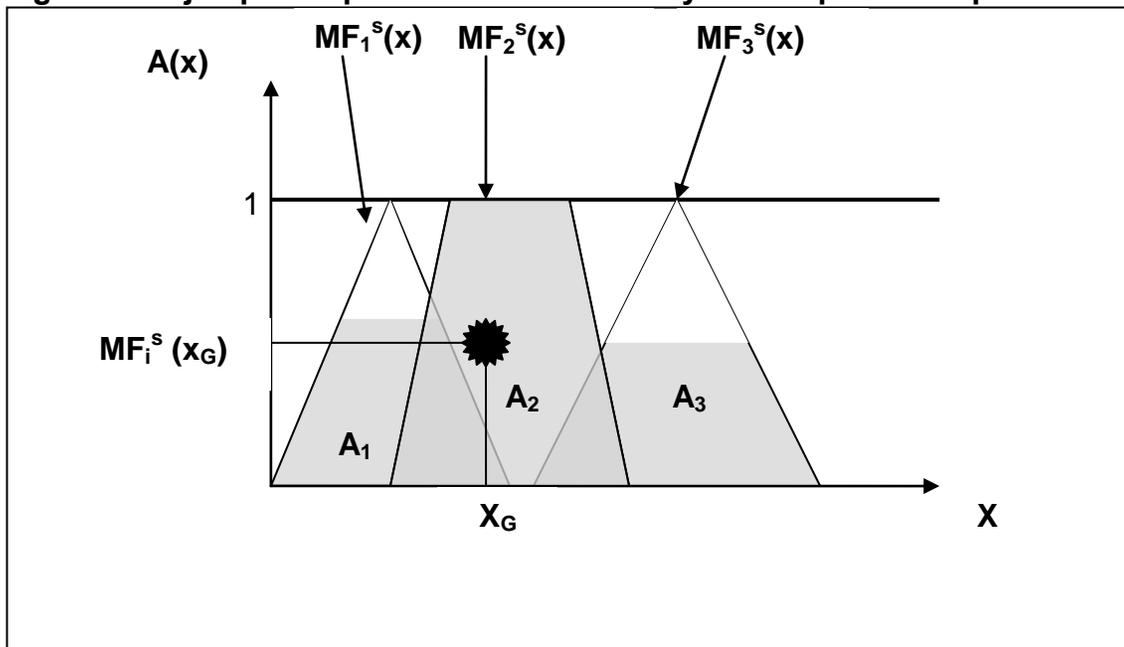


Figura 2.6 Ejemplo esquemático de “Desfuzzyficado” para FIS tipo “Mandami”



2.1.3 FIS de Tipo Sugeno

En el caso de las funciones de implicancia de tipo Sugeno (Sugeno, 1985), la función de salida de la regla i -ésima se obtiene simplemente de una combinación lineal de las variables de entrada, de modo que A_i se obtiene mediante la expresión que se presenta en la ecuación 2.14.

$$A_i = a_0^i + \sum_{k=1}^p a_k^i V_k \quad \text{EC 2.14}$$

Para obtener el valor de las variables “desfuzzyficadas”, se emplea la suma ponderada de las implicancias por la membresía conjunta “ W_i ” de la regla respectiva, la cual se obtiene mediante la operación Unión (si el conectivo lógico es “O”), o Intersección (si el conectivo lógico es “Y”). En términos generales “ W_i ”, o grado de cumplimiento de la regla difusa “ R_i ”, queda definido de la forma que se señala en las ecuaciones 2.15, obteniéndose la expresión genérica que se señala en la ecuación 2.16 (con una estructura en la cual se define una cantidad de funciones de pertenencia para cada variable igual al número de reglas, i.e. $m = n$).

$$W_i = \bigcup_{k=1}^p MF_k^i(V_k) \quad W_i = \bigcap_{k=1}^p MF_k^i(V_k) \quad \text{EC 2.15}$$

$$FIS(V_1, \dots, V_k, \dots, V_p) = \frac{\sum_{i=1}^n A_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{EC 2.16}$$

2.2 MODELOS LINEALES DE PRONÓSTICO DE CAUDALES

Los modelos lineales multivariados de función transferencia son uno de los esquemas de modelación más utilizados para el pronóstico de caudales en tiempo real (Vargas et al., 1986 y Brown y Vargas, 1988).

Estos modelos, en términos generales, se basan en representar una variable de estado en el instante actual en función del valor de la misma variable en tiempos pasados, pudiendo incluir además otras variables explicativas llamadas exógenas para el cálculo de la variable de interés. Los modelos de función de transferencia poseen un término de "ruido" o impacto aleatorio que se adiciona a las variables de entrada mencionadas anteriormente. La estructura general de este tipo de modelos puede resumirse en las relaciones de las ecuaciones 2.17 y 2.18.

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{D}(t) + \xi(t) \quad \text{EC 2.17}$$

$$\mathbf{D}(t) = \mathbf{f} \left\{ \delta[\mathbf{y}(t) \dots \mathbf{y}(t-n)] ; \lambda[\mathbf{x}_1(t-1), \dots, \mathbf{x}_1(t-r_1), \dots, \mathbf{x}_k(t-1), \dots, \mathbf{x}_k(t-r_k), \dots, \mathbf{x}_p(t-r_p)] \right\} \quad \text{EC 2.18}$$

Donde:

$\mathbf{y}(t)$: Variable de estado en el tiempo t .

$\mathbf{x}_k(t)$: Variable exógena k – ésima en el tiempo t .

$\mathbf{D}(t)$: Es la componente determinística del modelo función de transferencia, la cual, en este caso, corresponde a una combinación lineal que relaciona las variables del modelo, las que a su vez son entregadas por las funciones δ y λ .

$\xi(t)$: Parte aleatoria o ruido del modelo.

$\delta(t)$: Función que relaciona la variable de estado en tiempos igual y/o anteriores al actual.

$\lambda(t)$: Función que relaciona las variables exógenas en tiempos igual y/o anteriores al actual.

Como la función $\mathbf{D}(t)$ es una combinación lineal de las variables definidas por las funciones δ y λ , el sistema se puede representar mediante un sistema lineal simple, siendo los parámetros ponderadores de cada elemento de la matriz $\mathbf{D}(t)$ independientes del instante "t" en que se encuentre, lo que implica que estos parámetros se consideran constantes en el tiempo. Lo anterior, tácitamente, supone la invariabilidad en el tiempo del modelo que representa el sistema.

Además, los modelos de función de transferencia estudiados en la presente Tesis son absolutamente determinísticos, no simulando por tanto el valor del ruido $\xi(t)$. Se debe destacar también que los modelos encontrados no identifican efectos de periodicidad de la variable de estado.

Por otro lado, los modelos suponen que el sistema es estacionario de primer orden, lo que equivale a decir que la media y varianza de las variables empleadas (y de los residuos $\xi(t)$) son también constantes en el tiempo, contemplando en particular que la media de los residuos es igual a cero.

Una última consideración en la implementación de estos esquemas, tiene que ver con el hecho que las variables de entrada de los modelos son “adimensionalizadas”, con ello se obtienen parámetros adimensionales en los modelos identificados, los cuales pueden eventualmente ser estudiados para propósitos que están fuera del alcance de este estudio.

Es importante destacar que la simplicidad en la formulación y calibración de los parámetros de los modelos de función de transferencia, además de la versatilidad que presentan los mismos para su estructuración, han hecho que estos modelos tengan un extendido uso para el pronóstico de escorrentía. Así por ejemplo, se pueden calibrar los parámetros de estos modelos mediante el uso de técnicas de calibración de modelos lineales tal como la de los mínimos cuadrados.

No obstante el masivo uso que tienen estos modelos, se describe que los resultados de la implementación de este tipo de esquema en cuencas con componente nival en su régimen, no es tan satisfactoria como en cuencas de régimen netamente pluvial (Vargas et al., 2002), para tiempos de pronóstico “adecuados” bajo las necesidades de un Sistema de Alerta Temprana. Este aspecto será también discutido en el desarrollo de esta Tesis.

2.3 CALIBRACIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS (G.A.)

Los algoritmos genéticos (G.A.) (Estévez, 1997) son métodos exhaustivos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización, que aplican a estos los procesos observados en la evolución biológica; selección basada en cambios en la población, mediante los mecanismos de reproducción sexual y mutación.

En un algoritmo genético, tras modelar el problema, determinando la estructura y parámetros asociados (individuos x_1, \dots, x_n), se procede a codificar los mismos, mediante la asignación de los cromosomas que los individualizan. Todos los operadores empleados por los G.A. se aplican sobre estos cromosomas, o bien directamente sobre la población (conjunto de individuos).

Las poblaciones, que constituyen conjuntos de parámetros o individuos, codificadas en cromosomas, “compiten” para ver cuál constituye la mejor solución (aunque no necesariamente es la solución óptima). El “medio ambiente”, constituido por la población y condiciones de evaluación de ésta en su conjunto, ejercerá una presión selectiva, de forma que sólo los mejor adaptados (aquellos que resuelvan mejor el problema) sobrevivan o leguen su material genético a las siguientes generaciones, igual que en la evolución de las especies. La diversidad genética se introduce mediante mutaciones y reproducción sexual.

En primer lugar, se requiere que los individuos de la población se codifiquen mediante “cromosomas”. Cada cromosoma tiene varios genes, que corresponden a la unidad elemental de acción de los operadores de los G.A. Estos genes usualmente se representan mediante 0s y 1s, dentro de una cadena de caracteres, siendo el número de bits usado por cada parámetro la precisión que se quiera en el mismo.

Otros elementos relevantes en la operación de los G.A. son:

- **Tamaño de la población:** Ésta debe de ser suficiente para garantizar la diversidad de las soluciones; variable que es acotada por la capacidad de procesamiento y complejidad del problema a resolver.
- **Condición de término:** En general está dada por una condición de convergencia, o por un número prefijado de generaciones (iteraciones).
- **Heurística:** Este elemento lo constituye la función que debe ser optimizada, ésta, en el caso del proceso de calibración de un modelo, corresponde a una función que representa el ajuste de los mismos con respecto a la información observada.
- **Fitness:** Durante el proceso de evaluación de los individuos, se decodifican los genes de cada parámetro o cromosoma, para luego calcular el valor de la función a optimizar (heurística), de modo de asignar una puntuación relativa al resto de la

población, dependiendo del ajuste de la función objetivo. A esta puntuación se le denomina “fitness” o “Ranking”.

Dentro de los principales operadores que actúan en el algoritmo genético simple se encuentran:

- **Generación de población inicial:** Corresponde a la condición de inicio del algoritmo, etapa en la cual se crean individuos de manera estocástica, a partir de un individuo inicial, siendo el Tamaño de la población prefijado como variable de entrada.

- **Evaluación y selección:** Proceso de puntuación y calificación relativa de la población mediante el “fitness” o “ranking”, donde se obtienen las posibilidades de reproducción dependiendo de las condiciones de los individuos.

- **Cruzamiento o “Crossover”:** En analogía, representa la reproducción sexuada, la cual consiste en el intercambio de material genético entre dos cromosomas de dos individuos distintos. Dicho sea de paso el crossover es el principal operador genético.

- **Mutación:** En la evolución, una mutación es un suceso bastante poco común, y por lo general en la mayoría de los casos ésta resulta ser letal, pero, en promedio, contribuyen a la diversidad genética de la especie. En el G.A. la operación asociada actúa de forma análoga cambiando de forma aleatoria el material genético de algunos individuos de las generaciones futuras.

En la bibliografía relacionada al tema de los algoritmos evolutivos y sistemas expertos existe variada documentación sobre la calibración de Redes Neuronales y FIS mediante el empleo del G.A. En este último caso se ha utilizado el algoritmo genético directamente en la identificación de la estructura óptima de los FIS (Túpac et al., 1999 y Herrera et al., 1993) y de los parámetros asociados a las funciones de pertenencia e implicancia; afinidad documentada que motiva en la presente Tesis el análisis y evaluación del uso combinado de estas técnicas.

2.4 CONCEPTOS GENERALES PARA LA DEFINICIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO

El Índice de Riesgo debe ser un instrumento abstracto de evaluación y toma de decisión en tiempo real, por lo que tiene que ser fácilmente interpretable en términos cualitativos. Además, dicho indicador debe tener la propiedad de evaluar en términos jerárquicos el nivel de riesgo de los elementos afectados, según la importancia y vulnerabilidad de los mismos.

Se adopta la estructura y definición general del Índice de Riesgo entregada por Jacoby (Jacoby, 2001), trabajo en el que se realiza una clasificación exhaustiva de los tipos de elementos a ser considerados (por ejemplo Hospitales, Escuelas, viviendas, etc.) asignándoles parámetros representativos según la importancia (prioridad), nivel de amenaza, vulnerabilidad y características de las fallas que se presentan en éstos.

Adaptando las definiciones del citado estudio, se obtienen los siguientes términos y componentes del Índice de Riesgo:

- **Incertidumbre**

La incertidumbre es la carencia de un perfecto entendimiento de cómo representar el fenómeno estudiado y los procesos involucrados. La incerteza puede ser expresada en términos cuantitativos o cualitativos. Entregar una medida de incertidumbre tiene relación con el análisis de las fuentes que la provocan. Se clasifica el origen de la incerteza (Yen et al., 1971) en dos tipos según el procedimiento de análisis de la misma, el primero puede ser cuantificable estocásticamente y se refiere al asociado a cualquier proceso aleatorio u obtenido a partir de muestras estadísticas, mientras que la segunda fuente está comprendida por procesos de valor cualitativo (subjetivo), para los cuales no es disponible extraer información objetiva cuantitativa. En la bibliografía especializada se identifican las siguientes fuentes de incertidumbre: (Yen et al., 1986):

- Incertidumbres asociadas con la aleatoriedad inherente de los procesos naturales involucrados.
- Incertidumbre propia del modelo, que refleja la imposibilidad de la metodología (esquema conceptual) para representar precisamente el sistema físico “real”.
- Incertidumbres asociadas a los parámetros del modelo, las que son resultado de la imposibilidad de cuantificar exactamente los valores de las variables de entrada utilizadas en la calibración.
- Incertidumbre propia de los valores de los datos de entrada, las que a su vez tienen los siguientes orígenes:

1. Errores de medición.
2. Problemas de Inconsistencia y no homogeneidad de los datos.
3. Errores de digitalización y transcripción de los datos.
4. Inadecuada representatividad de los datos de calibración, debido a limitaciones temporales y espaciales.

Tal como se deduce de lo anterior, la incertidumbre de los modelos tiene un origen diverso, aunque en el caso de los pronósticos de caudales en tiempo real la principal fuente de incertidumbre viene dada por la **precipitación**. Hecho que puede ser explicado por la influencia de hechos puntuales o “ruidos” (temporal y espacialmente) sobre la manifestación de la precipitación.

Además, se concluye claramente que la incertidumbre o bien el riesgo asociado a un sistema de recursos hídricos debe ser estimado a partir de la combinación de los riesgos de los componentes de este, teniendo en cuenta cuales de estos es el predominante, dicho procedimiento en general no es trivial y por lo tanto merece un análisis particular para cada caso. Como en general es impracticable el obtener una incertidumbre global del sistema incorporando todos los factores, es posible tener una idea de la debilidad del mismo conociendo cuales son los elementos para los cuales el esquema es más sensible y una estimación de sus respectivas incertidumbres.

- **Elementos bajo riesgo (E)**

Corresponden a la abstracción de los componentes, de un mismo tipo, del Sistema de Alerta Temprana. Éstos tienen la propiedad de ser susceptibles a ser afectados por tormentas y crecidas de los cauces cercanos. Los elementos, tales como zonas pobladas y obras civiles, son agrupados de manera de establecer Jerarquías y analogías entre los sectores amagados.

En la presente Tesis se ha realizado una clasificación de los elementos que están bajo riesgo, distinguiendo los que se enumeran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de los elementos bajo Riesgo

| |
|---|
| + Postas, Hospitales, Consultorios |
| + Carabineros, Bomberos |
| + Ejército |
| + Intendencia Regional, Ministerios, municipios |
| + Servicios de agua, gas y electricidad |
| + Colegios, Universidades, Institutos e Iglesias |
| + Domicilios particulares (urbanos-rural) |
| + Puentes en ruta 5 Sur |
| + Puentes en camino principal y secundario |
| + Industria sector insumos y comercio |
| + Sector Agropecuario |
| + Alcantarillas y/o badén en camino principal y secundario |
| + Estadios, plazas, discotecas, teatros, centros culturales |

- **Umbral de Falla**

Se define el umbral de falla como el valor crítico de la variable de estado que provoca la falla del elemento asociado. El umbral de falla queda determinado por las condiciones de diseño o bien por los antecedentes históricos de falla del elemento. Este valor se supone constante en el tiempo, aún cuando en la realidad modificaciones del entorno del elemento afectado, como por ejemplo mejoras en defensas fluviales, impliquen cambios en las condiciones de falla.

- **Amenaza o peligro (A)**

Se define amenaza o peligro de un elemento, como la razón entre el valor actual de la variable de estado, usualmente el caudal del cauce asociado, y un cierto umbral de falla de dicho elemento.

- **Vulnerabilidad (V)**

Corresponde a la serie de características diferenciadas de un elemento, que lo predisponen a experimentar daños frente al impacto de un evento físico extremo. La vulnerabilidad se define por las condiciones socio-económicas y físicas previas a la ocurrencia de los eventos catastróficos para un elemento "E" y se cuantifica por la capacidad de la población e infraestructuras de hacerles frente. Por lo tanto, la vulnerabilidad representa la propensión de un elemento a dañarse e incluye de forma implícita las dificultades para la recuperación del mismo.

- **Riesgo**

Se asocia a la ocurrencia de un evento físico que puede causar algún tipo de daño o alteración a la sociedad, o la infraestructura.

El riesgo se crea en la interacción de amenaza con la vulnerabilidad de un elemento, en un espacio y tiempo, particular. De hecho, amenazas y vulnerabilidades son mutuamente condicionadas o creadas, dado que no puede existir una amenaza sin la existencia de una sociedad o infraestructura vulnerable o viceversa.

La magnitud del riesgo siempre está en función de las condiciones de amenaza y vulnerabilidad, siendo las últimas, de igual manera que el riesgo, condiciones latentes del sistema de alerta.

El riesgo, producto de la interrelación de amenazas y vulnerabilidades es, al fin de cuentas, una construcción sólida, dinámica y cambiante. De manera que se deben actualizar sus componentes en la medida de la evolución temporal del sistema. Resumiendo lo anterior se tiene que el riesgo es una función que tiene como variables la amenaza y la vulnerabilidad:

$$\text{Riesgo de Inundación} = f(\text{Amenaza, Vulnerabilidad})$$

- **Índice de Riesgo**

La evaluación del riesgo puede llevarse a cabo mediante una formulación general que se presenta a continuación:

$$I_R = f(E, A, V)$$

Donde la función “f” es monótonamente creciente con respecto a las variables E (elemento), A (Amenaza) y V (Vulnerabilidad).

No se considera explícitamente la duración de la falla en la formulación del Índice de Riesgo, puesto que, en general, en cauces donde dominen los efectos inerciales (torrentes), sobre los gravitacionales la duración de la falla tiene una importancia menor en comparación a la magnitud de ésta. Como se verá posteriormente, en la zona de estudio predominan los cauces con estas características. Sin embargo, el término de Vulnerabilidad (V) incorpora indirectamente la duración de la falla, ya que también representa la dificultad de recuperación del elemento.

Un procedimiento posterior consiste en escalar y “calibrar” la expresión anterior, de manera que los resultados obtenidos puedan expresarse fácilmente de forma cualitativa, esto consiste en determinar los rangos de variación del Índice de Riesgo donde se tengan valores “equivalentes” en cuanto a significado e implicancia. Un ejemplo de éstos sería fijar rangos que posean la misma interpretación del Índice de Riesgo, tales como rango 1 = riesgo Bajo, rango 2 = riesgo medio, etc.

En resumen, esta ecuación genérica permite evaluar y comparar situaciones de riesgo entre los diversos tipos de elementos, satisfaciendo los requerimientos y objetivos planteados en esta Tesis.

3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

3.1 DEFINICIÓN DEL SATR Y CRITERIOS GENERALES

El Sistema de Alerta en Tiempo Real “SATR” es la representación de los riesgos de inundación y falla de obras hidráulicas, en la zona geográfica donde se implementa el sistema de alerta temprana, topológicamente es un conjunto que posee los siguientes componentes y subcomponentes:

- Elementos bajo Riesgo (Mapa de Amenazas):
 1. Ubicación Geográfica (Cuenca)
 2. Vulnerabilidad
 3. Umbral de Falla
- Estaciones de medición (con sistema de transmisión en Tiempo Real):
 1. Ubicación Geográfica (Cuenca)
 2. Precipitación
 3. Caudal
- Modelos:
 1. Pronóstico de caudales
 2. Proceso de la información (Índices agregados)
- Sistema de Visualización

La variable de Estado del Sistema corresponde a valor del Índice de Riesgo en los elementos o en un conjunto de estos.

A continuación se explican los criterios de elección de elementos incorporables en el SATR y de determinación del Umbral de Falla.

3.1.1 Criterios de factibilidad de modelación de los elementos bajo riesgo

Para determinar los elementos que serán modelados e incorporados al Sistema de Alerta en Tiempo Real (SATR), es necesario establecer primero ciertas condiciones que estos deben cumplir.

De las aproximadamente 160 zonas amagadas en la VII región, catastradas durante el proceso de recolección de antecedentes, los elementos particulares que pueden incorporarse al sistema de alerta deben poseer al menos las siguientes características:

- La cuenca del cauce asociado a las fallas del elemento debe tener un control limnigráfico representativo.
- Conocimiento de las fechas de falla recurrentes del elemento.
- Existencia de valores de caudales instantáneos medidos en la estación limnigráfica para fechas concurrentes a las fallas del elemento.

3.1.2 Criterios de asignación del Umbral de Falla.

En primer lugar, es fundamental, tal como se señala en el capítulo 2.4, hacer hincapié en la necesidad de realizar una adecuada estimación del umbral de falla, dado que la sensibilidad y comportamiento del SATR está sumamente ligado a este valor.

Para determinar los umbrales de falla, de los elementos o zonas amagadas, se requiere disponer de registros históricos para los cuales se sabe que hubo problemas de inundación en dichos puntos, es decir conocer las fechas y magnitudes de las inundaciones que se produjeron durante estos episodios.

Lo anterior a la vez se traduce en la necesidad de disponer de mediciones de caudal concurrentes para estos períodos en la estación limnigráfica utilizada en la modelación del elemento asociado.

Se consideró como criterio, no estricto, de validez para la asignación del umbral de falla, disponer información durante al menos tres eventos extremos en los cuales se presentan fallas del elemento. Además, los caudales registrados deben ser consistentes entre dichos eventos, es decir que el rango de variación de estos debe ser el menor posible. No obstante, las imprecisiones y ambigüedades de la información extraída de la prensa escrita sobre el instante de la falla, hacen que los valores umbrales puedan tener un alto grado de incertidumbre.

El umbral de falla es asumido constante en el tiempo, aún cuando en la realidad existen modificaciones del entorno del elemento afectado, como por ejemplo mejoras en defensas fluviales u otras, que implican cambios en las condiciones de falla. Por ello se recomienda, que particularmente en las zonas donde se disponga de menos de tres registros para determinar el umbral de falla, se realice una evaluación y seguimiento para afinar este valor.

Luego de todas estas consideraciones y bajo el supuesto implícito que existe una correlación perfecta entre lo registrado en la estación limnigráfica y la ocurrencia de inundaciones en el sector en estudio, se define el caudal umbral (Q_{falla}) como el mínimo de los caudales instantáneos¹, que fueron registrados durante los eventos de inundación en la estación limnigráfica con la cual se realiza la modelación del elemento.

¹ Se considera a los registros limnigráficos como valores instantáneos.

3.2 DEFINICIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO

Para determinar y comprender las componentes que definen el Índice Riesgo adoptado en este trabajo, es necesario tener claridad en los siguientes conceptos, los cuales fueron caracterizados en el capítulo 2.4.

- **Amenaza o peligro (A)**
- **Incertidumbre**
- **Vulnerabilidad (V)**
- **Elementos bajo riesgo (E)**
- **Umbral de Falla**
- **Riesgo**

También, como se mencionó en el capítulo 2.4, es importante tener presente que se ha realizado una clasificación de los elementos que están bajo riesgo, estos elementos se enumeran en dicho capítulo en la tabla 2.1.

La evaluación de riesgo de un elemento puede llevarse a cabo mediante una formulación general presentada en la ecuación 3.1.

$$I_R = E \times A \times V \quad \text{EC 3.1}$$

La ecuación 3.1, permite evaluar y comparar situaciones de riesgo entre los diversos tipos de elementos, los que al momento de producirse una situación de emergencia tienen asignado dicho valor.

Los elementos mezclan 2 características propias, además de la amenaza (A), que es un factor externo y circunstancial, durante la evaluación del Índice de Riesgo I_R . Por una parte está su importancia relativa en términos de funcionalidad durante situaciones de emergencia, lo que se expresa mediante el índice E, que varía entre 0-100. La otra característica es la vulnerabilidad, V, la que se mide en valores de 1, 2 y 3, que representan si el elemento es poco vulnerable, vulnerable ó muy vulnerable, respectivamente.

Para el desarrollo de la Tesis, el Índice de Riesgo se ha definido separadamente para zonas o poblados con poblaciones mayores a 10.000 habitantes y menores a 10.000 habitantes, lo que ayuda a definir distintos grados de vulnerabilidad que los elementos afectados tienen para enfrentar situaciones de emergencia. De este modo, el Índice de Riesgo " I_R " fue adaptado para ser expresado de la forma que se señala en la ecuación 3.2.

$$I_r = \alpha \times A^2 \times V^a \times E^b \quad \text{EC 3.2}$$

En las figuras 3.1 y 3.2 se representan los valores de la aplicación de los parámetros a, b y α , los cuales fueron “calibrados”, de manera que elementos sujetos a igual estado de amenaza “A” tengan un valor “jerarquizado” del Índice de Riesgo “I_r” según importancia relativa de los mismos. Luego de esta etapa de calibración cualitativa se obtienen las relaciones para estimar el Índice de Riesgo “I_r”. (Ecuaciones 3.3 y 3.4)

- Para poblaciones mayores o iguales a 10.000 habitantes:

$$I_r = 44 \times A^2 \times V^{0.0917} \times E^{0.178} \quad \text{EC 3.3}$$

- Para poblaciones menores a 10.000 habitantes:

$$I_r = 48.6 \times A^2 \times V^{0.122} \times E^{0.139} \quad \text{EC 3.4}$$

Los valores de vulnerabilidad (V) y elemento (E) son valores constantes durante el evento y podrían eventualmente cambiar una vez que opere el sistema en forma permanente y existan nuevos antecedentes para su optimización. La valorización mediante la clasificación de los elementos presentados, así como la vulnerabilidad asociada a cada elemento se presenta en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Índices de Vulnerabilidad y priorización de elementos tipo (valorización)

| mayor 10.000 hab | menor a 10.000 hab | | |
|--------------------------|--------------------------|---|---------------|
| Índice de vulnerabilidad | Índice de Vulnerabilidad | Infraestructura afectada | Elemento tipo |
| 1 | 2 | Postas, Hospitales, Consultorios | 100 |
| 1 | 2 | Carabineros, Bomberos | 100 |
| 1 | 1 | Ejército | 100 |
| 1 | 3 | Intendencia Regional, Ministerios, municipios | 70 |
| 2 | 2 | Servios de agua, gas y electricidad | 70 |
| 2 | 3 | Colegios, Universidades, Institutos e Iglesias | 70 |
| 2 | 3 | Domicilios particulares (urbanos-rural) | 50 |
| 1 | 1 | Puentes en ruta 5 Sur | 60 |
| 2 | 2 | Puentes en camino principal y secundario | 60 |
| 1 | 1 | Industria sector insumos y comercio | 50 |
| | 2 | Sector Agropecuario | 50 |
| 3 | 3 | Alcantarillas/badén camino principal y secundario | 40 |
| 2 | 2 | Estadios, plazas, discotecas, teatros, centros culturales | 20 |

Figura 3.1
Índices de riesgo para zonas con número de habitantes menor a 10.000.

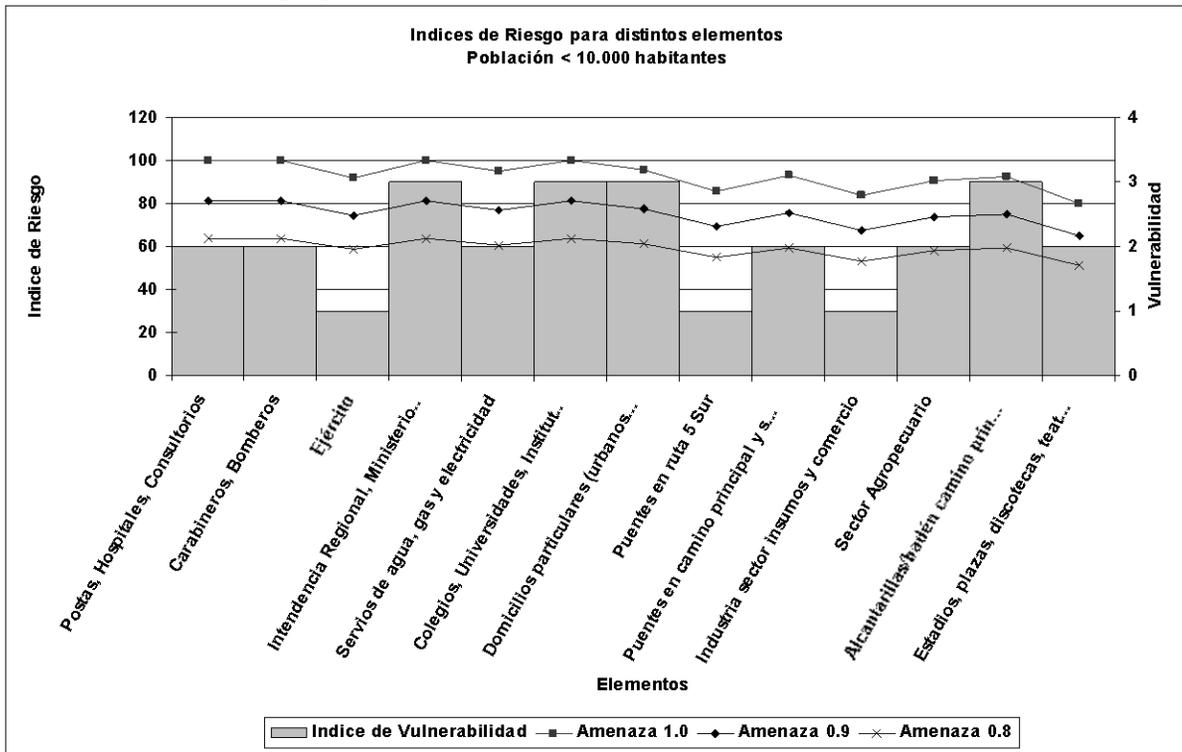
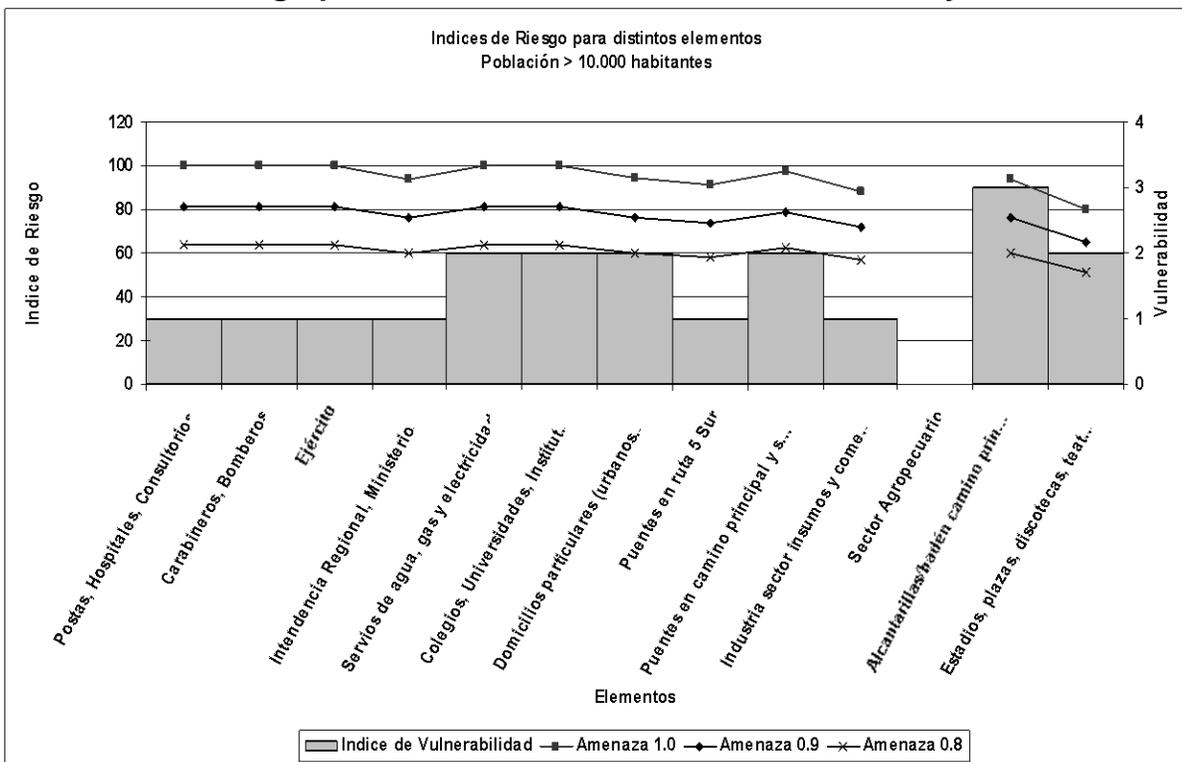


Figura 3.2
Índices de riesgo para zonas con número de habitantes mayor a 10.000.



3.3 USO DE LOS MODELOS LINEALES Y FIS PARA EL PRONÓSTICO DE CAUDALES

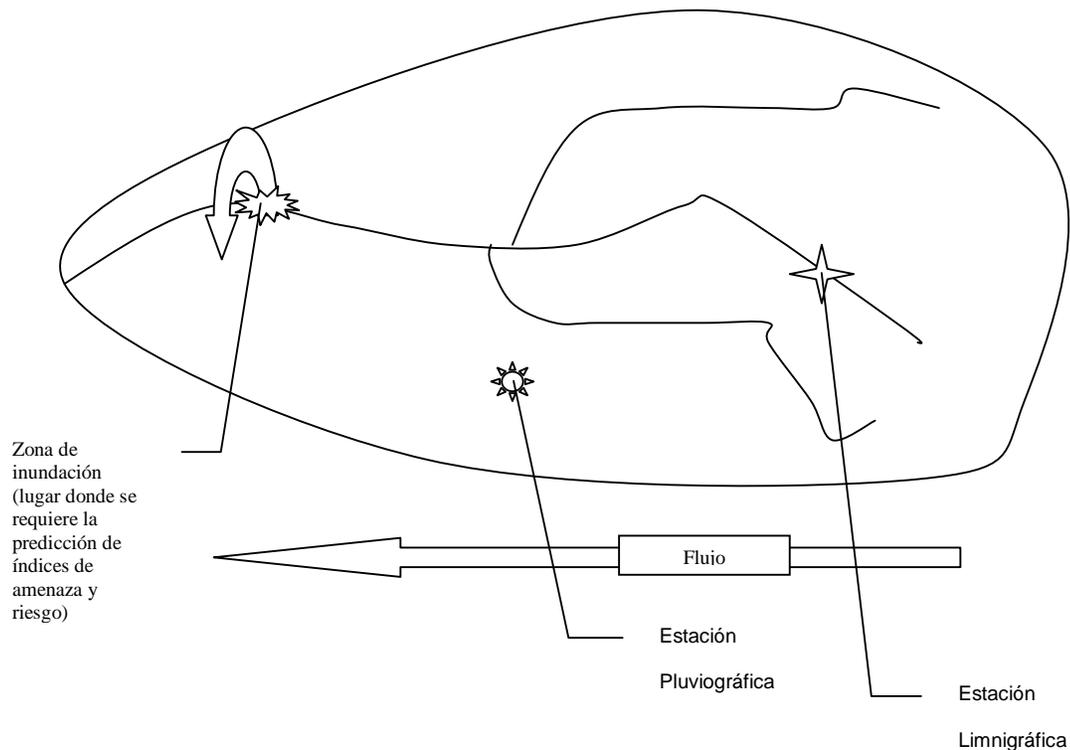
En este capítulo se expondrán las metodologías y esquemas de modelación planteados para el pronóstico de escorrentía, los cuales están compuestos por modelos concentrados de función de transferencia y el empleo de los FIS directamente para el pronóstico de caudales. Los FIS que serán implementados y evaluados en primera instancia en la Cuenca Piloto, utilizan el esquema conceptual planteado por Sugeno, (Sugeno, 1985), metodología que fue descrita genéricamente en el tema 2.1.3. Además, se detallará sobre los métodos aplicados para la calibración de los FIS, mediante el uso de los G.A. (ver tópico 2.3).

Los modelos de pronóstico buscan alertar con antelación el nivel de amenaza “A” que un elemento deberá afrontar.

Se definió la amenaza como la relación entre el caudal observado en cierto instante “ $Q(t)$ ” y el umbral de falla asociado a cierto elemento “ Q_{falla} ”.

Un esquema conceptual del problema a resolver puede verse ilustrado en la figura 3.3.

Figura 3.3 Esquema conceptual de modelación de un elemento bajo riesgo.



3.3.1 Modelos lineales de función de transferencia para el pronóstico de caudales.

Se analizan aquí las relaciones funcionales lineales, del tipo función de transferencia, para el pronóstico de caudales en los cauces asociados a las zonas amagadas (elementos).

Los modelos de función de transferencia permiten pronosticar caudales en los lugares donde existe un control fluviográfico y pluviográfico representativo. Una descripción general sobre estos modelos se encuentra en el capítulo 2.2.

Los modelos lineales utilizados se separan en dos tipos. El primero, "Modelo Lineal P-Q", corresponde a los modelos lineales que emplean como variable de estado la Amenaza " $A(t)$ ", mientras que la variable exógena se constituye por la fracción de precipitación manifestada sobre la cuenca " $I(t)$ ", durante cierto intervalo temporal anterior al actual, con respecto a la precipitación media anual de la cuenca "Pp. Media anual"; valores para los cuales se asume representativa la estación pluviográfica de la cual son obtenidos los registros. Estas estaciones pueden presentar una configuración como se esquematiza en la figura 3.3.

La estructura particular de los modelos lineales de pronóstico de caudales P-Q que se considera es arbitraria. Esta se obtuvo de forma empírica, de acuerdo a un análisis cualitativo y en virtud del principio de parsimonia, mediante el ensayo de distintas estructuras. Estos ensayos se realizaron con información de la estación fluviográfica "Río Palos en Junta con Colorado" (utilizando datos de precipitación de la estación "Potrero Grande").

Además, la topología del modelo P-Q planteada es prácticamente idéntica a la del modelo concentrado P-Q utilizado en el trabajo "Pronóstico de Caudales en Tiempo Real. ¿Modelación Concentrada o Semidistribuida? (Vargas et al. 2002). Se concluye en dicho trabajo que este tipo de Modelo Concentrado entrega mejores resultados que el Modelo Semidistribuido.

El segundo tipo de modelos lineales, "Modelo Lineal Q-Q", son aquellos que utilizan como variable de estado el caudal en la estación donde se realizan los pronósticos, y como variable exógena el caudal registrado en estaciones limnigráficas ubicadas aguas arriba de la estación asociada al pronóstico.

a) Modelo Lineal P-Q

Los modelos lineales de función de transferencia P-Q se implementaron para cauces pertenecientes a cuencas de régimen pluvial y nivo-pluvial, utilizándose una misma estructura básica en todos los casos estudiados. Los modelos lineales P-Q quedan determinados por la estructura y variables que se presentan a continuación:

- **V1 = $Q_{(t)}/Q_{falla}$ (Asociada a la variable de estado)**
- **V2 = $Q_{med(t)}/Q_{falla}$ (Asociada a la variable de estado)**
- **V3 = $Pp_{.(t)}/Pp_{.media\ anual}$ (Asociada a la variable exógena)**

Donde:

- $Pp_{.(t)}$: Precipitación acumulada en la estación pluviográfica al tiempo t, durante las últimas k hrs., lo que equivale a la expresión de la ecuación 3.5.

$$Pp_{.(t)} = \sum_{t=t-k}^{-1} I(t) \quad \text{EC 3.5}$$

- $I_{(t)}$: pulso de precipitación horario en la estación pluviográfica en la hora t.
- $Q_{(t)}$: Caudal registrado en la estación limnigráfica en la hora t.
- $Q_{med(t)}$: Promedio de los caudales registrados en las últimas "r" horas, en la estación limnigráfica al tiempo t – 1. (Ecuación 3.6)

$$Q_{med(t)} = \sum_{t=r}^{-1} \frac{Q(t)}{r} \quad \text{EC 3.6}$$

Según la nomenclatura utilizada en el capítulo 2.2, el modelo de función de transferencia es equivalente a expresar $y_{(t)}$ (variable de salida) como la variable $A_{(t+\Delta)}$, mientras que $D_{(t)}$ que es la combinación lineal de las funciones $\delta_{(t)}$ y $\lambda_{(t)}$, lo cual se resume en la ecuación 3.7.

$$y(t) = D(t) = f \left\{ \delta[Q(t), \dots, Q(t-k-1)]; \lambda[I(t-1), \dots, I(t-r-1)] \right\} \quad \text{EC 3.7}$$

$$\delta(t) = \begin{bmatrix} \delta_1(t) = V1 \\ \delta_2(t) = V2 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$\lambda(t) = \begin{bmatrix} \lambda_1(t) = V3 \end{bmatrix}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} \beta & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{bmatrix}$$

Se obtiene como salida del modelo de pronóstico la variable $y_{(t)} = V1$ en el tiempo “ $t + \Delta$ ”, con Δ = tiempo de adelanto o de pronóstico del modelo función de transferencia. En resumen, la estructura del modelo de función de transferencia es la presentada en la ecuación 3.8.

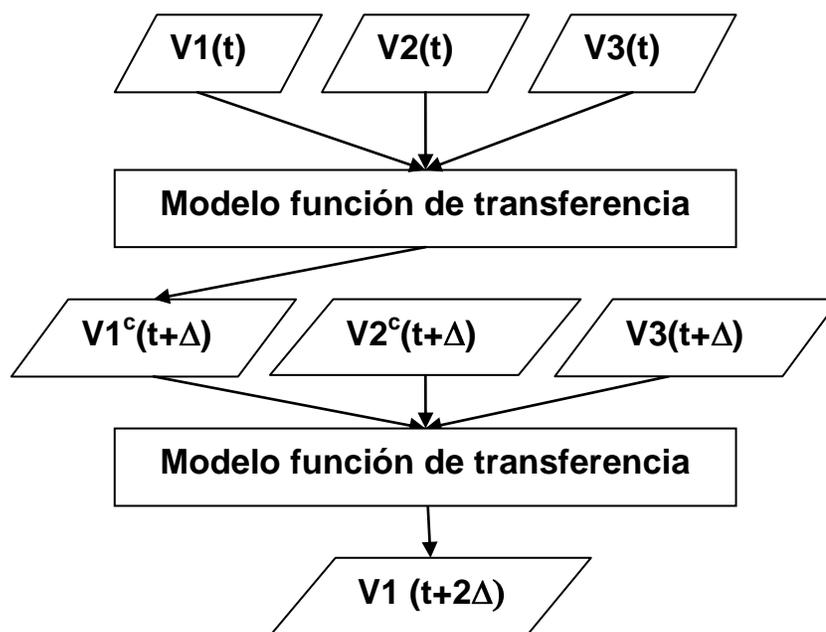
$$V1_{(t+\Delta)} = \frac{Q_{(t+\Delta)}}{Q_{falla}} = y_{(t)} = \alpha * \frac{Q_{(t)}}{Q_{falla}} + \beta * \frac{Q_{med}}{Q_{falla}} + \gamma * \frac{P_{p.(t)}}{P_{p.(media\ anua)}} \quad \text{EC 3.8}$$

Donde: α , β , γ son parámetros a calibrar mediante el método de mínimos cuadrados. Con todo lo anterior el índice de amenaza pronosticado “ $A_{(t + \Delta)}$ ” (de acuerdo a lo definido en el punto 2.4) para la zona de inundación se obtiene mediante la expresión señalada en la ecuación 3.9.

$$A_{(t+\Delta)} = V1_{(t+\Delta)} \quad \text{EC 3.9}$$

Es posible extender el tiempo de pronóstico mediante una aplicación recursiva del modelo lineal P-Q para obtener $Q_{(t + 2\Delta)}/Q_{falla}$, es decir se aplica el mismo esquema empleado para obtener $Q_{(t + \Delta)}/Q_{falla}$ reemplazando el valor de la variable $V1 = Q_{(t)}/Q_{falla}$ por $Q_{(t + \Delta)}/Q_{falla}$, manteniendo constante el valor de la variable $V3 = P_{p(t)}/P_{p. media\ anual}$ (dado que no se dispone de pronósticos de precipitación) y recalculando el valor de la variable $V2$; utilizando para ello los pronósticos de $V1$ realizados para los tiempos $t + \Delta - 1$, $t + \Delta - 2$, etc. y el valor observado de $Q_{(t)}/Q_{falla}$ en el instante “ t ” (Figura 3.4).

Figura 3.4 Esquema de aplicación recursiva del modelo función de transferencia



Luego se obtiene el pronóstico de la amenaza $A_{(t+2\Delta)}$ mediante el empleo de la ecuación 3.10.

$$A_{(t+2\Delta)} = \alpha * V1^c + \beta * V2^c + \gamma * V3 \quad \text{EC 3.10}$$

Donde:

- $V1^c_{(t+\Delta)} = \underline{Q}_{(t+\Delta)} / Q_{falla}$
- $V2^c_{(t+\Delta)} = [\underline{Q}_{(t+\Delta-1)} + \underline{Q}_{(t+\Delta-2)} + \dots + \underline{Q}_{(t+\Delta-r+1)} + Q_{(t)}] / (r * Q_{falla})$
- $V3_{(t+\Delta)} = Pp_{(t)} / Pp. \text{ media anual}$
- $\underline{Q}_{(t+\Delta-j)} / Q_{falla} = \text{Pronóstico de la Amenaza realizado en el tiempo } t - j.$

b) Modelo Lineal Q-Q

Este tipo de modelo puede asemejarse, en estructura, a los modelos lineales clásicos de propagación de crecidas, como el método de Muskingum. En general, el tipo de esquema planteado utiliza como variable de estado la Amenaza " $A_{(t)}$ " y como variable exógena la relación entre el caudal registrado en una estación limnigráfica ubicada aguas arriba de la estación asociada al pronóstico y el caudal umbral estimado en la estación donde se realiza el pronóstico.

Es importante señalar que los modelos lineales de pronóstico, del tipo "Q-Q", permiten traducir el desplazamiento espacial de la onda de crecida en un desfase temporal de ésta entre secciones de control. Éstos, presentan ventajas en cuencas nivo pluviales con respecto a los modelos función de transferencia "P-Q", dado que la distribución espacial de la precipitación puede verse afectada por efectos orográficos y de variación del gradiente térmico, lo cual puede cambiar el área pluvial aportante, y por lo tanto la respuesta de la cuenca para distintas crecidas.

En el caso de los modelos lineales Q-Q, no se presenta una estructura general como se hace para los modelos lineales P-Q, obteniéndose modelos particulares en las zonas donde estos se implementaron. Consecuentemente, la descripción y topología básica, en cada caso, se presenta en los capítulos respectivos a la modelación particular de las cuencas asociadas. Los modelos Q-Q se emplearon en las cuencas del Río Mataquito en Licantén y Maule en Forel, ambas nivo pluviales, existiendo en estos casos estaciones limnigráficas en los afluentes.

3.3.2 Empleo de los FIS para el pronóstico de caudales

En la topología de los modelos, se considera la estructura general entregada por los FIS tipo Sugeno. Además, se distinguen dos tipos en los modelos de Lógica Difusa empleados, según tipo de dato de entrada, el primero de estos son los FIS que utilizan como variables de entrada la precipitación y caudal, mientras que el segundo tipo incorpora sólo información de caudales como variable de entrada.

El objetivo del procedimiento es calibrar y validar el modelo de Lógica Difusa (FIS) para predecir en un tiempo “t” el valor de la variable de estado en el instante “t+Δ”, para el caso de los sectores amagados esta variable de estado corresponde al caudal medido en la estación limnográfica asociada.

La identificación de la estructura topológica de los FIS, conceptualmente se basa en agrupar en subconjuntos las combinaciones de variables de entrada que producen una respuesta similar del sistema (variable de salida). Se tuvo como criterio para la estructuración del modelo la parsimonia, lo que equivale a simplificar y reducir, en la medida de lo posible, el número de relaciones y parámetros que lo componen, sin que se altere significativamente el desempeño del FIS, de modo de encontrar el conjunto de reglas y funciones de membresía a ser calibrado (con sus respectivos parámetros).

El esquema utilizado considera funciones de membresía Gaussianas, es decir de la forma como se indica en la ecuación 3.11. Se emplean estas funciones, también en virtud del principio de parsimonia, por que son igualmente explicativas que las funciones triangulares, pero tienen la ventaja de poseer un grado de libertad menos que las últimas, ya que una función triangular se define como la intersección de dos rectas por lo que dispone de tres parámetros, mientras que las Gaussianas sólo tienen como parámetros “μ” y “σ”. (Figura 3.5)

$$MF_k^i(V_k) = \mu_{Gauss(\mu_i, \sigma_i)}^k(V_k) = e^{-\frac{(V_k - \mu_k^i)^2}{2\sigma_k^i}} \quad \text{EC 3.11}$$

Donde “μ_{kⁱ}” es la media de la “i - ésima” función Gaussiana de membresía asociada a la variable de entrada “V_k” y “σ_{kⁱ}” es la varianza de la misma. Además, estos conjuntos difusos tienen las características enumeradas a continuación:

1. *Soport* $\mu_{Gauss(\mu_i, \sigma_i)}^k) = V_k \in (0, \infty)$
2. *Núcleo* $\mu_{Gauss(\mu_i, \sigma_i)}^k) = \mu_k^i$
3. $\mu_{Gauss(\mu_i, \sigma_i)}^k \alpha(corte) = V_k \in [\mu_i - \sigma_i \sqrt{-2Ln(\alpha)}, \mu_i + \sigma_i \sqrt{-2Ln(\alpha)}] \dots \alpha \in [0, 1]$

4. $\mu_{Gauss}^k(\mu_i, \sigma_i)$ es una función convexa.

5. $Card(\mu_{Gauss}^k(\mu_i, \sigma_i)) = \sqrt{2\pi}\sigma_k^i$

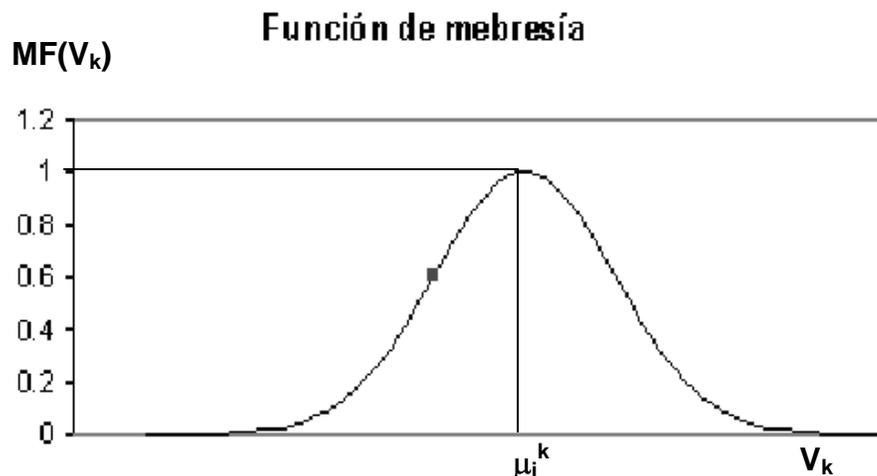
Para obtener la pertenencia conjunta “ W_i ” de cada regla, se estudia el uso de las operaciones Unión e Intersección de las funciones de membresía asociadas a cada variable, definidas por el máximo y producto respectivamente.

En consecuencia, se define la operación Intersección como el producto de las funciones de membresía de las variables de entrada para la regla i -ésima, mientras que la Unión es el máximo de estas funciones de pertenencia. (Ecuaciones 3.12 y 3.13, respectivamente).

$$W_i^\cap = \prod_{k=1}^p MF_k^i(V_k) \quad \text{EC 3.12}$$

$$W_i^\cup = \text{Max}\{MF_k^i(V_k)\}_{k=\{1,\dots,p\}} \quad \text{EC 3.13}$$

Figura 3.5 Función de membresía Gaussiana



En las ecuaciones 3.12 y 3.13, los grados de pertenencia conjuntos, vienen dados por la evaluación de las variables de entrada en sus respectivas funciones de membresía, determinando los MF_k^i , para una regla “ i ” dada, siendo los parámetros de las funciones MF_k^i la componente “no lineal” el modelo.

Como se señala en el punto 2.1.3, los FIS de tipo Sugeno consideran una función de implicancia “ A_i ” igual a la combinación lineal de las variables de entrada, tal como se presentó en la ecuación 2.14.

La salida “des-Fuzzyficada” o salida numérica del FIS (variable de estado pronosticada), se obtiene calculando el promedio ponderado de los A_i por sus

respectivos grados de cumplimiento conjunto para todas las “n” reglas, de la forma que se indicó en la ecuación 2.16, según la definición de W_i que se utilice.

Para un FIS de “p” variables de entrada “ V_k ” (con “m” funciones de pertenencia asociadas a cada una de éstas) y una variable salida, el número de parámetros a calibrar depende de la cantidad de conjuntos difusos asociados a cada una de éstas; en los FIS estudiados se considera un número “ $m = n = p$ ” constante de funciones de membresía para todas las variables de entrada. De lo anterior se deduce (dado que cada conjunto difuso o función de membresía posee dos parámetros “ μ ” y “ σ ”) que el esquema difuso dispondrá de $2n^2$ parámetros no lineales.

Por otro lado, se tiene que para la salida difusa “ A_i ” (componente lineal del modelo), correspondiente a cada regla “ R_i ”, están asociados “p” parámetros “ a_k^i ” asociados a la combinación lineal de las variables de entrada más una constante “ a_0^i ”. Como se dispone de un total de “n” reglas el número de parámetros lineales del esquema es $n*(n+1)$.

En general, el número total de parámetros “N” que determina los grados de libertad del FIS es la suma de los parámetros lineales más los no lineales, de modo que se señala en la ecuación 3.14. (Obs.: en este caso $n=m=p$, tal que $N = 3n^2 + n$)

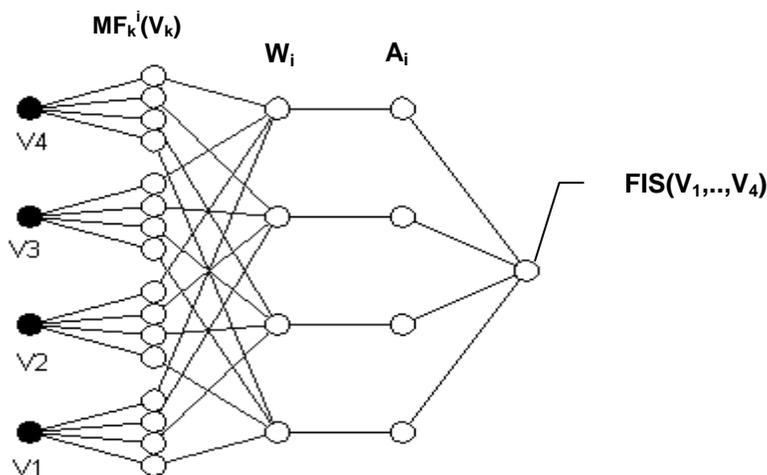
$$N = 2mp + n(p + 1) \quad \text{EC 3.14}$$

Es importante destacar el hecho que los FIS de tipo Sugeno permiten combinar e incorporar directamente modelos lineales de función de transferencia dentro de la componente lineal. Otra forma de ver esto, es considerar que los modelos lineales o de función de transferencia son un caso particular de FIS tipo Sugeno, ya que éstos cuando poseen una regla o inferencia única ($n=1$) derivan en un modelo lineal, puesto que se cancela la parte no lineal. Por lo tanto, definiendo convenientemente las variables de entrada se pueden combinar modelos de función de transferencia, en las inferencias o las reglas A_i , los que pueden estar calibrados para distintos eventos y rangos de variación de las variables de entrada exógenas y de estado.

En el caso de los FIS implementados para el pronóstico de caudales, una vez definido el caudal de falla o umbral “ Q_{falla} ” en el elemento afectado, como se explica en el capítulo 3.1.3, se definen las variables que componen el FIS, para luego definir la estructura del mismo. En la figura 3.6 se presenta un ejemplo del esquema topológico para un FIS de tipo Sugeno, compuesto por cuatro variables de entrada y cuatro reglas o inferencias difusas.

Al igual que los modelos lineales de función de transferencia, es posible clasificar los FIS de pronóstico de caudales en relación al tipo de variable de entrada que consideren. Se denominarán FIS del tipo P-Q, si éstos contemplan el uso (de registros pluviográficos (variable exógena), mientras que los FIS del tipo Q-Q, serán aquellos que no contemplan el uso de información pluviográfica en su estructura

Figura 3.6 Ejemplo de esquema topológico de los FIS tipo Sugeno



Es recomendable tener un tiempo de pronóstico lo más grande posible, dado que los FIS de pronóstico de caudales tienen como objetivo alertar emergencias tempranamente, sin que lo anterior sea en desmedro de disponer de pronósticos que tengan una razonable precisión.

Para extender el tiempo de antelación de los pronósticos realizado con los FIS, se propone una aplicación recursiva de éstos, de manera análoga a los expuesto en el punto 3.3.1, recalculando las variables asociadas a los caudales pronosticados (variable de estado).

3.3.3 Calibración de los FIS (Tipo Sugeno) mediante el uso del Algoritmo Genético (G.A.)

Uno de los objetivos es evaluar la aplicación de los Algoritmos Genéticos (G.A.) para la calibración de los modelos de pronóstico de caudales que se plantean en el acápite 3.3.2.

Con el objeto de estudiar la aplicación más apropiada de los G.A. al problema de calibración de los FIS, se ensayó el empleo de este algoritmo para la calibración de un FIS tipo Sugeno de estructura simple, para ello se utilizó la función trigonométrica “Coseno” como ejemplo, la cual será aproximada mediante un FIS.

Se aproxima la función Coseno, en el intervalo $[0, 2\pi]$, mediante el uso de un FIS tipo Sugeno, el cual está compuesto por dos reglas y una variable de entrada “x”, la cual pertenece al intervalo $[0, 2\pi]$.

Se emplean funciones de pertenencia o membresía (parte no lineal del modelo) Gaussianas, tal como se describe en la ecuación 3.15, empleándose la operación intersección definida como el producto para la obtención de la pertenencia conjunta (ecuación 3.12).

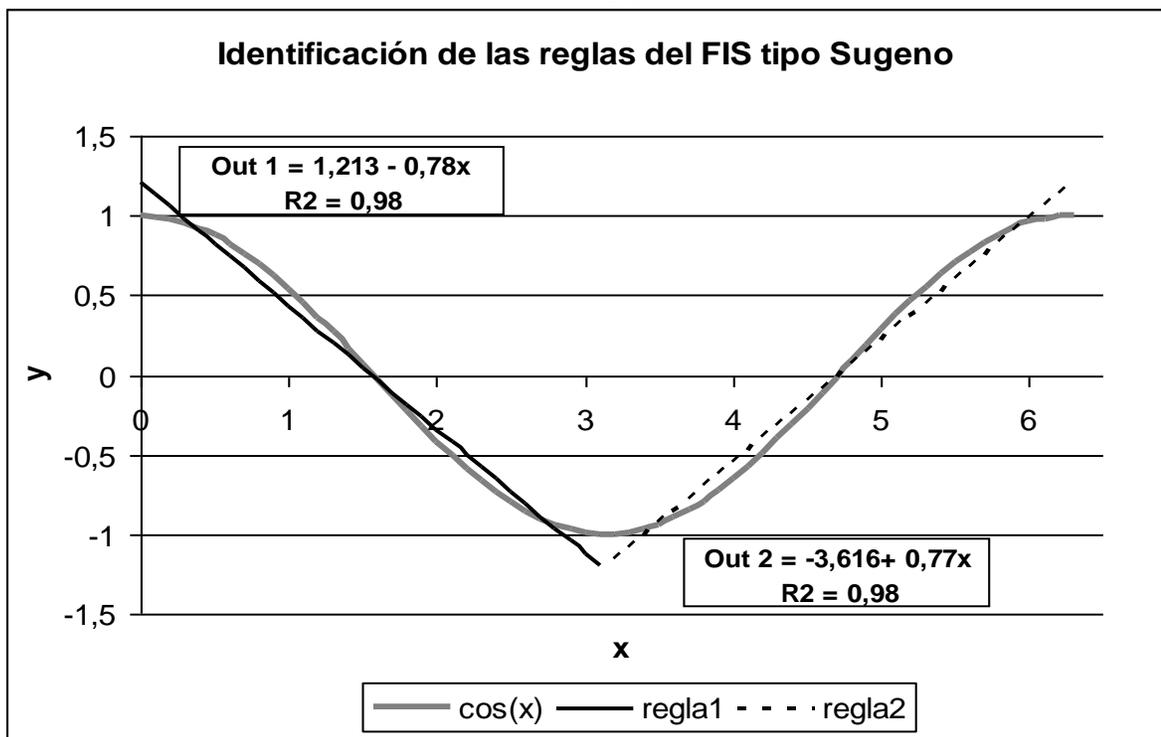
$$MF^i(x) = e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}}$$

EC 3.15

Cada una de las reglas o funciones de implicancia (Parte lineal del modelo) “A_i” (i = 1, 2) se obtienen mediante un ajuste por mínimos cuadrados para un cierto rango de variación de la variable “x”.

La primera regla “A₁” se obtiene de la recta de regresión lineal que ajusta Cos(x) en el intervalo (0, π), mientras que la segunda regla “A₂” ajusta Cos(x) en el intervalo (π, 2π), tal como se presenta en la figura 3.7.

Figura 3.7 Determinación de las reglas del FIS para aproximación de la función Cos (x)



Como se aprecia en la figura 3.7 las reglas del FIS quedan definidas de la siguiente forma:

- **A₁ = 1.213 – 0.78x**
- **A₂ = - 3.616 + 0.77x**

El ejercicio consiste en calibrar los parámetros de la parte no lineal del FIS, proponiendo que la función Cos (x) se aproxime en el intervalo [0,2π] por la relación presentada en la ecuación 3.16.

$$\cos(x) \approx FIS(x) = \frac{A_1 e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + A_2 e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}}}{e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}}} \quad \text{EC 3.16}$$

Como se deduce de la ecuación 3.16, la estructura del FIS consta de dos reglas ($n=2$) y dos funciones de pertenencia ($m=2$) para la variable x ($p=1$).

La parte lineal (A_1 y A_2) está compuesta por dos ponderadores de la variable x más dos constantes, por lo tanto el número de grados de libertad “N” o cantidad de parámetros del FIS es igual a $N = 2*m*p + n*(p+1) = 8$.

Dado que sólo se desconoce el valor de los parámetros de la parte no lineal del FIS, la cantidad de parámetros a estimar empleando Algoritmo Genético es igual a $2*m*p = 4$, siendo estos μ_1 , μ_2 , σ_1 y σ_2 .

a) Metodología de calibración del FIS para una aproximación de la función Cos(x)

Tal como se expresó previamente (tema 2.3), esta metodología se basa en una búsqueda adaptativa del conjunto de parámetros (individuos) que entregan un mejor ajuste del modelo, en base a los resultados observados.

El G.A. utilizado, en general, contiene los siguientes pasos para la búsqueda de los mejores “individuos” que componen la población de parámetros estimados durante la calibración:

1. Generación de una población inicial.
2. Evaluación en el FIS de los individuos de la población.
3. Estimar el ajuste del FIS para cada individuo evaluado.
4. Jerarquización de los individuos según desempeño (ajuste).
5. Elección del par de individuos de mejor desempeño (ajuste).
6. Reproducción sexual de los individuos de la pareja seleccionada.
7. Mutación de los genomas (parámetros) de los “hijos” resultantes de los individuos reproducidos.
8. Evaluar en el FIS la descendencia.
9. Reinserción de los hijos en la población inicial, estos individuos reemplazan a los de peor desempeño.
10. Volver al punto 2 hasta que se cumpla el número de iteraciones máximo o bien algún criterio de convergencia.

Una vez identificada la parte lineal del FIS (ver figura 3.7), se procedió a implementar la metodología de calibración de la parte no lineal mediante el uso del GA tal como se explica a continuación.

I. Generación de la población inicial y codificación de los genes:

Esta etapa consiste en generar la población inicial (primera generación), la cual es un conjunto de individuos, los cuales a su vez son conjuntos de valores de los parámetros (μ y σ) a estimar, estos parámetros son llamados cromosomas.

El proceso es aleatorio y se basa en alterar los valores de los parámetros de un conjunto inicial, el cual es información de entrada del algoritmo, obteniendo de esta forma un número determinado de individuos "Nind" que componen la población inicial, siendo Nind una variable de entrada del GA. La generación de la población inicial, para el ejemplo estudiado, se esquematiza en la figura 3.8.

Luego se procede a codificar en "genes" los valores de los parámetros; esto se hace convirtiendo los valores asociados en una serie binaria de largo dado por la base que se utilice. Este largo de serie o cantidad de genes componentes de cada parámetro determina el nivel de precisión "Prec" con el cual se pretende estimar dichos cromosomas (parámetros del FIS). Un esquema de codificación en genes se presenta en la figura 3.9.

Por lo tanto, el número total de genes "Ngen" que caracteriza a los individuos de la población es igual al cuádruple del número de genes de cada cromosoma (**Ngen = 4 x Prec**).

Figura 3.8 Esquema de generación de población inicial

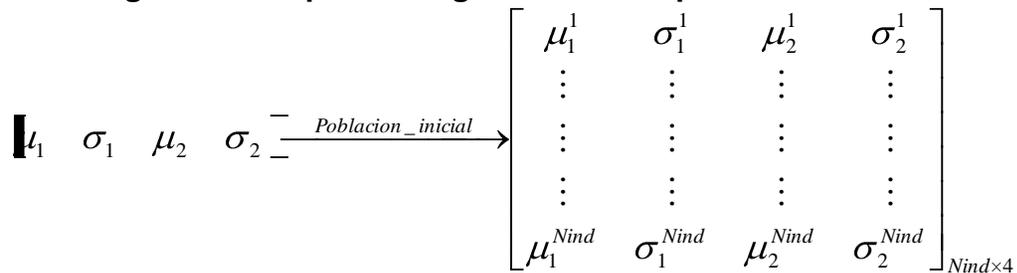
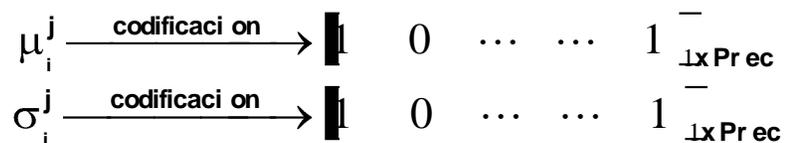


Figura 3.9 Esquema de codificación de los cromosomas en genes (individuo j-ésimo)



II. Evaluación en el FIS de la población:

Esta etapa se basa en evaluar el FIS, según el ajuste del mismo a los valores observados, para los distintos parámetros constituyentes de cada individuo, obteniendo el valor de la función objetivo “FO”, o eurística de calibración que se pretende minimizar, asociado a estos. Esta función se definió como:

$$FO^{j \in \{1, \dots, Nind\}} = \sum_{x \in [0, 2\pi]} (FIS^j(x) - Cos(x))^2 \quad \text{EC 3.17}$$

De esta forma se obtienen un total de “Nind” valores de FO, cada uno de éstos asociados al FIS correspondiente para el j-ésimo individuo evaluado.

III. Ranking del ajuste de los individuos y elección de los progenitores:

Una vez evaluado el ajuste de los individuos pertenecientes a la población se procede a asignar un Ranking de desempeño a los mismos. Para estos efectos se asigna arbitrariamente una “calificación” máxima para el individuo de mejor ajuste, lo que equivale al de menor FO asociada (en el caso estudiado la nota corresponde al valor 2) mientras que el integrante de la población de peor desempeño se le asigna una calificación igual a 0. El resto de los individuos obtiene un Ranking con valores comprendidos en el intervalo $(0^+, 2^-)$, el cual se obtiene, luego de ordenarlos correlativamente de mayor a menor FO, de manera proporcional a la ubicación relativa, como se presenta en la ecuación 3.18 (correspondiendo el valor $j = 1$ al individuo de mejor ranking intermedio y $j = Nind - 3$ al peor):

$$Ranking(FIS^{j \in \{1, \dots, Nind-3\}}) = \frac{2(Nind - 2 - j)}{Nind} \quad \text{EC 3.18}$$

En esta etapa se realiza la elección del par progenitor, estos sujetos engendrarán los nuevos individuos que pasarán a formar parte de la población en la generación siguiente. La selección de la pareja de “Padres”, se realiza por el método llamado “método de Ruleta” (Estévez, 1997), lo que equivale a asignar una probabilidad de selección en directa relación al valor del Ranking de los individuos. Este esquema de “Ruleta” se compone por los siguientes pasos:

- Determinar la suma “S” de los Ranking de los individuos de toda la población, tal que:

$$S = \sum_{j=1}^{Nind} Ranking(FIS^j)$$

- Relacionar uno a uno los individuos con segmentos continuos en la recta lineal $[0,S)$, tal que cada segmento individual sea igual en su tamaño a su grado de adaptación (Ranking).
- Generar un número aleatorio “x” tal que:

$$x \rightarrow U[0, S)$$

- Seleccionar el individuo cuyo segmento cubre al N° aleatorio “x”.
- Repetir el proceso hasta obtener el número deseado de la muestra, en el caso de elección de los “Padres” este número es igual a 2.

Es importante mencionar que el Ranking es utilizado también para identificar los individuos que abandonarían la población en la generación siguiente, esto equivale a la “muerte” de los componentes menos adaptados en virtud del principio de selección natural. Cabe señalar, que se considera un tamaño de población constante en todas las generaciones.

IV. Cruza (Crossover) de los individuos “Padres”:

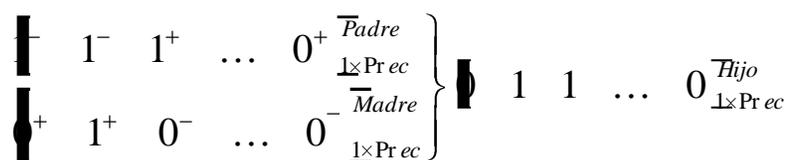
Esta operación se realiza a nivel de “genes” de los individuos “Padres”, seleccionados en la etapa anterior, en particular el método de cruce empleado intercambia de manera correlativa los genes entre los cromosomas de estos individuos, de tal forma que los “hijos” de éstos poseen inicialmente un aporte equitativo de la información genética de sus “Padres”.

Además, los genes que son intercambiados son distintos para cada hijo, obteniendo de esta forma individuos distintos, pudiendo darse el caso fortuito que algunos “hermanos” posean la misma información genética, estos corresponderían a individuos “gemelos”.

Para seleccionar que genes se intercambiaran, se elige de manera aleatoria (con distribución de probabilidad uniforme) la mitad de los genes del Padre, siendo estos los que se conservaran para el hijo en la posición correspondiente, rellenando el resto de los genes con el valor correlativo que presentan los genes de la “Madre”.

Esta operación se esquematiza en la figura 3.10 para un cromosoma dado (parámetros μ ó σ).

Figura 3.10 Esquema de intercambio del material genético de un cromosoma. (Crossover)



Donde + es el Gen que se preserva para el hijo (dominante) y – es el gen que no se conserva (recesivo).

Es importante señalar que el número de hijos por cruza “Nhijos” es constante en todas las generaciones y que este es un parámetro del algoritmo.

V. Mutación de la descendencia:

La mutación consiste en el fenómeno espontáneo de cambio en los genes de los cromosomas que describen al individuo. Tal como se menciona en el capítulo 2.3, la mutación, en promedio, contribuye a la diversidad genética de la especie. En el G.A. la operación asociada actúa de forma análoga a la realidad, cambiando de forma aleatoria el material genético de algunos individuos de las generaciones futuras.

El cambio de los genes de los cromosomas de los individuos, en esta aplicación en particular, se define mediante una probabilidad de mutación “Pmut” la cual es un parámetro de entrada del GA, de manera que la mutación tiene efecto si una variable aleatoria (de distribución uniforme o Random) queda comprendida dentro de cierto rango de variación.

En resumen, esta operación del G.A. puede resumirse de la manera que se expresa a continuación:

$$\begin{aligned}
 & \text{Sea} \\
 & x \rightarrow U [0,1] \\
 & P_x \leq Pmut \Rightarrow Gen_k = 1 - Gen_k^0 \\
 & P_x > Pmut \Rightarrow Gen_k = Gen_k^0 \\
 & k \in \{1, \dots, Ngen\}
 \end{aligned}$$

Siendo Gen_k^0 el valor del gen (0 ó 1) previo a la aplicación del operador mutación. Cabe recalcar que el operador mutación se aplica sobre la descendencia de la generación en curso, es decir para los hijos de los obtenidos en la etapa de “Crossover”.

VI. Evaluación en el FIS e inserción de los “hijos” en la población original:

Este paso del GA corresponde al cálculo de los FIS para cada “Hijo”, empleando la heurística señalada en la ecuación 3.17 para obtener el valor de FO de cada uno, como se presenta en la ecuación 3.19.

$$FO^{j \in \{1, \dots, Nhijos\}} = \sum_{x \in [0, 2\pi]} (FIS^j(x) - Cos(x))^2 \quad \text{EC 3.19}$$

El objetivo de esta etapa es obtener el Ranking de los descendientes, para estimar posteriormente las posibilidades de inserción de éstos en la población original. El Ranking se obtiene de forma análoga a lo presentado en el punto 3, reemplazando el valor del parámetro Nind por Nhijos. Luego, se reinserta en la población original los “hijos” que reemplazan a los sujetos de peor desempeño, siempre que su ajuste o “fitness” sea mejor que el del individuo reemplazado. De esta forma se obtiene una nueva población, la que debe ser mejor adaptada que la correspondiente a la generación anterior.

VII. Evaluación en el FIS e inserción de la población correspondiente a la nueva generación:

En esta etapa se evalúa la nueva población total obtenida, la cual incluye los sujetos insertados y los sobrevivientes de la generación anterior, tal como se señala en el punto II, repitiendo el algoritmo hasta que se satisfaga alguna de las condiciones de término, siendo la primera un número máximo de iteraciones, mientras que la segunda corresponde a una condición de ajuste del mejor individuo de la generación, el cual debe tener una FO menor a un valor objetivo de “FO” (FO_{max}).

b) Resultados de calibración del FIS para aproximación de función Cos(x)

Para la calibración del FIS se considera una población constante de 40 individuos, esta cantidad de “hijos” por generación es igual a la población total, de modo que éstos reemplazan a todos los individuos de la generación anterior.

Se impone que la probabilidad de mutación “ p_{mut} ” es igual a un 1%. La condición de término del Algoritmo se produce cuando el valor de la función objetivo “Fo” del mejor individuo de la iteración cumple que $Fo < FO_{max.} = 0.009$, o bien para un número máximo de 100 iteraciones (generaciones). Se utilizó una longitud de cromosoma “Prec = 15” (cantidad de genes que constituyen un parámetro). Cabe señalar que todos éstos son parámetros del programa, los cuales fueron probados en distintas combinaciones en virtud de la convergencia del método de calibración.

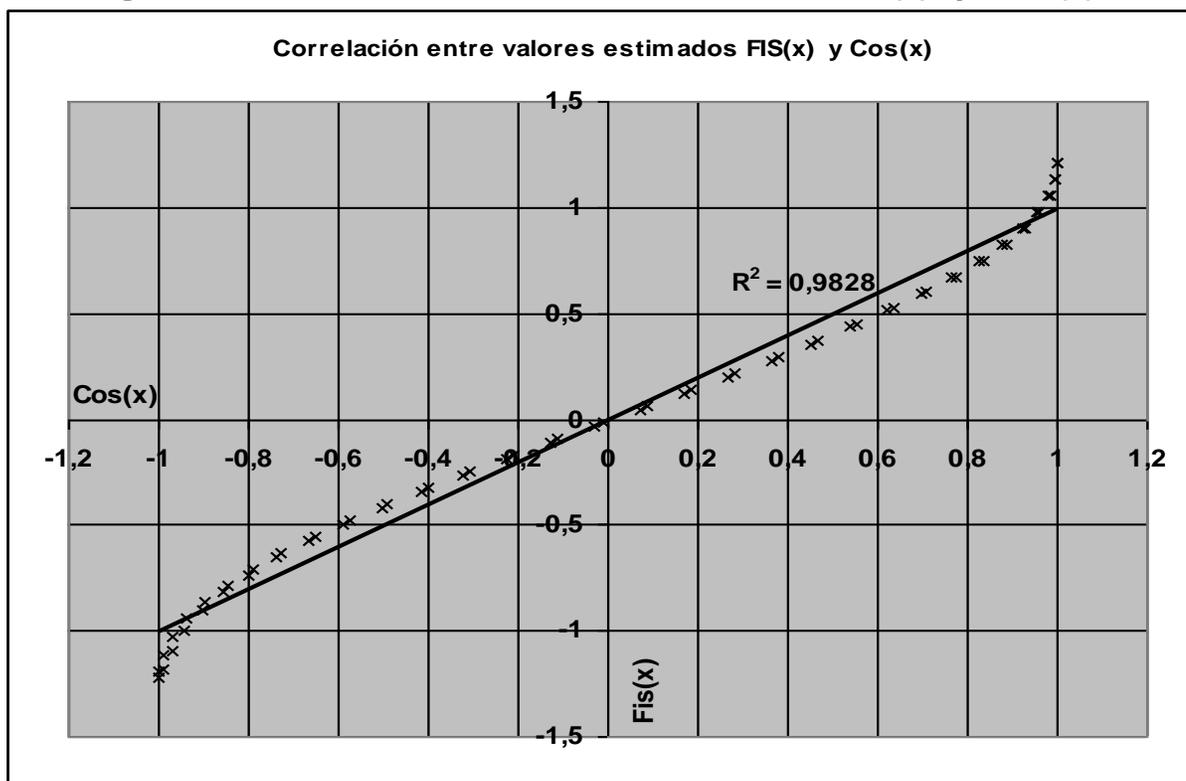
Una vez aplicado el G.A., con las consideraciones anteriores para calibrar el FIS expuesto en este capítulo, se obtienen los resultados de ajuste del FIS presentados en la Figura 3.11. El valor de los parámetros estimados del FIS los que se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros estimados del FIS para $P_{mut} = 1\%$

| Parámetros estimados del FIS | | |
|------------------------------|-----------------|--------------------|
| Regla Nº 1 | μ_1 0,27 | σ_1 0,85 |
| Regla Nº 2 | μ_2 4,86 | σ_2 0,55 |

De la evaluación del FIS, con los parámetros y reglas mencionados anteriormente, se calculan los valores que se presentan en la figura 3.12.

Figura 3.11 Correlación entre valores estimados “FIS(x)” y “Cos(x)”



Se estudia los valores de FO para los individuos que entregan el mejor ajuste en cada generación, observándose el valor de los “fitness” (FO) de éstos por generación en la figura 3.13. De la figura 3.13 se desprende que el individuo que cumple la condición de término $Fo < Fo_{max}$ pertenece a la generación Nº 89, con un valor $Fo = 0.00897$.

Figura 3.12 Evaluación del FIS calibrado para $P_{mut} = 1\%$

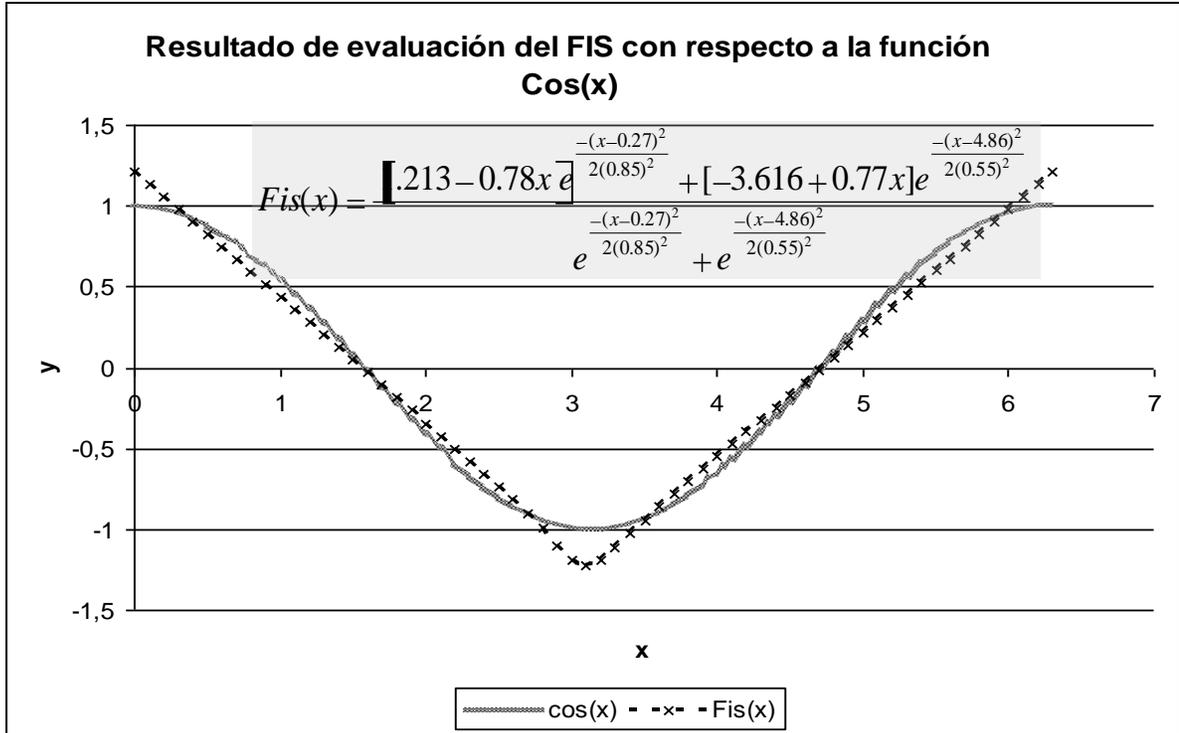
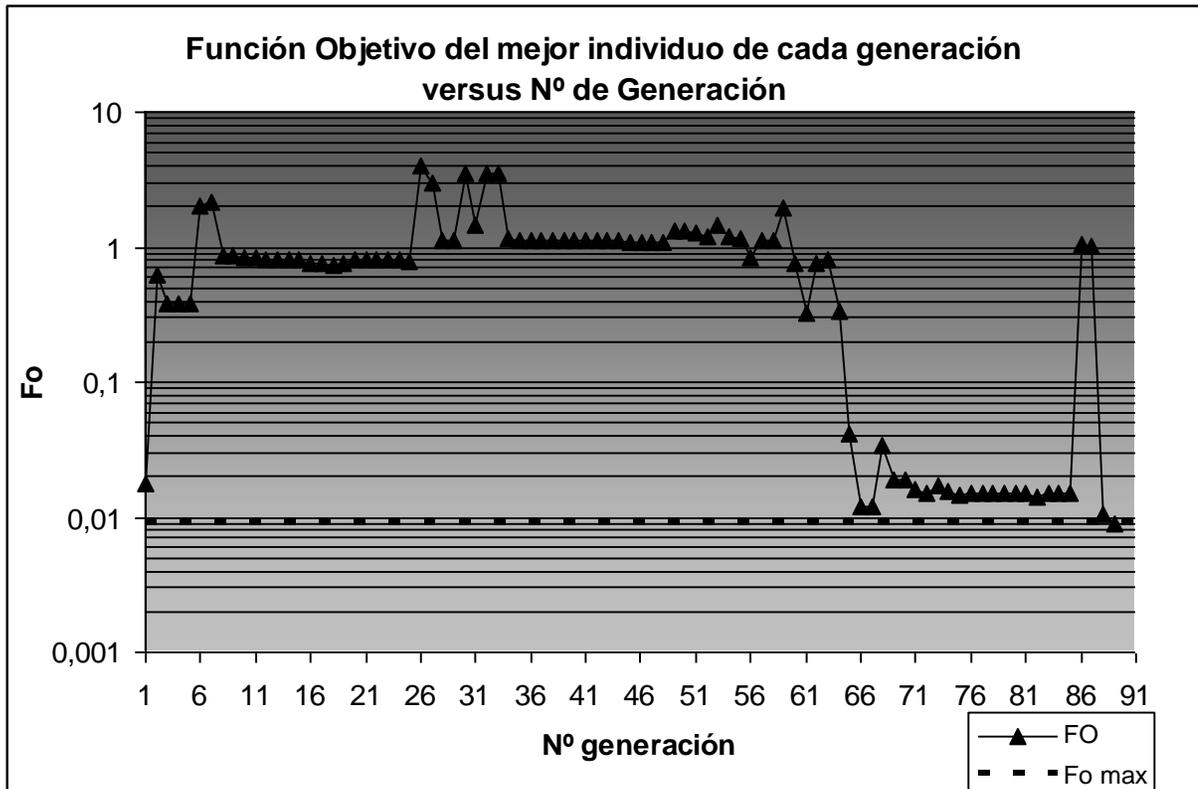


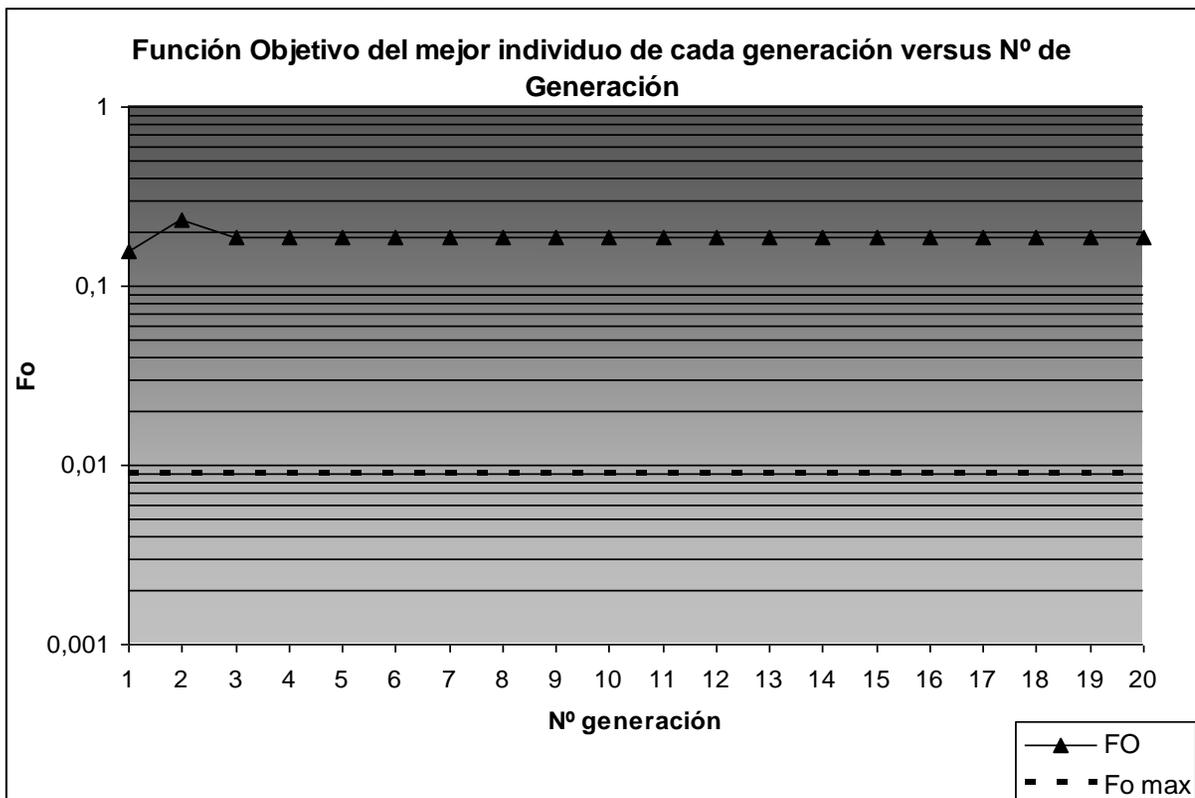
Figura 3.13 Resumen de la convergencia del G.A. para la estimación de los parámetros del FIS, $P_{mut} = 1\%$



En la figura 3.13 se aprecia que la convergencia del G.A. a los parámetros “óptimos” es bastante errática, durante el transcurso de las iteraciones, presentando de forma clara varias “zonas” de convergencia o de “Fitness” parecido entre generaciones contiguas. Las “zonas” de convergencia sólo son perturbadas por la operación de mutación, la cual logra crear “diversidad” en poblaciones estancadas, dichas poblaciones presentan individuos similares y por lo tanto de ajuste parecido.

La importancia de la mutación queda de manifiesto en la figura 3.14, donde se aprecia que existe una única “zona” convergencia, para un escenario de calibración que emplea una probabilidad de mutación “ p_{mut} ” nula y un número máximo de generaciones igual a 20, el resto de los parámetros de calibración son idénticos a los utilizados en la calibración del FIS para una probabilidad de mutación igual al 1%.

Figura 3.14 Resumen de la convergencia del G.A. para la estimación de los parámetros del FIS, $P_{mut} = 0\%$

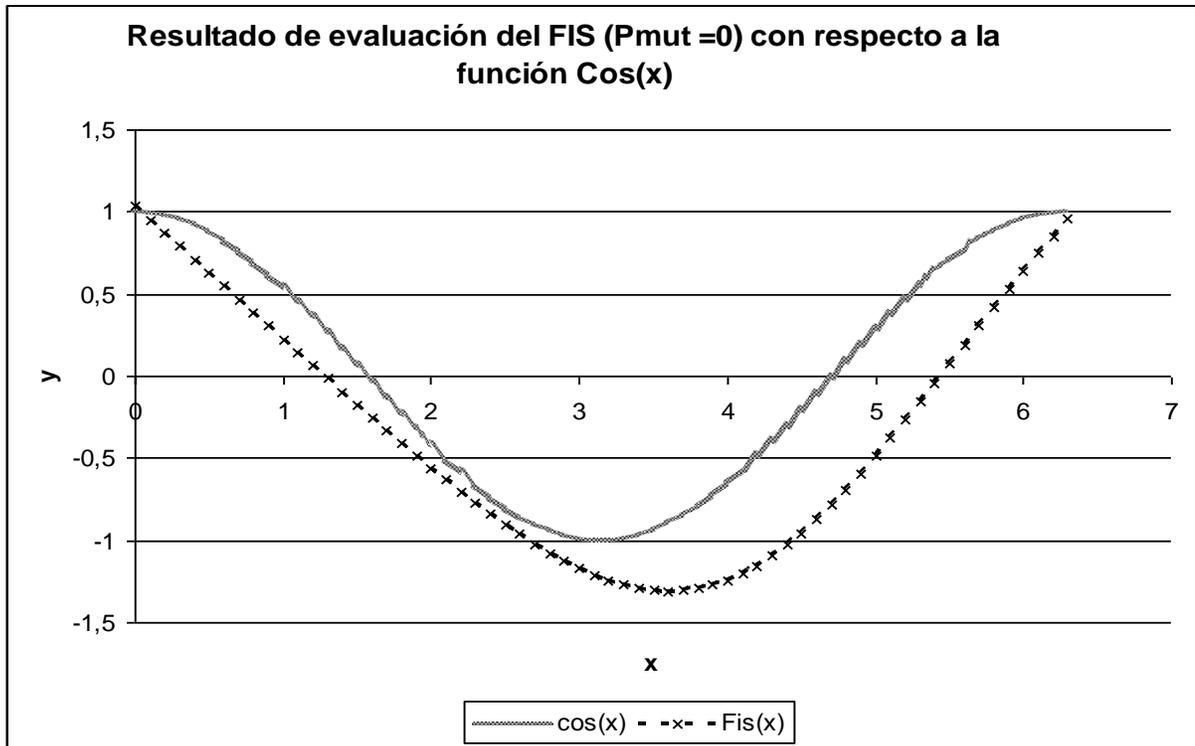


Como se aprecia en la figura 3.14, la convergencia del G.A. es bastante rápida, tres generaciones, pero a una solución que no es la óptima ($FO \gg FO_{max}$), obteniéndose los parámetros del FIS asociado presentados en la tabla 3.3, con los cuales se obtiene la aproximación de $\text{Cos}(x)$ entre 0 y 2π , que se muestra en la figura 3.15.

Tabla 3.3 Parámetros estimados del FIS para $P_{mut} = 0\%$

| Parámetros estimados del FIS ($P_{mut} = 0$) | | |
|---|-----------------|--------------------|
| Regla Nº 1 | μ_1 1,20 | σ_1 2,02 |
| Regla Nº 2 | μ_2 8,74 | σ_2 3,34 |

Figura 3.15 Evaluación del FIS calibrado para $P_{mut} = 0\%$



En la estimación de los parámetros del FIS que mejor aproxima la función $\text{Cos}(x)$ se necesita de una cantidad importante de recursos computacionales, debido a la cantidad de operaciones del G.A. e información manipulada. Estos recursos son ocupados en el almacenamiento y manipulación de los genes que componen los cromosomas de cada individuo de la población. Por lo tanto, el valor de los parámetros de calibración del G.A. deben ser adecuados a los recursos computacionales disponibles, ya que los tiempos de cálculo crecen en razón del aumento del tamaño de la población (número de individuos) y la cantidad de genes que representa un cromosoma (parámetro).

La relación general que liga el número de bites que son manejados en cada generación en función al Número de individuos, cantidad de parámetros (cromosomas) y cantidad de Genes que componen un parámetro se enuncia en la ecuación 3.20.

$$Bites = N_{genes} \times N_{ind.}$$

$$N_{genes} = 2 \times N_{reglas} \times Prec \times N_{var}$$

C 3.20

Donde N_{reglas} (en el ejemplo es igual a 2) es la cantidad de reglas del FIS tipo Sugeno a calibrar y N_{var} es la cantidad de variables de entrada del FIS (en el caso del ejemplo es igual a 1). Por lo tanto, en este ejemplo la cantidad de bites que se requieren durante las operaciones del G.A. es igual a 2400, lo que implica que el número de bytes procesados (1 byte es igual a 8 bites) en las operaciones es igual 300 (0,3 Kb). Lo anterior sin considerar el cálculo del FIS propiamente tal para cada individuo para la evaluación de su "fitness".

Por lo tanto, las aplicaciones del G.A. empleadas en esta Tesis tienen requerimientos computacionales altos, dado que las estructuras, cantidad de variables de entrada y cantidad de parámetros utilizados en los FIS para el pronóstico de caudales también son mayores al del ejemplo ilustrado.

La elección de la estructura del FIS, como se deduce en este ejemplo, es arbitraria, ya que la cantidad de reglas, tipo de funciones de membresía, tipo y valores de las funciones de implicancia (consecuencia) son fijadas a priori. En la práctica, en otras aplicaciones, es natural cuestionar esta arbitrariedad para asignar las estructuras de los FIS, ya que éstos debieran ser un ente evolutivo y ajustable en estructura, en función del medio (datos observados), y no sólo ajustable en cuanto a los valores paramétricos para una topología dada.

La respuesta a lo referido en el párrafo anterior, a juicio del autor, debe provenir de una calibración de la topología además de los parámetros constitutivos del FIS, posiblemente mediante el empleo del G.A, cambiando la estructura en el tiempo en la medida que el entorno se altera. Sin embargo, dada la complejidad y extensión que tiene el hecho de tan sólo calibrar los parámetros del FIS para una topología dada, está fuera de los alcances de esta Tesis indagar sobre aplicaciones del G.A. que apunten en este sentido, no obstante queda planteada esta inquietud para posibles estudios que en el futuro que se desarrollen en el tema.

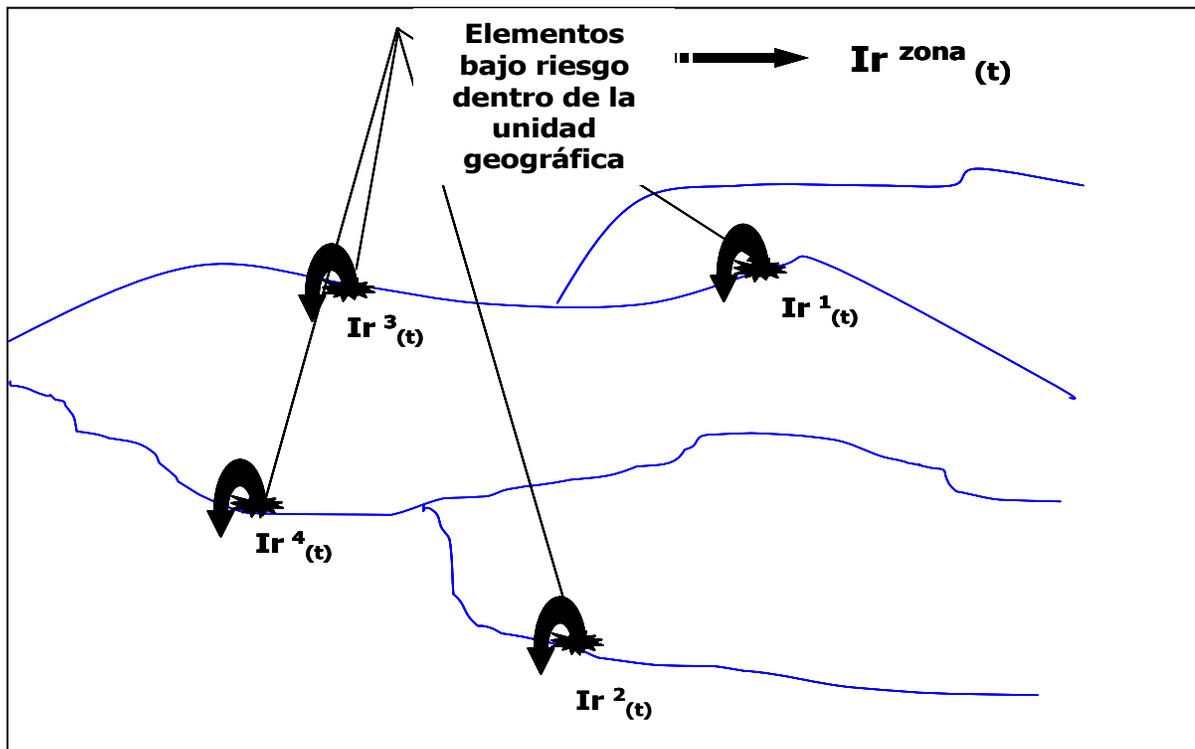
3.4 USO DE LOS FIS PARA ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RIESGO AGREGADOS

El objetivo de esta metodología es obtener un Índice de Riesgo agregado en tiempo real por unidad geográfica o geopolítica, es decir un índice comunal de riesgo. Esto, con la finalidad de interpretar las salidas del SATR en términos globales. Lo anterior se resume esquemáticamente en la Figura 3.16.

Como se observa en la Figura 3.16, los elementos bajo riesgo que están incluidos dentro de la zona donde se obtienen los índices de riesgo agregados no necesariamente están asociadas a los mismos cauces, o en caso contrario los elementos pueden tener distintos umbrales de falla. Por lo tanto, en general, los elementos para cierto instante tienen índices de amenaza distintos. Además, el Índice de Riesgo "I_r" pondera la importancia y vulnerabilidad de los elementos bajo riesgo, como se presentó en el acápite 3.2, por lo que estos índices son comparables entre los diversos componentes del SATR que son afectados.

En consecuencia con lo señalado en el párrafo anterior, para la obtención del Índice de Riesgo agregado se utilizan como variables de entrada los índices de riesgos, en cierto instante, de los elementos pertenecientes a la zona en la cual se desea obtener el Índice de Riesgo global.

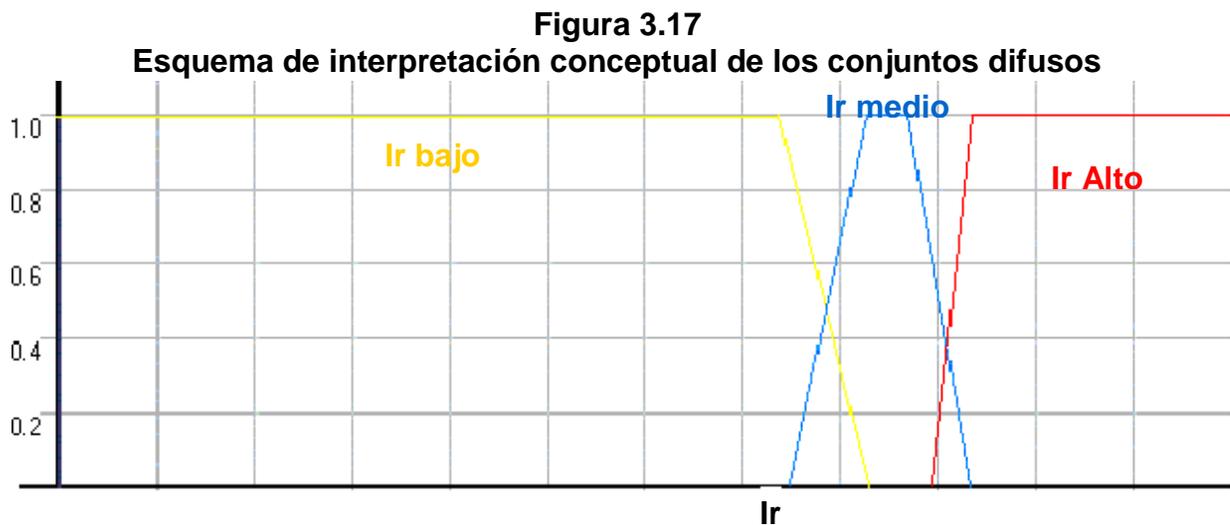
Figura 3.16
Esquema elementos bajo riesgo pertenecientes a una zona



En la obtención de los índices agregados se emplearán los FIS con funciones de implicancia de tipo Mandami (Mandami et al., 1975), aplicando la operación Unión de las funciones de implicancia “ A_i ” (ecuación 2.11) para obtener la salida “difusa” del modelo, posteriormente se obtiene la salida “desfuzzyficada” mediante la determinación de las coordenadas del centro de gravedad del conjunto resultante de la unión de estas implicancias, tal como se describió en el acápite 2.1.3.

Tiene una especial importancia el tratamiento de la consistencia y propiedades de los conjuntos difusos empleados, debido a que estos modelos no serán calibrados cuantitativamente, puesto que este tipo de FIS pretende traducir la opinión cualitativa que se pueda tener del estado del sistema a través de un esquema topológico y paramétrico prefijado, el cual se asume “experto”.

Los conjuntos difusos de los FIS utilizados en esta aplicación tienen una relevante interpretación conceptual, ya que permiten discriminar los “ I_r ” en intervalos que representan un valor cualitativo similar, esto se puede traducir esquemáticamente en la figura 3.17, si por ejemplo se consideran tres rangos de variación del Índice de Riesgo de un elemento dado, los cuales serían índice bajo, medio y alto. Esta interpretación también es aplicable para la salida difusa del FIS, es decir para las funciones de implicancia “ A_i ”.



Los FIS de tipo Mandami utilizados constan de “ p ” variables de entrada “ V_k ” (donde, $k=\{1,\dots,p\}$), las cuales corresponden a los valores de los índices de riesgo individuales de los elementos afectados (por ejemplo en la Figura 3.16 $p = 4$), y un total de “ n ” reglas de inferencia (donde, $i=\{1,\dots,n\}$), para un número igual a “ n ” funciones de pertenencia por cada variable. Se obtiene como salida del FIS el Índice de Riesgo agregado “ $I_r^{zona}(t)$ ”.

En esta aplicación de los FIS se emplearán funciones de pertenencia “ μ_k ” e implicancia “ A_i ” triangulares y trapezoidales, las que son presentadas en las ecuaciones 2.5 y 2.9, respectivamente. Como propiedades de los conjuntos difusos trapezoidales, según se señaló en el capítulo 2.1, se tienen las siguientes:

1. $Soport(\mu_{trapezoidal(a,b,c,d)}) = [a, d]$
2. $Núcleo(\mu_{trapezoidal(a,b,c,d)}) = [b, c]$
3. $\mu_{trapezoidal(a,b,c,d)}(\alpha(corte)) = \frac{\alpha(b-a) + a}{c-a} + \frac{\alpha(c-d) + d}{c-d}$
4. $Card(\mu_{trapezoidal(a,b,c,d)}) = \frac{c+d-a-b}{2}$

En el caso de los conjuntos difusos triangulares, las propiedades señaladas anteriormente son las mismas si se observa que en este caso $b=c$. Además, ambos tipos de funciones son convexas.

El valor de la membresía conjunta asociada a las variables de entrada para una regla i -ésima “ W_i ”, se determina mediante la operación Unión (ecuación 2.15) entre los conjuntos difusos, o funciones de pertenencia, definiéndose esta S-norma por el máximo de dichas funciones al ser evaluadas, tal como se presentó en la ecuación 3.13.

Otro criterio para la caracterización de los FIS de tipo Mandami, a través de sus conjuntos difusos, será el de inclusión difusa (ecuación 2.4). Este criterio es aplicable tanto a los conjuntos difusos de las funciones de implicancia como a las funciones de membresía de las variables.

Debido a que esta comparación sólo puede realizarse entre pares de conjuntos difusos se define una matriz de inclusión difusa “S”. Sea z una variable para la cual se determinan n conjuntos difusos “ μ^i ”, entonces la matriz de inclusión difusa “S” queda definida de la forma que se señala en la matriz de la ecuación 3.21.

$$S(z) = \begin{bmatrix} 1 & \dots & \dots & S(\mu^1, \mu^n) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ S(\mu^n, \mu^1) & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad \text{EC 3.21}$$

Es importante notar, que los elementos de la diagonal de la matriz “S” son igual a 1, ya que la inclusión difusa de un conjunto difuso consigo mismo tiene siempre este valor. Por otro lado, la matriz “S” en general no es simétrica ya que la

fracción de un conjunto difuso que es contenida dentro de otro depende del orden en que se establezca la comparación (ecuación 2.4), puesto que el grado de inclusión difusa depende de la cardinalidad de cada uno de estos conjuntos.

Si bien es posible caracterizar los conjuntos difusos, tanto las funciones de pertenencia " μ_k^i " como las de implicancia " A_i ", mediante las propiedades que se señalaron anteriormente, es útil caracterizar las funciones de pertenencia para el caso de los FIS tipo Mandami mediante la definición de "Cubrimiento de nivel ξ " de la variable " V_k " como sigue a continuación:

- **Cubrimiento de nivel ξ :**

$$\text{Sea } \xi \in [0, 1] \Rightarrow \forall V_k \quad \exists i \in \{1, \dots, n\} \text{ q. } \mu_k^i(V_k) \geq \xi$$

Esta definición representa el nivel de traslape entre las funciones de pertenencia, esto se deduce debido a que a mayor valor ξ , para el cual se logra obtener un cubrimiento de nivel ξ , más alto será el traslape de los conjuntos difusos para una variable dada.

4 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1 ZONA DE ESTUDIO

La zona escogida para la implementación del SATR corresponde a la Séptima Región del Maule (Zona central de Chile). Ella cuenta con la red de monitoreo de datos meteorológicos en tiempo real más completa del país, y es una zona relativamente de alta incidencia de emergencias por inundaciones.

Esta Región cuenta con condiciones geográficas e hidrológicas diversas en toda su extensión, brindando así una amplia gama de casos a analizar debido sólo a este hecho, obteniéndose de esta forma una mayor extrapolabilidad de los resultados que se obtengan de este estudio para otras zonas del país. En la Figura 4.1 se presenta un esquema de ubicación de la zona de estudio que contiene la red de estaciones meteorológicas de la D.G.A. en la VII región. En la Figura 4.2 se presenta la red de estaciones fluviométricas del mismo organismo. Cabe señalar que no todas las estaciones, que están marcadas puntualmente en dichas figuras, cuentan con equipos para la transmisión de datos en tiempo real.

Figura 4.1 Esquema de ubicación; red de estaciones meteorológicas en la VII Región del Maule

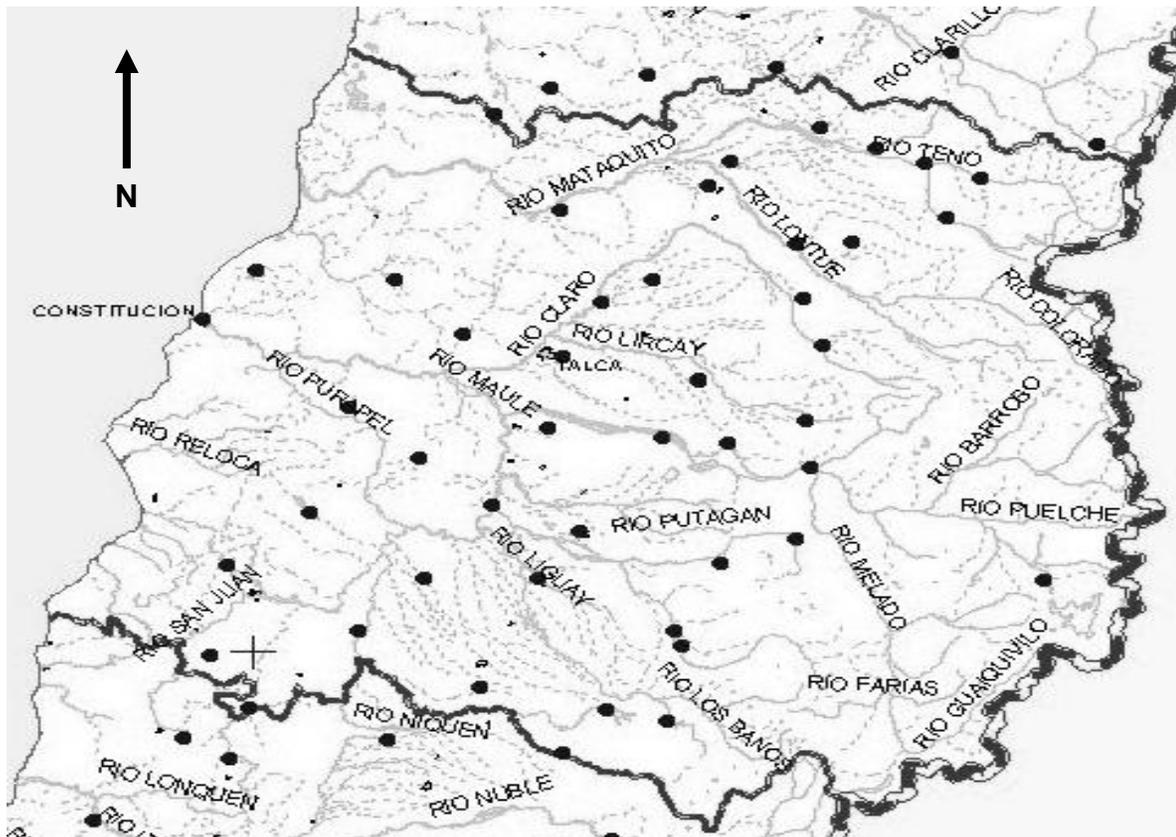
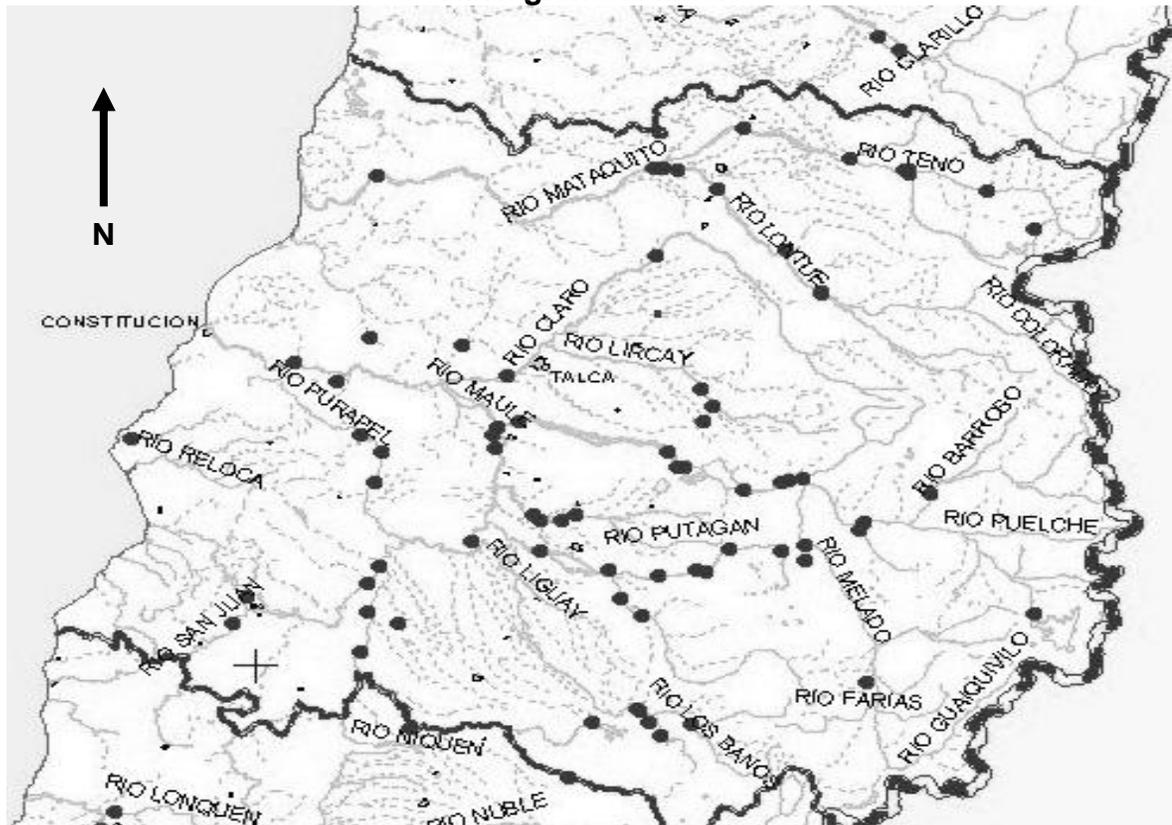


Figura 4.2 Esquema de ubicación; Red de estaciones fluviométricas en la VII Región del Maule



Es importante destacar la diversidad hidrológica que presenta la zona de estudio, encontrándose distintos regímenes de escorrentía en los cauces que en ella fluyen.

Esta región presenta un sistema de drenaje muy intervenido, existiendo múltiples canales de regadío y de trasvase, además de varias obras de regulación. Sin embargo, en varios de los casos analizados no existen obras de regulación de importancia que viertan a los afluentes de las cuencas modeladas.

El sistema de alerta está orientado principalmente a zonas rurales, esto debido a que el catastro de zonas de inundación reveló que la mayoría de los problemas por desbordes en ríos se presentan en estos sectores.

Durante el período donde se producen las inundaciones (meses de invierno), las cuencas estudiadas, en la mayoría de los casos, se comportan en régimen natural puesto que las bocatomas de los canales de riego y trasvase, en estos meses, se encuentran cerradas.

Hay que señalar, que en el catastro de zonas amagadas muchos de los canales de riego son los responsables de las inundaciones, especialmente por mala mantención y limpieza, o bien porque los ríos de los cuales estos se alimentan sobrepasan las obras de toma, inundando, en algunos casos, zonas bastante alejadas de las riberas.

Los principales embalses existentes que se ubican en la VII Región son los siguientes:

- **Laguna Invernada:** Finalizado el año 1948, se ubica en la parte alta de la Hoya del río Maule tiene como uso la generación de electricidad con una potencia instalada igual a 102,4 (MW), con una capacidad máxima de 170 (Hm³).
- **Sistema de Embalses Colbún y Machicura:** Puesto en operación el año 1985, capta las Aguas del Río Maule en las cercanías de la localidad de Armerillo y tiene como uso la generación hidroeléctrica, con una potencia instalada en su conjunto de 500 (MW). Estos embalses tienen una capacidad máxima de 1.550 (Hm³) y 55 (Hm³), respectivamente.
- **Embalse Ancoa:** Éste data del año 1961, y tiene como principal afluente las aguas del Río Ancoa. El uso de este embalse está definido para el riego, siendo su capacidad máxima de almacenamiento de 17,13 (Hm³).
- **Embalse Digua:** Finalizado el año 1968, regula las aguas del Río Cato, afluente al Río Longaví, y tiene como uso el riego, con una capacidad máxima de 220 (Hm³).
- **Embalse Bullileo:** Esta obra, terminada el año 1948, capta las aguas del Río del mismo nombre, el cual es afluente al Río Longaví y fue concebida para riego, siendo su capacidad máxima de almacenamiento de 60 (Hm³).
- **Embalse Tutuvén:** Es la obra de regulación de mayor tamaño en cuencas costeras, de régimen pluvial, de la VII Región, con una capacidad máxima de almacenamiento de 13 (Hm³). Las descargas de este embalse, que recibe los aportes del río homónimo, son afluentes al Río Loncomilla. Este embalse, opera desde el año 1945 y su uso es de riego.

Las condiciones topográficas medias de la región, se presentan tres unidades longitudinales (Norte - Sur) muy marcadas. La primera unidad, al oriente de la región, queda definida la cordillera de los Andes con una altura media de 3500 m.s.n.m., altura que decrece de Norte a Sur, contando aproximadamente con un ancho medio (Oeste-Este) de 60 Km. Al costado poniente de la Cordillera, se ubica la depresión Intermedia, unidad que abarca la gran mayoría de la región con una cota media de 300 m.s.n.m, concentrándose en la misma la mayoría de la población (ancho medio 200 Km.). En la sección más costera de la región irrumpe, entre los valles, la cordillera de la costa, con alturas que en algunas cumbres sobrepasan los 1000 m.s.n.m. Esta sección tiene un ancho medio de 30 Km.

En la VII Región son predominantes las tormentas de tipo frontal, siendo durante este tipo de eventos donde se presentan las emergencias por inundaciones. Estas tormentas, en algunos casos, pueden extenderse por varios días. Además se registran efectos orográficos, durante estos eventos, con un considerable aumento de la intensidad de las precipitaciones, en relación con la altura (cercanía con la Cordillera de los Andes).

Dentro de la VII Región se distinguen las siguientes zonas, clasificadas por el régimen de escorrentía de sus cuencas.

- **Cuencas de régimen Pluvio - Nival**, estas cuencas son afluentes ya sea a la hoya hidrográfica del río Mataquito, o bien a la del río Maule. Es importante notar que los eventos que provocan inundaciones y desbordes en estos cauces, se producen en la temporada invernal, por directa manifestación de la precipitación efectiva.

La ubicación de la isoterma cero, durante la tormenta, es un factor de importancia a ser contemplado en la evaluación de los modelos de pronósticos en tiempo real en estas cuencas. Dado que fluctuaciones de esta cota puede incidir considerablemente sobre el área pluvial aportante y tiempo de concentración, en vista de la fuerte pendiente media que se presenta en las cuencas altas y zonas precordilleranas.

- **Cuencas de régimen Pluvial**, las cuencas de este tipo en su mayoría son esteros de flujo discontinuo, y se ubican en la depresión intermedia y zonas costeras de la VII Región. Los cauces de mayor importancia con estas características se concentran al sur de la región, dentro de los que destacan los ríos Cauquenes, Perquillauquén y Purapel.

4.2 RECOPIACIÓN Y PROCESO DE LA INFORMACIÓN BÁSICA

4.2.1 Catastro zonas amagadas

Se realizó una revisión exhaustiva de la prensa escrita de la séptima región, la cual consistió en identificar todas las fechas de tormentas significativas, que durante el período 1990-2001 dejaron sectores inundados o aislados, ocasionando situaciones de emergencia en las zonas afectadas. Se localizaron adicionalmente los lugares donde existen problemas, señalando la envergadura de éstos. El resumen de las fechas de estas tormentas se presenta en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resumen de tormentas con registro de daños

| FECHAS INUNDACIONES | | |
|---------------------|---------------|--|
| AÑO | MES | DÍAS |
| 1990 | Marzo | 27-28-29 |
| 1991 | Mayo | 8-9-10-11-12-13-14-15-16-17-18-19-20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30 |
| | Octubre | 14 |
| 1992 | Marzo | 26-27 |
| | Abril | 29 |
| | Mayo | 4-5-6-7-8-9-10-11 |
| | Junio | 5-6-7-8-9 |
| | Julio | 3-16-17-18-19-20 |
| 1993 | Agosto | 21 |
| | Abril | 13-14 |
| | Mayo | 5-6-9-19 |
| | Junio | 3-9 |
| | Julio | 1-2 |
| 1994 | Abril | 26 |
| | Mayo | 22-24 |
| | Junio | 13-14-15-16-21-24 |
| | Julio | 19-21-22-23-24-25-26-27 |
| 1995 | Junio | 9-10 |
| | Julio | 22-23-27-28 |
| 1996 | Junio | 12-13-14 |
| | Julio | 6-7 |
| | Agosto | 5-12-13-24 |
| 1997 | Abril | 18-19-23-24-29 |
| | Junio | 3-4-11-12-15-16-17-18-19-20-21-22-23 |
| 1998 | Mayo | 11 |
| | Junio | 6 |
| 1999 | Marzo | 2 |
| | Mayo | 3 |
| | Junio | 20-21-24-29 |
| | Agosto | 29-30 |
| | Septiembre | 4-5-6 |
| 2000 | Febrero | 10-13-26-28 |
| | Abril | 13-14 |
| | Junio | 3-4-5-12-13-14-15-17-20-22-23-24-25-26-27-28-29-30 |
| | Julio | 1-2-3 |
| | Agosto | 4-6 |
| Septiembre | 8-11-12-13-20 | |
| 2001 | Abril | 14-21-22 |
| | Mayo | 14-16-17-18 |
| | Junio | 15 |
| | Julio | 8-9-11-13-14-17-18-19-20-29-31 |
| | Agosto | 25-29 |

Posteriormente se procesó toda la información, obteniéndose a priori más de 160 puntos críticos (zonas) que han sido afectados en los temporales del período analizado, con lo cual se generaron fichas de sectores y obras sensibles a los temporales producidos en la región. Mayores detalles se presentan en el Anexo A1, “Fichas de zonas afectadas”.

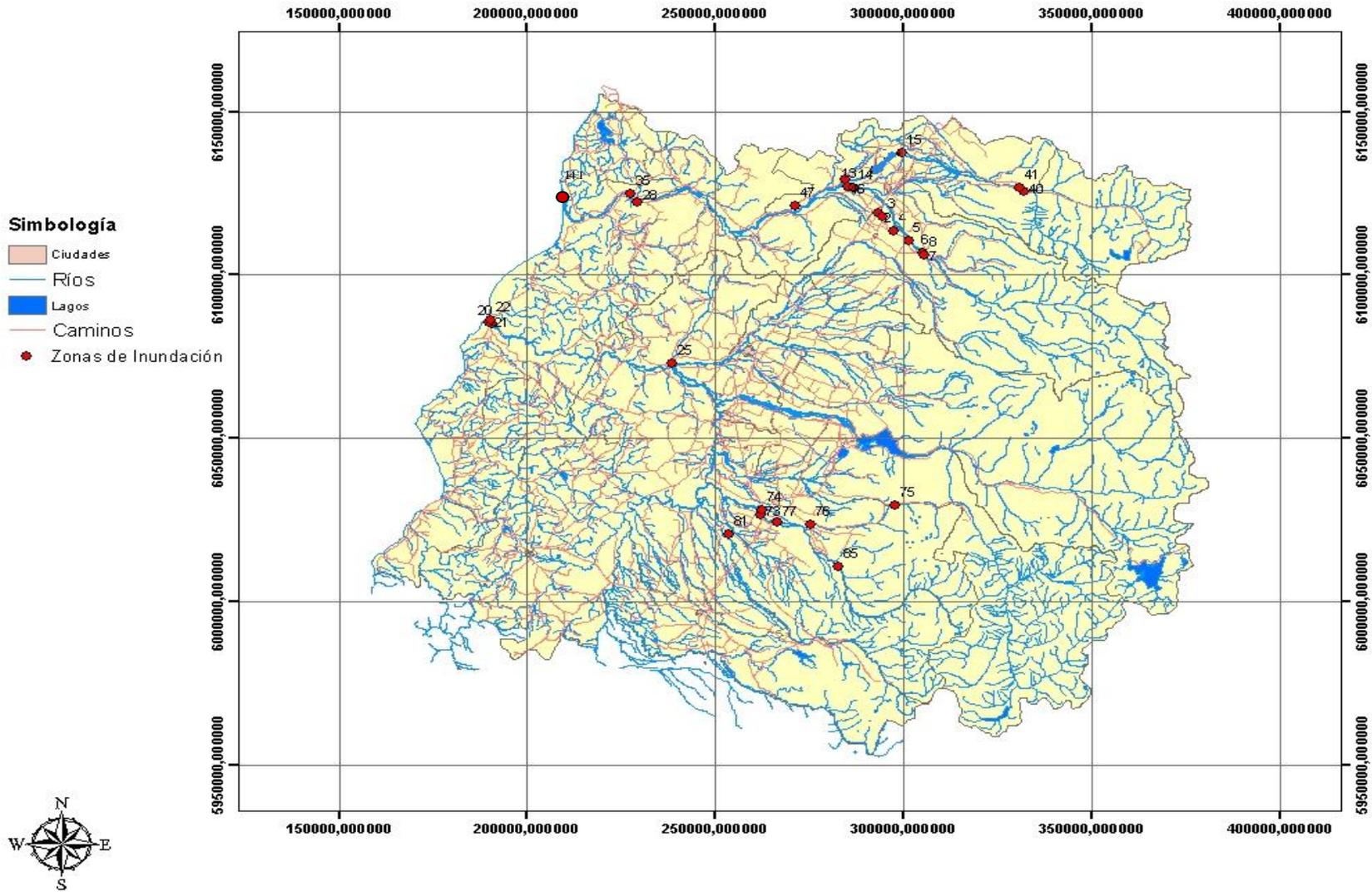
Toda la información se ordenó en términos de la importancia y factibilidad de modelación de las zonas amagadas. Dicho trabajo se tradujo finalmente en un catastro con las principales tormentas que azotaron a la séptima región entre los años 1990 y 2001, con los respectivos lugares que fueron amagados en éstas. Se pudo discriminar y caracterizar los sectores amagados que serán incorporados al SATR, resultados que se resumen en los anexos A1 y A2, respectivamente.

4.2.2 Selección de los elementos incorporables al SATR

Del total de elementos catastrados (160 zonas amagadas, ver punto 1.3.3), cumplen con los criterios de factibilidad de modelación, planteados en el punto 3.1.1, un número igual a 35 Puntos (elementos), de los cuales son incorporados al mapa de amenaza de la VII Región aquellos que tienen asociados cauces con estaciones de control en Tiempo Real; dicho mapa es presentado en la Figura 4., con la enumeración correlativa de los puntos catastrados que se señala en el anexo A1, el que incluye la descripción y características generales de las zonas afectadas.

Figura 4.3 Mapa de Amenaza

Zonas de inundación VII región con pronóstico de índice de riesgo en tiempo real



4.2.3 Recopilación de información fluviométrica base

Los datos correspondientes a *fluviometría* se obtuvieron en forma completa desde la base de datos del Departamento de Hidrología de la DGA (Sistema denominado BNA2000F).

No se tuvo acceso a los datos buscados en 4 de las estaciones consideradas en el estudio (Río Maule en Armerillo DGA, Canal Maule Norte en Aforador, Canal Maule Sur en Aforador y Río Purapel en el Sauzal). Debido a que no toda la información registrada estaba ingresada en el Banco Nacional De Aguas (BNA2000, DGA)

Un resumen se presenta en las Tablas 4.2 a 4.4, en las que se indica la información disponible, los nombres de las 34 estaciones de la región, coordenadas UTM, y el área de drenaje aproximada. Además, se cuenta con una ordenación de las estaciones en las 2 principales cuencas (Maule y Mataquito) las que a su vez están subdivididas en sus respectivas subcuencas.

En el caso de las alturas limnigráficas se indican los períodos en los cuales existe información y a cada altura se asocia el caudal respectivo (formato BNA2000F). Para el caso de las curvas de descarga se indica la última curva publicada (antes del 10 de enero de 2002) por la DGA en el BNA2000F.

Tabla 4.2 Resumen de información fluviométrica disponible

| VARIABLE | PERÍODO | TIPO DE ESTACIÓN |
|--------------------------------------|-----------|------------------|
| Caudales Medios Diarios | 1990-2000 | Todas |
| Alturas Limnigráficas | 1998-2001 | Sólo PS* |
| Caudales Máximos Instantáneos | 1990-2000 | Todas |
| Caudales Medios Mensuales | 1990-2000 | Todas |
| Curva de Descarga | 1990-2000 | Todas |

*PS: Estación implementada con Sistema Satelital.

Las series estadísticas de caudales instantáneos, anteriores al año 2002, están registradas a intervalos temporales no uniformes, es decir los datos no están registrados para una discretización temporal fija, dado que estas series provienen de la digitalización de los fluviogramas. En general, no se tienen más de 10 mediciones en 24 horas, durante eventos de crecidas, lo cual varía dependiendo de la estación y fecha en que los datos son controlados.

Dado lo señalado en el párrafo anterior, se procesó e interpoló la información limnigráfica que se empleó para la calibración y validación de los modelos, de modo de disponerla cada una hora. Se desecharon los datos en aquellos casos en que las “ventanas temporales” sin información son lo suficientemente grandes como para no poder caracterizar la crecida asociada. Este hecho acota de manera importante la cantidad de información disponible para la calibración de los modelos de pronóstico, especialmente para la calibración de los modelos Q-Q, donde es necesario tener información limnigráfica concurrente en más de una estación fluviográfica.

Tabla 4.3 Estaciones Fluviométricas

| Cuenca | Subcuencas | Estaciones | IMPLEMENTACIÓN | | | | Q Medio Diario | Q Máx, Min, Medio Diario | Q Medio Mensual | Q Medio Anual | Curva de Descarga | Altura Limnigráfica y Q instantáneo |
|-----------|---------------------|------------|--|----|----|----|----------------|--------------------------|-----------------|---------------|-------------------|-------------------------------------|
| Mataquito | Teno | 1 | RIO TENO BAJO QUEBRADA INFIERNILLO | DL | LG | | | | | | | |
| | | 2 | RIO CLARO EN LOS QUEÑES | DL | LG | LM | | | | | | |
| | | 3 | RIO TENO DESPUES DE JUNTA CON CLARO | PS | LG | LM | | | | | | |
| | Lontue | 4 | RIO COLORADO EN JUNTA CON PALOS | PS | LG | | | | | | | |
| | | 5 | RIO PALOS EN JUNTA CON COLORADO | PS | LG | | | | | | | |
| | | 6 | ESTERO UPEO EN UPEO | | DL | LG | | | | | | |
| | Mataquito | 7 | RIO MATAQUITO EN LICANTEN | PS | LG | | | | | | | |
| Maule | Maule Medio | 8 | RIO MAULE EN ARMERILLO | | | | //// | //// | //// | //// | | |
| | | 9 | CANAL MAULE NORTE EN AFORADOR | | | | //// | //// | //// | //// | | |
| | | 10 | RIO MAULE EN LONGITUDINAL | PS | LG | | | | | | | |
| | | 11 | CANAL MAULE SUR EN AFORADOR | | | LM | //// | //// | //// | //// | | |
| | Perquillauquen Alto | 12 | RIO PERQUILLAUQUEN EN SAN MANUEL | | DL | LG | | | | | | |
| | | 13 | RIO PERQUILLAUQUEN EN NIQUEN | | DL | LG | | | | | | |
| | | 14 | RIO PERQUILLAUQUEN EN QUELLA | | DL | LG | | | | | | |
| | | 15 | ESTERO CURIPEUMO EN LO HERNANDEZ | | DL | LG | | | | | | |
| | | 16 | RIO CAUQUENES EN DESEMBOCADURA | | DL | LG | | | | | | |
| | | 17 | RIO CAUQUENES EN EL ARRAYAN | | DL | LG | | | | | | |
| | Perquillauquen Bajo | 18 | RIO PURAPEL EN NIRIVILLO | | DL | LG | | | | | | |
| | | 19 | RIO PURAPEL EN EL SAUZAL | | DL | | LM | //// | //// | //// | //// | |
| | Loncomilla | 20 | RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA | PS | LG | | | | | | | |
| | | 21 | RIO LONGAVI EN EL CASTILLO | | DL | LG | | | | | | |
| | | 22 | RIO ACHIBUENO EN LA RECOVA | PS | LG | | | | | | | |
| | | 23 | RIO ANCOA EN EL MORRO | PS | LG | | | | | | | |
| | | 24 | RIO LONCOMILLA EN BODEGA | | DL | LG | | | | | | |
| | | 25 | RIO PUTAGAN EN YERBAS BUENAS | | DL | LG | | | | | | |
| | | 26 | RIO LONCOMILLA EN LAS BRISAS | PS | LG | LM | | | | | | |
| | | 27 | RIO CLARO EN CAMARICO | | DL | LG | | | | | | |
| | Claro | 28 | RIO LIRCAY EN PUENTE LAS RASTRAS | | DL | LG | | | | | | |
| | | 29 | CANAL MAULE NORTE BAJO SECCION 1 | | | LG | | | | | | |
| | | 30 | CANAL MAULE NORTE BAJO SECCION 2 | | | LG | | | | | | |
| | | 31 | RIO CLARO EN TALCA | PS | LG | | | | | | //////// | |
| | Maule Bajo | 32 | ESTERO LOS PUERCOS EN PUENTE LOS PUERCOS | | DL | LG | | | | | //////// | |
| | | 33 | RIO MAULE EN FOREL | PS | | | | | | | //////// | |
| | Costero | 34 | RIO LOANCO EN DESEMBOCADURA | | DL | LG | | | | | | |

| SIMBOLOGÍA | |
|------------|------------------------------|
| PS | Cuenta con Sistema Satelital |
| DL | Cuenta con Data Logger |
| LG | Cuenta con Limnógrafo |
| LM | Cuenta con Limnímetro |
| | Existe Información |
| //// | No se encontró información |

Tabla 4.4 Coordenadas Estaciones Fluviométricas

| Cuenca | Subcuencas | Estaciones | Latitud S | Longitud W | UTM Este | UTM Norte | Área Drenaje [km ²] |
|-----------|-------------------|---|-------------|-------------|----------|-----------|---------------------------------|
| Mataquito | Teno | 1 RIO TENO BAJO QUEBRADA INFIERNILLO | 035° 03' 00 | 070° 37' 00 | 352,553 | 6,120,156 | 562 |
| | | 2 RIO CLARO EN LOS QUEÑES | 035° 00' 00 | 070° 49' 00 | 334,209 | 6,125,387 | 350 |
| | | 3 RIO TENO DESPUES DE JUNTA CON CLARO | 035° 00' 00 | 070° 50' 00 | 332,688 | 6,125,360 | 1188 |
| | Lontue | 4 RIO COLORADO EN JUNTA CON PALOS | 035° 16' 00 | 071° 01' 00 | 316,554 | 6,095,457 | 942 |
| | | 5 RIO PALOS EN JUNTA CON COLORADO | 035° 16' 00 | 071° 01' 00 | 316,554 | 6,095,457 | 514 |
| | | 6 ESTERO UPEO EN UPEO | 035° 11' 00 | 071° 06' 00 | 308,776 | 6,104,544 | 356 |
| | Mataquito | 7 RIO MATAQUITO EN LICANTEN | 034° 58' 47 | 072° 00' 30 | 773,116 | 6,125,054 | |
| Maule | Maule Medio | 8 RIO MAULE EN ARMERILLO | | | | | 5323 |
| | | 9 CANAL MAULE NORTE EN AFORADOR | | | | | |
| | | 10 RIO MAULE EN LONGITUDINAL | 035° 34' 00 | 071° 43' 00 | 253,779 | 6,060,653 | 5800 |
| | | 11 CANAL MAULE SUR EN AFORADOR | | | | | |
| | Pernilauquen Alto | 12 RIO PERNILAUQUEN EN SAN MANUEL | 036° 25' 00 | 071° 30' 00 | 275,841 | 5,966,866 | 326 |
| | | 13 RIO PERNILAUQUEN EN NIQUEN | 036° 14' 00 | 072° 00' 00 | 769,633 | 5,985,931 | 1033 |
| | | 14 RIO PERNILAUQUEN EN QUELLA | 036° 03' 00 | 072° 05' 00 | 762,752 | 6,006,503 | 1995 |
| | | 15 ESTERO CURIPEUMO EN LO HERNANDEZ | 035° 58' 00 | 072° 01' 00 | 769,043 | 6,015,568 | 440 |
| | | 16 RIO CAUQUENES EN DESEMBOCADURA | 035° 54' 00 | 072° 03' 00 | 766,260 | 6,023,057 | |
| | | 17 RIO CAUQUENES EN EL ARRAYAN | 036° 01' 00 | 072° 23' 00 | 735,820 | 6,010,971 | 658 |
| | Pernilauquen Bajo | 18 RIO PURAPEL EN NIRVILO | 035° 33' 00 | 072° 06' 00 | 762,895 | 6,062,028 | 259 |
| | | 19 RIO PURAPEL EN EL SAUZAL | | | | | 661 |
| | Loncomilla | 20 RIO LONGAVI EN LA QUIRIQUINA | 036° 14' 00 | 071° 28' 00 | 278,311 | 5,987,284 | 641 |
| | | 21 RIO LONGAVI EN EL CASTILLO | 036° 15' 00 | 071° 22' 00 | 287,345 | 5,985,659 | 460 |
| | | 22 RIO ACHIBUENO EN LA RECOVA | 036° 00' 20 | 071° 26' 04 | 280,574 | 6,012,629 | |
| | | 23 RIO ANCOA EN EL MORRO | 035° 54' 00 | 071° 18' 00 | 292,418 | 6,024,635 | 194 |
| | | 24 RIO LONCOMILLA EN BODEGA | 035° 49' 00 | 071° 50' 00 | 244,004 | 6,032,616 | 7245 |
| | | 25 RIO PUTAGAN EN YERBAS BUENAS | 035° 47' 00 | 071° 35' 00 | 266,499 | 6,036,939 | 526 |
| | | 26 RIO LONCOMILLA EN LAS BRISAS | 035° 37' 00 | 071° 47' 00 | 247,893 | 6,054,936 | 10046 |
| | | 27 RIO CLARO EN CAMARICO | 035° 10' 00 | 071° 23' 00 | 282,927 | 6,105,811 | 684 |
| | Claro | 28 RIO LIRCAY EN PUENTE LAS RASTRAS | 035° 29' 00 | 071° 18' 00 | 291,335 | 6,070,860 | 375 |
| | | 29 CANAL MAULE NORTE BAJO SECCION 1 | 035° 33' 50 | 071° 17' 00 | 293,054 | 6,061,959 | |
| | | 30 CANAL MAULE NORTE BAJO SECCION 2 | 035° 31' 00 | 071° 15' 00 | 295,956 | 6,067,267 | |
| | | 31 RIO CLARO EN TALCA | 035° 25' 00 | 071° 42' 00 | 254,835 | 6,077,337 | 2596 |
| | Maule Bajo | 32 ESTERO LOS PUERCOS EN PUENTE LOS PUERCOS | 035° 23' 00 | 071° 51' 00 | 241,104 | 6,080,652 | |
| | | 33 RIO MAULE EN FOREL | 035° 25' 00 | 072° 25' 00 | 734,568 | 6,077,620 | 20197 |
| | Costero | 34 RIO LOANCO EN DESEMBOCADURA | 035° 34' 08 | 072° 35' 00 | 719,018 | 6,061,115 | |

(*) Los cuadros en blanco indican que no se encontró información.

4.2.4 Recopilación de información pluviométrica base

Los datos correspondientes a pluviometría se recopilieron desde la base de datos del Departamento de Hidrología de la DGA (BNA2000M). La información analizada incluye estadísticas desde Enero de 1990 hasta Agosto de 2001. Fue necesario digitalizar el período 1992 – 2001, dado que se dispone de registros digitalizados por la DGA sólo hasta el año 1992.

Sólo la estación Perquilauquén en San Manuel no tiene registro dentro de todo el período de análisis, de un total de 12 estaciones consideradas en el estudio, debido a que su pluviógrafo fue instalado en enero de 1995.

Se constató, durante el proceso de digitalización de los pluviogramas, ciertas inconsistencias en los registros, las cuales, en los casos que fue posible, se corrigieron mediante la comparación con los registros pluviométricos correspondientes. En caso contrario, no se trabajó con dicha información.

En la Tabla 4.5 se muestra un resumen con la información existente para cada estación seleccionada. En la Figura 4., se presenta la distribución espacial de las estaciones pluviométricas y pluviométrica seleccionadas.

Tabla 4.5 Estaciones Pluviométricas Seleccionadas

| Estación | Nomenclatura Fig. 4.3 | Código BNA | Coordenadas UTM | | Fecha inicio |
|-----------------------------|--------------------------|------------|-----------------|----------|--------------|
| | | | Norte (m) | Este (m) | |
| Los Queñes | A | 07100450-K | 6125387 | 334209 | Abr-71 |
| potrero Grande | B | 07117050-0 | 6104544 | 308776 | May-67 |
| Embalse Digua | C | 07331050-4 | 5985280 | 272366 | Abr-71 |
| San Manuel de Perquilauquén | D | 07332050-K | 5984533 | 245404 | Ene-95 |
| Parral | E | 07345050-0 | 5991930 | 245187 | Ene-74 |
| Embalse Bullileo | F | 07350050-8 | 5981850 | 282944 | Abr-71 |
| Embalse Ancoa | G | 07355051-2 | 6026448 | 290870 | Jul-57 |
| Melozal | H | 07357051-4 | 6041949 | 246752 | Abr-71 |
| San Javier | I | 07359050-7 | 6057037 | 156902 | May-74 |
| Talca U.C. | J | 07378050-0 | 6075651 | 260939 | Mar-82 |
| Colorado | K | 07378051-9 | 6056138 | 294700 | Sep-69 |
| Pencahue | L | 07381051-5 | 6080782 | 245647 | Ago-86 |

Para todas las estaciones se dispone de la información pluviográfica y pluviométrica, no necesariamente de forma continua, en todo el período 1990-2001.

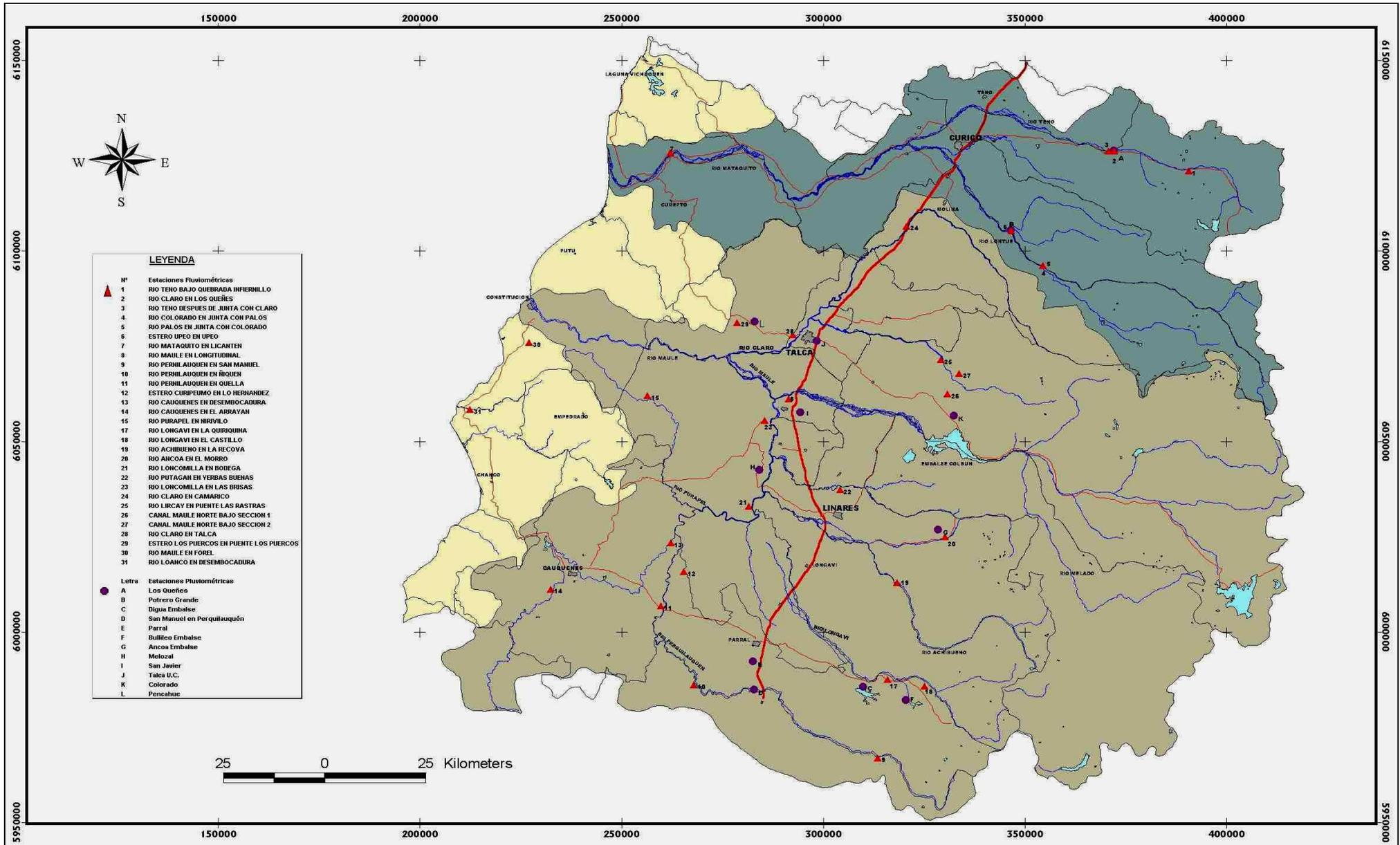
Las estaciones pluviográficas existentes que disponen del sistema de transmisión de datos en tiempo real (P. S.) disponen información sólo desde el año 2002.

Se realizaron correlaciones, dado lo señalado en el párrafo anterior, entre estas estaciones y la estaciones pluviográficas que cuentan con información adecuada para la calibración y validación de los modelos, con los datos en el período concurrente de operación (Enero-Julio 2002). En el anexo A3 se presentan las correlaciones realizadas.

Es importante notar que las estaciones pluviográficas existentes que transmiten información en tiempo real no necesariamente son representativas de las condiciones de precipitación de la cuenca en que se encuentran. Dado que todas estas se ubican en el lugar donde se encuentran las estaciones limnigráficas, con el objetivo de emplear las mismas plataformas de transmisión satelital y no por motivos de representatividad de sus mediciones.

Lo señalado en el párrafo anterior, se puede traducir en un empeoramiento de los pronósticos de caudales durante la operación del SATR, dado que los datos de precipitación utilizados por los modelos de pronóstico pueden no ser suficientemente explicativos.

Figura 4.4 Estaciones de medición Seleccionadas



4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORRENTÍA MENSUAL EN LAS CUENCAS MODELADAS

En este punto se procederá a caracterizar hidrológicamente las cuencas que son modeladas, en cuanto al régimen de escorrentía que estas presentan y variación mensual de los caudales registrados en las mismas.

De esta caracterización hidrológica, se desprenden posteriores análisis sobre la aplicabilidad y consideraciones de las metodologías de modelación empleadas, según las diferencias en cuanto a regimenes y variabilidad de los caudales máximos que las distintas cuencas presentan.

En particular, interesa determinar la variación anual de los caudales de mayor envergadura, para identificar los períodos donde se presentan las crecidas que pueden provocar daños en los elementos catastrados.

Se contempla esta caracterización en términos de los caudales medios mensuales e instantáneos (provenientes de los limnigramas) registrados entre los años 1990 y 2001.

Con el objeto de identificar el período donde se registran las mayores crecidas, se realiza un análisis de la variación del promedio de los caudales medios mensuales con respecto al promedio interanual de los caudales máximos instantáneos mensuales (proveniente de los limnigramas), para todos los meses.

Además, en las cuencas caracterizadas se presentan las precipitaciones mensuales en una estación pluviométrica que se considera representativa, durante el período comprendido entre los años hidrológicos 1990 y 2001, y las estadísticas de caudales medios mensuales, para el período concurrente al antes mencionado, en las estaciones pluviométricas que se utilizan para modelar dichas cuencas.

4.3.1 Subcuencas pertenecientes a la cuenca del Río Mataquito

a) Río Teno en junta con río Claro

En esta cuenca se encuentra la estación pluviométrica “Los Queñes”, la cual posee estadísticas pluviográficas desde el año 1971. En esta estación se registra una precipitación media anual igual a 1171 (mm/año). Siendo las precipitaciones mensuales en el período comprendido por los años 1990 y 2001 las que se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Precipitaciones mensuales en “Los Queñes” (mm.)

| Año | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | PP. Anual |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-----------|
| 1990 | 52,6 | 75,2 | 83,4 | 176,9 | 136,9 | 199,6 | 65,1 | 41,3 | 0,0 | 5,8 | 0,0 | 104,9 | 941,7 |
| 1991 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 109,2 | 312,9 | 299,3 | 298,5 | 36,2 | 142,9 | 1,8 | 0,0 | 0,0 | 1202,6 |
| 1992 | 160,9 | 572,0 | 585,8 | 112,2 | 168,1 | 98,3 | 26,6 | 17,0 | 0,0 | 0,0 | 0,6 | 9,2 | 1750,7 |
| 1993 | 70,9 | 429,2 | 415,7 | 199,0 | 72,0 | 41,4 | 55,3 | 54,9 | 58,8 | 6,0 | 0,0 | 0,0 | 1403,2 |
| 1994 | 129,8 | 161,9 | 294,6 | 351,0 | 35,3 | 109,7 | 49,5 | 0,2 | 33,0 | 0,0 | 0,0 | 1,8 | 1166,8 |
| 1995 | 167,0 | 52,8 | 382,6 | 339,6 | 195,5 | 43,9 | 77,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 13,7 | 0,0 | 1272,6 |
| 1996 | 73,4 | 54,7 | 248,3 | 100,3 | 303,4 | 9,0 | 19,1 | 18,5 | 6,0 | 84,8 | 0,0 | 0,0 | 917,5 |
| 1997 | 143,1 | 308,8 | 683,0 | 277,3 | 271,2 | 305,1 | 296,0 | 69,6 | 7,6 | 5,0 | 7,7 | 8,6 | 2383,0 |
| 1998 | 96,0 | 77,1 | 74,5 | 0,0 | 14,4 | 78,3 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 1,4 | 0,9 | 342,8 |
| 1999 | 28,7 | 80,6 | 321,9 | 57,3 | 288,7 | 311,3 | 38,4 | 6,6 | 3,2 | 0,0 | 6,2 | 28,2 | 1171,1 |
| 2000 | 21,6 | 31,2 | 887,2 | 139,5 | 43,3 | 311,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 101,6 | 0,0 | 1536,0 |
| 2001 | 5,6 | 37,9 | 7,3 | 57,8 | 32,8 | 2,5 | 1,3 | 1,0 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 146,3 |
| Prom. | 79,3 | 156,8 | 332,0 | 160,0 | 156,2 | 150,8 | 77,3 | 20,5 | 21,0 | 8,6 | 10,9 | 12,8 | 1186,2 |
| Desv_est | 57,3 | 182,0 | 279,2 | 112,7 | 116,3 | 126,2 | 105,9 | 24,4 | 42,4 | 24,1 | 28,9 | 30,1 | 591,9 |

En la estación fluviométrica “Río Teno en Junta con Río Claro” se presentan los caudales medios mensuales resumidos en la Tabla 4.7.

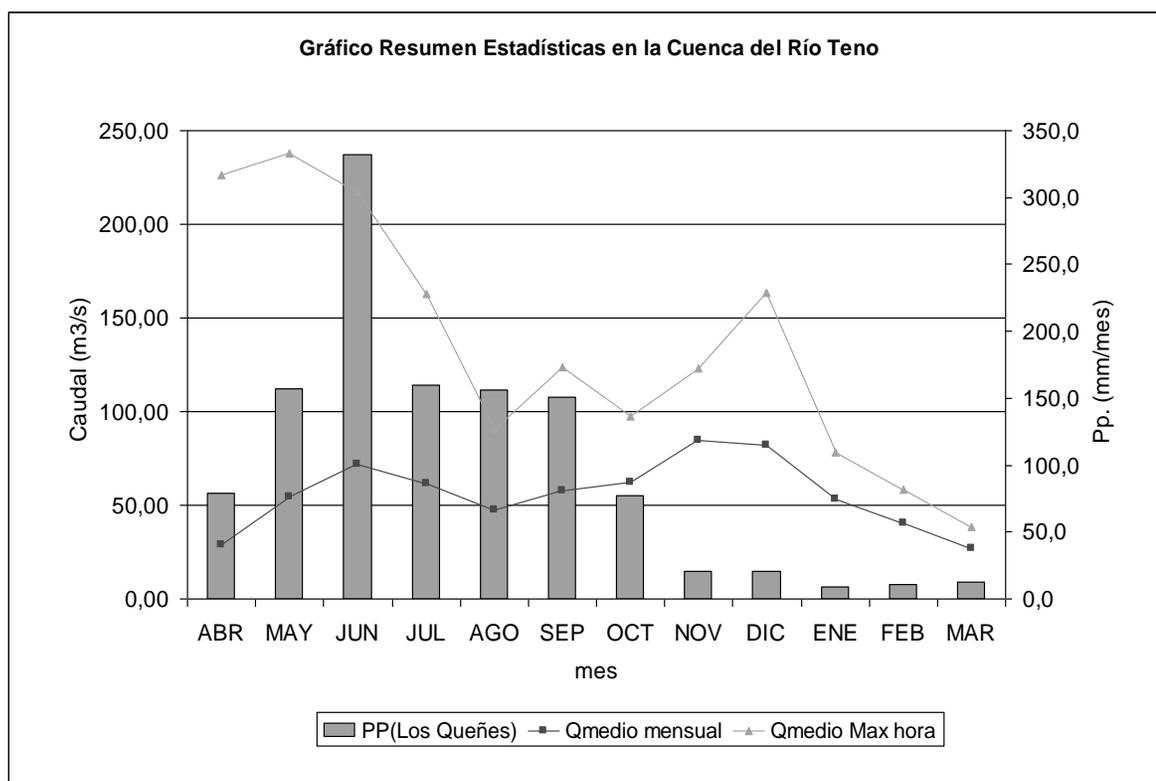
Tabla 4.7 Caudales medios mensuales en la estación “Teno en junta con Claro” (m3/s)

| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q med. anual |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------------|
| 1990 | 19,36 | 20,71 | 16,83 | 21,35 | 28,70 | 58,07 | 58,40 | 62,95 | 47,71 | 31,62 | 25,16 | 15,80 | 33,89 |
| 1991 | 27,09 | 109,43 | 87,49 | 71,78 | 46,21 | 55,59 | 57,39 | 95,42 | 74,13 | 36,41 | 29,37 | 17,00 | 58,94 |
| 1992 | 21,03 | 96,54 | 111,15 | 60,89 | 39,02 | 62,96 | 88,97 | 130,52 | 121,84 | 53,86 | 43,64 | 29,46 | 71,66 |
| 1993 | 31,52 | 69,68 | 122,93 | 115,91 | 45,14 | 46,24 | 60,29 | 82,47 | 89,09 | 86,06 | 56,59 | 36,25 | 70,18 |
| 1994 | 37,49 | | 52,88 | 109,60 | 50,32 | 46,89 | 61,79 | 99,63 | 84,31 | 60,53 | 44,69 | 30,94 | |
| 1995 | 25,38 | 25,12 | 72,78 | 50,95 | 50,57 | 78,82 | 72,72 | 117,33 | 102,98 | 41,84 | 42,75 | 26,38 | 58,97 |
| 1996 | | | 35,67 | 25,00 | 37,88 | 37,41 | 42,85 | 37,91 | 22,14 | | | | |
| 1997 | 26,30 | 33,98 | 120,65 | 76,07 | 111,21 | 114,79 | 90,01 | 108,60 | 171,68 | 19,95 | 21,13 | 17,50 | 75,99 |
| 1998 | 40,49 | 26,85 | 28,19 | 22,54 | 19,22 | 20,21 | 26,18 | 26,00 | 26,01 | 123,35 | 73,15 | 45,35 | 39,79 |
| 1999 | | | | | | | | | | 27,61 | 27,73 | 23,87 | |
| 2000 | | | | | | | | | | | | | |
| Prom | 28,58 | 54,61 | 72,06 | 61,56 | 47,58 | 57,88 | 62,07 | 84,54 | 82,21 | 53,47 | 40,47 | 26,95 | 58,49 |
| Desv_Est | 7,46 | 36,98 | 40,90 | 35,65 | 25,98 | 26,93 | 20,35 | 35,68 | 47,54 | 32,96 | 16,79 | 9,81 | 16,18 |

Se compara en el gráfico de la Figura 4.3 el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales, además del promedio interanual de los caudales máximos limnigráficos observados en el mismo período.

Como se aprecia en los promedios de los caudales medios mensuales presentados en la Figura 4.3, la cuenca del río Teno presenta un régimen de escorrentía Nivo-Pluvial. Además, se observa en el promedio interanual de los caudales máximos instantáneos mensuales, que las crecidas de mayor envergadura se producen durante el período pluvial de la cuenca (entre los meses de Abril y Julio). Por lo tanto, los índices de riesgo en las zonas de inundación pertenecientes a esta cuenca deben ser adecuadamente modelados para los meses de invierno. Lo anterior se ve ratificado en los antecedentes de las zonas amagadas, anexo A2, donde se identifica que las fallas de los elementos se producen durante este período solamente.

Figura 4.3 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Teno en junta con Claro



b) Río Palos en junta con el Río Colorado

En esta cuenca se encuentra la estación pluviométrica “Potrero Grande”, la cual posee estadísticas pluviográficas desde el año 1967. En esta estación se registra una precipitación media anual igual a 1050 (mm/año). Siendo las precipitaciones mensuales en el período comprendido por los años 1990 y 2001 las que se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Precipitaciones mensuales en “Potrero Grande” (mm.)

| Año | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | PP. Anual |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----|------|------|-----------|
| 1990 | 51,0 | 48,9 | 54,2 | 122,7 | 68,6 | 154,8 | 62,3 | 33,0 | 0,0 | 5,5 | 0,3 | 75,4 | 676,7 |
| 1991 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 63,9 | 387,0 | 242,0 | 298,4 | 24,5 | 101,6 | 4,2 | 0,0 | 0,0 | 1125,8 |
| 1992 | 106,6 | 507,6 | 428,4 | 127,1 | 100,6 | 58,6 | 12,9 | 8,5 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 24,4 | 1374,9 |
| 1993 | 59,0 | 328,2 | 267,2 | 150,1 | 81,7 | 12,5 | 29,5 | 26,7 | 21,6 | 4,1 | 0,0 | 0,0 | 980,6 |
| 1994 | 153,2 | 146,6 | 193,7 | 242,9 | 40,2 | 66,3 | 42,7 | 2,5 | 16,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 904,5 |
| 1995 | 127,2 | 34,9 | 341,5 | 293,7 | 204,3 | 33,4 | 42,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1077,8 |
| 1996 | 73,5 | 54,9 | 162,2 | 72,0 | 171,2 | 2,9 | 4,9 | 17,1 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 562,7 |
| 1997 | 113,3 | 156,5 | 517,0 | 225,4 | 165,4 | 211,5 | 246,4 | 33,7 | 5,4 | 0,2 | 22,7 | 0,0 | 1697,5 |
| 1998 | 88,3 | 50,8 | 46,4 | 0,0 | 18,4 | 76,5 | 0,0 | 0,0 | 5,2 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 286,8 |
| 1999 | 21,4 | 88,8 | 237,8 | 98,0 | 282,3 | 273,8 | 19,0 | 0,0 | 1,5 | 0,0 | 2,0 | 23,7 | 1048,3 |
| 2000 | 15,3 | 47,3 | 812,0 | 75,7 | 38,7 | 268,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 76,5 | 0,0 | 1334,1 |
| 2001 | 6,7 | 26,1 | 7,7 | 55,5 | 28,7 | 1,9 | 0,6 | 0,8 | 0,0 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 128,6 |
| Prom. | 68,3 | 124,2 | 255,7 | 127,3 | 132,3 | 116,9 | 63,3 | 12,2 | 13,0 | 1,2 | 8,5 | 10,4 | 933,2 |
| Desv_est | 48,2 | 149,6 | 241,1 | 87,0 | 114,3 | 106,8 | 100,3 | 13,9 | 28,8 | 2,1 | 22,4 | 22,5 | 455,5 |

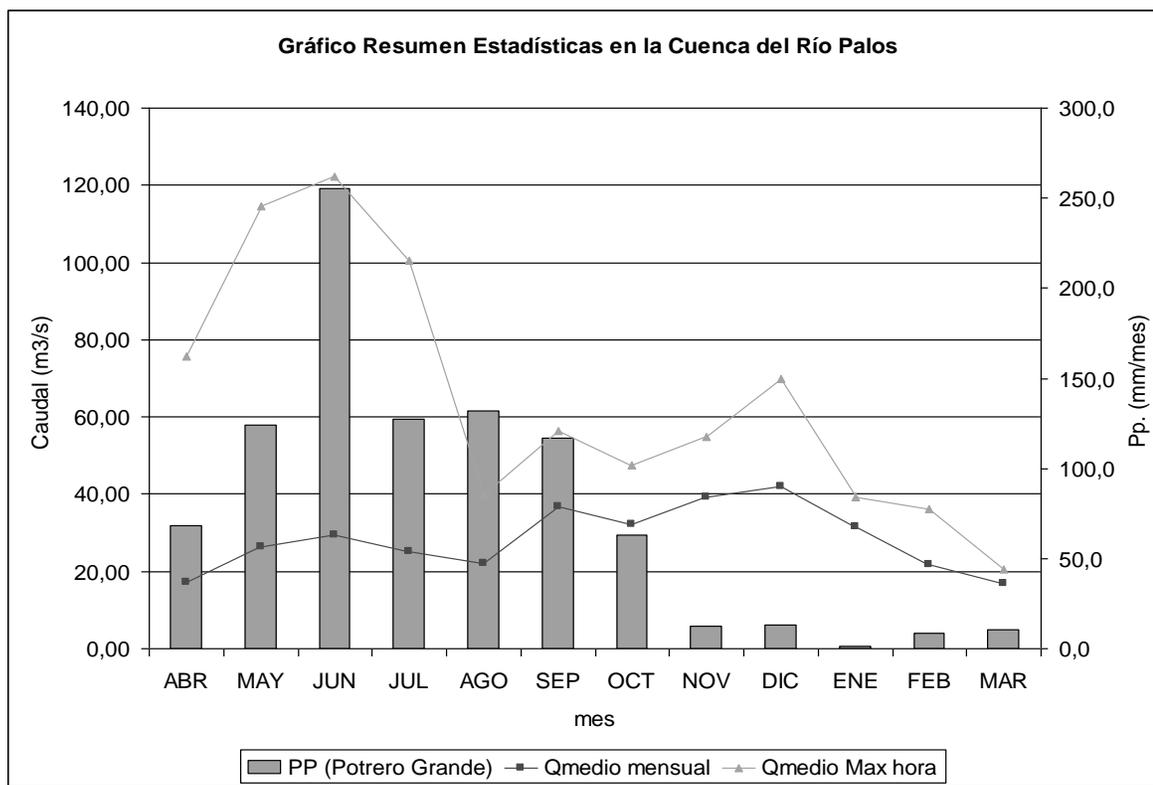
En la estación fluviométrica “Río Palos en Junta con Río Colorado” se presentan los caudales medios mensuales resumidos en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Caudales medios mensuales en la estación “Palos en junta con Colorado” (m3/s)

| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q medio Anual |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| 1990 | 17,44 | 16,03 | 13,62 | 14,21 | 16,53 | 24,31 | 24,32 | 29,61 | 26,20 | 18,69 | 14,87 | 12,78 | 19,05 |
| 1991 | 14,28 | 60,85 | 36,47 | 33,77 | 19,85 | 24,88 | 26,83 | 39,39 | 41,52 | 18,73 | 14,60 | 12,51 | 28,64 |
| 1992 | 18,10 | 37,74 | 38,71 | 28,31 | 21,75 | 24,95 | 36,50 | 51,74 | 56,72 | 34,98 | 24,65 | 19,66 | 32,82 |
| 1993 | 18,02 | 33,12 | 41,75 | 26,74 | 21,71 | 21,99 | 26,64 | 37,18 | 45,20 | 46,88 | 30,25 | 19,66 | 30,76 |
| 1994 | 15,10 | 15,90 | 22,54 | 39,01 | 23,28 | 24,34 | 29,99 | 40,70 | 43,47 | 32,08 | 21,19 | 16,19 | 26,98 |
| 1995 | 19,52 | 17,44 | 35,30 | 29,02 | 23,96 | 33,87 | 34,49 | 51,60 | 50,55 | 30,70 | 19,48 | 15,68 | 30,13 |
| 1996 | | | | | | | | | | | | | |
| 1997 | | | 41,41 | 25,25 | 36,20 | 53,30 | 45,80 | 52,87 | 66,74 | | | | |
| 1998 | 26,00 | 19,81 | 19,72 | 15,92 | 13,64 | 14,49 | 17,85 | 15,26 | 12,79 | 58,32 | 39,95 | 27,95 | 23,47 |
| 1999 | 9,87 | 9,85 | 13,90 | 14,50 | 20,46 | 31,09 | 35,45 | 48,87 | | 11,21 | 10,11 | 10,32 | |
| 2000 | | | | | | 113,40 | 45,12 | 23,41 | 35,02 | | | | |
| Prom | 17,29 | 26,34 | 29,27 | 25,19 | 21,93 | 36,66 | 32,30 | 39,06 | 42,02 | 31,45 | 21,89 | 16,84 | 27,41 |
| Desv_Est | 4,64 | 16,80 | 11,72 | 8,75 | 6,26 | 28,85 | 8,94 | 12,96 | 16,07 | 15,62 | 9,64 | 5,59 | 4,74 |

En el gráfico de la Figura 4.4 se compara el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales, además del promedio interanual de los caudales máximos mensuales observados en el mismo período.

Figura 4.4 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Palos en junta con Colorado



Como se aprecia en los promedios de los caudales medios mensuales presentados en la Figura 4.4, la cuenca del río Palos presenta un régimen de escorrentía Nivo-Pluvial. Se observa que las crecidas de mayor envergadura se producen durante el período pluvial de la cuenca (entre los meses de Abril y Julio).

Por lo tanto, los índices de riesgo en las zonas de inundación pertenecientes a esta cuenca deben ser adecuadamente modelados para los meses de invierno. Lo anterior se ve ratificado en los antecedentes de las zonas amagadas, anexo A2, donde se identifica que las fallas de los elementos se producen durante este período solamente.

c) Río Mataquito en Licantén

En esta cuenca se encuentran las estaciones pluviográficas “Potrero Grande” y “Los Queñes”, las cuales se ubican en la parte alta de esta cuenca, no existiendo registros pluviográficos en la zona intermedia ni baja de la misma. Dado lo anterior, se considera, solo para efectos de comparación de la distribución de precipitaciones y caudales medios mensuales observados en la cuenca, los registros de la estación “Los Queñes”, que son presentados en la Tabla 4.10.

En la estación fluviométrica “Río Mataquito en Licantén” se presentan los caudales medios mensuales resumidos en la Tabla 4.11.

Tabla 4.10 Caudales medios mensuales en la estación “Mataquito en Licantén” (m3/s)

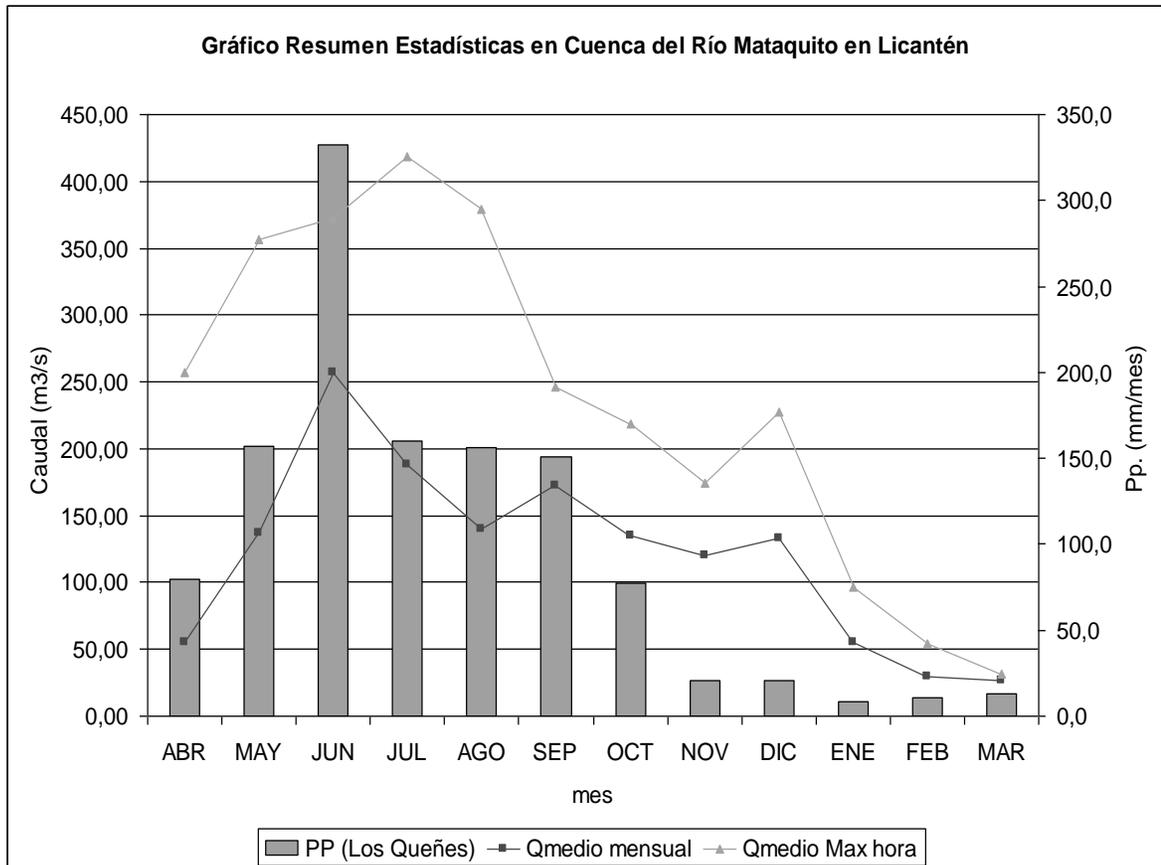
| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q medio Anual |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|---------------|
| 1990 | 111,57 | 106,10 | 84,53 | 103,52 | 106,59 | 181,93 | 121,56 | 115,58 | 59,06 | 12,60 | 9,00 | 13,50 | 85,46 |
| 1991 | 51,79 | 308,78 | 402,62 | 364,31 | 133,36 | 146,90 | 119,31 | 150,77 | 158,19 | 17,46 | 9,30 | 15,66 | 156,54 |
| 1992 | 54,63 | 340,22 | 497,09 | 217,65 | 138,02 | 225,00 | 153,00 | 222,40 | 222,19 | 86,62 | 45,91 | 43,79 | 187,21 |
| 1993 | 70,47 | 188,29 | 343,77 | 255,42 | 110,50 | 103,43 | 89,46 | 123,49 | 141,53 | 136,40 | 64,95 | 47,58 | 139,61 |
| 1994 | 47,97 | 88,64 | 148,26 | 349,83 | 117,17 | 92,53 | 90,50 | 123,72 | 108,89 | 73,82 | 26,37 | 28,63 | 108,03 |
| 1995 | 49,71 | 83,35 | 217,49 | 258,39 | 203,10 | 143,59 | 100,24 | 149,73 | 133,43 | 39,11 | 19,65 | 22,06 | 118,32 |
| 1996 | | 49,81 | 52,52 | 72,57 | 80,04 | 64,34 | 49,58 | 43,55 | 12,15 | 44,73 | 18,09 | 20,01 | |
| 1997 | 59,70 | 97,83 | 595,40 | 132,82 | 344,01 | 227,00 | 273,70 | 156,43 | 187,39 | 2,83 | 3,58 | 6,36 | 173,92 |
| 1998 | 47,29 | 61,19 | 61,56 | 46,86 | 35,59 | 22,25 | 16,91 | 7,87 | 3,86 | 144,62 | 92,15 | 57,56 | 49,81 |
| 1999 | 14,18 | 47,06 | 168,22 | 78,90 | 125,11 | 520,69 | 115,44 | 137,10 | 100,92 | 0,98 | 1,97 | 7,74 | 109,86 |
| 2000 | 45,96 | | | | | | 352,86 | 87,14 | 333,20 | 45,96 | | | |
| Prom | 55,33 | 137,13 | 257,15 | 188,03 | 139,35 | 172,77 | 134,78 | 119,80 | 132,80 | 55,01 | 29,10 | 26,29 | 125,42 |
| Desv_Est | 24,39 | 106,76 | 192,04 | 116,90 | 83,58 | 139,04 | 97,13 | 57,86 | 94,90 | 50,30 | 29,71 | 17,70 | 43,66 |

Se compara en el gráfico de la Figura 4.5 el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales en la estación “Los Queñes”, además del promedio interanual de los caudales máximos mensuales observados en el mismo período.

Como se aprecia en los promedios de los caudales medios mensuales presentados en la Figura 4.5, la cuenca del río Mataquito presenta un régimen de escorrentía pluvio - nival, con un aporte nival en la temporada estival de menores proporciones que los observados en sus afluentes (Río Palos y Teno). Se observa

que las crecidas de mayor envergadura se ocasionan durante el período pluvial de la cuenca (entre los meses de Abril y Agosto). Por lo tanto, los índices de riesgo en las zonas de inundación pertenecientes a esta cuenca deben ser adecuadamente modelados para los meses de invierno. Lo anterior, se ve ratificado en los antecedentes de las zonas amagadas, anexo A2, donde se identifica que las fallas de los elementos se producen durante este período solamente.

Figura 4.5 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Mataquito en Licantén



4.3.2 Subcuencas pertenecientes a la cuenca del Río Maule

Dentro de esta unidad hidrológica hay cuencas con regímenes netamente pluviales, así como otras con componente nival. Además, ésta se encuentra más intervenida y regulada que la hoya del río Mataquito, lo cual se refleja en la existencia de una mayor cantidad de embalses y obras de trasvase con respecto a la hoya del Mataquito. Sin embargo, este hecho altera los regímenes naturales en algunos cauces principalmente en los meses de estiaje y no durante la época de lluvias, donde fundamentalmente se pretende caracterizar las cuencas pertenecientes al valle del Maule, tal como se señala en el punto 4.1.

Es importante señalar, que no se tuvo acceso a la información fluviométrica en la estación Maule en Armerillo durante el período 1990-2000, motivo por el cual no es posible realizar una caracterización hidrológica como el realizado en el resto de las subcuencas del río Maule.

a) Río Claro en Talca

En esta cuenca se encuentra la estación pluviométrica “Pencahue”, la cual posee estadísticas pluviográficas desde el año 1986. En esta estación se registra una precipitación media anual igual a 582 (mm/año). Siendo las precipitaciones mensuales en el período comprendido por los años 1990 y 2001 las que se presentan en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Precipitaciones mensuales en “Pencahue” (mm.)

| Año | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | PP. Anual |
|------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-----------|
| 1990 | 25,3 | 42,6 | 24,8 | 64,2 | 17,3 | 98,0 | 28,7 | 17,6 | 3,0 | 6,6 | 2,6 | 102,4 | 433,1 |
| 1991 | 24,0 | 0,0 | 0,0 | 20,9 | 246,9 | 149,1 | 119,7 | 27,9 | 52,1 | 24,0 | 0,0 | 0,0 | 664,6 |
| 1992 | 67,9 | 356,9 | 344,2 | 22,1 | 121,0 | 64,4 | 2,3 | 1,1 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 27,4 | 1008,3 |
| 1993 | 88,2 | 164,5 | 125,1 | 60,1 | 61,0 | 7,3 | 9,2 | 0,5 | 2,5 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 518,9 |
| 1994 | 62,5 | 78,4 | 108,5 | 169,2 | 11,4 | 40,4 | 17,7 | 0,0 | 1,6 | 0,0 | 0,0 | 2,5 | 492,2 |
| 1995 | 89,8 | 18,9 | 105,1 | 222,5 | 69,0 | 12,1 | 21,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,0 | 539,3 |
| 1996 | 39,8 | 36,5 | 87,0 | 86,6 | 111,6 | 4,5 | 5,6 | 5,2 | 8,8 | 39,3 | 0,0 | 0,0 | 424,9 |
| 1997 | 72,3 | 81,4 | 345,3 | 52,1 | 99,4 | 94,7 | 153,3 | 38,0 | 18,9 | 5,8 | 1,9 | 0,2 | 963,3 |
| 1998 | 23,1 | 65,1 | 69,9 | 5,3 | 13,3 | 27,2 | 0,0 | 0,0 | 5,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 209,3 |
| 1999 | 9,4 | 50,5 | 140,5 | 46,0 | 80,8 | 196,3 | 7,2 | 5,3 | 0,0 | 0,6 | 2,5 | 6,4 | 545,5 |
| 2000 | 9,7 | 24,4 | 459,2 | 16,4 | 18,7 | 188,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 24,5 | 0,0 | 741,3 |
| 2001 | 4,0 | 20,5 | 9,6 | 32,6 | 14,3 | 2,4 | 0,7 | 0,7 | 0,0 | 1,7 | 0,0 | 0,0 | 86,6 |
| Prom. | 43,0 | 78,3 | 151,6 | 66,5 | 72,1 | 73,7 | 30,5 | 8,0 | 7,8 | 6,5 | 2,7 | 11,6 | 552,3 |
| Desv. est | 30,2 | 97,7 | 149,0 | 65,7 | 68,6 | 71,6 | 50,9 | 12,8 | 15,0 | 12,4 | 7,0 | 29,7 | 268,9 |

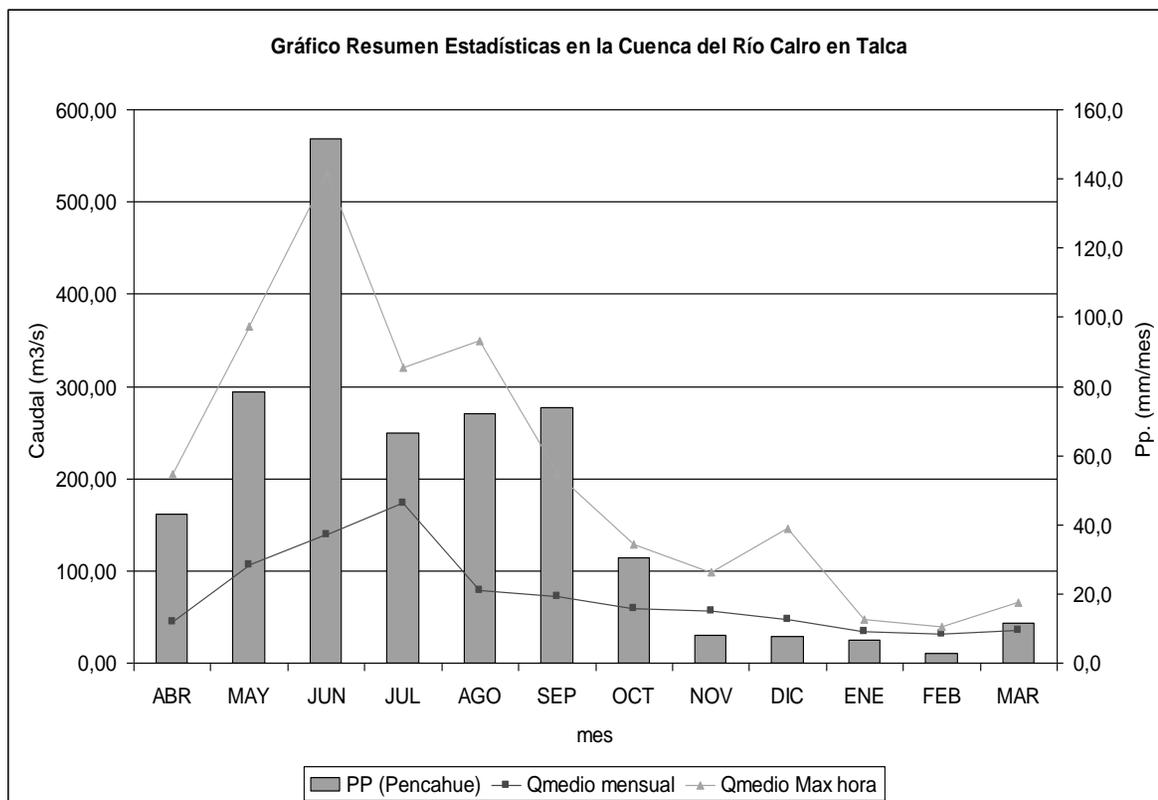
En la estación fluviométrica “Río Claro en Talca” se presentan los caudales medios mensuales resumidos en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Caudales medios mensuales en la estación “Claro en Talca” (m3/s)

| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q medio Anual |
|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| 1990 | 43,61 | 34,07 | 29,93 | 38,63 | 30,68 | 88,99 | 54,92 | 54,05 | 33,17 | 32,64 | 28,52 | 38,75 | 42,33 |
| 1991 | 32,86 | 174,85 | 155,45 | 189,97 | 63,99 | 67,08 | 66,75 | 67,05 | 71,51 | 26,07 | 24,47 | 26,32 | 80,53 |
| 1992 | 46,89 | 298,70 | 316,23 | 130,15 | 71,06 | 79,36 | 63,61 | 73,11 | 54,95 | 46,00 | 39,33 | 45,65 | 105,42 |
| 1993 | 47,04 | 101,18 | 169,51 | 133,83 | 72,03 | 59,64 | 54,52 | 53,74 | 57,47 | 45,64 | 34,53 | 36,64 | 72,15 |
| 1994 | 54,12 | 56,94 | 115,50 | 247,46 | 87,95 | 71,93 | 61,47 | 47,35 | 49,11 | 42,34 | 41,11 | 41,04 | 76,36 |
| 1995 | 64,72 | 46,15 | 115,60 | 433,14 | 146,39 | 105,84 | 82,76 | 54,86 | 43,79 | 38,33 | 37,75 | 41,64 | 100,92 |
| 1996 | 45,21 | 34,97 | 72,48 | 43,20 | 76,31 | 36,33 | 32,15 | 41,36 | 23,76 | 26,84 | 27,47 | 30,20 | 40,86 |
| 1997 | 22,34 | | | | | | | | | 20,35 | 21,71 | 21,43 | |
| Prom | 44,60 | 106,69 | 139,24 | 173,77 | 78,34 | 72,74 | 59,45 | 55,93 | 47,68 | 34,78 | 31,86 | 35,21 | 74,08 |
| Desv. Est | 12,77 | 98,40 | 91,32 | 136,49 | 34,88 | 22,11 | 15,32 | 10,91 | 15,90 | 9,75 | 7,28 | 8,39 | 25,38 |

Se compara en el gráfico de la Figura 4.6 el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales, además del promedio interanual de los caudales máximos mensuales observados en el mismo período. Como se aprecia en los promedios de los caudales medios mensuales, el Río Claro presenta un régimen de escorrentía predominantemente pluvial. Se observa que las crecidas de mayor envergadura se produjeron durante el período pluvial de la cuenca (entre los meses de Abril y Agosto).

Figura 4.6 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Claro en Talca



En consecuencia con lo señalado en el párrafo anterior, los índices de riesgo en las zonas de inundación pertenecientes a esta cuenca deben ser adecuadamente modelados para los meses de invierno. Lo anterior se ve ratificado en los antecedentes de las zonas amagadas, anexo A2, donde se identifica que las fallas de los elementos se producen durante este período solamente.

b) Río Longaví en La Quiriquina

En esta cuenca se encuentra la estación pluviométrica “Meloza”, la cual posee estadísticas pluviográficas desde el año 1971. En esta estación se registra una precipitación media anual igual a 750 (mm/año). Siendo las precipitaciones mensuales en el período comprendido por los años 1990 y 2001 la que se presentan en la Tabla 4.13.

En la estación fluviométrica “Río Longaví en La Quiriquina” se presentan los caudales medios mensuales resumidos en la Tabla 4.14.

Se compara en el gráfico de la Figura 4.7 el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales, además del promedio interanual de los caudales máximos mensuales observados en el mismo período.

Tabla 4.13 Precipitaciones mensuales en “Melozal” (mm.)

| Año | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | PP. Anual |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-----------|
| 1990 | 37,0 | 58,5 | 36,0 | 91,5 | 36,5 | 101,5 | 30,5 | 13,0 | 0,0 | 9,5 | 8,5 | 72,0 | 494,5 |
| 1991 | 17,5 | 0,0 | 0,0 | 28,5 | 256,5 | 155,0 | 118,0 | 34,0 | 82,5 | 17,5 | 0,0 | 0,0 | 709,5 |
| 1992 | 60,5 | 438,0 | 408,5 | 28,5 | 78,0 | 51,0 | 24,5 | 0,0 | 3,0 | 0,0 | 0,0 | 38,5 | 1130,5 |
| 1993 | 76,7 | 154,0 | 224,8 | 69,3 | 86,0 | 18,0 | 22,0 | 7,5 | 3,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 661,8 |
| 1994 | 68,7 | 82,2 | 202,7 | 98,7 | 0,0 | 68,5 | 27,5 | 2,5 | 26,5 | 0,0 | 0,0 | 2,0 | 579,3 |
| 1995 | 76,0 | 33,5 | 211,0 | 252,5 | 82,5 | 13,8 | 33,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1,5 | 0,0 | 703,8 |
| 1996 | 62,5 | 38,0 | 76,0 | 80,0 | 105,0 | 10,8 | 9,5 | 18,5 | 29,0 | 45,4 | 0,0 | 0,0 | 474,7 |
| 1997 | 75,5 | 121,5 | 351,5 | 75,5 | 77,5 | 100,4 | 154,5 | 31,0 | 3,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 990,9 |
| 1998 | 55,0 | 64,4 | 68,7 | 7,2 | 27,3 | 69,4 | 0,0 | 0,2 | 0,5 | 0,0 | 1,3 | 2,0 | 296,0 |
| 1999 | 11,0 | 58,4 | 184,7 | 45,4 | 102,8 | 171,7 | 8,1 | 2,7 | 0,0 | 2,0 | 8,0 | 10,5 | 605,3 |
| 2000 | 9,2 | 40,0 | 421,2 | 15,5 | 28,8 | 256,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 33,2 | 0,5 | 805,3 |
| 2001 | 6,2 | 21,8 | 11,8 | 33,4 | 11,6 | 2,0 | 1,1 | 1,2 | 0,0 | 2,0 | 0,0 | 0,3 | 91,3 |
| Prom. | 46,3 | 92,5 | 183,1 | 68,8 | 74,4 | 84,9 | 35,7 | 9,2 | 12,4 | 6,4 | 4,4 | 10,5 | 628,6 |
| Desv_est | 27,2 | 116,8 | 150,1 | 65,4 | 67,6 | 77,5 | 49,1 | 12,4 | 24,4 | 13,4 | 9,6 | 22,3 | 281,5 |

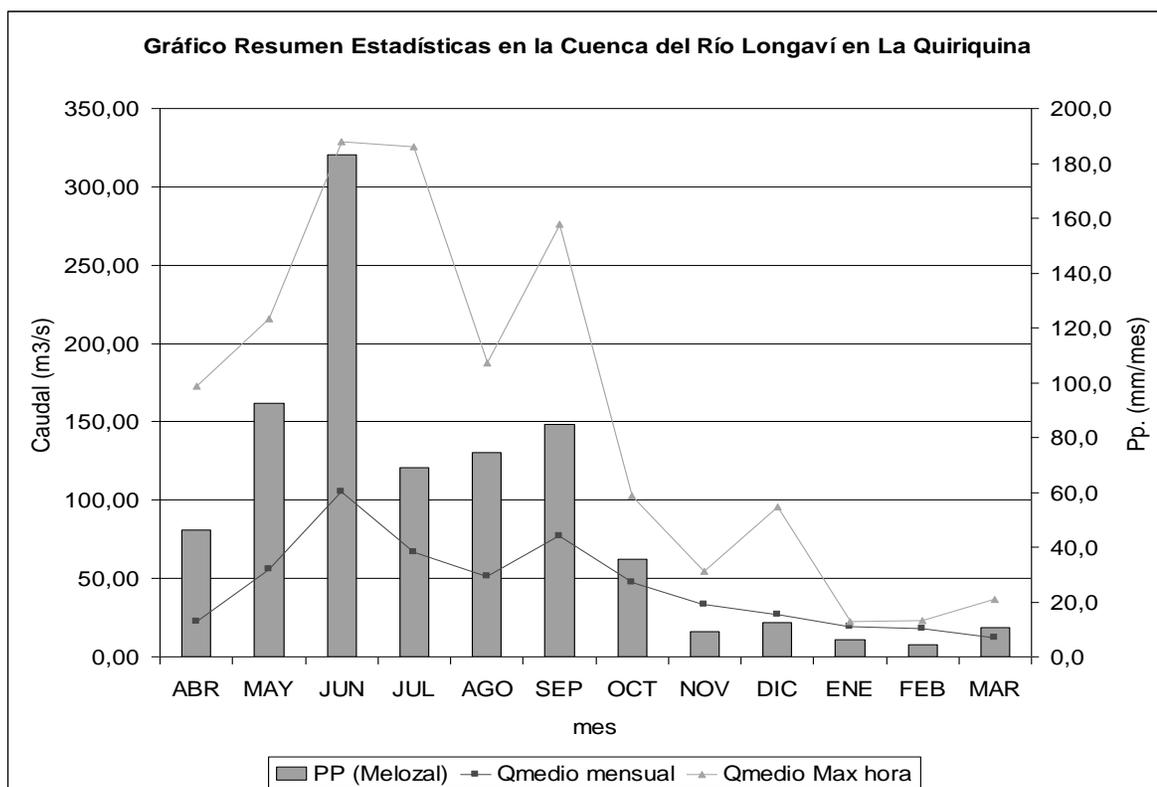
Tabla 4.14 Caudales medios mensuales en la estación “Longaví en La Quiriquina” (m3/s)

| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q medio Anual |
|-----------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| 1990 | 25,24 | 21,76 | 27,55 | 18,59 | 34,27 | 81,97 | 37,47 | 22,31 | 16,44 | 18,00 | 16,81 | 15,10 | 27,96 |
| 1991 | 9,98 | 172,82 | 63,65 | 100,39 | 37,15 | 67,33 | 50,91 | 34,06 | 32,63 | 16,33 | 13,94 | 7,58 | 50,56 |
| 1992 | 33,33 | 156,72 | 122,56 | 79,01 | 33,44 | 51,33 | 61,83 | 46,93 | 29,53 | 21,98 | 20,57 | 16,72 | 56,16 |
| 1993 | 12,31 | 71,12 | 366,88 | 90,33 | 88,01 | 50,51 | 37,36 | 32,00 | 35,15 | 23,05 | 21,09 | 15,43 | 70,27 |
| 1994 | 31,24 | 31,18 | 66,27 | 137,80 | 43,53 | 65,40 | 47,15 | 31,40 | 26,63 | 21,49 | 21,86 | 12,64 | 44,72 |
| 1995 | 30,38 | 14,84 | 105,25 | 114,67 | 72,63 | 89,56 | 58,30 | 45,78 | 28,22 | 20,82 | 17,30 | 11,95 | 50,81 |
| 1996 | 13,01 | 12,42 | 49,98 | 23,48 | 30,45 | 26,37 | 18,45 | 14,39 | 12,66 | 20,80 | 19,16 | 12,89 | 21,17 |
| 1997 | 52,07 | 47,03 | 181,29 | 98,94 | 105,60 | 115,10 | 102,36 | 63,47 | 35,32 | 12,81 | 12,44 | 6,10 | 69,38 |
| 1998 | 13,78 | 17,64 | 23,60 | 35,88 | | 14,83 | 13,63 | 10,35 | | 25,44 | 24,57 | 17,56 | |
| 1999 | 3,28 | 11,15 | 44,66 | 30,24 | 57,01 | 119,29 | | | | 9,66 | 9,45 | 5,24 | |
| 2000 | | | | 6,99 | 12,66 | 167,26 | | | | | | | |
| Prom | 22,46 | 55,67 | 105,17 | 66,94 | 51,48 | 77,18 | 47,50 | 33,41 | 27,07 | 19,04 | 17,72 | 12,12 | 48,88 |
| Desv_Est | 14,66 | 60,52 | 103,93 | 45,02 | 29,02 | 44,26 | 26,31 | 16,82 | 8,39 | 4,87 | 4,68 | 4,42 | 17,57 |

Como se aprecia en los promedios de los caudales medios mensuales, el Río Longaví presenta un régimen de escorrentía predominantemente pluvial. Se observa que las crecidas de mayor envergadura se producen durante el período pluvial de la cuenca (entre los meses de Abril y Septiembre). Por lo tanto, los índices de riesgo en las zonas de inundación pertenecientes a esta cuenca deben ser adecuadamente modelados para los meses de invierno, además del mes de Septiembre. Lo anterior se ve ratificado en los antecedentes de las zonas amagadas, anexo A2, donde se identifica que las fallas de los elementos se producen durante estos meses solamente.

Es importante señalar que el régimen natural de escorrentía en esta cuenca está alterado debido a la existencia de los embalses de riego Bullileo y Digua, los cuales son embalses ubicados que captan de los afluentes de la zona alta del valle del río Longaví.

Figura 4.7 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Longaví en La Quiriquina



c) Río Ancoa en El Morro

En esta cuenca se encuentra la estación pluviométrica “Embalse Ancoa”, registrándose en esta estación una precipitación media anual igual a 750 (mm/año). Siendo las precipitaciones mensuales en el período comprendido por los años 1990 y 2001 las que se presentan en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15 Precipitaciones mensuales en “Embalse Ancoa” (mm.)

| Año | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | PP. Anual |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|-----------|
| 1990 | 66,6 | 127,6 | 100,5 | 158,2 | 109,6 | 293,4 | 55,5 | 57,5 | 3,5 | 8,0 | 7,0 | 138,5 | 1125,9 |
| 1991 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 153,5 | 606,0 | 330,9 | 360,6 | 72,5 | 151,1 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 1688,6 |
| 1992 | 185,3 | 709,2 | 529,6 | 139,8 | 125,5 | 103,1 | 78,5 | 12,5 | 2,5 | 0,0 | 13,0 | 89,5 | 1988,5 |
| 1993 | 127,0 | 378,7 | 483,9 | 189,5 | 147,0 | 39,0 | 70,6 | 36,3 | 92,5 | 2,5 | 0,0 | 0,0 | 1567,0 |
| 1994 | 172,0 | 183,7 | 412,4 | 495,0 | 65,6 | 140,5 | 71,7 | 17,3 | 52,0 | 4,5 | 4,5 | 6,5 | 1625,7 |
| 1995 | 211,5 | 70,5 | 442,5 | 480,0 | 211,0 | 51,2 | 65,6 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,0 | 1535,0 |
| 1996 | 60,4 | 101,2 | 209,0 | 65,0 | 266,8 | 21,8 | 31,4 | 40,3 | 7,5 | 84,6 | 0,0 | 0,0 | 888,0 |
| 1997 | 295,5 | 172,1 | 742,4 | 253,3 | 147,7 | 295,1 | 363,8 | 67,0 | 28,1 | 3,5 | 34,0 | 2,2 | 2404,7 |
| 1998 | 131,5 | 100,6 | 143,1 | 28,4 | 60,8 | 57,8 | 0,0 | 3,0 | 18,2 | 0,0 | 2,0 | 4,5 | 549,9 |
| 1999 | 27,8 | 128,3 | 357,8 | 116,5 | 288,3 | 402,8 | 24,8 | 5,5 | 1,5 | 1,5 | 36,5 | 18,2 | 1409,5 |
| 2000 | 33,0 | 127,0 | 929,2 | 139,4 | 90,5 | 349,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 154,0 | 1,8 | 1824,6 |
| 2001 | 10,3 | 37,0 | 17,0 | 85,0 | 34,2 | 2,9 | 2,3 | 2,4 | 0,0 | 12,3 | 0,0 | 0,6 | 203,9 |
| Prom. | 110,7 | 178,0 | 363,9 | 192,0 | 179,4 | 174,0 | 93,7 | 26,4 | 29,7 | 10,3 | 21,0 | 21,8 | 1400,9 |
| Desv_est | 87,8 | 191,9 | 287,3 | 149,8 | 156,2 | 148,4 | 128,7 | 27,2 | 47,4 | 23,7 | 43,9 | 44,6 | 618,4 |

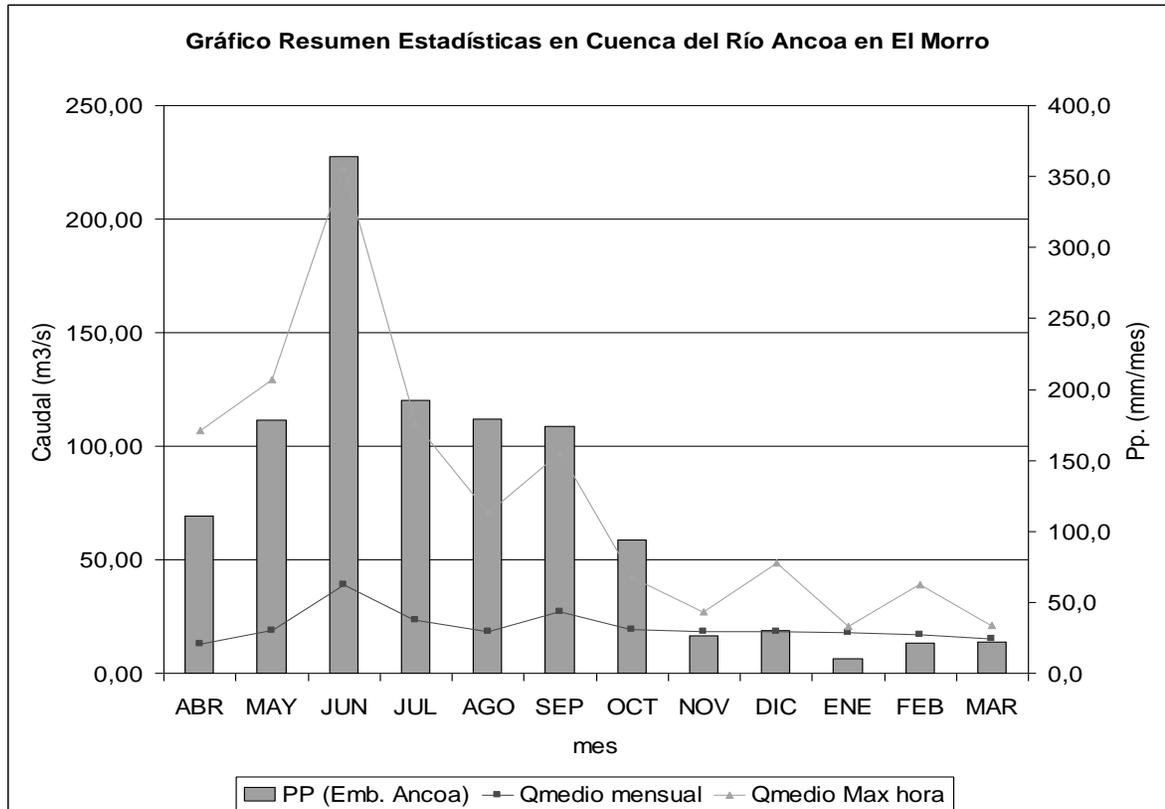
En la estación fluviométrica “Río Ancoa en El Morro” se presentan los caudales medios mensuales resumidos en la Tabla 4.16.

Se compara en el gráfico de la Figura 4.8 el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales, además del promedio interanual de los caudales máximos mensuales observados en el mismo período.

Tabla 4.16 Caudales medios mensuales en la estación “Ancoa en El Morro” (m3/s)

| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q medio Anual |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| 1990 | 6,34 | 11,98 | 5,83 | 6,12 | 12,22 | 32,61 | 12,85 | 15,03 | 17,28 | 16,85 | 16,08 | 13,43 | 13,88 |
| 1991 | 10,34 | 11,06 | | 23,50 | 15,13 | 23,75 | 18,77 | 13,04 | 17,18 | 17,00 | 15,80 | 11,40 | |
| 1992 | 10,87 | 60,88 | 66,09 | 11,00 | 12,84 | 19,65 | 20,28 | 17,92 | 16,61 | 16,92 | 17,77 | 16,52 | 23,95 |
| 1993 | 9,96 | 29,16 | 68,62 | 27,39 | 21,73 | 14,25 | 13,72 | 17,37 | 22,70 | 18,85 | 17,71 | 15,94 | 23,12 |
| 1994 | 15,11 | 13,71 | 27,90 | 65,23 | 16,25 | 20,29 | 15,05 | 14,36 | 21,70 | 17,88 | 16,88 | 15,49 | 21,65 |
| 1995 | 17,69 | 10,40 | 47,93 | 42,34 | 28,90 | 31,05 | 18,25 | 19,99 | 22,92 | 18,35 | 18,05 | 16,18 | 24,34 |
| 1996 | 12,57 | 13,18 | 23,87 | 9,31 | 13,90 | 9,16 | 11,89 | 18,78 | 17,65 | 18,63 | 18,10 | 16,66 | 15,31 |
| 1997 | 22,48 | 16,72 | 79,05 | 27,50 | 38,40 | 48,23 | 40,67 | 21,59 | 20,59 | 17,51 | 16,96 | 14,81 | 30,38 |
| 1998 | 15,86 | 11,39 | 13,44 | 6,20 | 12,17 | 9,47 | 18,29 | 18,30 | 15,64 | 22,63 | 20,06 | 18,41 | 15,15 |
| 1999 | 6,59 | 8,25 | 19,19 | 14,11 | 22,15 | 46,51 | 23,97 | 24,52 | | 14,55 | 14,05 | 11,30 | |
| 2000 | | | | | 10,07 | 41,96 | 18,52 | 19,38 | 11,38 | | | | |
| Prom | 12,78 | 18,67 | 39,10 | 23,27 | 18,52 | 26,99 | 19,30 | 18,21 | 18,36 | 17,92 | 17,14 | 15,01 | 20,97 |
| Desv_Est | 5,06 | 15,93 | 26,91 | 18,78 | 8,65 | 14,14 | 7,93 | 3,30 | 3,62 | 2,06 | 1,62 | 2,32 | 5,73 |

Figura 4.8 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Ancoa



Como se aprecia en los promedios de los caudales medios mensuales, el Río Ancoa presenta un régimen de escorrentía pluvial. Se observa (Ver Figura 4.8) que las mayores crecidas ocurren durante el período pluvial de la cuenca (entre los meses de Abril y Septiembre). Por lo tanto, los índices de riesgo en las zonas de inundación pertenecientes a esta cuenca deben ser adecuadamente modelados para los meses de invierno, además del mes de Septiembre. Lo anterior se ve ratificado en los antecedentes de las zonas amagadas, anexo A2, donde se identifica que las fallas de los elementos se producen durante estos meses solamente.

d) Río Achibueno en La Recova

Dado que no existe control pluviográfico al interior de esta cuenca, se considera como representativa de las condiciones de precipitación en ella la estación pluviográfica “Embalse Ancoa”; la estación se ubica en la cuenca del río Ancoa, la cual es adyacente a la cuenca del río Achibueno, registrándose en esta estación una precipitación media anual igual a 750 (mm/año). Además, ambas cuencas presentan características topográficas de similares condiciones, por lo cual efectos orográficos que afecten la distribución espacial de la precipitación deben afectar a ambas de manera similar.

Las precipitaciones medias mensuales en “Embalse Ancoa” son presentadas en la Tabla 4.15. Por otro lado, en la estación fluviométrica “Río Achibueno en La Recova” se presentan los caudales medios mensuales resumidos en la Tabla 4.17.

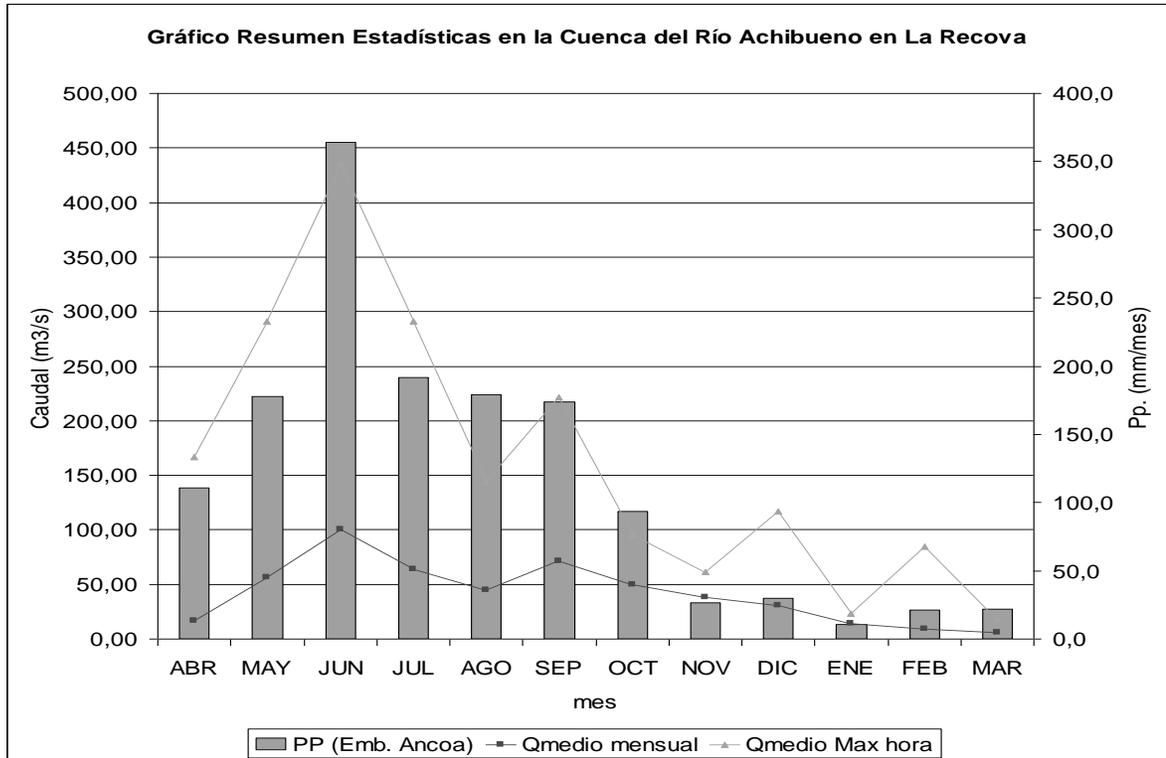
Se compara en el gráfico de la figura 4.11 el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales, además del promedio interanual de los caudales máximos mensuales observados en el mismo período.

Tabla 4.17 Caudales medios mensuales en la estación “Achibueno en La Recova” (m3/s)

| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q medio Anual |
|----------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|---------------|
| 1990 | 14,58 | 28,85 | 17,77 | 18,48 | 32,24 | 85,30 | 36,83 | 23,87 | 12,90 | 9,42 | 6,64 | 6,92 | 24,48 |
| 1991 | 14,48 | 222,62 | 98,74 | 96,46 | 33,53 | 53,74 | 45,95 | 41,63 | 42,98 | 7,41 | 5,67 | 4,60 | 55,65 |
| 1992 | 19,52 | 139,09 | 152,55 | 68,95 | 27,95 | 46,61 | 52,83 | 58,26 | 40,39 | 21,37 | 8,99 | 7,66 | 53,68 |
| 1993 | 13,78 | 67,66 | 301,80 | 48,23 | 61,89 | 45,61 | 36,73 | 34,26 | 44,22 | 24,25 | 11,95 | 6,11 | 58,04 |
| 1994 | 15,72 | 25,74 | 74,46 | 165,90 | 40,73 | 54,51 | 46,84 | 42,07 | 32,26 | 17,60 | 9,06 | 7,15 | 44,34 |
| 1995 | 16,98 | 11,84 | 107,84 | 111,81 | 67,63 | 71,35 | 52,36 | 54,94 | 38,37 | 12,27 | 6,48 | 4,30 | 46,35 |
| 1996 | 9,33 | 8,52 | 44,99 | 16,30 | 22,56 | 23,92 | 21,20 | 18,50 | 9,82 | 15,58 | 8,49 | 6,62 | 17,15 |
| 1997 | 35,49 | 32,14 | 166,76 | 68,78 | 96,04 | 107,25 | 102,57 | 66,40 | 48,69 | 6,97 | 5,67 | 4,22 | 61,75 |
| 1998 | | | | | | | | 6,67 | 6,74 | 27,72 | 14,08 | 6,98 | |
| 1999 | | 5,82 | 35,44 | 34,43 | 61,63 | 154,71 | | | | 4,86 | 3,74 | 4,54 | |
| 2000 | 8,89 | 21,59 | 6,71 | 5,28 | 7,12 | | | | | 8,89 | 21,59 | 6,71 | |
| Prom | 16,53 | 56,39 | 100,71 | 63,46 | 45,13 | 71,44 | 49,41 | 38,51 | 30,71 | 14,21 | 9,30 | 5,98 | 45,18 |
| Desv_Est | 7,87 | 70,66 | 89,01 | 50,21 | 26,29 | 39,61 | 23,84 | 19,71 | 16,35 | 7,68 | 5,04 | 1,30 | 16,20 |

Como queda de manifiesto en la figura 4.11, el Río Achibueno tiene un régimen de escorrentía predominantemente pluvial, provocándose las crecidas de mayor importancia durante el período comprendido entre los meses de Abril y Septiembre.

Figura 4.9 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Achibueno



e) Río Perquilauquén en San Manuel

En esta cuenca se encuentra la estación pluviométrica “Embalse Digua”, la cual posee estadísticas pluviográficas desde el año 1971. En esta estación se registra una precipitación media anual igual a 1.509 (mm/año). Siendo las precipitaciones mensuales en el período comprendido por los años 1990 y 2001 las que se presentan en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18 Precipitaciones mensuales en “Embalse Digua” (mm.)

| Año | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | PP. Anual |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-----------|
| 1990 | 100,0 | 167,6 | 93,0 | 167,2 | 79,9 | 291,3 | 53,6 | 28,7 | 1,8 | 9,5 | 17,3 | 93,4 | 1103,3 |
| 1991 | 16,5 | 0,0 | 0,0 | 106,1 | 494,9 | 291,6 | 196,0 | 70,2 | 179,6 | 16,5 | 0,0 | 0,0 | 1371,4 |
| 1992 | 160,2 | 737,6 | 510,2 | 119,4 | 139,8 | 97,2 | 93,0 | 25,2 | 11,5 | 0,0 | 14,0 | 88,9 | 1997,0 |
| 1993 | 129,8 | 394,2 | 592,5 | 180,2 | 181,1 | 56,2 | 112,9 | 28,4 | 46,8 | 1,7 | 0,0 | 2,0 | 1725,8 |
| 1994 | 196,7 | 135,1 | 282,0 | 344,1 | 57,3 | 162,6 | 86,4 | 7,3 | 42,4 | 5,4 | 7,6 | 6,6 | 1333,5 |
| 1995 | 150,2 | 63,2 | 429,9 | 430,4 | 193,0 | 51,0 | 65,5 | 1,5 | 0,0 | 0,0 | 4,9 | 0,0 | 1389,6 |
| 1996 | 99,1 | 112,4 | 230,8 | 74,1 | 178,7 | 16,6 | 18,2 | 33,9 | 13,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 777,0 |
| 1997 | 180,9 | 181,2 | 585,3 | 188,9 | 122,4 | 162,3 | 252,6 | 51,6 | 31,5 | 10,4 | 29,4 | 1,2 | 1797,7 |
| 1998 | 75,3 | 156,5 | 88,2 | 47,0 | 103,3 | 63,5 | 0,0 | 5,4 | 27,4 | 0,0 | 6,8 | 18,0 | 591,4 |
| 1999 | 29,1 | 141,1 | 341,7 | 94,1 | 225,5 | 328,2 | 44,1 | 4,6 | 6,3 | 6,2 | 39,0 | 8,4 | 1268,3 |
| 2000 | 23,3 | 130,9 | 704,8 | 132,4 | 117,2 | 393,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 124,2 | 2,5 | 1629,2 |
| 2001 | 9,9 | 57,8 | 19,5 | 72,9 | 28,1 | 3,8 | 3,2 | 4,3 | 0,0 | 7,3 | 0,4 | 0,1 | 207,1 |
| Prom. | 97,6 | 189,8 | 323,2 | 163,1 | 160,1 | 159,8 | 77,1 | 21,8 | 30,0 | 4,7 | 20,3 | 18,4 | 1265,9 |
| Desv_est | 64,2 | 197,2 | 242,8 | 115,0 | 120,4 | 134,3 | 79,3 | 22,3 | 50,0 | 5,4 | 35,0 | 34,4 | 525,1 |

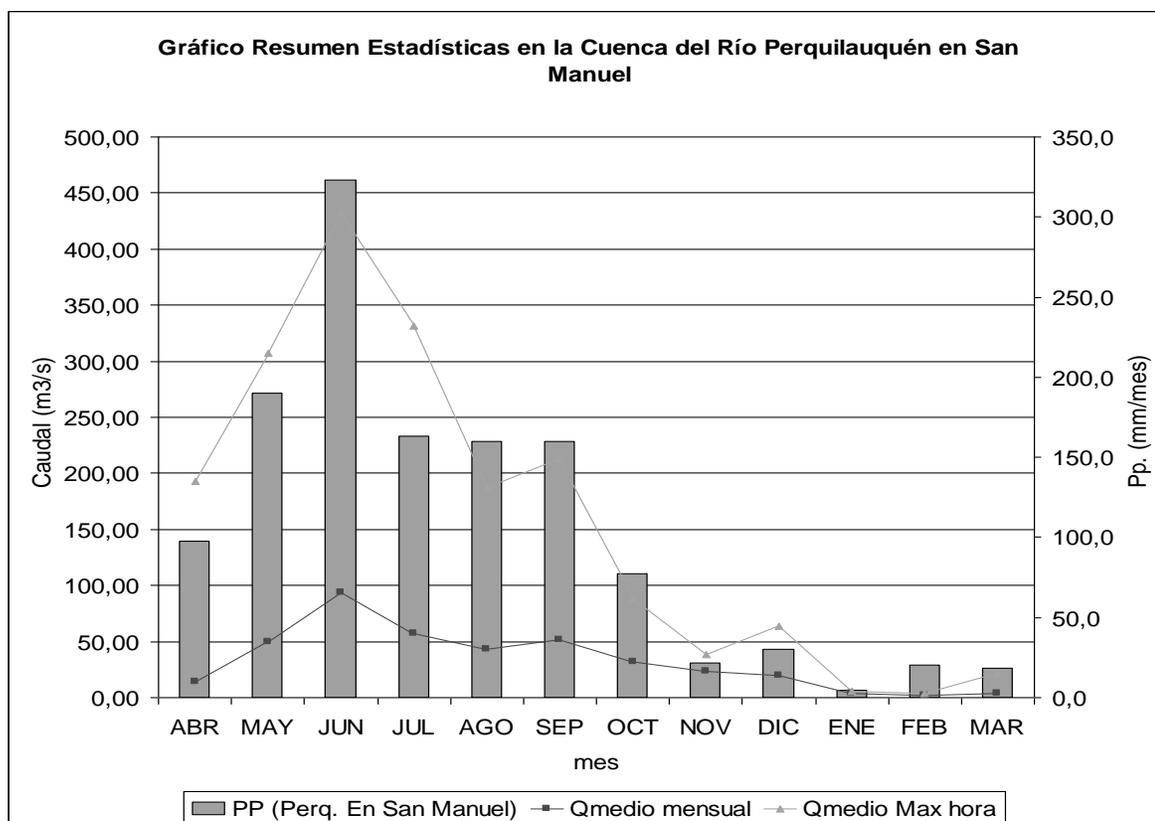
Por otro lado, en la estación fluviométrica “Río Perquilauquén en San Manuel” se presentan los caudales medios mensuales resumidos en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19 Caudales medios mensuales en la estación “San Manuel de Perquilauquén” (m3/s)

| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q medio Anual |
|----------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|------|-------|---------------|
| 1990 | 18,75 | 33,03 | 19,46 | 17,60 | 28,98 | 73,40 | 25,56 | 10,48 | 3,95 | 2,29 | 1,46 | 18,98 | 21,16 |
| 1991 | 5,06 | 138,32 | 82,48 | 82,97 | 25,59 | 57,07 | 34,87 | 17,11 | 15,07 | 1,60 | 1,27 | 1,04 | 38,54 |
| 1992 | 21,44 | 151,97 | 138,77 | 57,91 | 26,73 | 39,49 | 40,20 | 24,19 | 11,19 | 6,30 | 3,10 | 4,45 | 43,81 |
| 1993 | 7,15 | 65,04 | 280,01 | 45,67 | 70,72 | 33,16 | 19,48 | 11,48 | 18,30 | 4,92 | 2,35 | 1,59 | 46,66 |
| 1994 | 10,80 | 31,79 | 66,19 | 71,50 | | | | | | 4,23 | 2,38 | 1,61 | |
| 1995 | 21,54 | 11,62 | 103,40 | 98,85 | 41,32 | | 36,30 | 20,61 | 7,65 | | | | |
| 1996 | 6,62 | 6,95 | 45,91 | 24,07 | 30,01 | 20,80 | 10,41 | 6,38 | 3,33 | 3,45 | 2,75 | 3,14 | 13,65 |
| 1997 | 29,47 | 37,63 | 132,78 | 61,00 | 68,28 | 72,62 | 68,99 | 37,04 | 12,98 | 2,21 | 1,91 | 1,42 | 43,86 |
| 1998 | 5,38 | 12,54 | 20,84 | 79,66 | 43,86 | 15,23 | 6,83 | 3,14 | 1,82 | 4,82 | 2,60 | 1,56 | 16,52 |
| 1999 | | 9,22 | 46,07 | 27,66 | 49,19 | 96,87 | 38,47 | 35,98 | | 0,72 | 0,51 | 1,41 | |
| 2000 | | | | | | | 40,47 | 63,32 | 102,64 | | | | |
| Prom | 14,02 | 49,81 | 93,59 | 56,69 | 42,74 | 51,08 | 32,16 | 22,97 | 19,66 | 3,39 | 2,03 | 3,91 | 32,03 |
| Desv_Est | 8,94 | 53,32 | 77,90 | 27,47 | 17,26 | 28,67 | 17,87 | 18,23 | 31,62 | 1,82 | 0,82 | 5,75 | 14,33 |

Se compara en el gráfico de la Figura 4.10 el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales, además del promedio interanual de los caudales máximos mensuales observados en el mismo período.

Figura 4.10 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Perquilauquén



Según lo observado en la Figura 4.10, el Río Perquilauquén tiene un régimen de escorrentía netamente pluvial, provocándose las crecidas de mayor importancia durante el período comprendido entre los meses de Abril y Septiembre.

f) Estero Los Puercos

Dentro de esta cuenca se encuentra la estación pluviométrica “Pencahue”, la cual posee estadísticas pluviográficas desde el año 1986. En esta estación se registra una precipitación media anual igual a 582 (mm/año). Siendo las precipitaciones mensuales en el período comprendido por los años 1990 y 2001 las que se presentan en la Tabla 4.11.

Por otro lado, en la estación fluviométrica “Estero Los Puercos en Puente Los Puercos” se presentan los caudales medios mensuales resumidos en la Tabla 4.20.

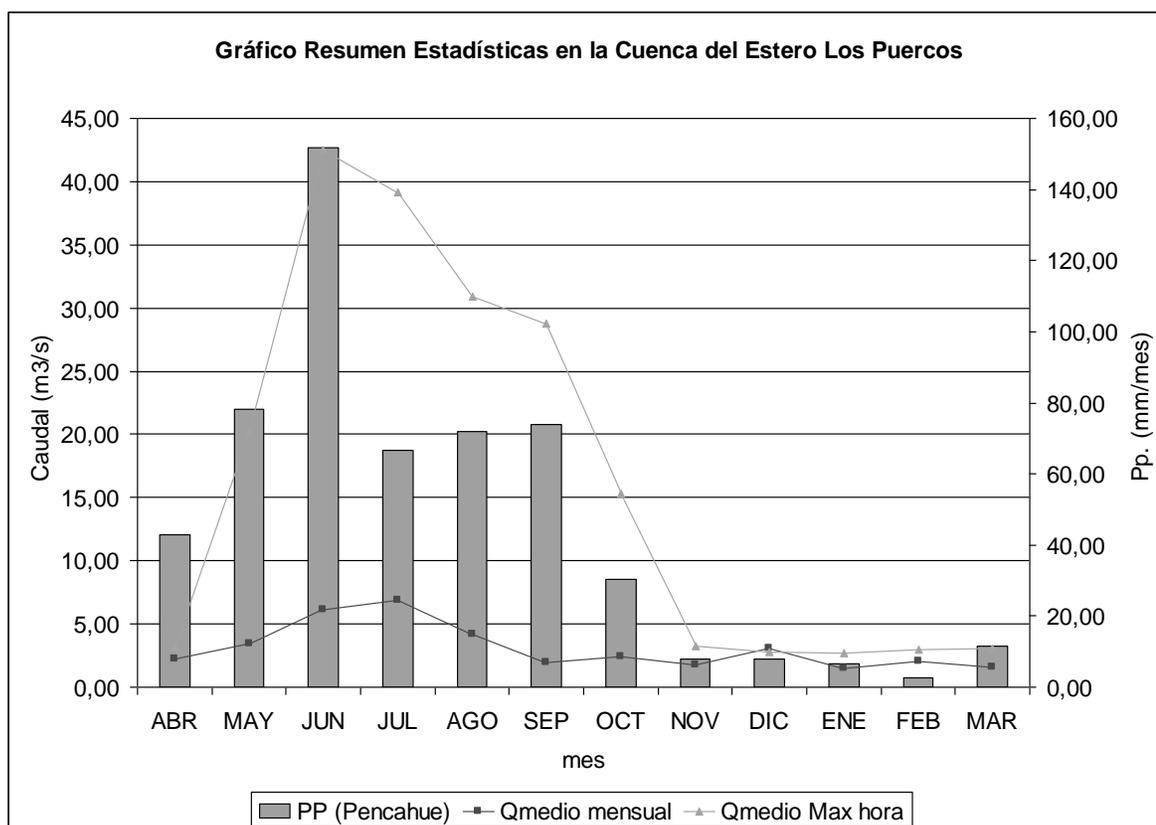
Se compara en el gráfico de la Figura 4.11 el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales, además del promedio interanual de los caudales máximos mensuales observados en el mismo período.

Según lo observado en la Figura 4.11, el Estero Los Puercos tiene un régimen de escorrentía netamente pluvial, provocándose las crecidas de mayor importancia durante el período comprendido entre los meses de Mayo y Septiembre.

Tabla 4.20 Caudales medios mensuales en la estación “Estero Los Puercos en Puente Los Puercos” (m3/s)

| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q medio Anual |
|-----------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|---------------|
| 1990 | 0,06 | 0,07 | 0,09 | 0,33 | 0,25 | 1,65 | 0,53 | 0,11 | | | | 1,46 | |
| 1991 | | 5,89 | 14,68 | 6,02 | 7,95 | 3,81 | 1,45 | 0,27 | 0,06 | | | | |
| 1992 | | 16,82 | 33,56 | 6,41 | 7,97 | 7,70 | 1,08 | 0,43 | 0,06 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | |
| 1993 | 0,07 | 1,51 | 8,27 | 7,19 | 2,38 | 1,38 | 0,96 | 1,36 | 1,42 | 0,00 | 0,56 | 0,28 | 2,12 |
| 1994 | 0,04 | 0,43 | 1,36 | 10,25 | 1,68 | 0,60 | 2,38 | 4,43 | 3,93 | 1,04 | 1,02 | | |
| 1995 | 2,08 | 1,67 | 0,65 | 35,24 | 8,83 | 1,06 | 1,15 | 3,12 | 3,12 | 3,30 | 2,53 | 1,66 | 5,37 |
| 1996 | 8,48 | 4,64 | 0,26 | 1,39 | 3,74 | 0,44 | 1,57 | 3,27 | 1,79 | 2,69 | 4,58 | 0,48 | 2,78 |
| 1997 | 1,63 | 1,55 | 1,83 | 3,73 | 9,53 | 1,05 | 7,99 | 2,79 | 3,34 | 0,48 | 1,37 | 1,36 | 3,06 |
| 1998 | 3,70 | 1,55 | 0,53 | 0,14 | 0,17 | 1,83 | 1,16 | 0,70 | 0,08 | 5,04 | 5,46 | 4,87 | 2,10 |
| 1999 | 0,94 | 1,38 | 2,23 | 1,24 | 2,82 | 0,17 | 1,71 | 2,34 | 2,66 | 0,06 | 0,34 | 0,35 | 1,35 |
| 2000 | 2,22 | 2,71 | 3,75 | 3,56 | 0,27 | 1,95 | 6,83 | 0,83 | 13,92 | 2,22 | 2,71 | 3,75 | 3,73 |
| 2001 | 3,18 | 0,45 | 0,50 | 2,32 | 1,30 | 4,15 | 13,04 | | | 0,00 | 2,78 | 3,15 | |
| Prom | 2,24 | 3,47 | 6,11 | 6,86 | 4,14 | 1,97 | 2,44 | 1,79 | 3,04 | 1,49 | 2,06 | 1,58 | 2,80 |
| Desv. Est | 2,55 | 4,75 | 10,12 | 9,94 | 3,71 | 2,14 | 2,52 | 1,47 | 4,09 | 1,75 | 1,92 | 1,68 | 1,32 |

Figura 4.11 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Estero Los Puercos



g) Cauquenes en Arrayán

En esta cuenca no existe control pluviográfico, por lo que se considera, para estos efectos, representativos de la pluviografía de la cuenca los registros medidos en la estación pluviométrica “Parral”, la cual posee estadísticas pluviográficas desde el año 1986. En esta estación se registra una precipitación media anual igual a 962 (mm/año). Siendo las precipitaciones mensuales en el período comprendido por los años 1990 y 2001 las que se presentan en la Tabla 4.21.

Por otro lado, en la estación fluviométrica “Río Cauquenes en Arrayán” se presentan los caudales medios mensuales resumidos en la Tabla 4.22.

Se compara en el gráfico de la Figura 4.12 el promedio de los caudales medios mensuales con el promedio de las precipitaciones mensuales, además del promedio interanual de los caudales máximos mensuales observados en el mismo período. Según lo observado en dicha figura, el Río Cauquenes tiene un régimen de escorrentía netamente pluvial, provocándose las crecidas de mayor importancia durante el período comprendido entre los meses de Mayo y Septiembre.

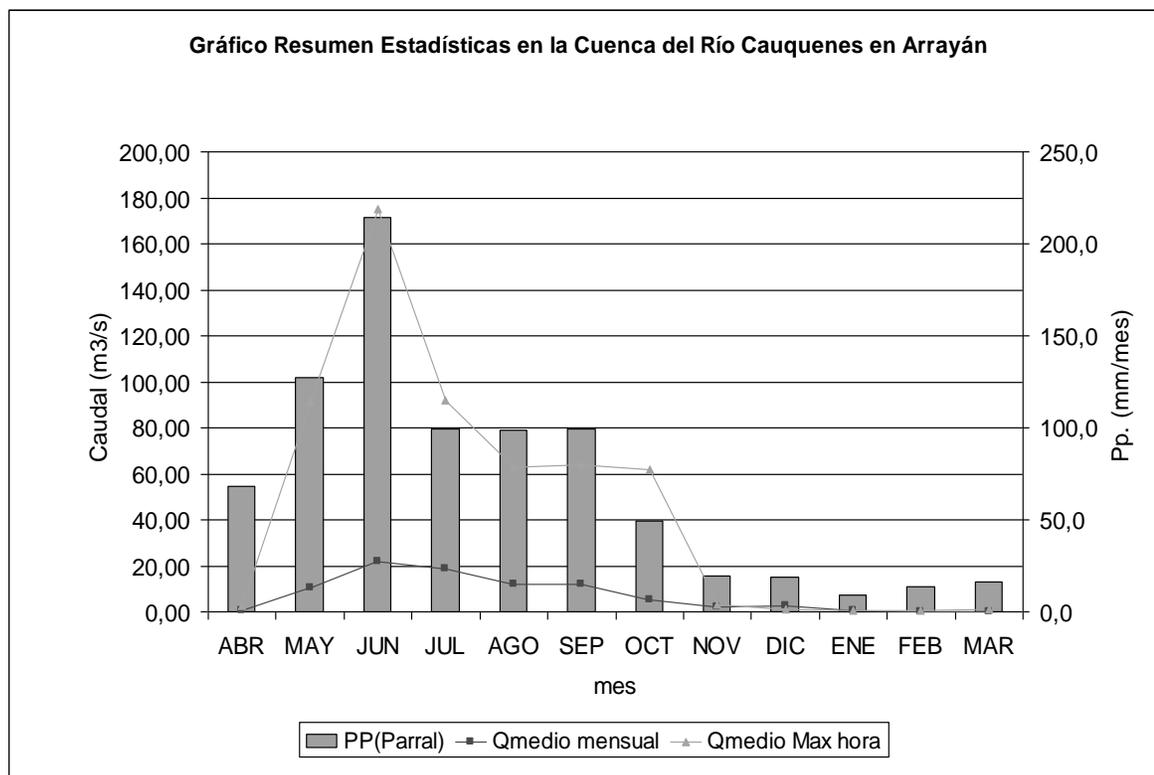
Tabla 4.21 Precipitaciones mensuales en “Parral” (mm.)

| Año | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | PP. Anual |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|-------|-----------|
| 1990 | 69,5 | 94,8 | 61,9 | 114,3 | 56,3 | 168,7 | 37,3 | 17,7 | 0,0 | 9,0 | 19,7 | 104,1 | 753,3 |
| 1991 | 19,0 | 0,0 | 0,8 | 58,7 | 305,6 | 167,1 | 127,4 | 48,1 | 139,9 | 19,0 | 0,0 | 0,8 | 886,4 |
| 1992 | 112,5 | 602,5 | 351,4 | 63,1 | 126,1 | 84,1 | 44,9 | 18,7 | 12,4 | 0,0 | 3,4 | 59,2 | 1478,3 |
| 1993 | 76,1 | 207,9 | 370,9 | 110,9 | 83,0 | 24,8 | 69,0 | 32,0 | 15,0 | 1,2 | 0,0 | 1,5 | 992,3 |
| 1994 | 150,6 | 90,6 | 183,0 | 217,6 | 23,5 | 97,4 | 50,6 | 10,0 | 39,5 | 0,5 | 9,1 | 5,6 | 878,0 |
| 1995 | 89,7 | 32,1 | 248,6 | 258,4 | 100,0 | 31,3 | 48,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 5,8 | 1,0 | 815,3 |
| 1996 | 68,4 | 61,7 | 131,7 | 71,2 | 148,0 | 8,1 | 19,2 | 32,7 | 9,5 | 60,5 | 0,0 | 0,0 | 611,0 |
| 1997 | 140,3 | 140,0 | 406,7 | 113,7 | 62,6 | 75,8 | 176,6 | 63,1 | 4,5 | 15,7 | 25,1 | 1,6 | 1225,7 |
| 1998 | 48,6 | 114,4 | 52,0 | 22,2 | 68,9 | 48,0 | 0,0 | 3,6 | 4,2 | 0,0 | 7,8 | 11,5 | 381,2 |
| 1999 | 25,6 | 90,4 | 253,8 | 74,6 | 112,1 | 228,3 | 20,3 | 5,5 | 0,2 | 3,3 | 18,5 | 10,5 | 843,1 |
| 2000 | 8,8 | 63,6 | 495,8 | 41,2 | 79,7 | 253,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 70,8 | 2,0 | 1015,2 |
| 2001 | 6,5 | 27,3 | 13,2 | 45,4 | 15,7 | 3,6 | 2,0 | 2,0 | 0,0 | 2,7 | 0,0 | 0,1 | 118,4 |
| Prom. | 68,0 | 127,1 | 214,2 | 99,3 | 98,5 | 99,2 | 49,6 | 19,4 | 18,8 | 9,3 | 13,4 | 16,5 | 833,2 |
| Desv_est | 46,9 | 159,6 | 166,7 | 71,6 | 75,9 | 85,7 | 53,7 | 20,6 | 39,8 | 17,4 | 20,1 | 32,1 | 357,4 |

Tabla 4.22 Caudales medios mensuales en la estación “Río Cauquenes en Arrayán” (m3/s)

| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q med. anual |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|--------------|
| 1990 | 0,71 | 1,02 | 1,34 | 3,19 | 6,72 | 4,55 | 2,49 | 0,85 | 0,32 | 0,21 | 0,19 | 0,36 | 1,83 |
| 1991 | 0,24 | 17,94 | 22,54 | 30,10 | 8,93 | 8,51 | 5,26 | 1,96 | 1,09 | 0,11 | 0,04 | 0,06 | 8,07 |
| 1992 | 0,56 | 73,20 | 60,42 | 15,71 | 9,31 | 8,55 | 4,04 | 1,58 | 0,71 | 0,46 | 0,28 | 0,31 | 14,59 |
| 1993 | 0,40 | 4,52 | 39,24 | 21,20 | 10,50 | 5,93 | 1,92 | 1,04 | 0,62 | 0,30 | 0,15 | 0,15 | 7,16 |
| 1994 | 0,91 | 1,52 | 10,44 | 32,95 | 6,12 | 4,70 | 3,12 | 0,87 | 0,48 | 0,41 | 0,28 | 0,25 | 5,17 |
| 1995 | 0,15 | 0,30 | 3,31 | 40,14 | 23,78 | 5,58 | 2,76 | 1,15 | 0,47 | 0,16 | 0,08 | 0,08 | 6,50 |
| 1996 | 0,72 | 0,84 | 4,84 | 14,00 | 12,86 | 3,94 | 1,53 | 0,86 | 0,60 | | | | 0,54 |
| 1997 | 1,12 | 4,77 | 65,51 | 15,08 | 18,73 | 21,11 | 18,23 | 5,49 | 1,57 | 0,29 | 0,25 | 0,13 | 12,69 |
| 1998 | 0,62 | 1,37 | 3,62 | 6,58 | 2,43 | 2,42 | 0,68 | 0,26 | 0,12 | 0,65 | 0,44 | 0,34 | 1,63 |
| 1999 | 0,10 | 0,39 | 5,25 | 8,86 | 19,63 | 53,56 | 3,41 | 1,21 | | 0,06 | 0,02 | 0,07 | |
| 2000 | | | | | | | 12,25 | 7,29 | 17,59 | | | | |
| Prom | 0,55 | 10,59 | 21,65 | 18,78 | 11,90 | 11,89 | 5,06 | 2,05 | 2,36 | 0,30 | 0,19 | 0,23 | 7,20 |
| Desv_Est | 0,33 | 22,63 | 24,69 | 12,14 | 6,80 | 15,56 | 5,35 | 2,23 | 5,37 | 0,19 | 0,14 | 0,16 | 4,63 |

Figura 4.12 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Cauquenes



h) Río Maule en Forel

Esta cuenca de considerable extensión, con un área aportante de alrededor de 20.000 Km², contiene cuencas de regímenes nivo - pluvial y pluvial, incluyendo las señaladas en los puntos anteriores. Además, el régimen natural de escorrentía en esta cuenca está modificado por embalses de riego y producción hidroeléctrica; en mayor medida por los embalses Colbún y Machicura (embalses de generación hidroeléctrica) y en menor cuantía por los embalses Bullileo y Digua, los cuales son embalses de riego ubicados en la cuenca del río Longaví, la cual es afluente al Río Loncomilla, que a su vez es afluente al Río Maule.

Según lo mencionado en el párrafo precedente, la relación precipitación escorrentía en régimen natural de esta cuenca está alterada, a una escala temporal del orden de la duración de una tormenta. Por lo tanto, se asume adecuado utilizar en este punto modelos concentrados que consideren como datos de entrada caudales en los afluentes del Río Maule (a manera de propagación de crecidas), sin considerar la precipitación.

En consecuencia, en esta cuenca no se realizará un análisis de las precipitaciones mensuales, tal como se hizo en el resto de las cuencas, sino se presentará solo la variación y distribución de los caudales medios mensuales y máximos instantáneos, en los principales afluentes de la misma.

Los principales afluentes continuos a la cuenca del Maule en Forel, son los ríos Claro y Loncomilla, las cuales actúan predominantemente en régimen natural; además esporádicamente recibe aportes del sistema de embalses Colbún - Machicura.

En la Tabla 4.12 y Figura 4.6 se presenta el resumen de la caracterización de la cuenca del Río Claro en Talca, mientras el resumen de la variación mensual de los caudales máximos instantáneos y medios mensuales en la estación Loncomilla en Las Brisas se muestra en la Tabla 4.23 y Figura 4.13.

Los caudales medios mensuales y máximos instantáneos en la estación fluviométrica "Río Maule en Forel" se presentan resumidos en la Tabla 4.24.

En el gráfico de la Figura 4.14 se compara el promedio de los caudales medios mensuales en la estación Maule en Forel con el promedio de los caudales máximos mensuales que se observan en el mismo período.

Tabla 4.23 Caudales medios mensuales en la estación “Loncomilla en Las Brisas” (m3/s)

| Año | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | Q medio Anual |
|----------|--------|----------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|---------------|
| 1990 | 110,79 | 198,93 | 130,05 | 176,57 | 179,26 | 522,30 | 156,48 | 68,63 | 32,81 | 24,57 | 24,90 | 53,14 | 139,87 |
| 1991 | 56,86 | 908,09 | 746,80 | 696,43 | 245,16 | 395,00 | 210,39 | 108,99 | 85,57 | 22,04 | 20,43 | 31,50 | 293,94 |
| 1992 | 116,22 | 1.754,05 | 1.186,95 | 520,82 | 280,32 | 373,40 | 221,19 | 142,03 | 81,73 | 34,43 | 39,33 | 62,22 | 401,06 |
| 1993 | 86,24 | 423,72 | 1.346,33 | 619,00 | 398,71 | 254,30 | 104,66 | 97,88 | 154,79 | 45,14 | 34,86 | 48,21 | 301,15 |
| 1994 | 78,95 | 180,10 | 466,83 | 944,87 | 245,58 | 312,13 | 183,19 | 76,27 | 82,39 | 30,94 | 30,73 | 39,52 | 222,63 |
| 1995 | 49,75 | 90,20 | 587,40 | 980,26 | 539,61 | 346,27 | 197,87 | 106,91 | 62,74 | 35,19 | 32,88 | 39,41 | 255,71 |
| 1996 | 85,71 | 78,72 | 285,97 | 170,87 | 199,60 | 114,91 | 41,23 | 42,60 | 19,95 | 31,27 | 36,70 | 58,03 | 97,13 |
| 1997 | 143,95 | 217,14 | 1.519,03 | 431,58 | 576,03 | 581,43 | 578,87 | 241,81 | | 12,54 | 18,78 | 21,19 | |
| 1998 | 65,25 | 60,38 | 107,18 | 81,99 | 79,87 | 72,43 | 24,59 | 14,30 | 9,66 | 26,90 | 32,48 | 37,13 | 51,01 |
| 1999 | 3,66 | 45,37 | 245,14 | 304,64 | 347,80 | 1.075,15 | 179,00 | 70,07 | 40,88 | 21,34 | 61,82 | 34,34 | 202,43 |
| 2000 | 33,33 | 55,85 | 1.227,65 | | | | | | | | | | |
| Prom | 75,52 | 364,78 | 713,58 | 492,70 | 309,19 | 404,73 | 189,75 | 96,95 | 63,39 | 28,44 | 33,29 | 42,47 | 218,33 |
| Desv_Est | 39,84 | 525,31 | 522,10 | 318,28 | 157,85 | 283,75 | 153,02 | 62,36 | 44,38 | 9,04 | 12,10 | 12,76 | 109,81 |

Tabla 4.24 Caudales medios mensuales en la estación “Maule en Forel” (m3/s)

| Año | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Q medio Anual |
|----------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| 1990 | 157,12 | 166,72 | 250,57 | 221,56 | 201,96 | 623,88 | 251,03 | 232,00 | 125,63 | | 114,59 | 117,68 | 247,83 |
| 1991 | 146,72 | 186,87 | 383,70 | 999,36 | 718,37 | 495,22 | 401,40 | 354,03 | 409,58 | 85,73 | 79,48 | 101,31 | 455,03 |
| 1992 | 269,88 | 1.914,64 | 1.885,52 | 883,98 | 0,00 | 652,50 | 452,11 | 506,61 | 481,80 | 223,65 | 155,33 | 217,21 | 783,00 |
| 1993 | 254,74 | 660,94 | 2.097,35 | 1.028,81 | 614,85 | 662,94 | 399,86 | 316,24 | 241,55 | 197,68 | 122,08 | 198,97 | 697,48 |
| 1994 | 354,09 | 466,39 | 795,82 | 1.362,56 | 561,39 | 657,35 | 405,73 | 265,49 | 263,57 | 131,01 | 128,62 | 179,26 | 570,27 |
| 1995 | 194,94 | 269,55 | 714,89 | 1.468,71 | 789,29 | 666,15 | 495,59 | 514,09 | 353,28 | 112,42 | 116,95 | 137,20 | 607,39 |
| 1996 | 240,61 | 265,42 | 477,11 | 349,39 | 418,89 | 287,41 | 0,00 | 147,53 | 73,57 | 155,58 | 126,39 | 154,42 | 251,10 |
| Prom | 231,16 | 561,51 | 943,57 | 902,05 | 472,11 | 577,92 | 343,67 | 333,71 | 278,43 | 151,01 | 120,49 | 158,01 | 516,01 |
| Desv_Est | 72,09 | 621,69 | 742,06 | 470,38 | 285,28 | 141,56 | 169,25 | 137,12 | 147,79 | 52,20 | 22,53 | 42,66 | 208,70 |

Figura 4.13 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Loncomilla en Las Brisas.

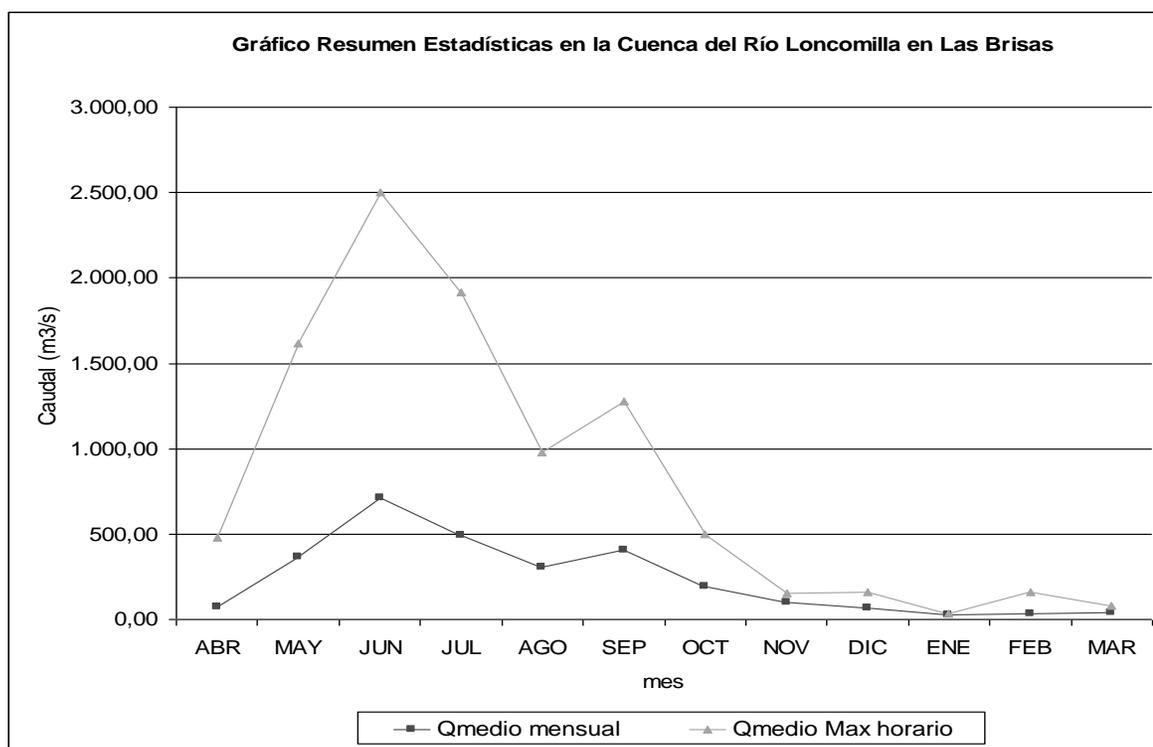
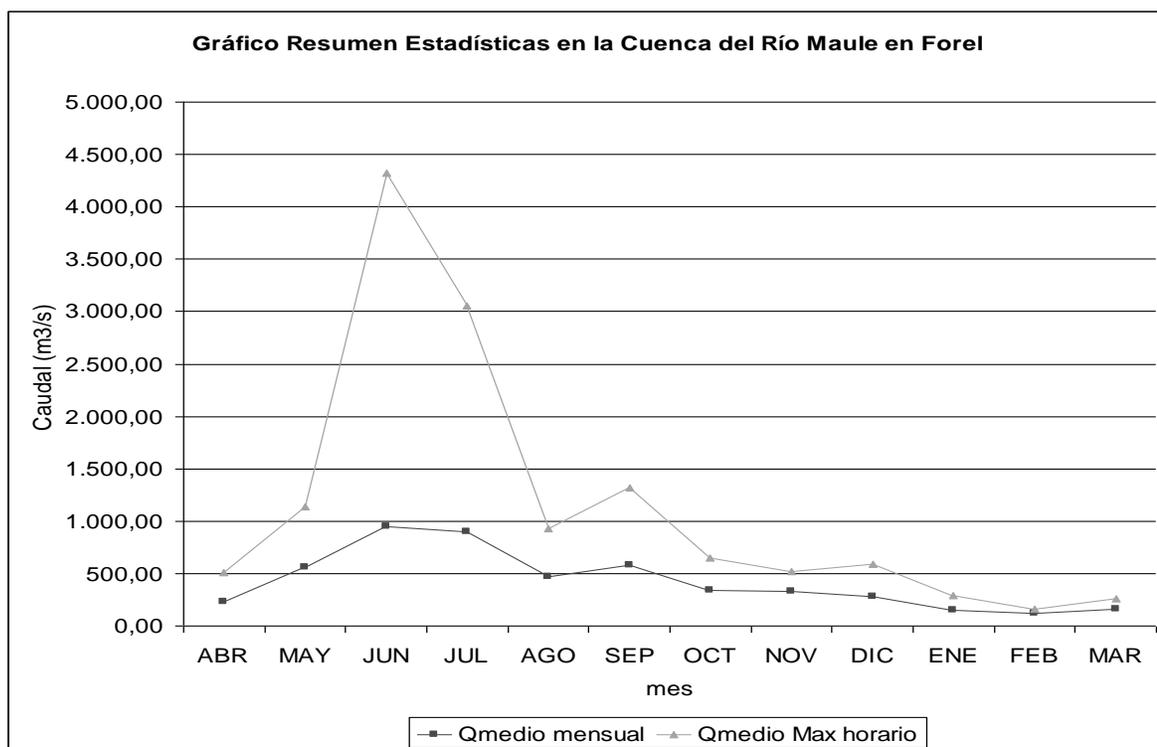


Figura 4.14 Resumen estadísticas mensuales en la cuenca del Río Maule en Forel.



4.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS MODELADOS

Es necesario determinar el valor del umbral de falla “Qfalla”, para los elementos que fueron incorporados al SATR, mediante el uso de la metodología descrita en el capítulo 3.1.3. Con este fin se presenta a continuación una descripción más detallada de los elementos modelados, ordenados por cuenca.

También fueron consideradas, en la estimación del umbral de falla, ciertas tormentas, con crecidas asociadas de relevancia, en la cuales no hay falla de los elementos; a estas tormentas se les denomina tormentas de verificación o “chequeo”, para las cuales se asumen que el valor “Qfalla” debe ser superior al caudal máximo instantáneo registrado durante las mismas. No obstante, en algunos casos los caudales de verificación pueden ser mayores a los umbrales adoptados, debido a que prensa escrita no registra explícitamente la falla en la fecha asociada. En estos casos se privilegia la consistencia del valor del umbral con respecto al resto de los caudales de falla que se registran.

En esta caracterización se señalan la ubicación, descripción del tipo de elemento, información disponible y tormentas con las cuales se estima el umbral de falla, con sus respectivos valores de caudal máximo instantáneo en la estación limnigráfica asociada. La enumeración de los puntos proviene del catastro de zonas de inundación presentado en el anexo A1, esta enumeración es la misma empleada en el mapa de amenaza de la VII Región, que se presenta en la Figura 4.

4.4.1 Hoya del Río Mataquito

Esta cuenca queda delimitada por la área aportante en la estación limnigráfica “Mataquito en Licantén” ($A = 5.923 \text{ Km}^2$). El Río Mataquito está formado principalmente por dos subcuencas, las cuales son las conformadas por el Río Lontué y el Río Teno, destacándose en estos afluentes las estaciones limnigráficas Palos en Colorado (afluente al Río Lontué) y Teno en Junta con el Río Claro. A continuación se presenta la ubicación de los elementos bajo riesgo y antecedentes de las fallas producidas en estos.

a) Cuenca del Río Teno en junta con río Claro

La información disponible está brindada por los datos controlados en la estación D.G.A. “**Río Teno en junta con Claro**”, la que posee equipamiento para la transmisión de información en tiempo real.

En el lugar donde se emplaza la estación limnigráfica, la información pluviográfica existente tiene una serie histórica mínima, disponiéndose sólo información para el año (2002), por lo que hubo que realizar correlaciones de la información concurrente en dicho período (Enero-Julio 2002) con la estación

pluviográfica “**Los Queñes**”, para obtener la cantidad de información necesaria con la que se calibran y validan los modelos de pronóstico asociados. En las tablas 4.25, 4.26, 4.28 y 4.29 se señalan las características de los elementos afectados en esta cuenca, mientras que en las tablas 4.27 y 4.30 se presentan las fechas y los caudales con los que se obtienen los umbrales de falla de dichos elementos.

Tabla 4.25 Punto N° 40

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Los Queñes, Camino J-55, aproximadamente sector Los Maquis Km32 de la ruta |
| Coordenadas (UTM) | : 6125520 N : 331953 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Romeral |
| Descripción | : Las crecidas del Río Teno afectan la estructura del camino J-55 Romeral-Los Queñes, sectores: Los Maquis, variante Los Maquis, Las Palomas y Cardonal. Localidad de Los Queñes queda aislada. |

Tabla 4.26 Punto N° 41

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Los Queñes, Camino J-55, aproximadamente sector Km30 de la ruta |
| Coordenadas (UTM) | : 6126477 N : 330938 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Romeral |
| Descripción | : Idem punto 40. |

Tabla 4.27 Fechas de eventos extremos, puntos 40 y 41

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 29-05-91 | 672,4 | 13-06-96 | 154,8 |
| 26-05-92 | 429,8 | 30-06-92 | 246,1 |
| (*) 04-05-93 | 372,2 | 22-06-92 | 180 |
| 28-06-93 | 525 | 27-07-92 | 106 |
| 26-07-94 | 460,4 | ----- | ----- |
| 22-06-97 | 444,3 | ----- | ----- |

(*): Tormenta en la que se registra el caudal umbral en los puntos 40 y 41.

Tabla 4.28 Punto N° 15

| | |
|---------------------------|---|
| Nombre | : Rincón de Sarmiento |
| Coordenadas (UTM): | : 6137185 N |
| | : 299626 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Curicó |
| Descripción | : Las crecidas del río Teno y el desborde de canal afectan al sector de Rincón de Sarmiento, inundando caminos y asentamientos humanos. Familias quedan aisladas por corte de camino (desborde de canal). Se observan arreglos en la actualidad |

Tabla 4.29 Punto N° 46

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Quilpoco |
| Coordenadas (UTM) | : 6129039 N |
| | : 284645 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Rauco |
| Descripción | : Las crecidas del río Teno y del estero Tilicura producen inundaciones de terrenos agrícolas y del camino. No se ven asentamientos humanos, sólo predios. Se genera corte del camino por falla del puente. |

Tabla 4.30 Fechas de eventos extremos, puntos 15 y 46

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 24-06-1992 | 246 | ----- | ----- |
| (*) 24-07-1992 | 214 | ----- | ----- |

(*): Tormenta en la que se registra el caudal umbral en los puntos 15 y 46.

Observaciones punto N° 15:

En este sector no se presentan problemas en los últimos años, por lo tanto es posible que éstos estén resueltos para el umbral estimado. Esto implica hacer un seguimiento en el futuro del elemento (zona de inundación) para corroborar si es adecuado seguir modelándolo o bien es necesario rectificar el caudal umbral.

Observaciones punto N°46:

En este sector no se dispone de suficiente información para estimar el caudal umbral “Qfalla”. Esto implica hacer un seguimiento en el futuro del elemento (zona de inundación) para corroborar si este valor es el adecuado o bien es necesario rectificar dicho caudal.

b) Cuenca del Río Palos en junta con Río Colorado

La información disponible está brindada por los datos controlados en la estación D.G.A. “**Río Palos en junta con Colorado**”, la que posee equipamiento para la transmisión de información en tiempo real.

En el lugar donde se emplaza la estación limnigráfica, la información pluviográfica existente tiene una serie histórica mínima, disponiéndose sólo información para el año (2002), por lo que hubo que realizar correlaciones de la información concurrente en dicho período (Enero-Julio 2002) con la estación pluviográfica “**Potrero Grande**”, para así obtener la cantidad de información necesaria con la que se calibran y validan los modelos de pronóstico asociados. Las tablas 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.37, 4.38, 4.40 y 4.41 señalan las características de los elementos afectados en esta cuenca, las tablas 4.36, 4.39 y 4.42 presentan las fechas y los caudales con los que se obtienen los umbrales de falla.

Tabla 4.31 Punto N° 2

| | |
|---------------------------|---|
| Nombre | : Localidad de Lontué. Canal de regadío, sector Estación FF.CC. |
| Coordenadas (UTM) | : 6118681 N |
| | : 293333 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Molina |
| Descripción | : Canal se desborda por crecida del río Lontué, inundando calles y sectores aledaños. |

Tabla 4.32 Punto N° 3

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Localidad de Lontué, Estero Seco |
| Coordenadas (UTM) | : 6117693 N |
| | : 294422 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Molina |
| Descripción | : Estero se desborda por crecida del Lontué, anegando viviendas aledaños. |

Tabla 4.33 Punto Nº 4

| | |
|--------------------------|--|
| Nombre | : Camino Casablanca-Pichingal |
| Coordenadas (UTM) | : 6113493 N |
| | : 297410 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Molina |
| Descripción | : Canal de regadío se desborda por crecida del Río Lontué, produciendo corte de caminos e inundación de sector agrícola. |

Tabla 4.34 Punto Nº 5

| | |
|--------------------------|--|
| Nombre | : Canal Patagua, Bocatoma canal a Pichingal (Sector de las veinticinco). |
| Coordenadas (UTM) | : 6110248 N |
| | : 301265 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Molina |
| Descripción | : Inundación por crecida del Río Lontué. En el sector no se ven problemas de anegamiento de viviendas, inundación se produce aguas abajo (en las localidades de: Entre Ríos-Casa Blanca Pichingal-Maravilla, etc). |

Tabla 4.35 Punto Nº 6

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Sector de La Puntilla, Espigones |
| Coordenadas (UTM) | : 6106738 N |
| | : 305015 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Molina |
| Descripción | : Inundación por crecida del Río Lontué, camino se ve afectado por desbordes de canal y río. Se están realizando trabajos de reparación en el sector. |

Tabla 4.36 Eventos extremos, puntos 2, 3, 4, 5 y 6

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 27 al 30/05/1991 | 449 | 03/05/1993 | 260 |
| 23 al 24/05/1992 | 247,1 | 28/06/1993 | 161 |
| (*) 23/04/1997 | 239 | 24/07/1994 | 270,8 |
| 01/07/2000 | 396,3 | 30/04/1995 | 164,8 |
| ----- | ----- | 01/06/1995 | 173 |
| ----- | ----- | 15/06/1997 | 194,8 |
| ----- | ----- | 06/09/1997 | 191,3 |
| ----- | ----- | 15/05/2001 | 63,4 |

(*): Tormenta para la que se registra el caudal umbral en los puntos 2, 3, 4, 5 y 6.

Tabla 4.37 Punto N° 7

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Sector de La Puntilla, Bocatoma del Canal |
| Coordenadas (UTM) | : 6106105 N |
| | : 305491 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Molina |
| Descripción | : Inundación por crecida del Río Lontué, camino se ve afectado por desbordes de canal y río. Se están realizando trabajos de reparación en el sector. Bocatoma canal Lontué: se aprecian 3 canales en el sector. |

Tabla 4.38 Punto N° 8

| | |
|--------------------------|--|
| Nombre | : Sector de La Puntilla, La Puntilla |
| Coordenadas (UTM) | : 6106016 N |
| | : 305565 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Molina |
| Descripción | : Inundación por crecida del Río Lontué, camino se ve afectado por desbordes de canal y río. Se están realizando trabajos de reparación. |

Tabla 4.39 Eventos extremos, puntos 7 y 8

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 27 al 30/05/1991 | 449 | ----- | ----- |
| 15/06/1997 | 194,8 | ----- | ----- |
| 23/04/1997 | 239 | ----- | ----- |
| 01/07/2000 | 396,3 | ----- | ----- |
| 03/05/1993 | 260 | ----- | ----- |
| (*) 28/06/1993 | 161 | ----- | ----- |
| 24/07/1994 | 270,8 | ----- | ----- |

(*): Tormenta para la que se registra el caudal umbral en los puntos 7 y 8.

Tabla 4.40 Punto N° 13

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Tutuquén Bajo (poblado) |
| Coordenadas (UTM) | : 6126835 N |
| | : 285176 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Curicó |
| Descripción | : Las crecidas del río Lontué y las crecidas del estero Quete-Quete afectan al sector de Tutuquén Bajo (Desde El Duraznito hacia abajo) viéndose afectados el camino Curicó-Tutuquén (J-620), asentamientos humanos, escuela y posta de salud, entre otros. Varias viviendas se ven afectadas. El camino queda cortado. |

Tabla 4.41 Punto N° 14

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Tutuquén Bajo (Río) |
| Coordenadas (UTM) | : 6126653 N |
| | : 2866598 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Curicó |
| Descripción | : Las crecidas del río Lontué y las crecidas del estero Quete-Quete afectan al sector de Tutuquén Bajo (Desde El Duraznito) Viéndose afectados el camino Curicó-Tutuquén (J-620), asentamientos humanos, escuela y posta de salud, entre otros. Muchas viviendas se ven afectadas. El camino queda cortado. Se observan gaviones en el río para proteger Tutuquén. Se aprecia socavación aguas arriba de los gaviones. |

Tabla 4.42 Eventos extremos, puntos 13 y 14

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 23-05-1992 | 247,1 | ----- | ----- |
| 06-06-1992 | 73,3 | ----- | ----- |
| 01/07/2000 | 396,3 | ----- | ----- |
| (*) 15/05/2001 | 63,4 | ----- | ----- |

(*): Tormenta para la que se registra el caudal umbral en los puntos 13 y 14.

c) Cuenca del Río Mataquito en Licantén

La información disponible está brindada por los datos controlados en la estación D.G.A. **“Río Mataquito en Licantén”**, la que posee equipamiento para la transmisión de información en tiempo real, por lo tanto los puntos asociados a esta cuenca pueden ser incluidos en la actualidad al SATR.

En el lugar donde se emplaza la estación limnigráfica, la información pluviográfica existente tiene una serie histórica mínima, disponiéndose sólo información para el año (2002), además de ser poco representativa de la totalidad de la cuenca, debido a la considerable extensión de la misma, donde se aprecian, entre otros fenómenos meteorológicos, cambios en la distribución espacial de la precipitación por efectos orográficos. Por dichos motivos se decide realizar correlaciones de la información concurrente en dicho período (Enero-Julio 2002) con las estaciones pluviográficas **“Potrero Grande”** y **“Los Queñes”**, determinándose que existe una mejor correlación entre las estaciones ubicadas en **“Licantén”** y **“Los Queñes”**.

Para la modelación de esta cuenca se dispone de información de las estaciones fluviométricas D.G.A **“Palos en Junta en Colorado”**, **“Colorado en Junta con Palos”** y **“Teno en junta con Claro”**, las cuales se encuentran aguas arriba de la Estación **“Mataquito en Licantén”**, en los afluentes del mismo río, dicha información existe en períodos concurrentes para algunas tormentas. Todas estas estaciones poseen plataformas de transmisión en tiempo real, por lo que los modelos identificados que requieran la información en las estaciones señaladas pueden ser incorporados al SATR. En las tablas 4.43, 4.45, 4.47, 4.49 se señalan las características de los elementos afectados en esta cuenca, mientras que en las tablas 4.44, 4.46, 4.48 y 4.50 se presentan las fechas y los caudales con los que se obtienen los umbrales de falla de dichos elementos.

Tabla 4.43 Punto N° 35

| | |
|--------------------------|--|
| Nombre | : Hualañé |
| Coordenadas (UTM) | : 6124774 N |
| | : 227600 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Hualañé |
| Descripción | : Crecidas del río Mataquito afectan a Hualañé y sectores aledaños. Influyen crecidas los ríos Teno y Lontué. Se produce corte de la ruta J-60, dejando sectores aislados (Lora y Placilla). |

Tabla 4.44 Eventos extremos, punto 35

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|----------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 21-06-1997 | 2509,3 | 28-05-1991 | 1797,2 |
| (*) 1-07-2000 | 2730 | 06-09-1999 | 536,8 |
| ----- | ----- | 25-05-1992 | 1666,7 |
| ----- | ----- | 7-06-1992 | 1430,3 |

(*): Tormenta en la cual se registra el caudal umbral en el punto 35.

Tabla 4.45 Punto N° 28

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Docomávida |
| Coordenadas (UTM) | : 6122161 N |
| | : 229284 E |
| Provincia | : Talca |
| Comuna | : Curepto |
| Descripción | : Crecidas del río Mataquito afectan camino, asentamientos humanos y terrenos agrícolas. Son aproximadamente 4 casas que, en general, se ven afectadas casi todos los años y deben ser evacuadas. Siempre se inundan los predios y la ruta. |

Tabla 4.46 Eventos extremos, punto 28

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 28-05-1991 | 1797,2 | ----- | ----- |
| 27-05-1992 | 1666,7 | ----- | ----- |
| 06-06-1992 | 1430,3 | ----- | ----- |
| 27-07-1995 | 942 | ----- | ----- |
| (*) 21-08-1995 | 822 | ----- | ----- |
| 20-06-1997 | 1268 | ----- | ----- |
| 19-07-2001 | 2471 | ----- | ----- |

(*): Tormenta en la que se registra el caudal umbral en el punto 28

Tabla 4.47 Punto N° 47

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Corazón |
| Coordenadas (UTM) | : 6120891 N |
| | : 271364 E |
| Provincia | : Curicó |
| Comuna | : Rauco |
| Descripción | : Crecidas del río Mataquito inundan terrenos agrícolas y parcelas. |

Tabla 4.48 Eventos extremos, punto 47

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 29-05-1991 | 1797,2 | 01-07-1993 | 949 |
| 25-05-1992 | 1666,7 | ----- | ----- |
| (*) 25-07-1994 | 1400 | ----- | ----- |
| 30-06-2000 | 2509,3 | ----- | ----- |

(*): Tormenta en la cual se registra el caudal umbral en el punto 47.

Tabla 4.49 Punto N° 141

| | |
|---------------------------|--|
| Nombre | : Ruta J-60 Iloca-La Pesca, Sector Km 112 |
| Coordenadas (UTM) | : 6129800 N |
| | : 209311 E |
| Provincia | : Curicó |
| Descripción | : Efectos combinados de marejadas y crecidas del río Mataquito al nivel de la desembocadura del mismo producen corte de caminos y aislamiento de localidades Iloca y La pesca. |

Tabla 4.50 Eventos extremos, punto 141

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| (*) 27-05-1992 | 1666,7 | ----- | ----- |
| 21-06-1997 | 2509,3 | ----- | ----- |

(*): Tormenta en la cual se registra el caudal umbral en el punto 141.

Observaciones punto N° 141:

En este sector no se presentan problemas en los últimos años, por lo tanto es posible que éstos estén resueltos para el umbral estimado. Esto implica hacer un seguimiento en el futuro del elemento (zona de inundación) para corroborar si es adecuado seguir modelándola o bien es necesario rectificar el caudal umbral.

4.4.2 Hoya del Río Maule

La Hoya del río Maule está compuesta por subcuencas de características hidrológicas y morfológicas diversas, tal como se menciona en el acápite 4.1. Para efectos del presente trabajo se contempla el estudio de la cuenca del Río Maule delimitada por el área aportante afluente a la estación limnigráfica Maule en Forel ($A = 20.197 \text{ Km}^2$), en la cual se encuentran las subcuencas y elementos asociados que se caracterizan a continuación.

a) Cuenca del Río Claro en Talca

La información disponible está brindada por los datos medidos en la estación D.G.A. “**Río Claro en Talca**”, la que posee equipamiento para la transmisión de información en tiempo real.

En el lugar donde se emplaza la estación limnigráfica, la información pluviográfica existente tiene una serie histórica mínima, disponiéndose sólo información para el año (2002), por lo que hubo que realizar correlaciones de la información concurrente en dicho período (Enero-Julio 2002) con la estación pluviográfica “**Pencahue**”, para así obtener la cantidad de información necesaria con la que se calibran y validan los modelos de pronóstico asociados. En la Tabla 4.51 se señalan las características de los elementos afectados en esta cuenca, mientras que en la Tabla 4.52 se presentan las fechas y los caudales con los que se obtienen los umbrales de falla de dichos elementos.

Tabla 4.51 Punto Nº 25

| | |
|---------------------------|---|
| Nombre | : Cerca de Corinto, donde confluyen Estero Los Puercos, Río Maule Y Río Claro. |
| Coordenadas (UTM) | : 6073013 N : 238440 E |
| Provincia | : Talca |
| Comuna | : Pencahue |
| Descripción | : Crecida de estero Los Puercos, Río Maule y Río Claro afectan al sector, produciendo anegamiento en la zona. Se genera así corte de caminos, aislamiento de la localidad de Corinto, inundación de terrenos agrícolas y de algunas viviendas aledañas. |

Tabla 4.52 Fechas de eventos extremos, punto 25

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|----------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| (*) 26-05-92 | 947,8 | 03-05-93 | 358,6 |
| 05-06-92 | 1756,4 | 28-06-93 | 782,9 |
| 28-07-95 | 1554 | 02-07-93 | 489 |

(*): Tormenta para la que se registra el caudal umbral en el punto 25.

b) Cuenca del Estero Los Puercos

La información disponible para el pronóstico de caudales en esta cuenca está brindada por los datos controlados en las estaciones limnigráfica y pluviográfica D.G.A. “**Esteros los Puercos**” y “**Pencahue**”, respectivamente, las cuales en la actualidad no poseen una plataforma de transmisión de datos en tiempo real, por lo tanto los puntos asociados a esta cuenca no pueden ser incluidos en la actualidad al SATR, aún cuando puedan identificarse los modelos de pronóstico correspondientes. En la Tabla 4.53 se señalan las características de los elementos afectados en esta cuenca, mientras que en la Tabla 4.54 se presentan las fechas y los caudales con los que se obtienen los umbrales de falla de dichos elementos.

Tabla 4.53 Punto N° 24

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Pencahue |
| Coordenadas (UTM) | : 6081762 N |
| | : 242925 E |
| Provincia | : Talca |
| Comuna | : Pencahue |
| Descripción | : Crecida del estero Los Puercos afectan al sector, produciendo anegamiento en la zona. Se genera así corte de caminos, inundación de terrenos agrícolas y de algunas viviendas aledañas. |

Tabla 4.54 Fechas de eventos extremos, punto 24

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|----------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 26-05-92 | 88 | ----- | ----- |
| 15-06-92 | 143,4 | ----- | ----- |
| (*) 02-07-95 | 62,8 | ----- | ----- |

(*): Tormenta de para la que se registra el caudal umbral en los punto 24.

c) Cuenca del Río Maule en Forel

La información disponible está brindada por los datos registrados en la estación D.G.A. “**Río Maule en Forel**”, la que posee equipamiento para la transmisión de información en tiempo real.

Existe información en el período concurrente durante algunas crecidas en las estaciones D.G.A. “**Loncomilla en Las Brisas**” y “**Claro en Talca**”, las cuales se encuentran ubicadas aguas arriba de la estación Maule en Forel. Todas estas estaciones cuentan con plataformas de transmisión de datos en tiempo real. En las tablas 4.55, 4.56 y 4.57 se señalan las características de los elementos afectados en esta cuenca, mientras que en la Tabla 4.58 se presentan las fechas durante las cuales se produjo la falla en los puntos 21 y 22.

Es importante notar, la importancia que reviste los aportes de los vertimientos del sistema de Embalses Colbún-Machicura en las crecidas registradas en este sector. Sin embargo, esto no es contemplado en la modelación de esta zona debido a que el SATR no dispone de la información de volúmenes, caudales afluentes y reglas de operación de dichos embalses.

El caudal umbral asociado a los desbordes del Río Maule en la ciudad de Constitución (punto N° 20) se obtuvo consultando un estudio afín al presente realizado por BF Ingenieros Civiles (“Investigación de sistemas de alerta de crecidas fluviales”, 1987). Se determina en dicho estudio que el caudal umbral o “Qfalla” en el punto 20, registrado en la estación Maule en Forel es igual a **Qfalla = 9000 (m³/s)**.

Tabla 4.55 Punto N° 20

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Constitución (sector costanera) |
| Coordenadas (UTM) | : 6087200 N |
| | : 736035 E |
| Provincia | : Talca |
| Comuna | : Constitución |
| Descripción | : Crecida del Río Maule inunda la "costanera", anegando el camino y la entrada de algunos locales aledaños. |

Tabla 4.56 Punto N° 21

| | |
|--------------------------|--|
| Nombre | : Constitución, Estero El Carbón (Prieto Al. 5000) |
| Coordenadas (UTM) | : 6087594 N |
| | : 735308 E |
| Provincia | : Talca |
| Comuna | : Constitución |
| Descripción | : Las crecidas del estero El Carbón afectan asentamientos humanos en Constitución. |

Tabla 4.57 Punto N° 22

| | |
|--------------------------|--|
| Nombre | : Constitución, Estero El Carbón (Sector La Poza) |
| Coordenadas (UTM) | : 6088243 N |
| | : 735707 E |
| Provincia | : Talca |
| Comuna | : Constitución |
| Descripción | : Las crecidas del estero El Carbón afectan asentamientos humanos en Constitución. |

Tabla 4.58 Fechas de eventos extremos, puntos 21 y 22

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| (*)06-05-92 | 4336 | ----- | ----- |
| 10-06-92 | 6739 | ----- | ----- |
| 06-06-93 | 6077 | ----- | ----- |
| 28-06-93 | 17355 | ----- | ----- |

(*): Tormenta para la que se registra el caudal umbral en los puntos 21 y 22.

d) Cuenca del Río Longaví en La Quiriquina

La información disponible está brindada por los datos registrados en la estación D.G.A. “**Longaví en la Quiriquina**”, la que posee equipamiento para la transmisión de información en tiempo real.

Es importante hacer notar que en el lugar donde se emplaza la estación limnigráfica, la información pluviográfica existente tiene una serie histórica mínima, disponiéndose sólo información para el año (2002), por lo que hubo que realizar correlaciones de la información concurrente en dicho período (Enero-Julio 2002) con la estación pluviográfica “**Meloza**”, para así obtener la cantidad de información necesaria con la que se calibran y validan los modelos de pronóstico asociado. En la Tabla 4.59 se señalan las características de los elementos afectados en esta cuenca, mientras que en la Tabla 4.60 se presentan las fechas durante las cuales se produjo la falla en dichos elementos.

Tabla 4.59 Punto N° 81

| | |
|---------------------------|---|
| Nombre | : Sector "Paso Cuñado" |
| Coordenadas (UTM) | : 6020647 N |
| | : 253583 E |
| Provincia | : Linares |
| Comuna | : Longaví |
| Descripción | : Desborde del río Longaví provoca corte del camino sin que ocurra aislamiento de sectores poblados. No existen mayores complicaciones. |

Tabla 4.60 Fechas de eventos extremos, punto 81

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|----------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 30-05-1991 | 2500 | 23-07-94 | 1343,4 |
| ----- | ----- | (*) 20-06-97 | 1590,6 |
| ----- | ----- | 29-05-2001 | ----- |

(*): Crecida con la cual se estima el caudal umbral “Qfalla”, en este caso es la cota superior de las crecidas de chequeo.

e) Cuenca del Río Cauquenes en Arrayán

La información disponible está brindada por los datos controlados en la estación limnigráfica D.G.A. “**Cauquenes en Arrayán**” y la estación pluviográfica, también perteneciente a la D.G.A. “**Parral**”, las cuales no poseen el equipamiento necesario para la transmisión de información en tiempo real. En la Tabla 4.61 se señalan las características de los elementos afectados en esta cuenca, mientras que en la Tabla 4.62 se presentan las fechas durante las cuales se produjo la falla en dichos elementos.

Tabla 4.61 Punto N° 145

| | |
|---------------------------|--|
| Nombre | : Ruta Cancha Alegre-Coronel (M-866,D-866), Sector Pueblo Coronel de Maule. |
| Coordenadas (UTM) | : 6006862 N |
| | : 732345 E |
| Descripción | : Desborde produce aislamiento de Coronel de Maule por anegamiento de puente |

Tabla 4.62 Fechas de eventos extremos, punto 145

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|----------------|----------------------------|------------------|----------------------------|
| 11-05-92 | 635,8 | ----- | ----- |
| 15-06-92 | 569,7 | ----- | ----- |
| (*)22-06-97 | 509,4 | ----- | ----- |

(*): Crecida con la cual se estima el caudal umbral “Qfalla”, en este caso es la cota superior de las crecidas de chequeo.

f) Cuenca del Río Perquillauquén en San Manuel

La información disponible está brindada por los datos medidos en la estación limnigráfica D.G.A. “**Perquillauquén en San Manuel**” y la estación pluviográfica, también perteneciente a la D.G.A. “**Embalse Digua**”, las cuales no poseen el equipamiento necesario para la transmisión de información en tiempo real. En la Tabla 4.63 se señalan las características de los elementos afectados en esta cuenca, mientras que en la Tabla 4.64 se presentan las fechas durante las cuales se produjo la falla en dichos elementos.

Tabla 4.63 Punto N° 70

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Río Perquillauquén en isla Pencahua. |
| Coordenadas (UTM) | : 5983980 |
| | 247647 |
| Provincia | : Linares |
| Comuna | : Parral |
| Descripción | : Anegamiento de zonas agrícolas y pobladas, además de aislamiento del sector. La zona se ubica prácticamente dentro del lecho del río, provocándose un anegamiento total del sector. |

Tabla 4.64 Fechas de eventos extremos, punto 70

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| (*) 12-06-91 | 379 | ----- | ----- |
| 23-06-97 | 509,4 | ----- | ----- |
| 26-05-92 | 796,8 | ----- | ----- |
| 09-06-92 | 598.4 | ----- | ----- |
| 04-06-93 | 698 | ----- | ----- |
| 23-07-94 | 828,6 | ----- | ----- |

(*): Crecida con la cual se estima el caudal umbral “Qfalla” en el punto 70.

g) Cuenca del Río Ancoa en El Morro

La información disponible está brindada por los datos controlados en la estación D.G.A. “**Ancoa en El Morro**”, la que posee equipamiento para la transmisión de información en tiempo real.

En el lugar donde se emplaza la estación limnigráfica, la información pluviográfica existente tiene una serie histórica mínima, disponiéndose sólo información para el año (2002), por lo que hubo que realizar correlaciones de la información concurrente en dicho período (Enero-Julio 2002) con la estación pluviográfica “**Embalse Ancoa**”, para así obtener la cantidad de información necesaria con la que se calibran y validan los modelos de pronóstico asociado. En las tablas 4.65, 4.66 y 4.67 se señalan las características de los elementos

afectados en esta cuenca, mientras que en la tabla 4.68 se presentan las fechas durante las cuales se produjo la falla en dichos elementos.

Tabla 4.65 Punto N° 75

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Puente Chupallar (sobre río Ancoa) |
| Coordenadas (UTM) | : 6029637 N 297876 E |
| Provincia | : Linares |
| Comuna | : Linares |
| Descripción | : Crecida del río Ancoa provoca socavación de las riberas y cortes del camino, lo cual aísla aproximadamente a 200 personas (ruta L-431). En la actualidad se observa construcción defensas fluviales en el sector (espigones). |

Tabla 4.66 Punto N° 76

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Puente 3 Arcos (Sobre río Ancoa) |
| Coordenadas (UTM) | : 6023605 N 275391 E |
| Provincia | : Linares |
| Comuna | : Linares |
| Descripción | : Crecida del río Ancoa genera erosión importante en el sector del puente (en la curva) y corte del camino, lo cual provoca aislamiento de localidades ubicadas al oriente de la zona. Está asociado al anegamiento de la localidad de "El Llepo" |

Tabla 4.67 Punto N° 77

| | |
|--------------------------|---|
| Nombre | : Sector Huapi Alto (El Pastor) |
| Coordenadas (UTM) | : 6024449 N 266551 E |
| Provincia | : Linares |
| Comuna | : Linares |
| Descripción | : Desborde del río Ancoa, origina aislamiento de zonas habitadas y socavación importante en torno al cauce. Existe un espigón en el lugar que provoca embalsamiento del río en el sector. |

Tabla 4.68 Eventos extremos, puntos 75, 76 y 77:

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 25-05-92 | 384 | 15-06-92 | 240 |
| 24-07-94 | 567,2 | 14-06-00 (*) | 391,6 |
| ----- | ----- | 09-06-95 | 204,7 |

(*): Crecida con la cual se estima el caudal umbral “Qfalla”, en este caso es la cota superior de las crecidas de chequeo.

h) Cuenca del Achibueno en la Recova

La información disponible está brindada por los datos fluviográficos controlados en la estación D.G.A. “**Achibueno en La Recova**”, la que posee equipamiento para la transmisión de información en tiempo real, además se emplea la información pluviográfica registrada en la estación “**Ancoa en El Morro**”, la que también posee el equipamiento necesario para la transmisión de información en tiempo real.

En el lugar donde se emplaza la estación Ancoa en El Morro, la información pluviográfica existente tiene una serie histórica mínima, disponiéndose sólo información para el año (2002), por lo que hubo que realizar correlaciones de la información concurrente en dicho período (Enero-Julio 2002) con la estación pluviográfica “**Embalse Ancoa**”, para así obtener la cantidad de información necesaria con la que se calibran y validan los modelos de pronóstico asociados. En las tablas 4.69, 4.70 y 4.72 se señalan las características de los elementos afectados en esta cuenca, mientras que en las tablas 4.71 y 4.73 se presentan las fechas durante las cuales se produjo la falla en dichos elementos.

Tabla 4.69 Punto N° 73

| | |
|--------------------------|--|
| Nombre | : Puente de la ruta 5 Sur (sobre río Achibueno) |
| Coordenadas (UTM) | : 6026556 N 262000 E |
| Provincia | : Linares |
| Descripción | : Desborde del río Achibueno provoca anegamiento de viviendas adyacentes a la ruta en el sector. No hay corte de camino en este punto. |

Tabla 4.70 Punto N° 74

| | |
|---------------------------|--|
| Nombre | : Puentes de la ruta 5 Sur (1 y 2) (sobre río Ancoa) |
| Coordenadas (UTM) | : 6028101 N 262533 E |
| Provincia | : Linares |
| Descripción | : Desborde del río Ancoa provoca anegamiento de viviendas adyacentes a la ruta en el sector. No hay corte de camino en este punto. |

Tabla 4.71 Fechas eventos extremos, puntos 73 y 74

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 28-05-91 | 2621 | 20-06-97 | 1250 |
| 23-07-94 | 1760 | 28-05-01 | 1087 |
| 28-06-00 | 1641 | 14-06-01 | 1002 |
| 25-05-92 | 1502 | ----- | ----- |
| 13-06-00 | 1425 | ----- | ----- |
| 03-07-01 (*) | 1394 | ----- | ----- |

(*): Crecida con la cual se estima el caudal umbral "Qfalla".

Tabla 4.72 Punto N° 85

| | |
|---------------------------|--|
| Nombre | : Sector "Carrizal" |
| Coordenadas (UTM) | : 6010841 N 282729 E |
| Provincia | : Linares |
| Comuna | : Linares |
| Descripción | : Crecida del estero Carrizal provoca cortes en el camino y aislamiento de localidades pobladas por falla del Puente "Carrizales". |

Tabla 4.73 Fechas eventos extremos, punto 85

| Fecha de falla | Qmáximo instantáneo (m3/s) | Fecha de chequeo | Qmáximo instantáneo (m3/s) |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 28-05-91 | 2621 | 25-05-92 | 1502 |
| (*) 23-07-94 | 1760 | 26-06-95 | 875 |
| ----- | ----- | 13-06-00 | 1425 |
| ----- | ----- | 28-06-00 | 1641 |
| ----- | ----- | 20-06-97 | 1250 |
| ----- | ----- | 03-07-01 | 1394 |
| ----- | ----- | 28-05-01 | 1087 |
| ----- | ----- | 14-06-01 | 1002 |

(*): Crecida con la cual se estima el caudal umbral "Qfalla".

4.4.3 Parámetros relevantes de los elementos incluidos en el SATR

De la caracterización presentada en los puntos 4.4.1 y 4.4.2, y del criterio de clasificación de los elementos bajo riesgo según lo planteado en el capítulo 3.2 (definición del Índice de Riesgo), se resumen en la Tabla 4.74 los umbrales de falla “Qfalla” y parámetros que caracterizan la falla (Vulnerabilidad, Elemento, etc.), para los puntos asociados a las cuencas que disponen de estaciones de medición con plataformas de transmisión de datos en tiempo real, y que por lo tanto son incorporados al SATR.

Tabla 4.74 Parámetros de caracterización del Índice de Riesgo por elemento perteneciente al SATR

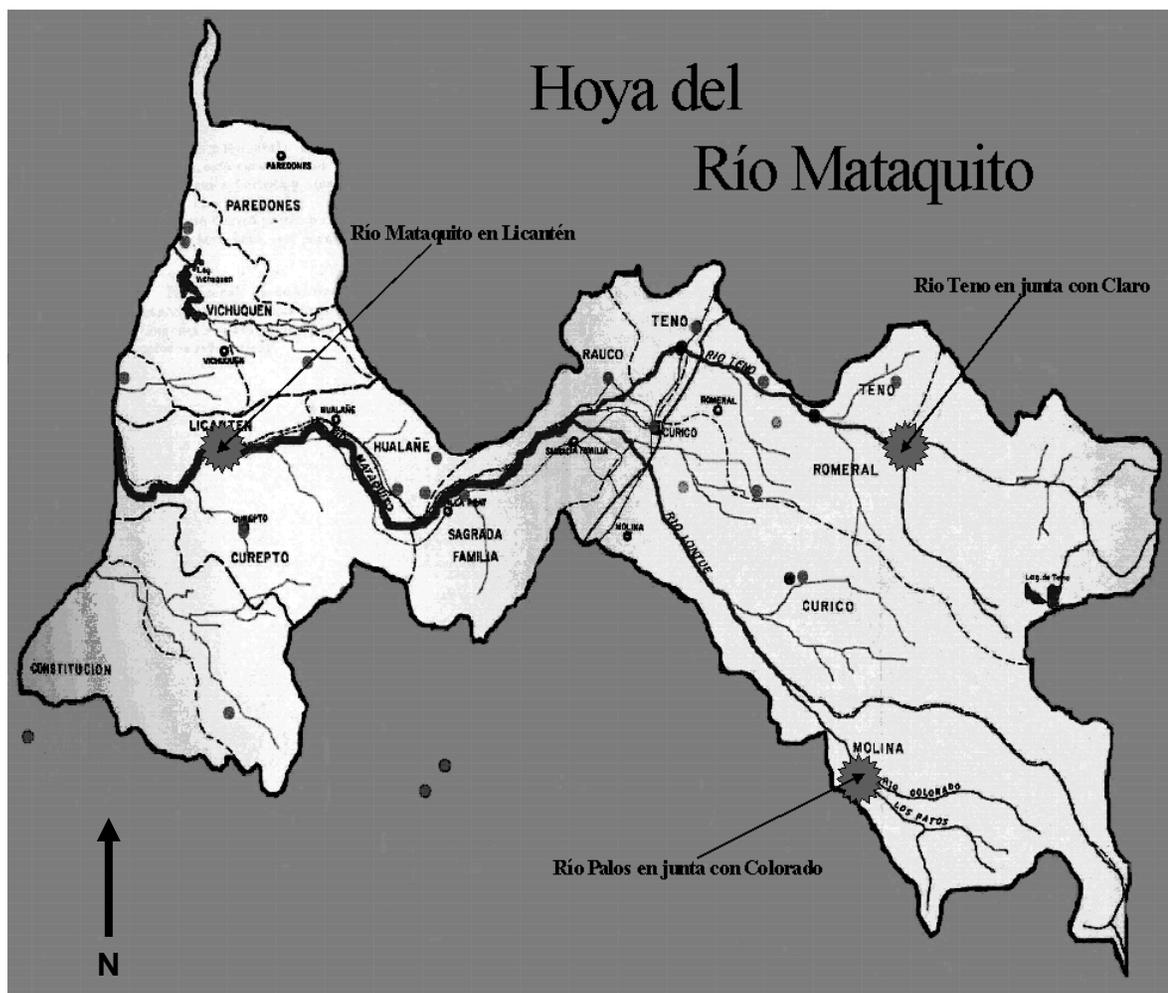
| Nº Punto | N (mt) | E (mt) | Q falla (m3/s) | Vulnerabilidad | Elemento | Población >10,000 hab Si =1, No=0 | Cuenca Asociada | Comuna |
|----------|---------|--------|----------------|----------------|----------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 40 | 6125520 | 331953 | 370 | 3 | 40 | 0 | Teno en Claro | Romeral |
| 41 | 6126477 | 330938 | 370 | 3 | 40 | 0 | | Romeral |
| 15 | 6137185 | 299626 | 210 | 3 | 50 | 0 | | Curicó |
| 46 | 6129039 | 284645 | 210 | 2 | 60 | 0 | | Rauco |
| 2 | 6118681 | 293333 | 240 | 3 | 50 | 0 | Palos Colorado | Molina |
| 3 | 6117693 | 294422 | 240 | 3 | 50 | 0 | | Molina |
| 4 | 6113493 | 297410 | 240 | 3 | 40 | 0 | | Molina |
| 5 | 6110248 | 301265 | 240 | 2 | 50 | 0 | | Molina |
| 6 | 6106738 | 305015 | 240 | 3 | 40 | 0 | | Molina |
| 7 | 6106105 | 305491 | 160 | 3 | 40 | 0 | | Molina |
| 8 | 6106016 | 305565 | 160 | 3 | 40 | 0 | | Molina |
| 13 | 6126835 | 285176 | 64 | 2 | 100 | 0 | | Curicó |
| 14 | 6126653 | 286598 | 64 | 2 | 100 | 0 | | Curicó |
| 28 | 6122161 | 229284 | 800 | 1 | 50 | 0 | | Mataquito en Licantén |
| 35 | 6124774 | 227600 | 2700 | 1 | 50 | 0 | Hualañé | |
| 47 | 6120891 | 271364 | 1500 | 2 | 50 | 0 | Rauco | |
| 141 | 6132210 | 209311 | 1700 | 3 | 40 | 0 | Licantén | |
| 20 | 6084983 | 190663 | 9000 | 1 | 50 | 0 | Maule en Forel | Constitución |
| 21 | 6085332 | 189913 | 4500 | 2 | 50 | 1 | | Constitución |
| 22 | 6086005 | 190273 | 4500 | 2 | 50 | 1 | | Constitución |
| 25 | 6073013 | 238440 | 950 | 3 | 50 | 0 | Claro en Talca | Pencahue |
| 81 | 6020647 | 253583 | 1600 | 3 | 40 | 0 | Longaví en La Quiriquina | Longaví |
| 75 | 6029637 | 297876 | 400 | 2 | 60 | 0 | Ancoa en El Morro | Linares |
| 76 | 6023605 | 275391 | 400 | 3 | 50 | 0 | | Linares |
| 77 | 6024449 | 266551 | 400 | 3 | 40 | 0 | | Linares |
| 73 | 6026556 | 262000 | 1400 | 3 | 50 | 0 | Achibueno en Recova | Linares |
| 74 | 6028101 | 262533 | 1400 | 3 | 50 | 0 | | Linares |
| 85 | 6010841 | 282729 | 1750 | 2 | 60 | 0 | | Linares |

4.5 ELECCIÓN DE LA “CUENCA PILOTO”

Como se enunció en el acápite 1.4.3, se trabajó inicialmente sobre una cuenca “experimental” dentro de la Séptima Región, llamada “Cuenca Piloto”, en la cual se ensayaron y evaluaron los distintos enfoques para el pronóstico de caudales y del Índice de Riesgo en tiempo real, determinando en esta zona la metodología más apropiada para ser extendida al resto de la región.

La cuenca elegida como cuenca piloto corresponde a la del **Río Mataquito en la localidad de Licantén**. Ésta cuenca de régimen Nivo – Pluvial es la segunda cuenca en importancia de la Séptima Región, con un área aportante igual a 5.923 Km². Además, el río Mataquito contiene dos subcuencas que también son modeladas e incluidas en el análisis de la cuenca piloto, las cuales son las del río **Palos en junta con el Río Colorado** (A= 514 Km²) y **Río Teno en Junta con el Río Claro** (A = 1.198 Km²). Un esquema de esta cuenca es presentado en la Figura 4.15.

Figura 4.15 Mapa Cuenca Piloto “Río Mataquito en Licantén”



Uno de los motivos de elección de la cuenca del río Mataquito es que en ella existe un gran número de sectores y elementos de importancia, que periódicamente presentan problemas por crecidas. Además, la ciudad más importante que está incluida en este valle es Curicó, que es la segunda ciudad de importancia en la Región del Maule.

En la cuenca del Río Mataquito hay importantes centros urbanos que suelen ser afectados, siendo las ciudades más comprometidas las siguientes:

- Lontué
- Molina
- Licantén

Otra razón para elegir esta cuenca, es disponer de la información requerida para el análisis, dado que en ella se encuentra una “adecuada” densidad de estaciones pluviométricas (gráficas) y fluviométricas (gráficas), ver Figura 4.4, que disponen de la infraestructura para la transmisión de información en tiempo real, teniendo la mayoría de éstas una cantidad suficiente de información, con el objeto de caracterizar hidrológicamente las cuencas estudiadas, calibrar y validar los modelos, definir umbrales de falla y en general identificar de manera apropiada los modelos y esquemas conceptuales a implementar.

Estos factores contemplados son relevantes, por cuanto estas metodologías y resultados obtenidos serán evaluados para su posterior implementación en toda la VII región.

5 APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 PRONÓSTICO DE CAUDALES EN LA CUENCA PILOTO

En este punto se expondrán las metodologías y esquemas de modelación planteados para el pronóstico de escorrentía, los cuales están compuestos por modelos de función de transferencia y el empleo de los FIS. Estos modelos, que serán implementados y evaluados en primera instancia en la cuenca del Río Mataquito en Licantén (Cuenca Piloto), utilizan, en el caso de los FIS, el esquema conceptual planteado por Sugeno (Sugeno M., 1985), metodología que se describió en el acápite 3.3.2.

5.1.1 Modelos lineales de función de transferencia para el pronóstico de caudales.

Se procedió a determinar las relaciones funcionales lineales, del tipo función de transferencia, para los cauces asociados a las zonas amagadas (elementos) incluidas en el SATR. Estas relaciones permiten pronosticar los caudales en los lugares donde existe control fluvigráfico, pudiendo distinguirse tres cuencas pertenecientes a la cuenca piloto. Estas cuencas modeladas se asocian a las estaciones limnigráficas siguientes (ver figura 4.15):

- Río Teno en junta con Río Claro ($A = 1.198 \text{ Km}^2$)
- Río Palos en junta con Colorado ($A = 514 \text{ Km}^2$)
- Río Mataquito en Licantén ($A = 5.923 \text{ Km}^2$)

Dentro de la cuenca Piloto se emplearon modelos lineales P-Q y Q-Q, los cuales se describen genéricamente en el punto 3.3.1. En particular se planteó los modelos P-Q en las tres cuencas señaladas anteriormente, y se estudió la aplicación de los modelos Q-Q para la cuenca del río Mataquito en Licantén.

a) Estructura Modelo lineal P-Q

La estructura específica del modelo P-Q, empleado en las tres subcuencas, se basa en las variables y estructura que se señalaron en el punto 3.3.1 a). Tal como se menciona en el mismo acápite, la elección de la estructura y variables de entrada escogidas en cada caso, quedó dada por un proceso de selección o "Screening" entre distintos modelos probados para los datos de calibración y validación disponibles; de manera que la elección del modelo P-Q a emplear sea óptima en cuanto a desempeño del mismo, siendo a su vez lo más parsimonioso posible.

Para determinar la estructura de los modelos lineales P-Q, se probaron los resultados obtenidos para distintos valores del parámetro “k” y “r” (Ecuaciones 3.5 y 3.6), los cuales se asocian a la cantidad de horas de información precedente al instante actual que el modelo emplea de los datos de precipitación y caudales, respectivamente, determinando que los valores a ser empleados corresponden a $k = 3$ y $r = 3$. Por lo tanto, en el caso de los modelos P-Q identificados, la estructura seleccionada en las tres subcuencas es la misma, y está compuesta por los siguientes datos de entrada:

- **$Pp_{(t)}$** : Precipitación acumulada en la estación pluviográfica en las tres horas previas al tiempo t, lo que equivale a un valor del parámetro $k = 3$ (ecuación 3.5).
- **$Q_{(t)}$** : Caudal registrado en la estación limnigráfica en el tiempo t.
- **$Q_{med(t)}$** : Promedio de los caudales registrados en la estación limnigráfica en las tres horas previas al tiempo t. Es decir, con un parámetro $r = 3$ (ecuación 3.6).

Con lo anterior se definen las siguientes variables de entrada del modelo P-Q de transferencia:

- **$V1_{(t)} = Q_{(t)} / Q_{falla}$** (asociada a la variable de estado “Q”)
- **$V2_{(t)} = Q_{med(t)} / Q_{falla}$** (asociada a la variable de estado “Q”)
- **$V3_{(t)} = Pp_{(t)} / Pp_{media\ anual}$** (asociada a la variable exógena “I”)

Finalmente, se obtiene como salida del modelo de pronóstico la variable V1 (igual a la amenaza “A”) en el tiempo “t + Δ ”, con $\Delta =$ tiempo de adelanto o de pronóstico del modelo función de transferencia ($\Delta = 3$ hrs.), mediante las expresiones de las ecuaciones 3.8 y 3.9.

En la Tabla 5.1 se presenta la información requerida por el modelo para el pronóstico de caudales P-Q.

Tabla 5.1 Información requerida por el modelo función de transferencia P-Q

| Tiempo “t” (hrs.) | Caudal (m ³ /s) | Precipitación (mm./hora) |
|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| t = 0 (instante presente) | Q(t) | |
| t = - 1 | Q(t) | I (t) |
| t = - 2 | Q(t) | I (t) |
| t = - 3 | Q(t) | I (t) |

Se realiza una aplicación recursiva del modelo, para extender el tiempo de pronóstico del modelo, en particular se obtiene **$Q_{(t + 2\Delta)} / Q_{falla}$** (ver figura 3.4).

Para calcular el pronóstico en el tiempo $t + 2\Delta$ se aplica el mismo esquema utilizado para obtener $Q_{(t + \Delta)}/Q_{falla}$, cambiando solo el valor de las variables de entrada de la siguiente forma:

- Reemplazar el valor de la variable $V1 = Q_{(t)}/Q_{falla}$ por $Q_{(t + \Delta)}/Q_{falla}$
- Recalcular el valor de la variable $V2$, utilizando los pronósticos de $V1$ realizados para los tiempos " $t + \Delta - 1$ ", " $t + \Delta - 2$ " y el valor observado de $V1$ en el instante " t ".
- Mantener constante el valor de la variable $V3 = Pp_{(t)}/Pp.$ media anual

Resumiendo, las variables que se emplean en estas aplicaciones recursivas de los modelos lineales P-Q son las que se presentan a continuación: ($k = 3$ y $r = 3$)

- $V1^c_{(t + \Delta)} = \underline{Q}_{(t + \Delta)}/Q_{falla}$
- $V2^c_{(t + \Delta)} = [\underline{Q}_{(t + \Delta - 1)} + \underline{Q}_{(t + \Delta - 2)} + Q_{(t)}] / (3 * Q_{falla})$
- $V3_{(t + \Delta)} = Pp_{(t)} / Pp.$ media anual

Donde $\underline{Q}_{(t + \Delta)}$, $\underline{Q}_{(t + \Delta - 1)}$ y $\underline{Q}_{(t + \Delta - 2)}$ fueron los caudales pronosticados en los tiempos t , $t - 1$ y $t - 2$, respectivamente.

Luego, de las ecuaciones 3.10 y 3.11 se determina el valor de " $A_{(t + 2\Delta)}$ ".

b) Estructura Modelo lineal Q-Q

Para la modelación del Río Mataquito, en la estación Mataquito en Licantén, se identificaron y calibraron modelos de pronóstico del tipo Q-Q, mediante el empleo de las estaciones limnigráficas Mataquito en Licantén, Palos en Junta con Colorado y Teno en junta con Claro.

La estructura topológica de estos modelos lineales utiliza los datos registrados en las estaciones mencionadas anteriormente, empleando como variable exógena los datos medidos en las dos estaciones limnigráficas que se ubican en los afluentes de la estación Mataquito en Licantén (Palos en Colorado y Teno en junta con Claro, ver figura 4.17).

La estructura de los modelos Q-Q utilizados contempla el uso de los siguientes datos de entrada a nivel horario:

- **QPC(t):** Caudal registrado en la estación limnigráfica Palos en junta con Colorado en el instante " t ". (Variable exógena)
- **QTC(t):** Caudal registrado en la estación limnigráfica Teno en junta con Claro en el instante " t ". (Variable exógena)
- **QML(t):** Caudal registrado en la estación limnigráfica Mataquito en Licantén en el instante " t ". (Variable de estado)

Utilizando la información medida en las estaciones antes señaladas, se definen los modelos de pronóstico Q-Q que se plantean en la ecuación 5.1. Estos modelos operan bajo la restricción señalada en la ecuación 5.2.

$$\delta(t) = \begin{bmatrix} \delta_1 = QML(t) \\ \delta_2 = \sum_{j=1}^2 \frac{QML(t-j)}{2} \end{bmatrix}$$

$$\lambda(t) = \begin{bmatrix} \lambda_1 = \frac{QPC(t - \Delta_1^{\max}) - QPC(t - \Delta_1^{\max} - 3)}{QPC(t - \Delta_1^{\max})} \\ \lambda_2 = \frac{QTC(t - \Delta_2^{\max}) - QTC(t - \Delta_2^{\max} - 3)}{QTC(t - \Delta_2^{\max})} \end{bmatrix} \quad \text{EC 5.1}$$

$$QML(t+r\Delta) = \mathbf{I}_1^r a_2^r \begin{bmatrix} \delta_1(t+r\Delta - \Delta) \\ \delta_2(t+r\Delta) \end{bmatrix} + \mathbf{I}_3^r a_4^r \begin{bmatrix} \lambda_1(t+r\Delta) \\ \lambda_2(t+r\Delta) \end{bmatrix}$$

$$r\Delta \leq \text{Min} \{ \Delta_1^{\max}, \Delta_2^{\max} \}, \forall r \in \{1, \dots, n\} \quad \text{EC 5.2}$$

Donde “ λ ” está asociada a las variables exógenas “QPC” y “QTC”, mientras “ δ ” está asociada a la variable de estado “QML”. Los parámetros “ Δ_1^{\max} ” y “ Δ_2^{\max} ” representan el desfase temporal “típico” entre los peaks de los hidrogramas durante crecidas, en las estaciones que se ubican aguas arriba con respecto a la estación de salida de la cuenca. En este caso “ Δ_1^{\max} ” y “ Δ_2^{\max} ” corresponden a los desfases con respecto a la estación Mataquito en Licantén observados en las estaciones Palos en Junta con Colorado y Teno en Junta con Claro, respectivamente.

El valor de “ Δ ” representa el intervalo elemental de pronóstico empleado (en horas, mientras que el parámetro “ r ” es un número perteneciente a los naturales que indica el tiempo de adelanto o pronóstico del modelo Q-Q asociado, ya que el valor “ $r\Delta$ ” es el tiempo relativo de pronóstico con respecto al instante t . Los parámetros del modelo lineal a_j^r , para valores $i = \{1, 2, 3, 4\}$ y $r = \{1, \dots, n\}$, se calibran y validan de forma independiente para cada valor de r . En cuanto a la variable “ λ ”, los datos de entrada asociados a las variables exógenas siempre son conocidos al instante actual, dado la restricción impuesta en la ecuación 5.2.

El modelo Q-Q es lineal y recursivo, ya que los valores de la variable “ δ ” dependen de los pronósticos realizados por el modelo en horas previas a las que se realiza el pronóstico, puesto que el valor de $QML_{(t+r\Delta)}$ es igual a la variable $\delta_{1(t+r\Delta)}$ y que la variable $\delta_{2(t+r\Delta)}$ puede ser recalculada a partir de los valores determinados de δ_1 para tiempos anteriores al instante $t+r\Delta$.

En consecuencia, el modelo lineal de pronóstico de la amenaza “A” para todos los tiempos de pronóstico “ $r\Delta$ ” se representa mediante la ecuación 5.3.

$$A_{(t+r\Delta)} = \frac{QML_{(t+r\Delta)}}{Q_{\text{falla}}} \quad \text{EC 5.3}$$

c) Río Teno en Junta con Claro

Para la modelación de Río Teno, en la estación Teno en junta con río Claro, se identifica el modelo P-Q, conforme a lo planteado en el punto 5.1.1, donde la variable de estado es el caudal registrado en la estación limnigráfica y la variable exógena es la precipitación registrada en las estaciones pluviográficas “Los Queñes” o en la estación situada en el lugar que se emplaza la estación limnigráfica en cuestión, según sea la fecha del evento.

Los resultados que se presentan a continuación son los asociados a los puntos 40 y 41, dado que los parámetros obtenidos para los restantes elementos modelados en esta cuenca son los mismos, salvo que en los puntos 40 y 41 difiere el caudal umbral “Qfalla” (igual a 370 m³/s), con respecto a los puntos 15 y 46 que tienen un caudal Qfalla distinto (ver tabla 4.6). El valor de los parámetros estimados se presenta en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico puntos 40 y 41

| Δ (hrs.) | Pp. media anual Los Queñes (mm/año) | Qfalla (m ³ /s) | α | β | γ |
|-----------------|---|-------------------------------|----------|---------|----------|
| 3 | 1.171 | 370 | 1,83 | -0,87 | 3,05 |

Con los parámetros presentados en la tabla 5.2 se obtiene el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en los hidrogramas adimensionalizados de las figuras 5.1 y 5.2, respectivamente, para las crecidas presentadas en las tablas 5.3 y 5.4.

En cuanto al modelo recursivo de pronóstico, para un adelanto de seis horas, se obtienen los hidrogramas adimensionalizados de calibración y validación que se presentan en las figuras 5.3 y 5.4, respectivamente; para las crecidas en las fechas señaladas en las tablas 5.3 y 5.4.

Tabla 5.3 Crecidas de calibración “Río Teno en Junta con Claro”

| Fecha inicio | Tormentas de Calibración | | hora |
|--------------|--------------------------|---------------|----------|
| | hora | Fecha término | |
| 02-06-02 | 12:32:00 | 06-06-02 | 1:32:00 |
| 05-08-02 | 0:32:00 | 09-08-02 | 7:32:00 |
| 16-05-91 | 0:00:00 | 31-05-91 | 9:00:00 |
| 20-05-92 | 0:00:00 | 27-05-92 | 23:00:00 |
| 01-05-93 | 0:00:00 | 06-05-93 | 23:00:00 |
| 19-05-93 | 0:00:00 | 23-05-93 | 23:00:00 |
| 24-06-93 | 0:00:00 | 30-06-93 | 22:00:00 |
| 16-07-94 | 0:00:00 | 27-07-94 | 23:00:00 |

Tabla 5.4 Crecidas de validación “Río Teno en Junta con Claro”

| Tormentas de Validación | | | |
|-------------------------|----------|---------------|----------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 28-04-02 | 20:32:00 | 30-04-02 | 2:32:00 |
| 15-03-02 | 14:32:00 | 16-03-02 | 23:00:00 |
| 29-04-02 | 0:32:00 | 29-04-02 | 23:32:00 |
| 13-05-02 | 16:32:00 | 28-05-02 | 16:32:00 |
| 31-05-02 | 12:32:00 | 01-06-02 | 23:32:00 |
| 03-06-97 | 0:00:00 | 25-06-97 | 23:00:00 |

Figura 5.1 Calibración modelo de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$) “Río Teno en Junta con Claro”

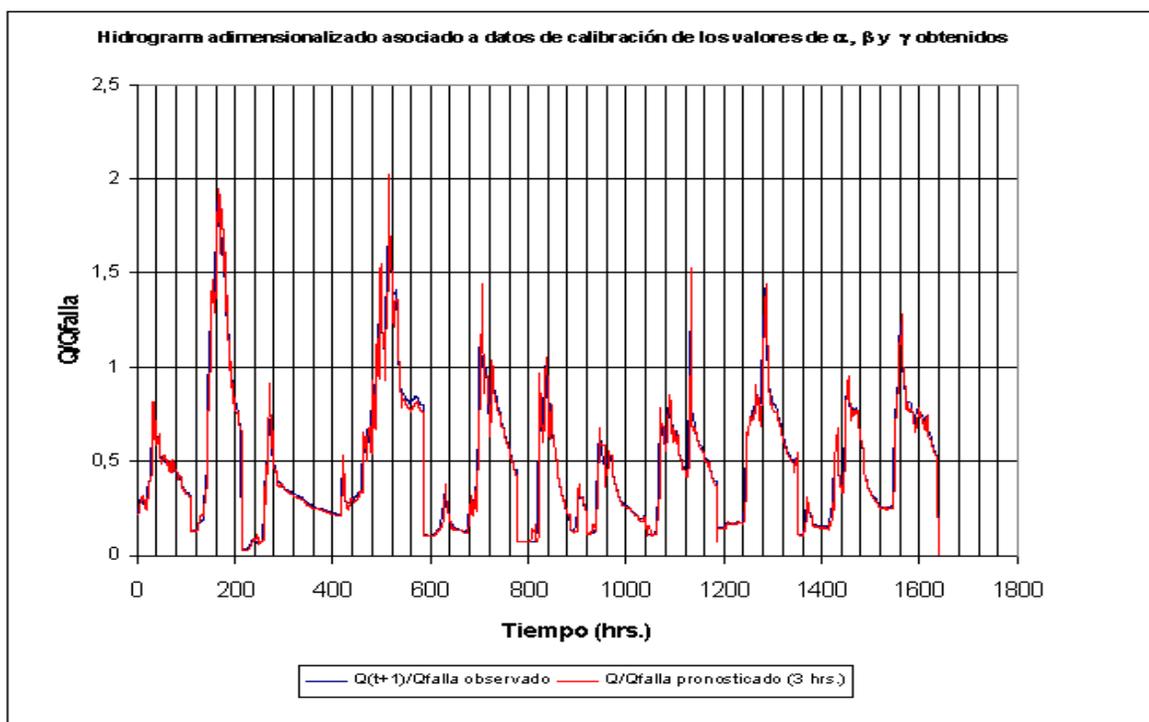
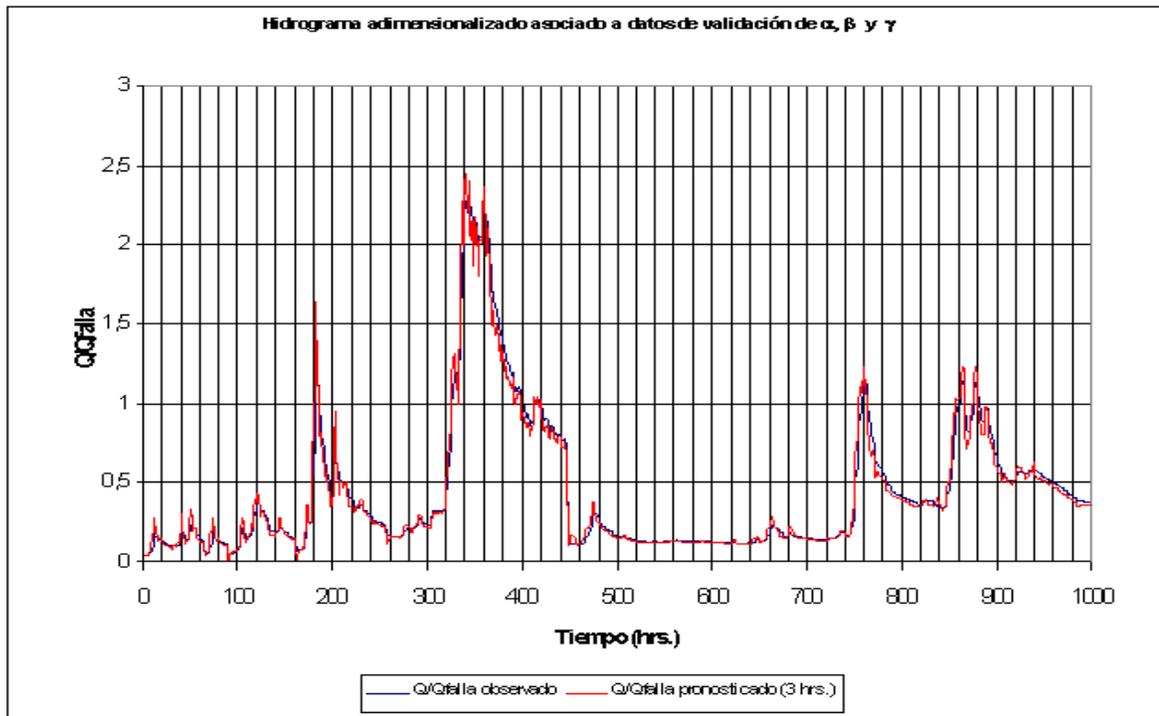
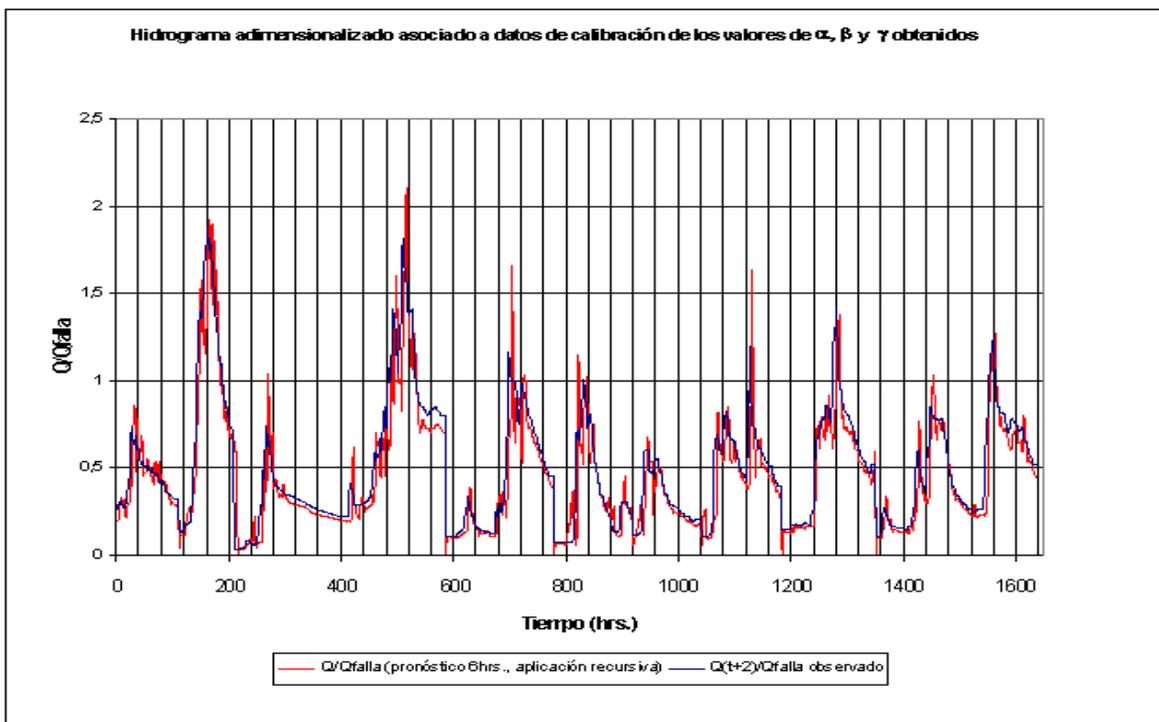


Figura 5.2 Validación modelo de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$) “Río Teno en Junta con Claro”



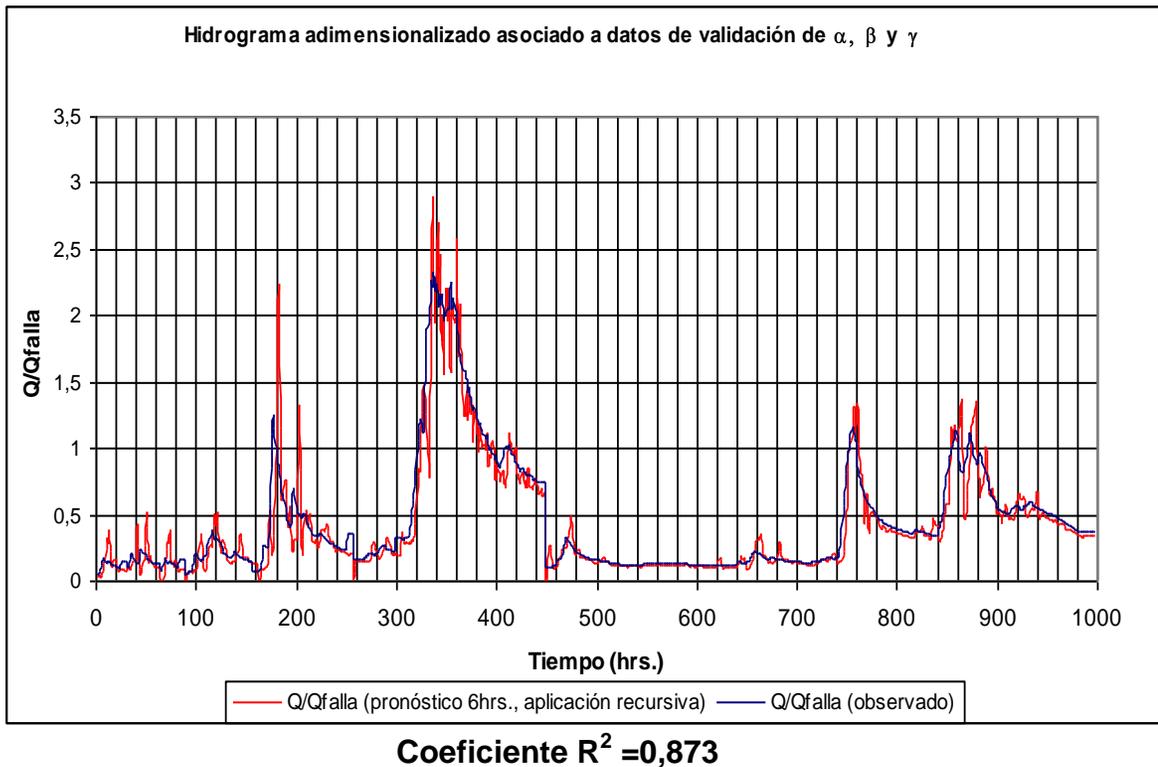
Coefficiente $R^2 = 0,968$

Figura 5.3 Calibración modelo de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$) “Río Teno en Junta con Claro”



Coefficiente $R^2 = 0,850$

Figura 5.4: Validación modelo de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$) “Río Teno en Junta con Claro”



d) Río Palos en junta con Colorado

Para la modelación del Río Lontué, mediante el pronóstico de caudales en el río Palos, afluente al Lontué, en la estación limnigráfica río Palos en junta con el río Colorado, se identificó un modelo P-Q, con la estructura descrita en el punto 5.5.1, donde la variable de estado es el caudal registrado en la estación limnigráfica y la variable exógena es la precipitación registrada en las estaciones pluviográficas “Potrero Grande” o la estación situada en el lugar que se emplaza la estación limnigráfica en cuestión, dependiendo de la fecha de tormenta utilizada.

Los resultados que se presentan a continuación son los asociados a los puntos que poseen un caudal umbral de 240 (m³/s), dado que en el caso de los otros elementos modelados en esta cuenca los parámetros estimados son los mismos, con la salvedad del valor umbral difiere dependiendo del elemento bajo riesgo considerado.

Con los parámetros presentados en la tabla 5.5 se obtiene el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en los hidrogramas adimensionalizados de las figuras 5.5 y 5.6, para las crecidas presentadas en las Tabla 5.6 y Tabla 5.7.

Tabla 5.5 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico puntos 2, 3, 4, 5 y 6

| Δ (hrs.) | Pp. media anual (Potrero Grande) (mm./año) | Qfalla (m ³ /s) | α | β | γ |
|-----------------|--|-------------------------------|----------|---------|----------|
| 3 | 1052 | 240 | 1,42 | -0,45 | 3,7 |

Tabla 5.6 Crecidas de calibración “Río Palos en junta con Colorado”

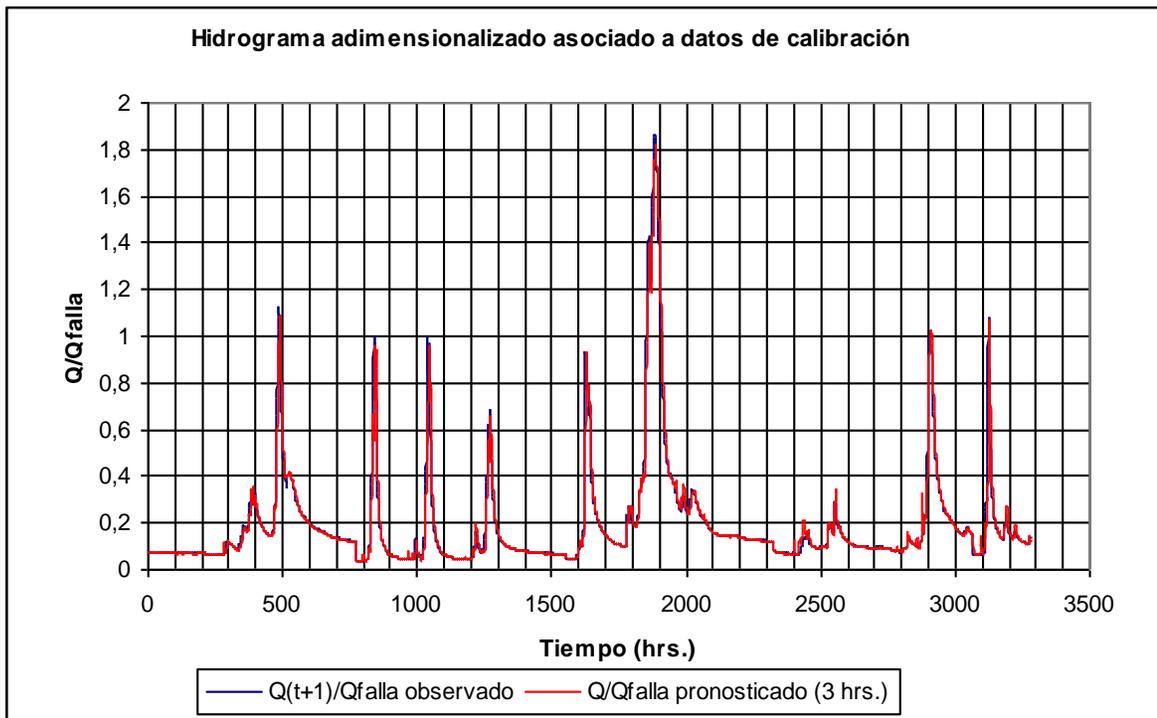
| Tormentas de Calibración | | | |
|--------------------------|----------|---------------|----------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 15-05-91 | 01:00:00 | 16-06-91 | 00:00:00 |
| 01-05-92 | 01:00:00 | 31-05-92 | 23:00:00 |
| 01-05-93 | 00:00:00 | 09-05-93 | 19:00:00 |
| 04-07-94 | 11:00:00 | 05-08-94 | 15:00:00 |
| 25-04-95 | 20:00:00 | 11-05-95 | 23:00:00 |
| 21-04-97 | 01:00:00 | 31-04-97 | 01:00:00 |
| 08-05-02 | 00:00:00 | 23-05-02 | 23:00:00 |

Tabla 5.7 Crecidas de validación “Río Palos en junta con Colorado”

| Tormentas de Validación | | | |
|-------------------------|----------|---------------|----------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 27-06-00 | 15:00:00 | 12-07-00 | 13:00:00 |
| 27-02-02 | 14:00:00 | 28-02-02 | 09:00:00 |
| 13-03-02 | 17:00:00 | 14-03-02 | 03:00:00 |
| 14-03-02 | 13:00:00 | 18-03-02 | 20:00:00 |
| 29-03-02 | 00:00:00 | 30-03-02 | 23:00:00 |
| 06-04-02 | 00:00:00 | 08-04-02 | 23:00:00 |
| 24-04-02 | 00:00:00 | 24-04-02 | 23:00:00 |
| 29-04-02 | 00:00:00 | 29-04-02 | 23:00:00 |

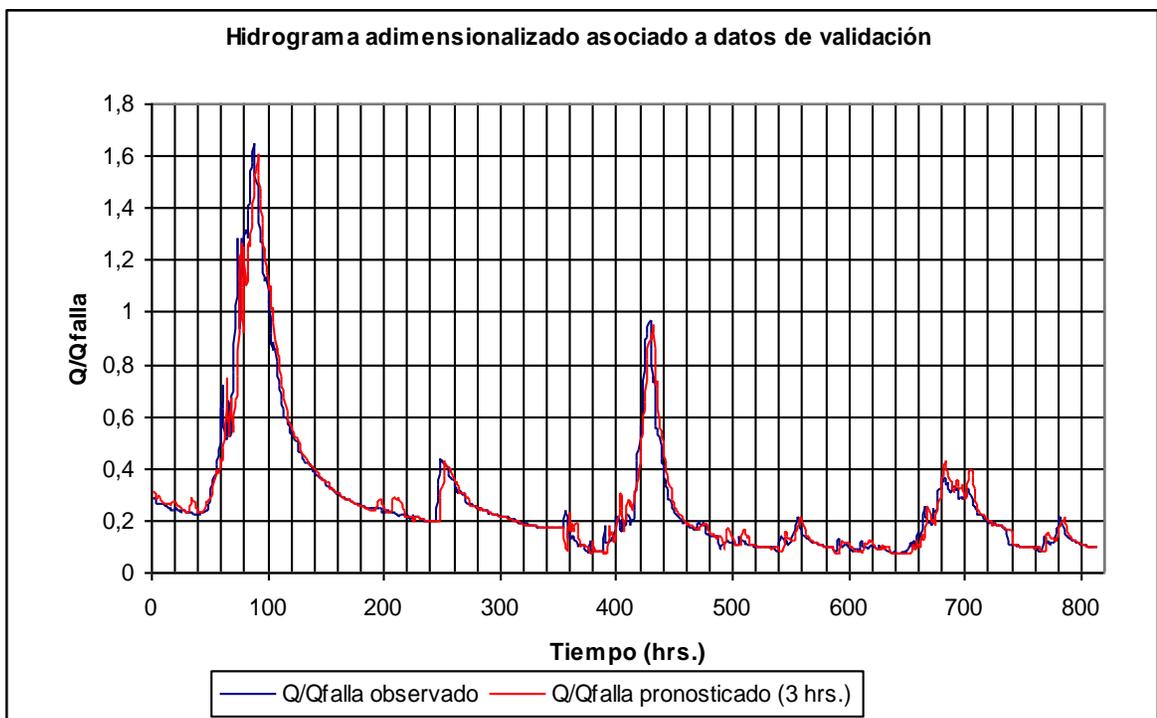
En cuanto al modelo recursivo de pronóstico, para un adelanto de seis horas, se obtienen los hidrogramas adimensionalizados de calibración y validación que se presentan en las figuras 5.7 y 5.8, respectivamente, para las crecidas en las fechas señaladas en las Tabla 5.6 y Tabla 5.7.

Figura 5.5 Calibración modelo de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$) “Río Palos en junta con Colorado”



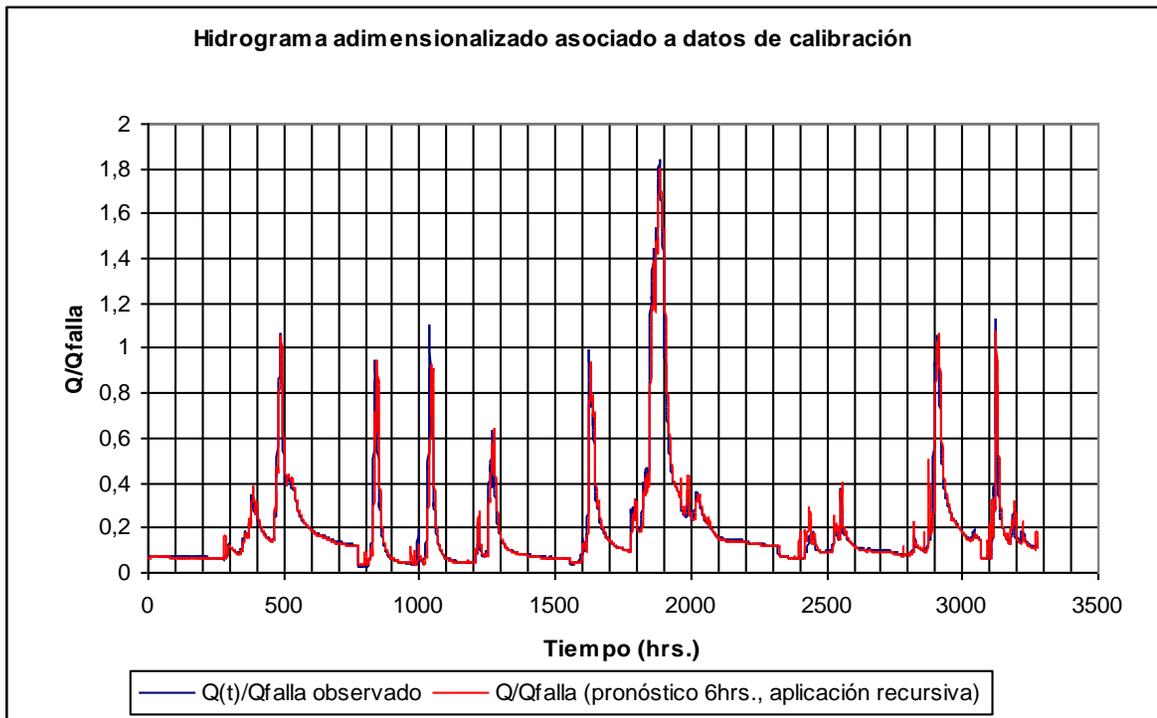
Coefficiente $R^2 = 0,962$

Figura 5.6 Validación modelo de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$) “Río Palos en junta con Colorado”



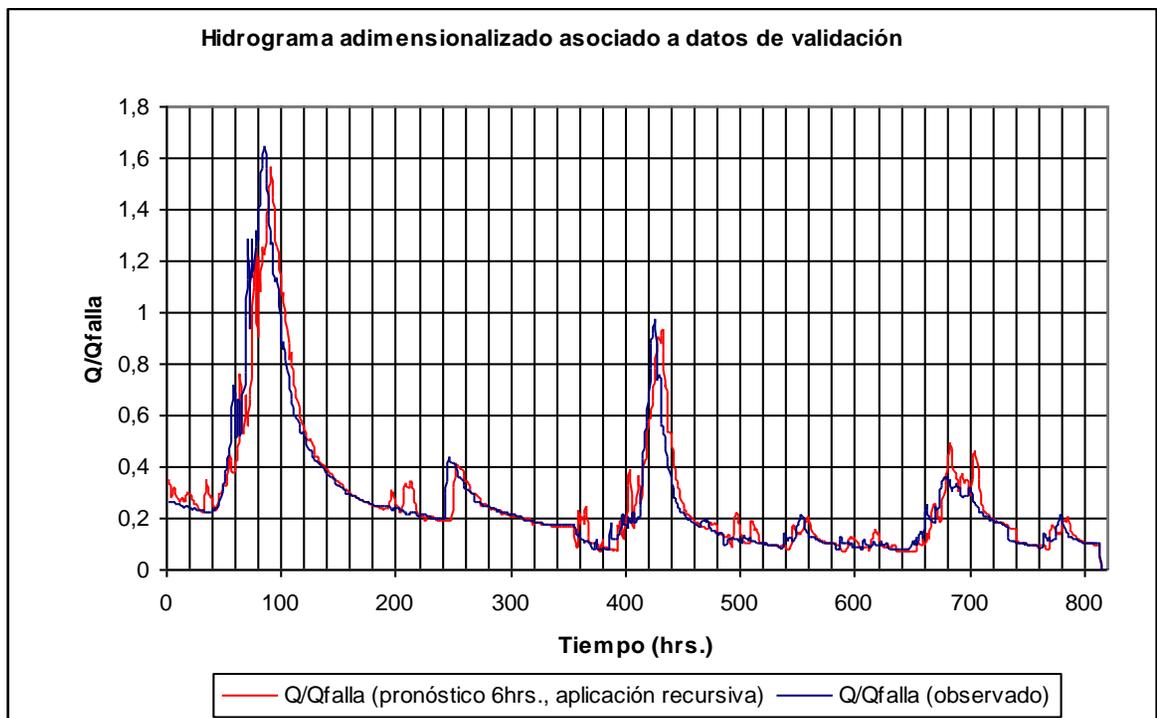
Coefficiente $R^2 = 0,952$

Figura 5.7 Calibración modelo de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$) “Río Palos en junta con Colorado”



Coficiente $R^2 = 0,925$

Figura 5.8: Validación modelo de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$) “Río Palos en junta con Colorado”



Coficiente $R^2 = 0,899$

e) Río Mataquito en Licantén (modelo P-Q)

Para la modelación de Río Mataquito, en la estación Mataquito en Licantén, se identificó el modelo P-Q, en conformidad con lo planteado en el punto 5.1.1, donde la variable de estado es el caudal registrado en la estación limnigráfica y la variable exógena es la precipitación registrada en las estaciones pluviográficas “Los Queñes” o la estación situada en el lugar que se emplaza la estación limnigráfica en cuestión, según sea la fecha de la tormenta en que se registra la crecida.

Los resultados que se presentan a continuación son los asociados al punto 35 ($Q_{falla} = 2.700 \text{ m}^3/\text{s}$), dado que los parámetros obtenidos para los restantes elementos modelados en esta cuenca son los mismos, salvo que en los puntos 28, 47 y 141 difiere el caudal umbral “ Q_{falla} ” igual a $800 \text{ m}^3/\text{s}$, $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.700 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente (ver tabla 4.6). El valor de los parámetros estimados se presenta en la tabla 5.8.

Tabla 5.8 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico punto 35

| Δ (hrs.) | Pp. media anual Los Queñes (mm/año) | Q_{falla} (m^3/s) | α | β | γ |
|-----------------|---|--|----------|---------|----------|
| 3 | 1171 | 2700 | 2,18 | -1,19 | 1,02 |

Con los parámetros presentados en la tabla 5.8 se obtiene el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en los hidrogramas adimensionalizados de las figuras 5.9 y 5.10, para las crecidas presentadas en las tablas 5.9 y 5.10.

Tabla 5.9 Crecidas de calibración “Mataquito en Licantén”

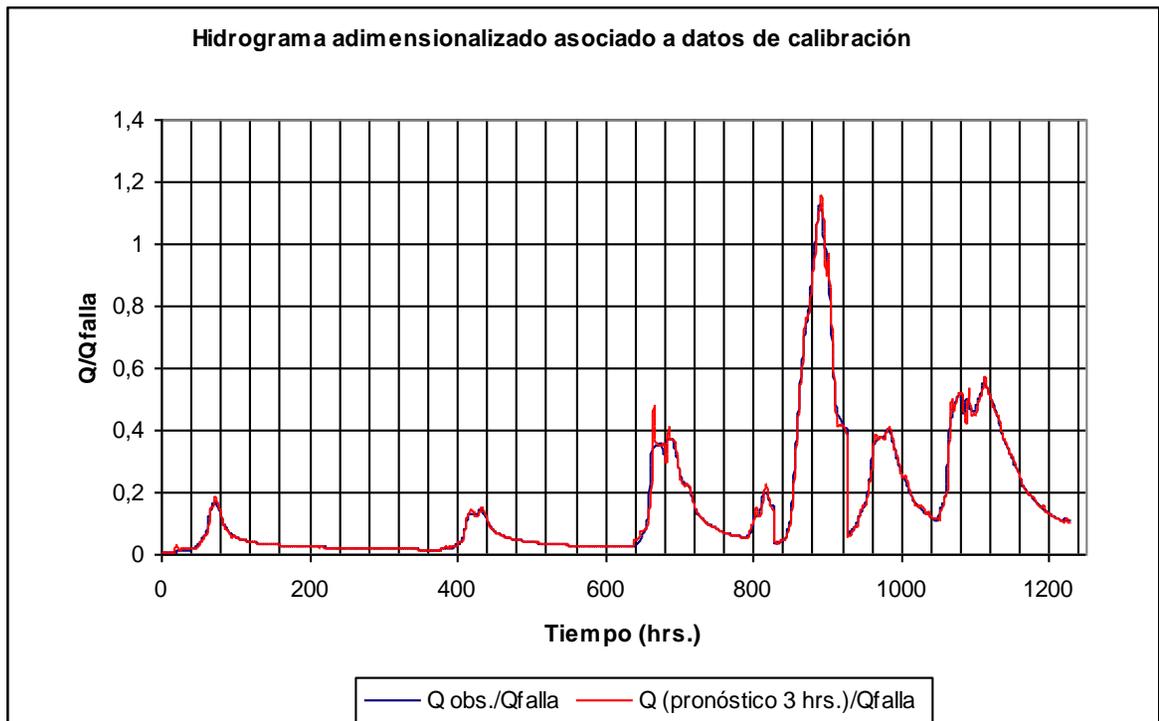
| Tormentas de Calibración | | | |
|--------------------------|----------|---------------|----------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 14-03-02 | 00:30:00 | 28-03-02 | 20:30:00 |
| 13-05-02 | 00:30:00 | 01-06-02 | 23:30:00 |
| 05-08-02 | 05:30:00 | 09-08-02 | 07:30:00 |
| 16-07-94 | 00:00:00 | 28-07-94 | 12:00:00 |

Tabla 5.10 Crecidas de validación “Mataquito en Licantén”

| Tormentas de Validación | | | |
|-------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 01-06-02 | 00:30 | 12-06-02 | 10:30 |
| 16-05-91 | 00:00 | 31-05-91 | 09:00 |
| 09-05-92 | 00:00 | 31-05-92 | 23:00 |
| 03-06-97 | 00:00 | 27-06-97 | 23:00 |

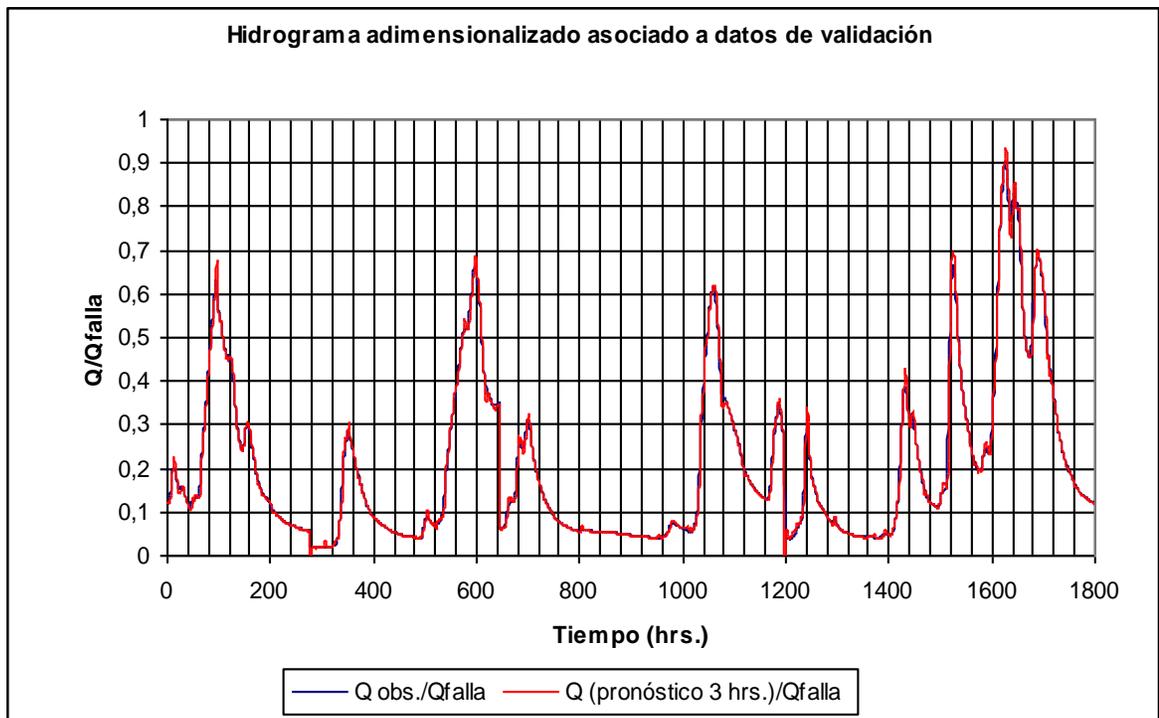
En cuanto al modelo recursivo de pronóstico, para un adelanto de seis horas, se obtienen los hidrogramas adimensionalizados de calibración y validación que se presentan en las figuras 5.11 y 5.12, respectivamente, para las crecidas en las fechas señaladas en las tablas 5.9 y 5.10.

Figura 5.9 Calibración modelo de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$) "Mataquito en Licantén"



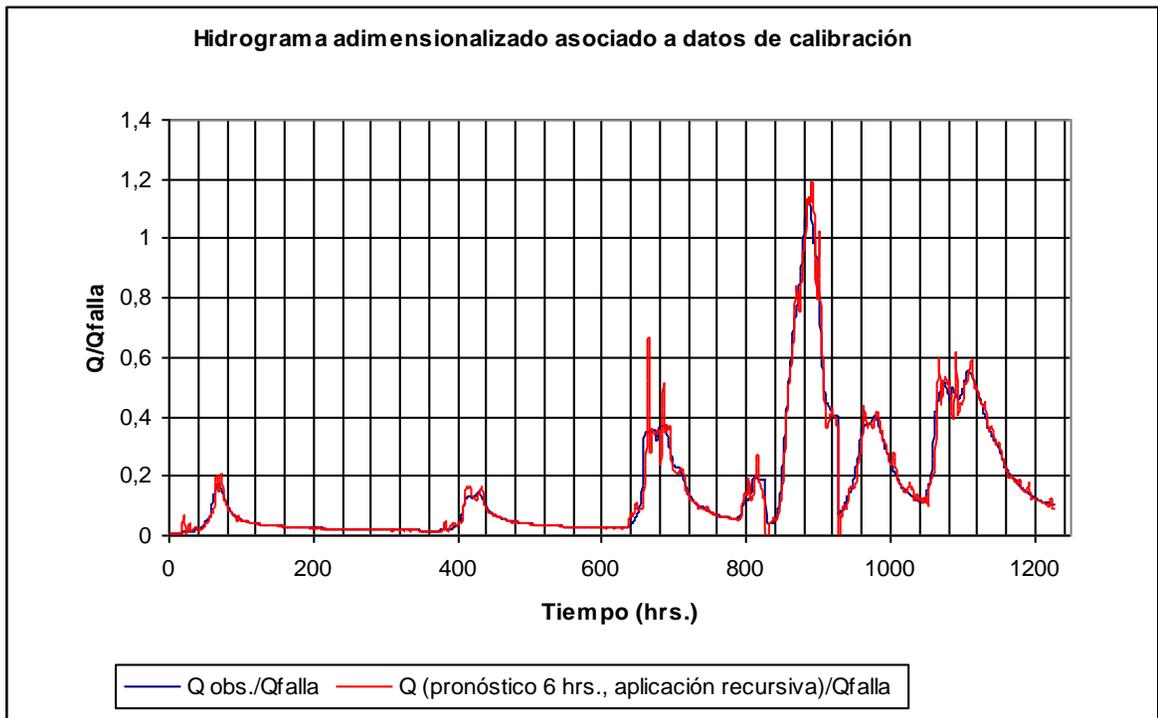
Coefficiente $R^2 = 0,995$

Figura 5.10 Validación modelo de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$) "Mataquito en Licantén"



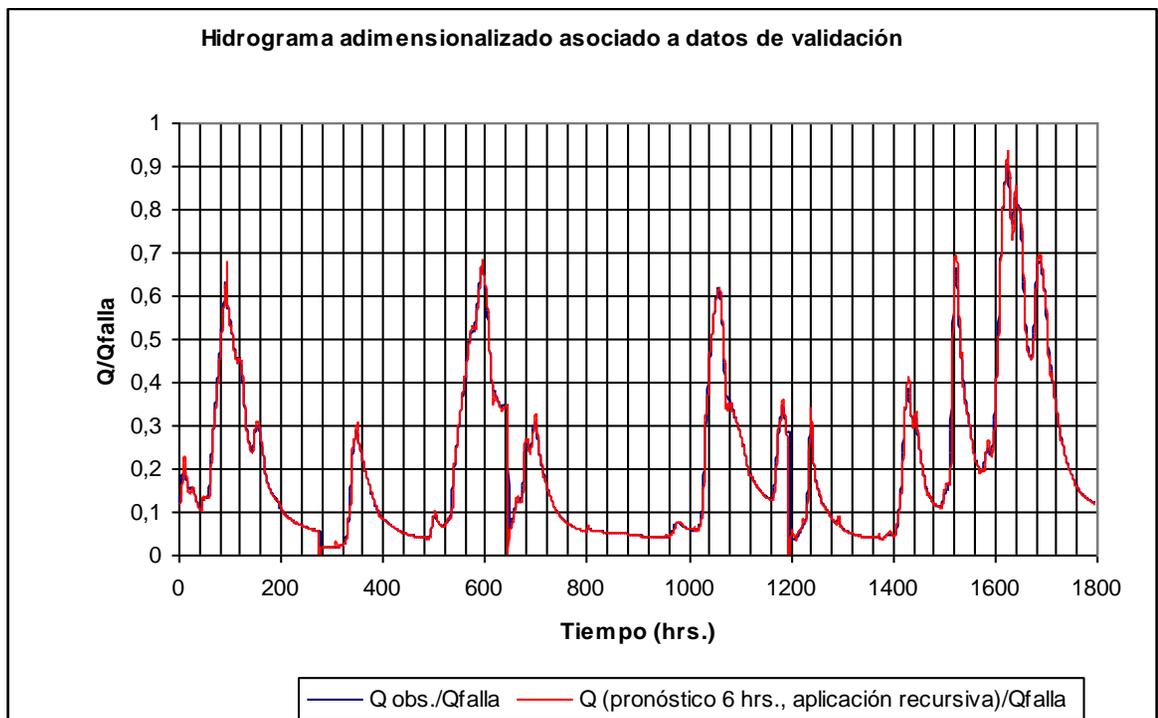
Coefficiente $R^2 = 0,993$

Figura 5.11 Calibración modelo de pronóstico de 6 horas ($t + 2\Delta$) "Mataquito en Licantén"



Coefficiente $R^2 = 0,970$

Figura 5.12 Validación modelo de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$) "Mataquito en Licantén"



Coefficiente $R^2 = 0,950$

f) Río Mataquito en Licantén (modelo Q-Q)

Al igual que en el caso del modelo P-Q, los resultados de calibración y validación del modelo Q-Q son presentados para el valor del umbral de falla asociado al punto 35 ($Q_{falla} = 2.700 \text{ m}^3/\text{s}$). Las fechas de las crecidas de calibración y validación se presentan en las tablas 5.11 y 5.12, para las cuales se dispone de información concurrente en las estaciones limnigráficas Palos en Colorado, río Teno en junta con Claro y Mataquito en Licantén.

Tabla 5.11 Crecidas de calibración

| Fecha inicio | Tormentas de calibración | | hora |
|--------------|--------------------------|---------------|-------|
| | hora | Fecha término | |
| 16-05-1991 | 00:00 | 31-05-1991 | 23:00 |
| 15-07-1994 | 00:00 | 31-07-1994 | 18:00 |
| 14-05-2002 | 00:00 | 01-06-2002 | 23:00 |

Tabla 5.12 Crecidas de validación

| Fecha inicio | Tormentas de validación | | hora |
|--------------|-------------------------|---------------|-------|
| | hora | Fecha término | |
| 02-05-1992 | 00:00 | 30-05-1992 | 17:00 |
| 01-06-1997 | 00:00 | 18-06-1997 | 23:00 |

Para los modelos Q-Q identificados en esta cuenca (representados por las ecuaciones 5.1 y 5.2), se seleccionó un valor del parámetro $\Delta = 3 \text{ hrs}$. Además, se observa comparando los hidrogramas entre las estaciones que están aguas arriba de la estación Mataquito en Licantén y esta última, que el desfase “típico” al peak es aproximadamente de 18 hrs., tal como se ejemplifica en la figura 5.13, con lo que se estima que los parámetros “ Δ_1^{max} ” y “ Δ_2^{max} ” son iguales a 18 hrs. Por lo tanto, la cantidad de modelos de pronóstico Q-Q a calibrar es igual a 6 ($n = 6$, según la restricción dada en la ecuación 5.2). En consecuencia, se presentarán modelos con los cuales se pueden obtener pronósticos para mayores tiempos de adelanto que el modelo P-Q identificado para esta misma cuenca.

Además, dado que son seis los modelos calibrados y validados, se representa la bondad del ajuste de los mismos mediante el uso de los gráficos de correlación directa presentados en las figuras 5.14 y 5.15; empleándose como criterio de comparación del ajuste entre los modelos el valor del coeficiente de determinación (R^2).

En la tabla 5.13 se presenta el resumen de los valores de los coeficientes de determinación (R^2) de los modelo Q-Q, tanto para la calibración, como para la validación. Se obtienen los parámetros de ajuste de los modelos Q-Q que se presentan en la tabla 5.14.

Tabla 5.13 Coeficiente R² de calibración y validación, modelo Q-Q

| Coeficiente R ² para datos de calibración modelo Q-Q | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| r=1 | r=2 | r=3 | r=4 | r=5 | r=6 |
| 0,992 | 0,973 | 0,950 | 0,923 | 0,891 | 0,857 |
| Coeficiente R ² para datos de validación modelo Q-Q | | | | | |
| r=1 | r=2 | r=3 | r=4 | r=5 | r=6 |
| 0,993 | 0,965 | 0,918 | 0,859 | 0,794 | 0,728 |

Tabla 5.14 Parámetros estimados de los modelos de pronóstico Q-Q

| Parámetros estimados de los modelos de pronóstico Q-Q | | | | | | |
|---|-------|--|--------|--------|--------|--------|
| Parámetro | r = 1 | r = 2 | r = 3 | r = 4 | r = 5 | r = 6 |
| a_1^r | 1,96 | 1,65 | 1,08 | 1,05 | 1,03 | 0,92 |
| a_2^r | -0,96 | -0,66 | -0,09 | -0,06 | -0,03 | 0,07 |
| a_3^r | 35,80 | 239,22 | 277,30 | 285,09 | 289,05 | 299,46 |
| a_4^r | 18,47 | 49,13 | 23,64 | 4,82 | -8,27 | -11,94 |
| Δ (hrs.) | 3 | $QML_{(t+r\Delta)} = a_1^r \delta_{1(t+r\Delta-\Delta)} + a_2^r \delta_{2(t+r\Delta)} + a_3^r \lambda_{1(t+r\Delta)} + a_4^r \lambda_{2(t+r\Delta)}$ $A_{(t+r\Delta)} = QML_{(t+r\Delta)} / Q_{falla}$ | | | | |
| Δ_1^{max} (hrs.) | 18 | | | | | |
| Δ_2^{max} (hrs.) | 18 | | | | | |
| Qfalla (m3/s) | 2700 | | | | | |

Figura 5.13 Desfase de crecida entre los afluentes y el río Mataquito

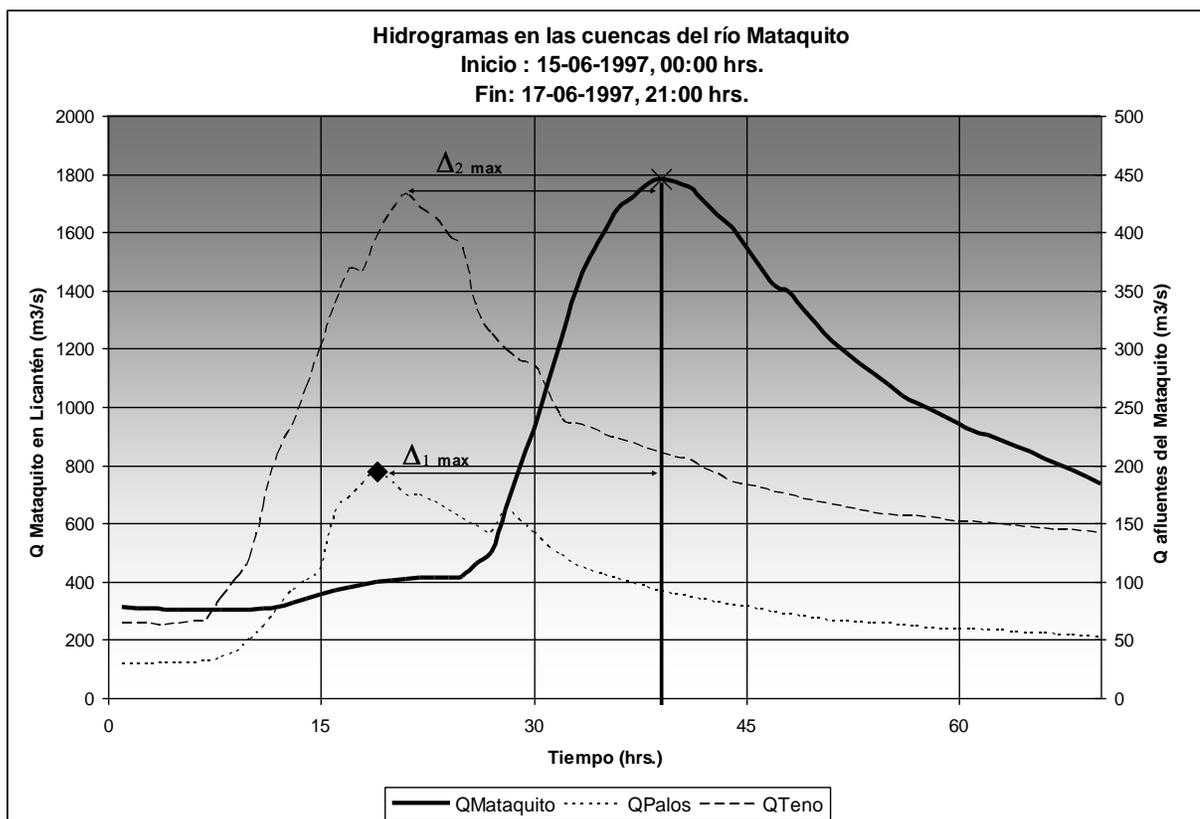


Figura 5.14 Resultados de Calibración de los modelos lineales Q-Q

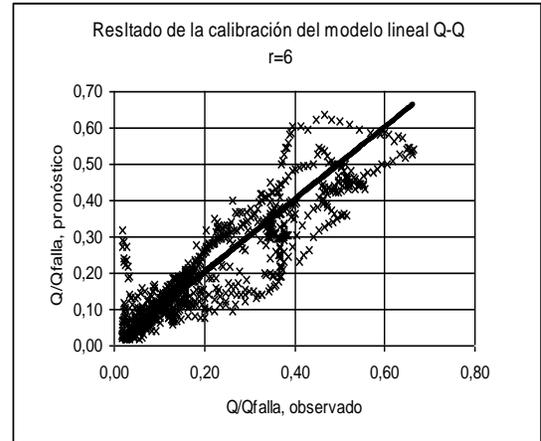
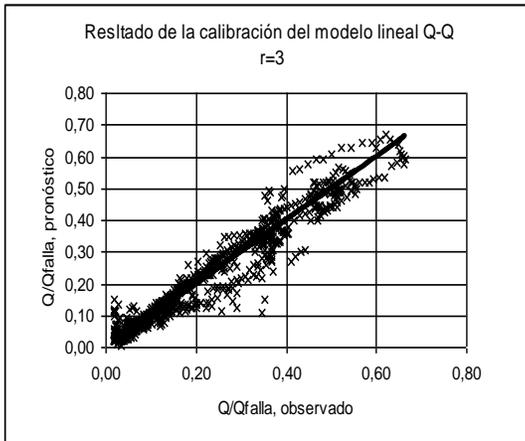
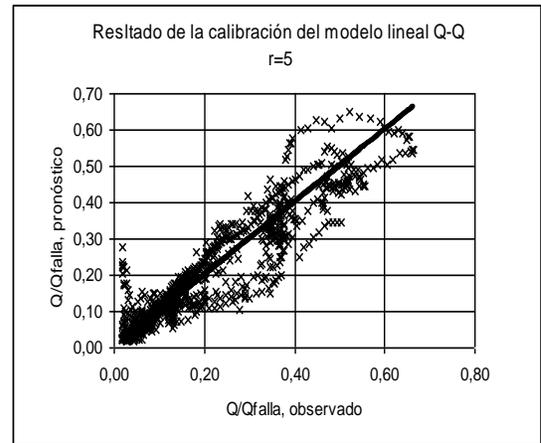
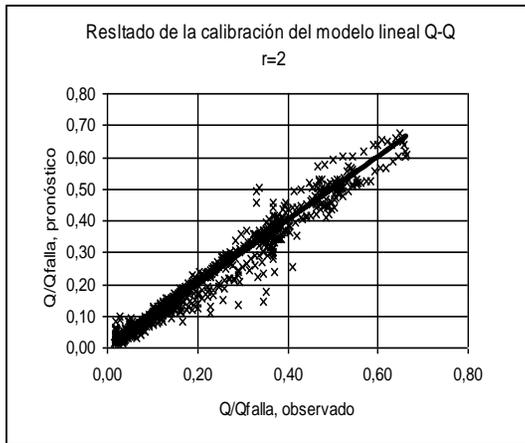
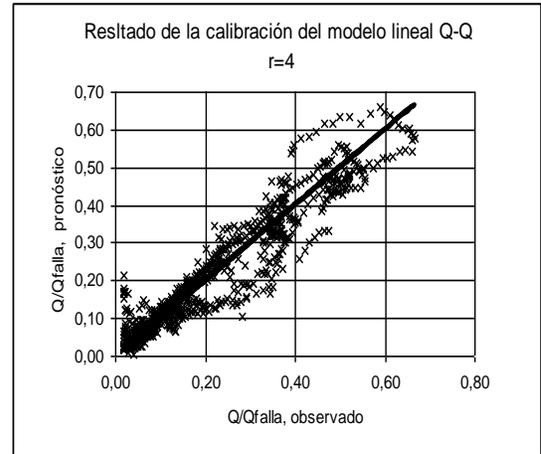
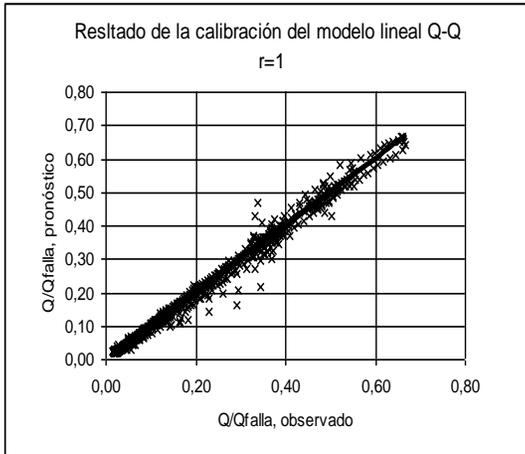
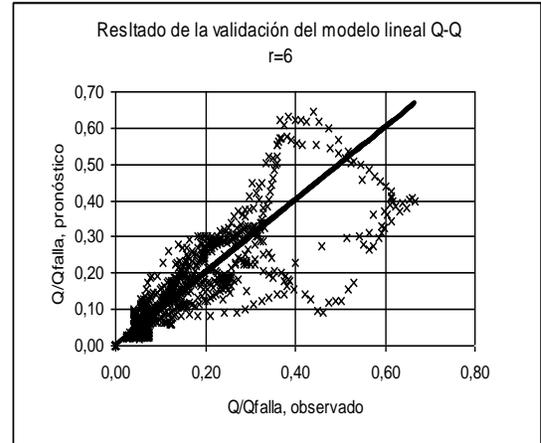
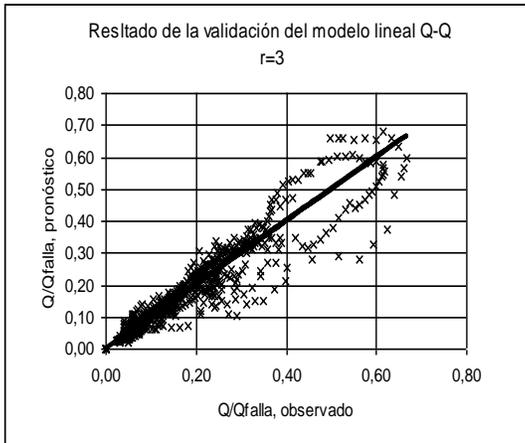
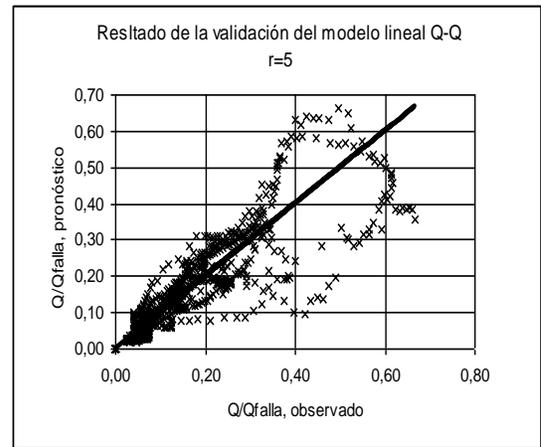
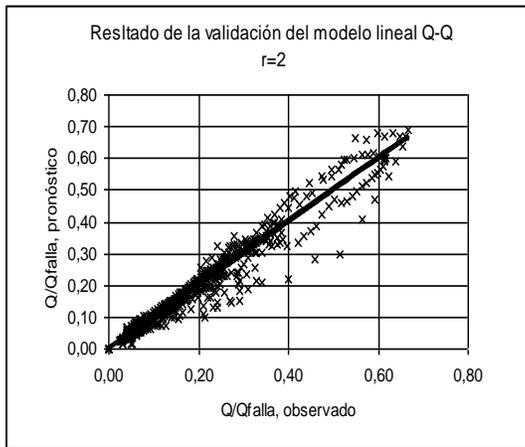
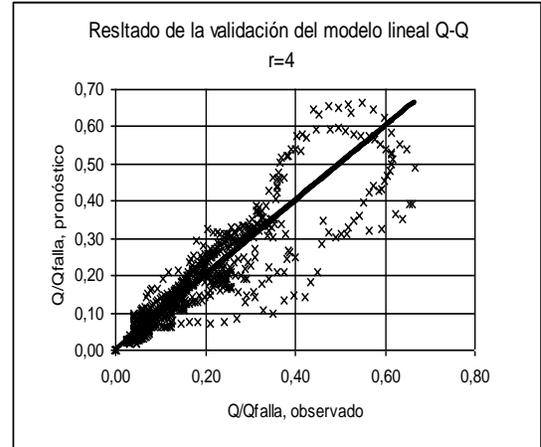
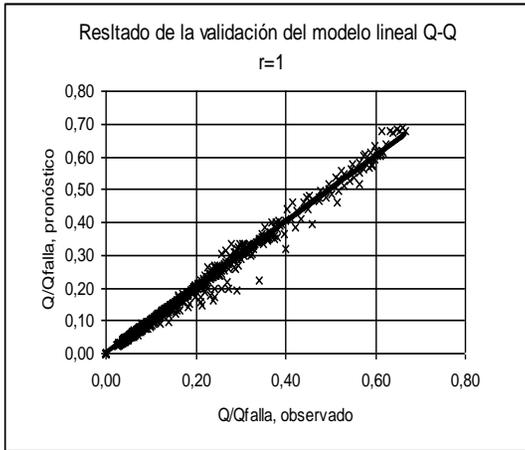


Figura 5.15 Resultados de Validación de los modelos lineales Q-Q



5.1.2 Empleo de los FIS para el pronóstico de caudales

Los FIS, del tipo P-Q, se estudiaron en las tres subcuencas del río Mataquito donde se aplican los modelos lineales P-Q, en conformidad a lo planteado en el capítulo 3.3.2. Por otro lado, se analizó el uso de FIS, del tipo Q-Q, en la estación Mataquito en Licantén.

a) Estructura FIS P-Q

La estructura de los FIS seleccionada en las tres subcuencas es la misma y está compuesta por los siguientes datos de entrada:

- **Pp_(t)**: Precipitación acumulada en la estación pluviográfica al tiempo t, durante las últimas k hrs. (Ecuación 3.5).
- **Q_(t)**: Caudal registrado en la estación de control limnigráfico en la salida de la cuenca para el tiempo t.
- **Q_{med(t)}**: Media de los caudales registrados en las últimas r horas en estación limnigráfica de control al tiempo t – 1. (Ecuación 3.6).

Con lo anterior se definen las siguientes variables de entrada FIS (P-Q):

- **V1_(t) = Q_(t) / Qfalla** (asociada a la variable de estado “Q”)
- **V2_(t) = Q_{med(t)} / Qfalla** (asociada a la variable de estado “Q”)
- **V3_(t) = Pp_(t) / Pp.media anual** (asociada a la variable exógena “I”)

La variable de entrada exógena “V3”, asociada a la precipitación, considera un valor del parámetro k=3 (ecuación 3.5), mientras que la variable de entrada “V2” se obtiene para un valor de r=3 (ecuación 3.6).

Dado las variables consideradas y lo planteado en el capítulo 3.3.2 - número de funciones de membresía “MF_kⁱ” Gaussianas (ecuación 3.11) y reglas igual al número de variables - la cantidad de reglas utilizadas es también igual a tres (m=n=p=3). Además, se emplea para la obtención de la membresía conjunta “W_i” de cada regla, la intersección de los conjuntos difusos o t-Norma definida por el producto (ecuación 3.12). Se obtiene entonces, que el FIS de pronóstico de caudales se calcula mediante la ecuación 5.4.

$$FIS(V_1, V_2, V_3) = \frac{\sum_{i=1}^{n=3} A_i \prod_{k=1}^3 MF_k^i(V_k)}{\sum_{i=1}^{n=3} \prod_{k=1}^3 MF_k^i(V_k)} \quad \text{EC 5.4}$$

Para obtener las implicancias A_i del tipo FIS Sugeno, ecuación 2.14, se impone que los valores constantes de la parte lineal del modelo " a_k^i " sean nulos, tal como se describe en la ecuación 5.5. Por lo tanto, el FIS puede ser interpretado como una intersección difusa de tres modelos lineales P-Q, donde cada regla corresponde a un modelo lineal P-Q. Puesto que las implicancias A_i son combinaciones lineales de las variables de entrada, y éstas son de igual estructura que los modelos lineales P-Q (ver punto 5.1.1),

$$k = 0 \Rightarrow a_k^i = 0 \Rightarrow A_i = \sum_{k=1}^{n=3} a_k^i V_k \quad \text{EC 5.5}$$

$$k \in \{0, \dots, n\}$$

Se obtiene como salida del FIS la variable $V1$ (igual a la amenaza " $A_{(t+\Delta)}$ ") en el tiempo " $t + \Delta$ ", con Δ = tiempo de adelanto o de pronóstico del modelo función de transferencia ($\Delta = 3$ hrs.), mediante la expresión de la ecuación 5.6.

$$A_{(t+\Delta)} = V_{1(t+\Delta)} = \text{FIS}(V_1, V_2, V_3) \quad \text{EC 5.6}$$

Para estimar los parámetros de la parte lineal del modelo, " a_k^i ", se calibran tres modelos lineales P-Q de forma independiente y para distintas crecidas, mediante mínimos cuadrados, correspondiendo los parámetros obtenidos en cada caso, a una implicancia equivalente A_i .

Una vez conocida la parte lineal del FIS como se describe en el párrafo anterior, se realiza la calibración de la parte no lineal (parámetros de las funciones de pertenencia Gaussianas) empleando el algoritmo genético, según lo expuesto en el punto 3.3.3. Además, la heurística o función objetivo a minimizar es discreta (con intervalo de cálculo a nivel horario), y corresponde a la señalada en la ecuación 5.7, donde N_{obs} corresponde al número de horas de calibración.

Se concluye de lo anterior que el FIS P-Q descrito dispone un total de 9 parámetros lineales y 18 no lineales. Por lo tanto tiene 27 grados de libertad.

$$FO = \sum_{n \in \{1, \dots, N_{\text{obs}}\}} \left[\text{FIS}(V_1^n, V_2^n, V_3^n) - V_1^n(t + \Delta) \right]^2 \quad \text{EC 5.7}$$

Además, se realiza un extensión del pronóstico, mediante una aplicación recursiva del FIS P-Q para obtener $V1_{(t+2\Delta)}$, tal como se describe en el punto 3.3.2. Es decir, se aplica el mismo FIS utilizado para obtener $Q_{(t+\Delta)}/Q_{\text{falla}}$, reemplazando el valor de la variable $V1 = Q_{(t)}/Q_{\text{falla}}$ por $Q_{(t+\Delta)}/Q_{\text{falla}}$, manteniendo constante el valor de la variable $V3 = Pp_{(t)}/Pp$. media anual (dado que no se dispone de pronósticos de precipitación) y recalculando el valor de la variable $V2$, utilizando para ello los pronósticos de $V1$ realizados para los tiempos $t + \Delta - 1$, $t + \Delta - 2$ y el valor observado de $Q_{(t)}/Q_{\text{falla}}$.

En particular, las variables que se emplean en estas aplicaciones recursivas de los FIS P-Q son las que se presentan a continuación: ($k = 3$ y $r = 3$)

- $V1^c_{(t+\Delta)} = \underline{Q}_{(t+\Delta)} / Q_{falla}$
- $V2^c_{(t+\Delta)} = [\underline{Q}_{(t+\Delta-1)} + \underline{Q}_{(t+\Delta-2)} + Q_{(t)}] / (3 * Q_{falla})$
- $V3_{(t+\Delta)} = Pp_{(t)} / Pp_{media\ anual}$

Donde $\underline{Q}_{(t+\Delta)}$, $\underline{Q}_{(t+\Delta-1)}$ y $\underline{Q}_{(t+\Delta-2)}$ fueron los caudales pronosticados en los tiempos t , $t - 1$ y $t - 2$, respectivamente.

Reemplazando las variables antes señaladas en la ecuación 5.6, se obtiene el valor de la amenaza " $A_{(t+2\Delta)}$ " como se señala en la ecuación 5.8.

$$A_{(t+2\Delta)} = V_{1(t+2\Delta)} = FIS(V_1^c, V_2^c, V_3) \quad EC\ 5.8$$

b) Estructura FIS Q-Q

Los FIS Q-Q para el pronóstico de caudales evaluados en la estación Mataquito en Licantén, buscan hacer interactuar los modelos Q-Q obtenidos en el punto 5.1.1 d). De manera de combinar la información brindada por los modelos Q-Q, para un tiempo de adelanto " $r\Delta$ ", $QML_{(t+r\Delta)}$ (ecuación 5.1), con los caudales pronosticados por éstos para tiempos de adelanto mayores, $QML_{(t+\rho\Delta)}$ con $\rho > r$.

Para estos efectos, se plantean los FIS en función de los pronósticos realizados con adelantos iguales o mayores a " $r\Delta$ ". Por lo tanto, las variables de entrada del FIS son directamente los pronósticos realizados con el modelo lineal Q-Q, para adelantos mayores o iguales al instante que se desea pronosticar, tal como se presenta en la ecuación 5.9.

$$QML^{FIS}_{(t+r\Delta)} = FIS^r(V_1, \dots, V_{n-r+1})$$

$$V_{\rho-r+1} = QML_{(t+\rho\Delta)} \quad r \leq \rho \leq n \quad EC\ 5.9$$

Donde:

- $QML_{(t+\rho\Delta)}$: Es el pronóstico de caudal realizado para el instante $t+\rho\Delta$ con el modelo lineal Q-Q, donde $\Delta = 3$ (hrs.) y $n = 6$ (número de modelos lineales Q-Q obtenidos)
- $QML^{FIS}_{(t+r\Delta)}$: Es el pronóstico de caudal realizado por el FIS^r, para el instante $t+r\Delta$.

Además, la estructura topológica seleccionada considera un número de reglas y de funciones de pertenencia, de cada variable, igual al número de variables, utilizándose funciones de pertenencia “MF_kⁱ” de tipo Gaussiana. (Ecuación 3.11).

Para obtener el valor de las variables “desfuzzyficadas” o salidas de los FIS, se emplea la suma ponderada de las implicancias “A_i” por la membresía conjunta “W_i” de la regla respectiva (EC 2.16). W_i se obtiene mediante la operación Unión (S-Norma asociada a la operación lógica “O”) definida como el máximo de las funciones de pertenencia individuales de las variables que componen una regla (ecuación 3.13). Por lo tanto, el pronóstico de caudales efectuado con el FIS se expresa mediante la ecuación 5.10.

$$FIS^r(V_1, \dots, V_k, \dots, V_{n-r+1}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-r+1} A_i \text{Max}_{k \in \{1, \dots, n-r+1\}} \{MF_k^i(V_k)\}}{\sum_{i=1}^{n-r+1} \text{Max}_{k \in \{1, \dots, n-r+1\}} \{MF_k^i(V_k)\}} \quad \text{EC 5.10}$$

Los FIS considerados, utilizan funciones de implicancias o consecuencias de tipo Sugeno, donde la implicancia de la regla i-ésima “A_i” se obtiene simplemente de una combinación lineal de las variables de entrada, tal como se presenta en la ecuación 2.14. Adicionalmente, en esta aplicación se impone que los coeficientes de las implicancias “A_i”, satisfagan la ecuación 5.11. De las ecuaciones 5.10 y 5.11, se obtiene que los FIS de pronóstico para el instante t+rΔ, se expresan mediante la ecuación 5.12.

$$a_k^i = \begin{cases} 1 \dots i = k \\ 0 \dots i \neq k \end{cases} \quad \text{EC 5.11}$$

$$k \in \{0, \dots, n-r+1\}$$

$$FIS^r(V_1, \dots, V_k, \dots, V_{n-r+1}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-r+1} V_i \text{Max}_{k \in \{1, \dots, n-r+1\}} \left\{ e^{\frac{-(V_k - \mu_k^i)}{\sigma_k^i}} \right\}}{\sum_{i=1}^{n-r+1} \text{Max}_{k \in \{1, \dots, n-r+1\}} \left\{ e^{\frac{-(V_k - \mu_k^i)}{\sigma_k^i}} \right\}} \quad \text{EC 5.12}$$

Se obtiene como salida del FIS la variable QML^{FIS}_(t+rΔ). Por lo tanto, la amenaza “A_(t+rΔ)” en el tiempo “t + rΔ”, de determina mediante la expresión indicada en la ecuación 5.13.

$$A(t+r\Delta) = \frac{QML^{FIS}(t+r\Delta)}{Qfalla} \quad \text{EC 5.13}$$

En particular, dado que los resultados obtenidos con los modelos lineales P-Q y Q-Q son satisfactorios para $r = 1$ (pronósticos realizados con un adelanto de 3 hrs.), se estudia el desempeño para valores de r iguales o superiores a dos. Además, según la ecuación 5.12, el FIS asociado para $r = 6$ (FIS⁶) es igual al modelo lineal de pronóstico Q-Q obtenido para $r = 6$. Debido a todo esto, sólo se estudian los FIS^r para $r = \{2, 3, 4, 5\}$.

Como se aprecia en la ecuación 5.12, los parámetros a calibrar corresponden a la parte no lineal del FIS, estos parámetros son " μ_k^i " y " σ_k^i ". Para estimar estos valores se aplicará el G.A., en conformidad a lo señalado en el punto 3.3.3, siendo la cantidad de parámetros total a estimar para el FIS^r igual a $2*(n-r+1)^2$.

c) FIS P-Q de Pronóstico de caudales en el Río Teno en Junta con Claro

Este modelo utiliza los datos medidos en mismas estaciones empleadas por el modelo lineal P-Q de pronóstico de caudales identificados en el punto 5.1.1. c). Además, las crecidas de calibración y validación empleadas son aquellas que se presentaron en las tablas 5.3 y 5.4.

Para estimar los parámetros " a_k^i " de los modelos lineales P-Q asociados a las tres implicancias " A_i ", se realiza una calibración de estos modelos mediante mínimos cuadrados. Las crecidas seleccionadas para la calibración de cada inferencia A_i , con los respectivos parámetros calibrados, se presentan en la Tabla 5.15. Los resultados de los FIS obtenidos (índices de Amenaza) son presentados en función de $Q_{falla} = 370$ (m³/s).

Tabla 5.15 Parámetros estimados de las implicancias A_i

| Fecha Crecidas | | i | a_1^i | a_2^i | a_3^i |
|----------------|------------|---|---------|---------|---------|
| Inicio | Fin | | | | |
| 02-06-2002 | 09-08-2002 | 1 | 1,92 | -0,94 | 1,40 |
| 16-05-1991 | 31-05-1991 | 2 | 1,57 | -0,59 | 2,16 |
| 16-07-1994 | 27-07-1994 | 3 | 2,11 | -1,12 | -0,24 |

Luego se calibra la parte no lineal de los FIS, mediante el empleo del G.A., utilizando parámetros estimados de la parte lineal que se presentan en la Tabla 5.15, para las crecidas de calibración presentadas en la Tabla 5.3. Los parámetros del G.A. son los siguientes:

- Pmut = 1%
- Prec = 10
- Nind = 25
- Nhijos = 25
- $F_{O_{max}} = 1$
- N° máximo de Generaciones = 100

De la calibración se obtiene que el individuo “mejor adaptado”, o conjunto de parámetros no lineales “óptimo”, se registra en la generación N° 100, para un valor FO = 5,333. Como se señala en la Figura 5.16. Los parámetros estimados de las funciones de pertenencia son presentados en la tabla Tabla 5.16.

Tabla 5.16 Parámetros estimados de las funciones de pertenencia MF_kⁱ

| Parámetros FIS(t+rΔ), parte no lineal. | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| k | μ_k^1 | μ_k^2 | μ_k^3 | σ_k^1 | σ_k^2 | σ_k^3 |
| 1 | 3,3 | 0,6 | 0,0 | 4,9 | 6,1 | 0,3 |
| 2 | 1,2 | 0,1 | 2,1 | 8,3 | 10,0 | 9,9 |
| 3 | 3,5 | 3,5 | 0,0 | 1,4 | 2,2 | 5,6 |

Con los parámetros estimados, se obtiene el desempeño de los FIS, de los pronósticos realizados con una antelación “t+Δ” (3 hrs.), para la calibración y validación mostrados en los hidrogramas adimensionalizados de las Figura 5.17 y Figura 5.18, respectivamente.

En cuanto a la aplicación recursiva del FIS, para los pronósticos efectuados con una antelación “t+2Δ” (6 hrs.), se obtienen los resultados que se presentan en las Figura 5.19 y Figura 5.20, para los datos de calibración y validación, respectivamente.

Figura 5.16 Resumen del comportamiento del G.A., para la estimación de los parámetros del FIS

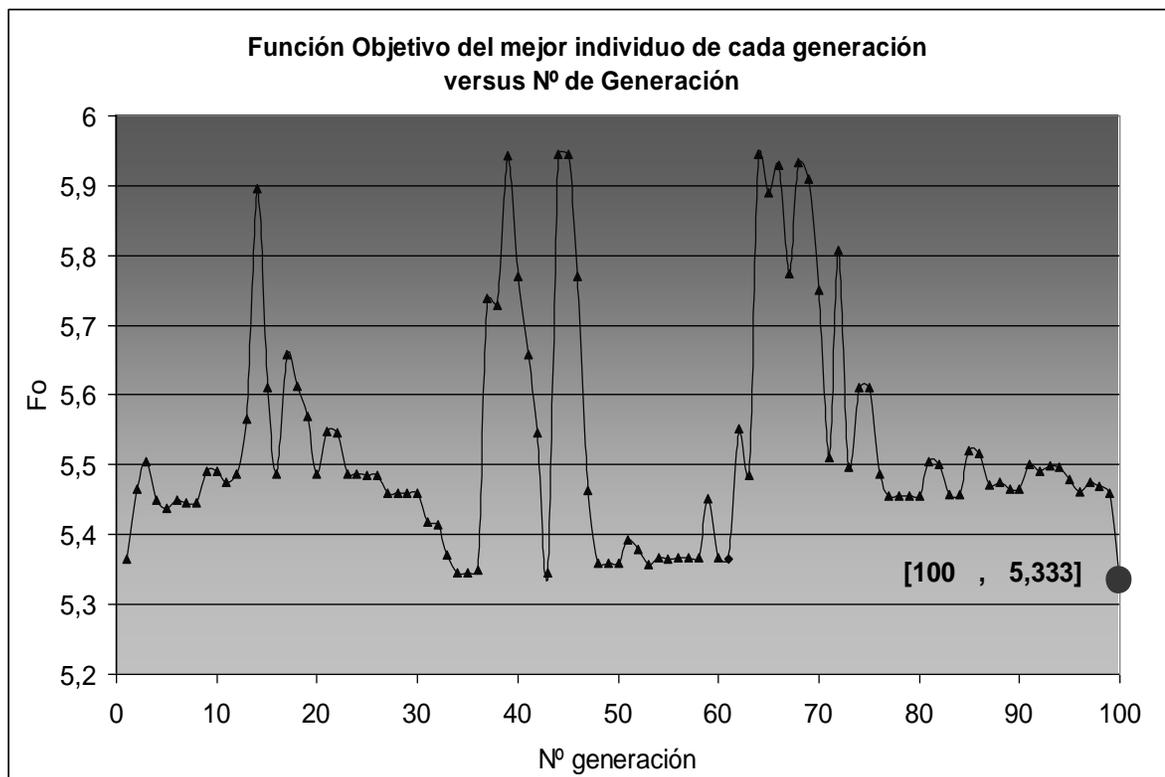
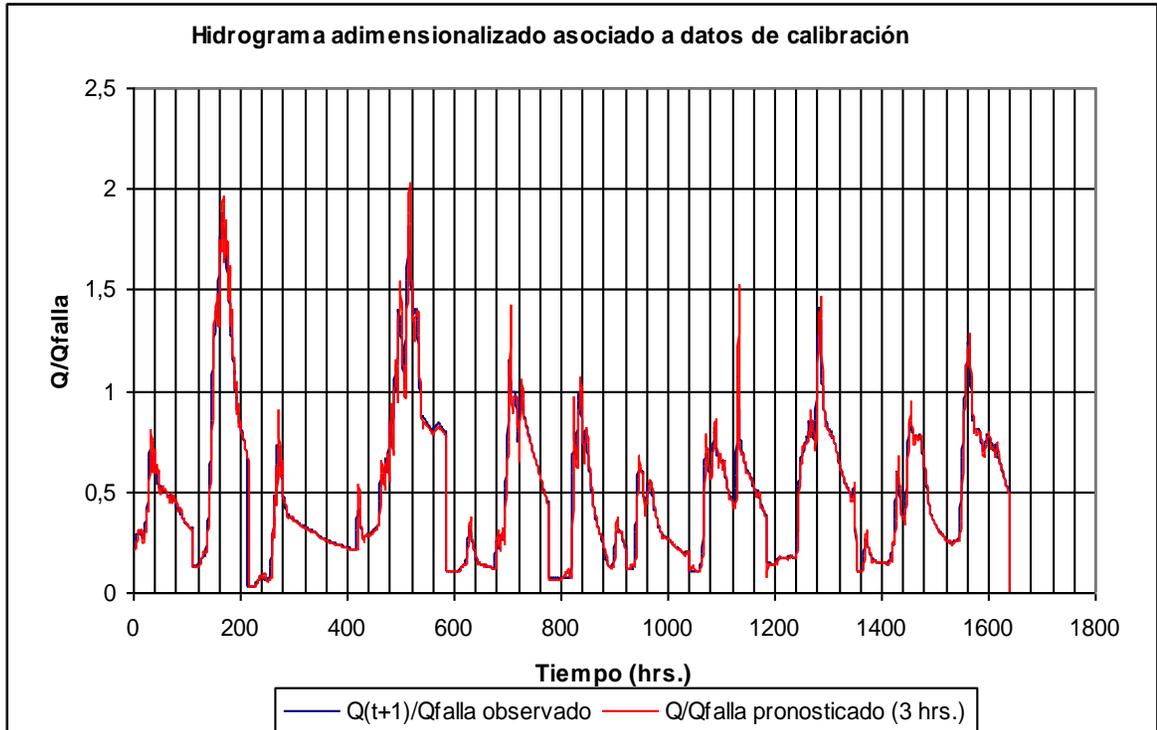
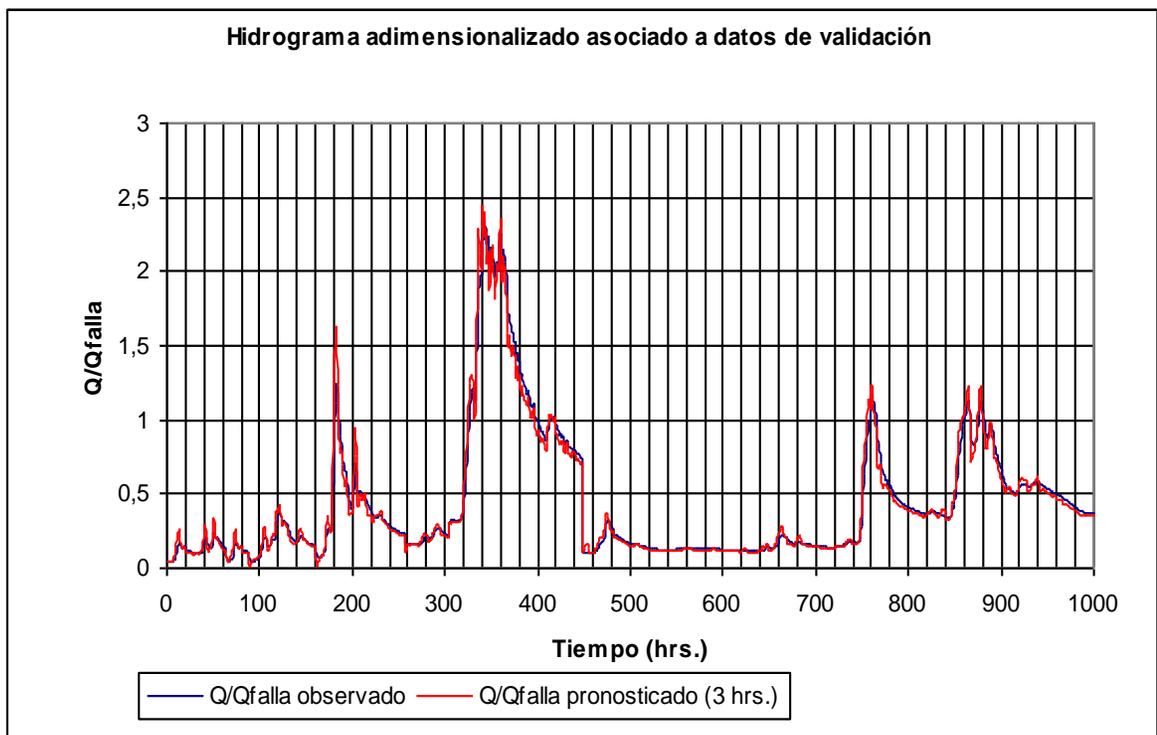


Figura 5.17 Calibración FIS de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$)



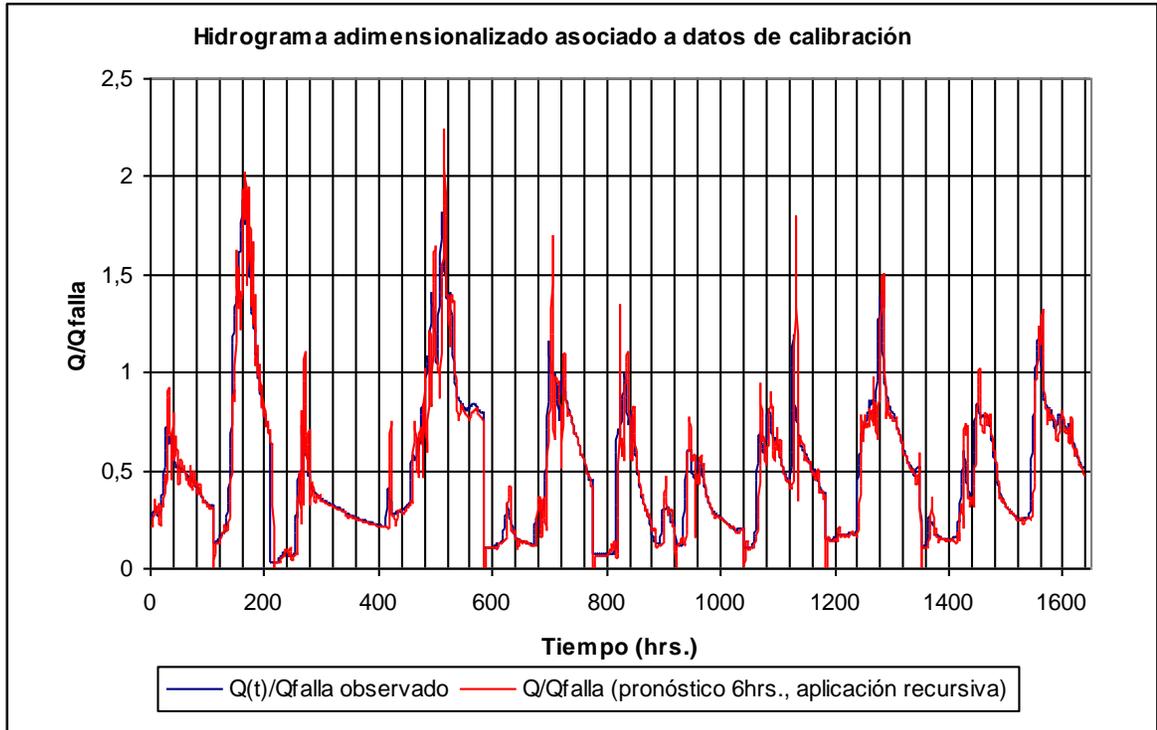
Coefficiente $R^2 = 0,958$

Figura 5.18 Validación FIS de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$)



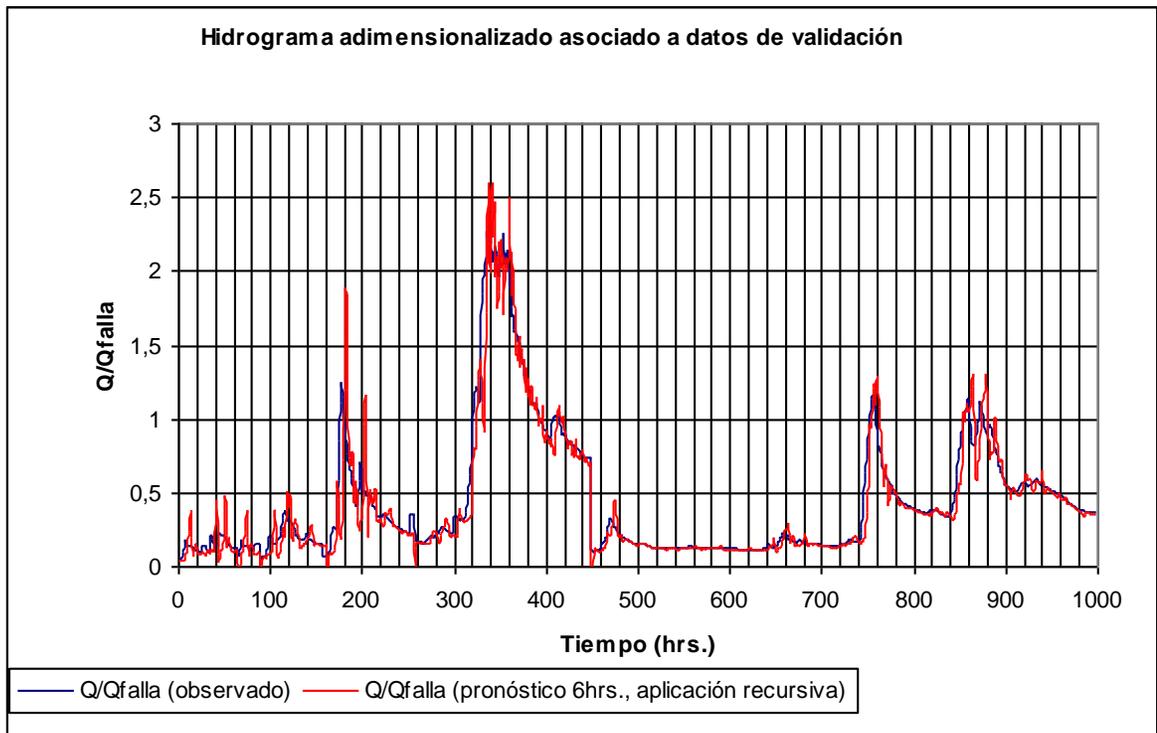
Coefficiente $R^2 = 0,982$

Figura 5.19 Calibración FIS de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$)



Coefficiente $R^2 = 0,862$

Figura 5.20 Validación FIS de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$)



Coefficiente $R^2 = 0,901$

d) FIS P-Q de Pronóstico de caudales en el Río Palos en Junta con Colorado

Este modelo utiliza los datos medidos en las mismas estaciones empleadas por el modelo lineal P-Q de pronóstico de caudales identificado en el punto 5.1.1. d). Además, las crecidas de calibración y validación que se utilizan son aquellas que se presentaron en las tablas 5.6 y 5.7.

Las crecidas seleccionadas para estimar los parámetros “ a_k^i ” se presentan en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17 Parámetros estimados de las implicancias A_i

| Fecha Crecidas | | i | a_1^i | a_2^i | a_3^i |
|----------------|------------|---|---------|---------|---------|
| Inicio | Fin | | | | |
| 15-05-1991 | 16-16-1991 | 1 | 1,96 | -0,99 | 3,91 |
| 01-05-1992 | 31-05-1992 | 2 | 1,25 | -0,31 | 6,29 |
| 04-07-1994 | 05-08-1994 | 3 | 1,77 | -0,79 | 4,34 |

La parte no lineal del FIS es calibrada para los valores de los parámetros del G.A siguientes:

- Pmut = 0,8%
- Prec = 10
- Nind = 20
- Nhijos = 20
- FO_{max} = 1
- N° máximo de generaciones = 100

De la calibración se obtiene, que el conjunto de parámetros no lineales “óptimo”, se registra en la generación N° 96, para un valor FO = 1,619, como se señala en la figura 5.21. Los parámetros estimados de las funciones de pertenencia son presentados en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18 Parámetros estimados de las funciones de pertenencia MF_k^i

| Parámetros FIS(t+rΔ), parte no lineal. | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| k | μ_k^1 | μ_k^2 | μ_k^3 | σ_k^1 | σ_k^2 | σ_k^3 |
| 1 | 0,7 | 2,1 | 2,5 | 5,6 | 4,6 | 9,2 |
| 2 | 1,5 | 2,3 | 3,5 | 5,0 | 0,4 | 0,3 |
| 3 | 3,8 | 2,3 | 4,0 | 0,8 | 8,6 | 1,6 |

Con los parámetros de la Tabla 5.18, se obtienen los pronósticos realizados con una antelación “t+Δ” (3 hrs.), para los datos de calibración y validación mostrados en los hidrogramas adimensionalizados de las figuras 5.22 y 5.23, respectivamente. Estos resultados (índices de Amenaza) son presentados en función de Qfalla = 240 (m³/s).

Los pronósticos efectuados con una antelación “ $t+2\Delta$ ” (6 hrs.), entregan los resultados que se presentan en las figuras 5.24 y 5.25, para los datos de calibración y validación, respectivamente.

Figura 5.21 Resumen del comportamiento del G.A., para la estimación de los parámetros del FIS

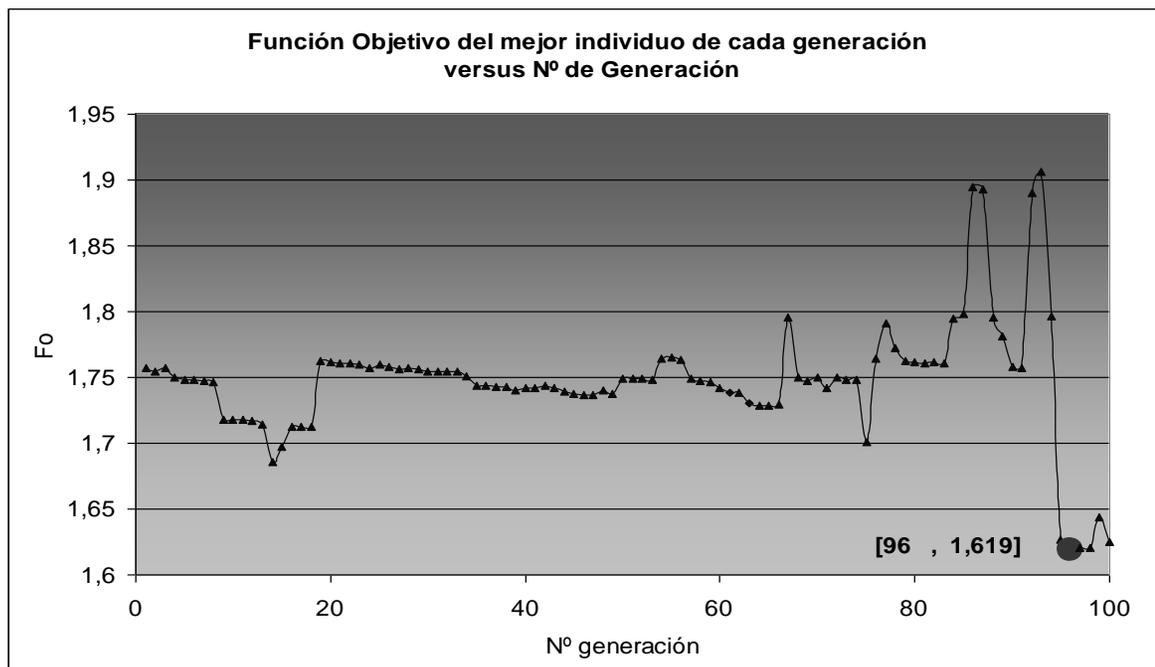
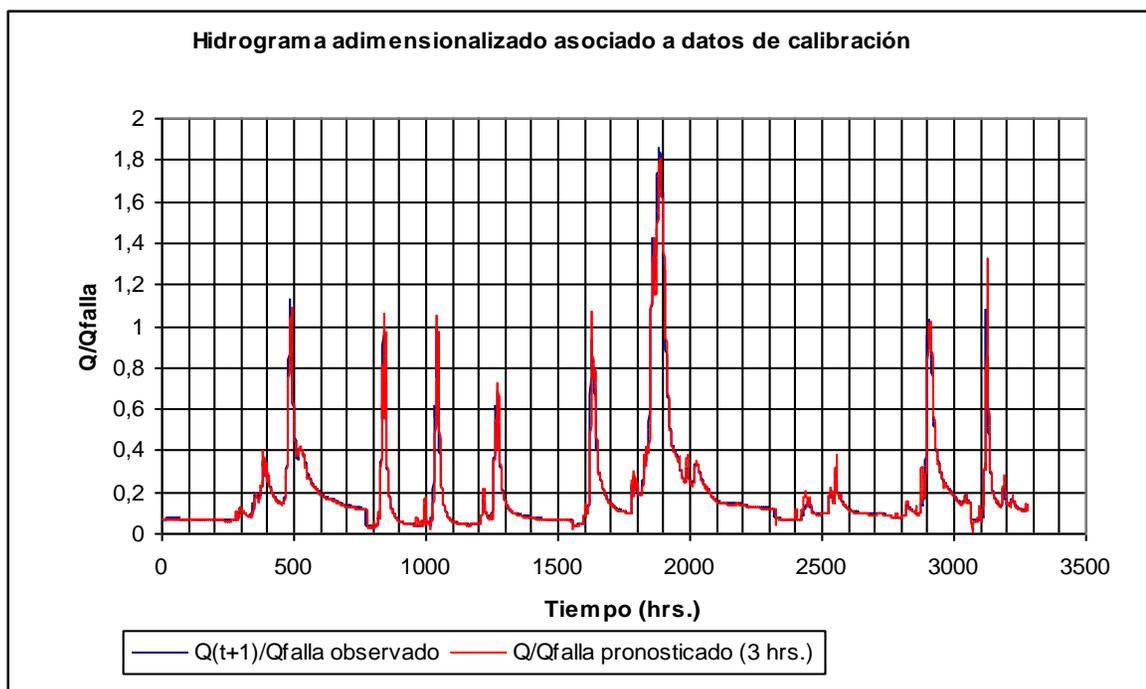
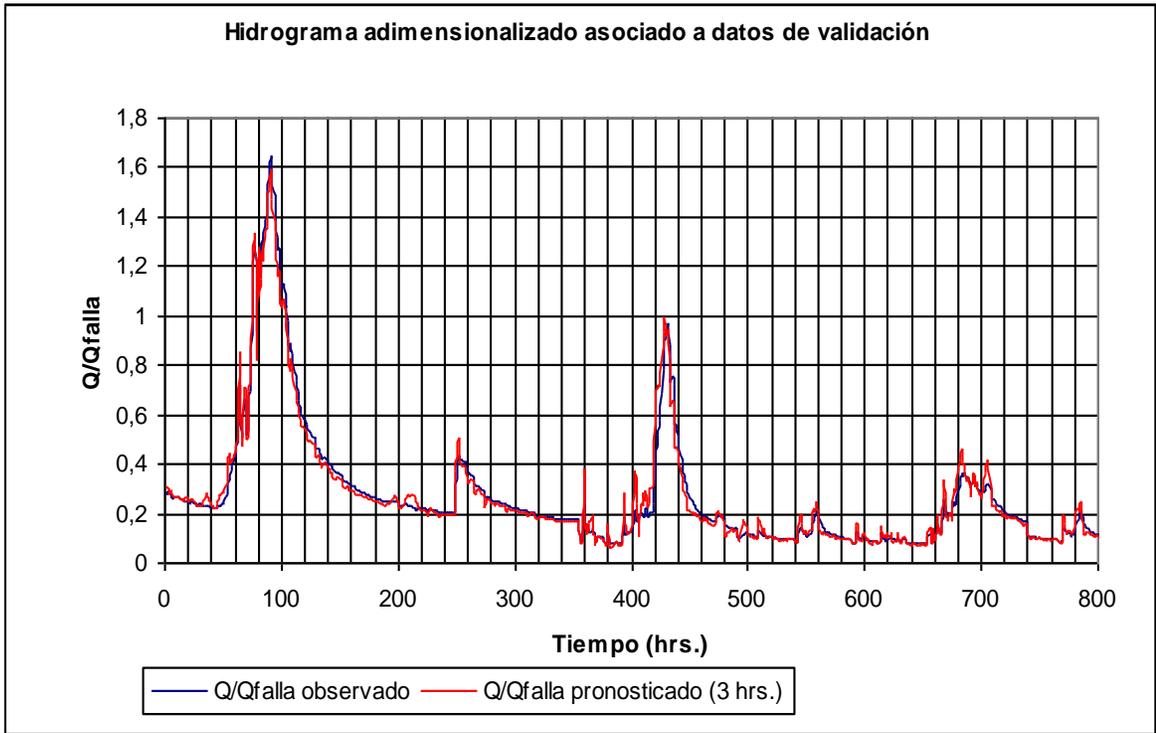


Figura 5.22 Calibración FIS de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$)



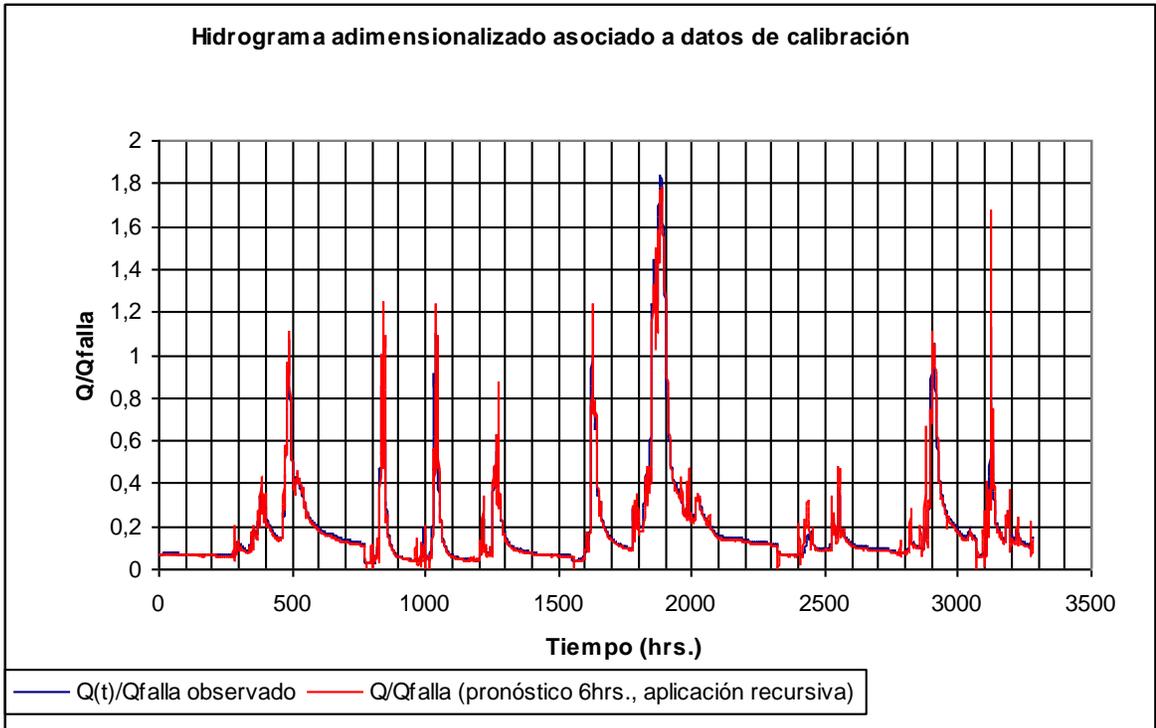
Coefficiente $R^2 = 0,970$

Figura 5.23 Validación FIS de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$)



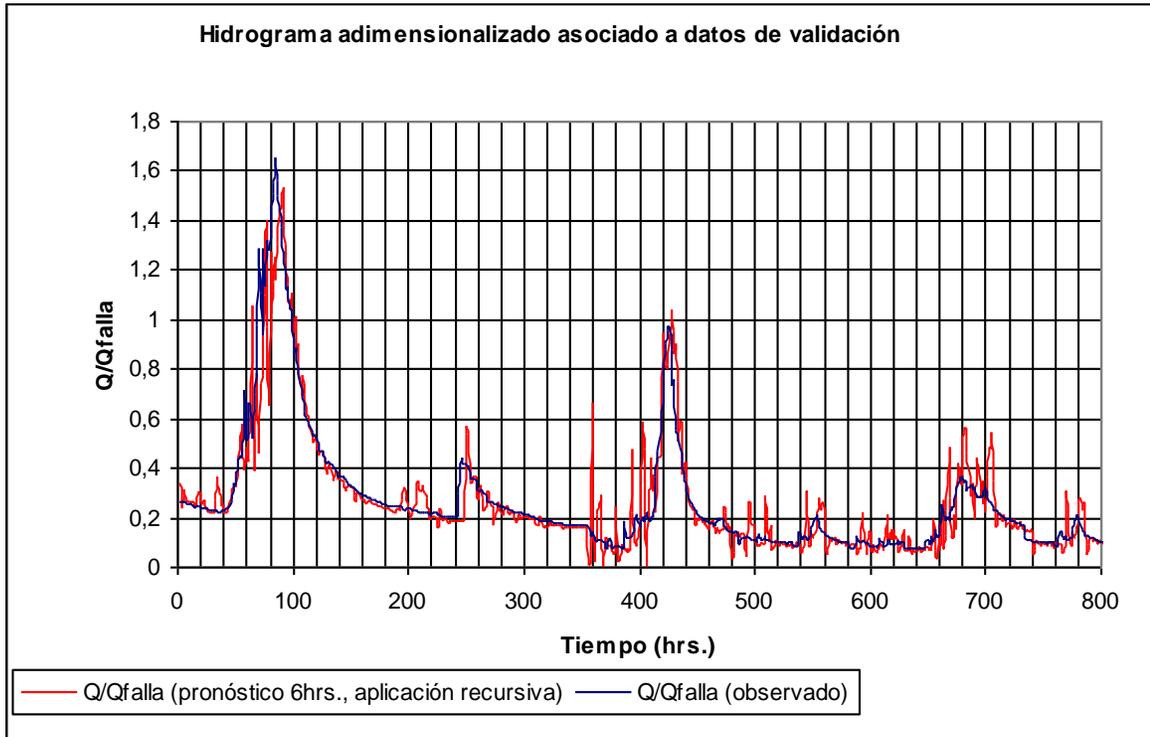
Coefficiente $R^2 = 0,980$

Figura 5.24 Calibración FIS de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$)



Coeficiente $R^2 = 0,928$

Figura 5.25 Validación FIS de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$)



Coeficiente $R^2 = 0,877$

e) FIS P-Q de Pronóstico de caudales en el Río Mataquito en Licantén

Este modelo utiliza los datos medidos en las mismas estaciones empleadas por el modelo lineal P-Q de pronóstico de caudales identificado en el punto 5.1.1 e). Además, las crecidas de calibración y validación que se utilizan son aquellas que se presentaron en las tablas 5.9 y 5.10.

Las crecidas seleccionadas para estimar los parámetros “ a_k^i ” se presentan en la Tabla 5.19

Tabla 5.19 Parámetros estimados de las implicancias A_i

| Fecha Crecidas | | i | a_1^i | a_2^i | a_3^i |
|----------------|------------|---|---------|---------|---------|
| Inicio | Fin | | | | |
| 13-05-2002 | 01-06-2002 | 1 | 1,83 | -0,85 | 0,82 |
| 05-08-2002 | 09-08-2002 | 2 | 2,22 | -1,24 | 1,94 |
| 16-07-1994 | 28-07-1994 | 3 | 2,22 | -1,22 | 0,07 |

La parte no lineal del FIS es calibrada para los valores de los parámetros del G.A siguientes:

- $P_{mut} = 0,8\%$

- Prec = 15
- Nind = 25
- Nhijos = 25
- $F_{o_{max}} = 0,1$
- N° máximo de generaciones = 100

De la calibración se obtiene que el conjunto de parámetros no lineales “óptimo”, se registra en la generación N° 27, para un valor $FO = 1,854$. Como se señala en la figura 5.26. Los parámetros estimados de las funciones de pertenencia son presentados en la tabla 5.20.

Tabla 5.20 Parámetros estimados de las funciones de pertenencia MF_k^i

| Parámetros FIS(t+rΔ), parte no lineal. | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| k | μ_k^1 | μ_k^2 | μ_k^3 | σ_k^1 | σ_k^2 | σ_k^3 |
| 1 | 3,8 | 0,7 | 2,8 | 1,6 | 0,5 | 8,6 |
| 2 | 0,2 | 1,4 | 1,4 | 2,1 | 1,8 | 6,8 |
| 3 | 0,7 | 1,0 | 2,7 | 6,2 | 4,6 | 9,5 |

Con los parámetros de la tabla 5.20, se obtienen los pronósticos realizados con una antelación “t+Δ” (3 hrs.), para los datos de calibración y validación mostrados en los hidrogramas adimensionalizados de las figuras 5.27 y 5.28, respectivamente. Estos resultados (índices de Amenaza) son presentados en función de $Q_{falla} = 2.700$ (m^3/s). Los pronósticos efectuados con una antelación “t+2Δ” (6 hrs.), entregan los resultados que se presentan en las figuras 5.29 y 5.30, para los datos de calibración y validación, respectivamente.

Figura 5.26 Resumen del comportamiento del G.A., para la estimación de los parámetros del FIS

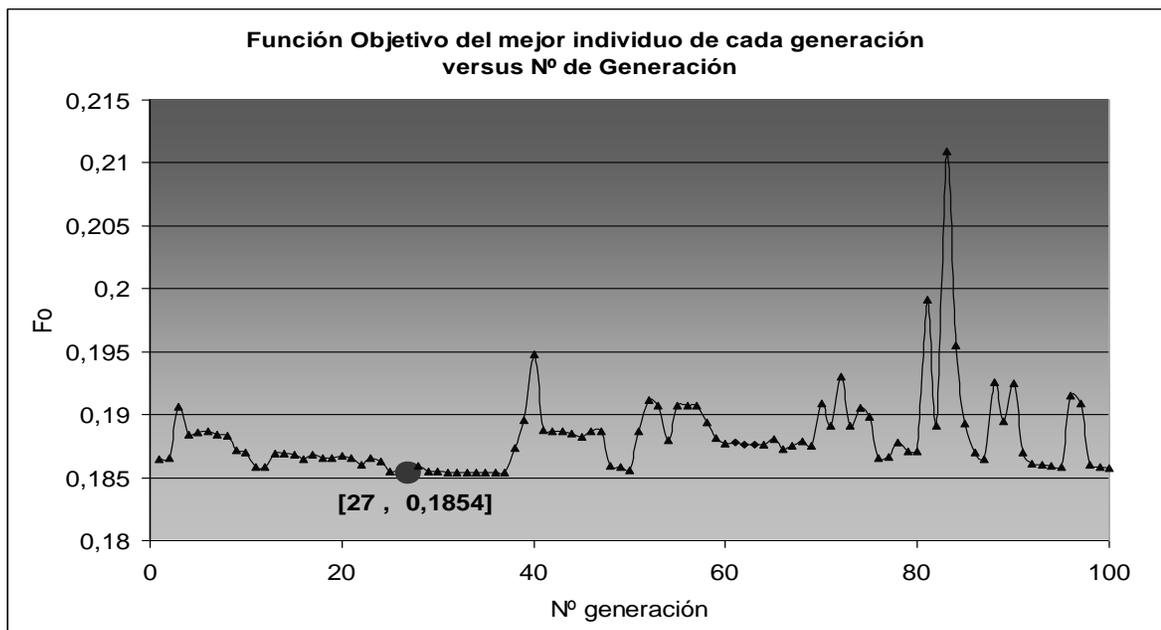
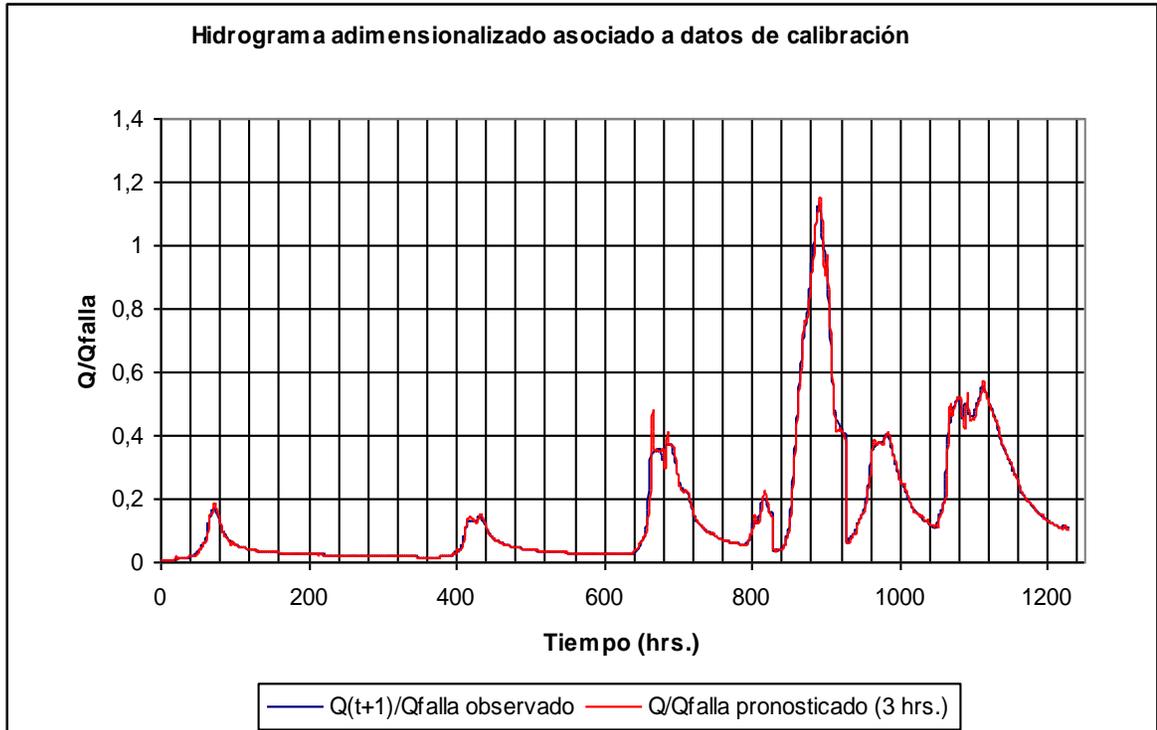
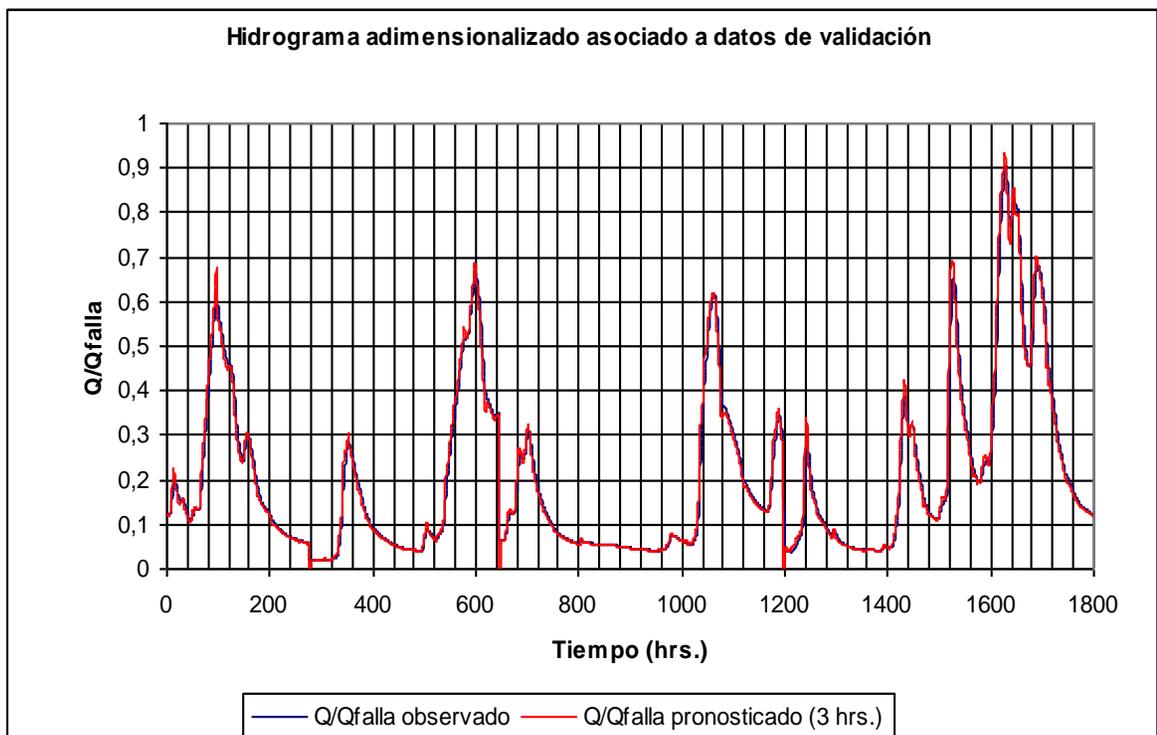


Figura 5.27 Calibración FIS de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$)



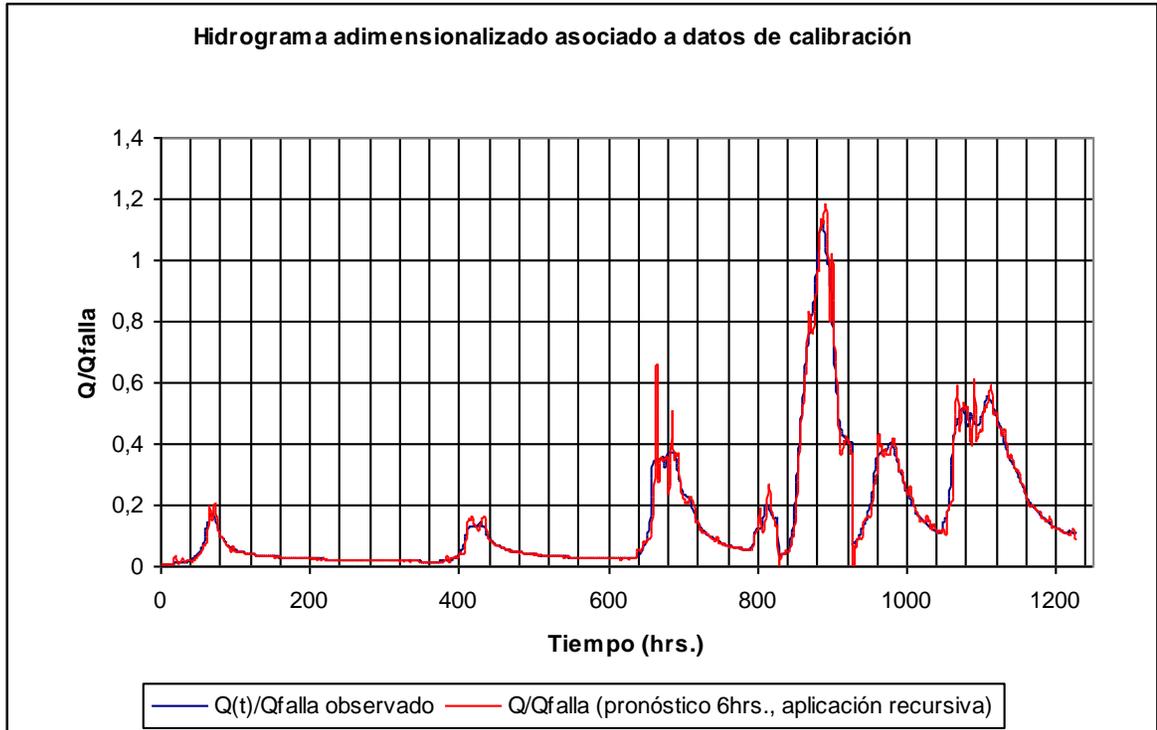
Coefficiente $R^2 = 0,995$

Figura 5.28 Validación FIS de pronóstico de tres horas ($t + \Delta$)



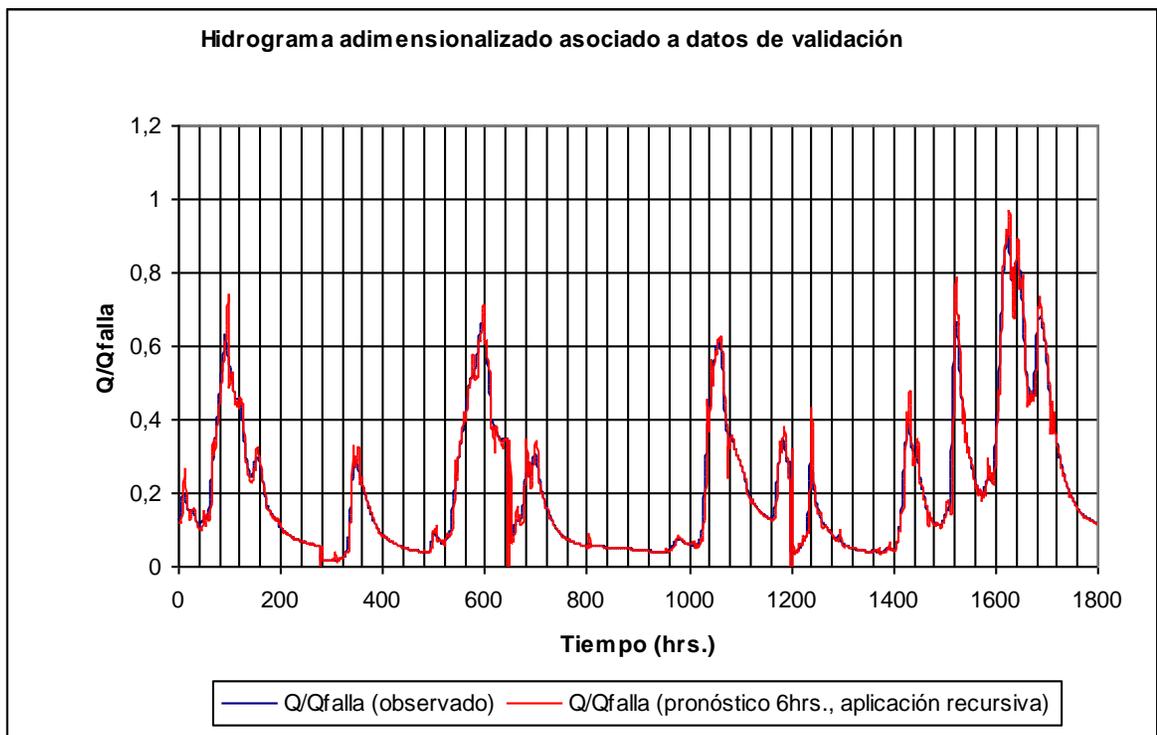
Coefficiente $R^2 = 0,982$

Figura 5.29 Calibración FIS de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$)



Coefficiente $R^2 = 0,976$

Figura 5.30 Validación FIS de pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$)



Coefficiente $R^2 = 0,937$

f) **FIS Q-Q de Pronóstico de caudales en el Río Mataquito en Licantén**

Al igual que en el caso del modelo lineal Q-Q, los resultados de calibración y validación del FIS Q-Q son presentados para el valor del umbral de falla asociado al punto 35 ($Q_{falla} = 2.700 \text{ m}^3/\text{s}$), mediante los gráficos de correlación directa que se presentan en las figuras 5.32 y 5.33, para las fechas de las crecidas de calibración y validación se presentan en las tablas 5.11 y 5.12, durante las cuales se dispone de información concurrente en las estaciones limnigráficas Palos en Colorado, río Teno en junta con Claro y Mataquito en Licantén.

Los FIS se calibran para las crecidas con las que se ajustó el modelo lineal Q-Q, mediante el uso de G.A. (Ver tablas 5.11 y 5.12), para lo cual se emplea una población de 25 individuos, una probabilidad de mutación "Pmut" = 1% y un total de 250 generaciones, obteniéndose los parámetros que se muestran en la Tabla 5.21, con los coeficientes R^2 asociados se presentan en la Tabla 5.22.

En la Figura 5.31, a modo de ejemplo, se presentan los valores de "FO" para el "mejor individuo" por generación, para un valor de $r = 3$, $P_{mut} = 10\%$ y $P_{mut} = 0\%$. Se observa que el comportamiento del G.A, para $P_{mut} = 10\%$, es bastante errático, aunque presente algunas regiones donde converge, mientras que para $P_{mut} = 0$ es rápidamente convergente, pero a una solución de menor ajuste que la encontrada en el otro caso.

Tabla 5.21 Parámetros calibrados del FIS Q-Q

| Parámetros calibrados $QML(t+r\Delta) = FIS(t+r\Delta)$ | | | | | | | | | | |
|---|--|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| r = 2 | Modelo de pronóstico de 6 hrs. | | | | | | | | | |
| k | μ_k^1 | μ_k^2 | μ_k^3 | μ_k^4 | μ_k^5 | σ_k^1 | σ_k^2 | σ_k^3 | σ_k^4 | σ_k^5 |
| 1 | 208,0 | 739,8 | 1770,1 | 678,3 | 804,6 | 176,9 | 116,1 | 116,7 | 35,6 | 64,1 |
| 2 | 394,1 | 680,0 | 1589,0 | 1735,2 | 1650,4 | 27,2 | 50,6 | 162,7 | 159,5 | 120,8 |
| 3 | 262,9 | 1454,3 | 1251,6 | 1662,1 | 801,3 | 64,9 | 163,2 | 5,3 | 2,7 | 76,1 |
| 4 | 1082,1 | 1288,2 | 1446,0 | 1226,7 | 1457,7 | 175,4 | 11,5 | 150,7 | 166,8 | 189,1 |
| 5 | 1243,3 | 1730,2 | 503,8 | 1569,0 | 1642,1 | 136,9 | 140,2 | 18,2 | 173,6 | 40,7 |
| r = 3 | Modelo de pronóstico de 9 hrs. | | | | | | | | | |
| k | μ_k^1 | μ_k^2 | μ_k^3 | μ_k^4 | σ_k^1 | σ_k^2 | σ_k^3 | σ_k^4 | | |
| 1 | 267,8 | 1193,5 | 505,5 | 1785,0 | 157,4 | 183,4 | 50,6 | 147,6 | | |
| 2 | 1156,9 | 716,5 | 1376,2 | 791,3 | 36,4 | 12,1 | 2,7 | 95,6 | | |
| 3 | 382,5 | 1205,1 | 1688,7 | 1328,1 | 193,0 | 172,4 | 102,4 | 117,1 | | |
| 4 | 189,7 | 1250,0 | 1233,3 | 1318,1 | 147,0 | 3,7 | 63,5 | 36,6 | | |
| r = 4 | Modelo de pronóstico de 12 hrs. | | | | | | | | | |
| k | μ_k^1 | μ_k^2 | μ_k^3 | σ_k^1 | σ_k^2 | σ_k^3 | | | | |
| 1 | 307,7 | 555,3 | 615,2 | 53,4 | 4,9 | 60,6 | | | | |
| 2 | 716,5 | 995,7 | 1662,1 | 23,3 | 27,8 | 176,5 | | | | |
| 3 | 497,2 | 1253,3 | 1309,8 | 144,1 | 38,9 | 181,6 | | | | |
| r = 5 | Modelo de pronóstico de 15 hrs. | | | | | | | | | |
| k | μ_k^1 | μ_k^2 | σ_k^1 | σ_k^2 | | | | | | |
| 1 | 164,8 | 1535,8 | 103,6 | 176,9 | | | | | | |
| 2 | 179,8 | 498,8 | 42,2 | 52,0 | | | | | | |

Tabla 5.22 Coeficiente R² de calibración y validación, FIS Q-Q

| Coeficiente R ² para datos de calibración del FIS Q-Q | | | |
|--|-------|-------|-------|
| r=2 | r=3 | r=4 | r=5 |
| 0,978 | 0,959 | 0,933 | 0,898 |
| Coeficiente R ² para datos de validación del FIS Q-Q | | | |
| r=2 | r=3 | r=4 | r=5 |
| 0,970 | 0,926 | 0,865 | 0,793 |

Figura 5.31 Resumen del comportamiento del G.A., para la estimación de los parámetros del FIS Q-Q (r = 3, Pmut = 10% y Pmut = 0%)

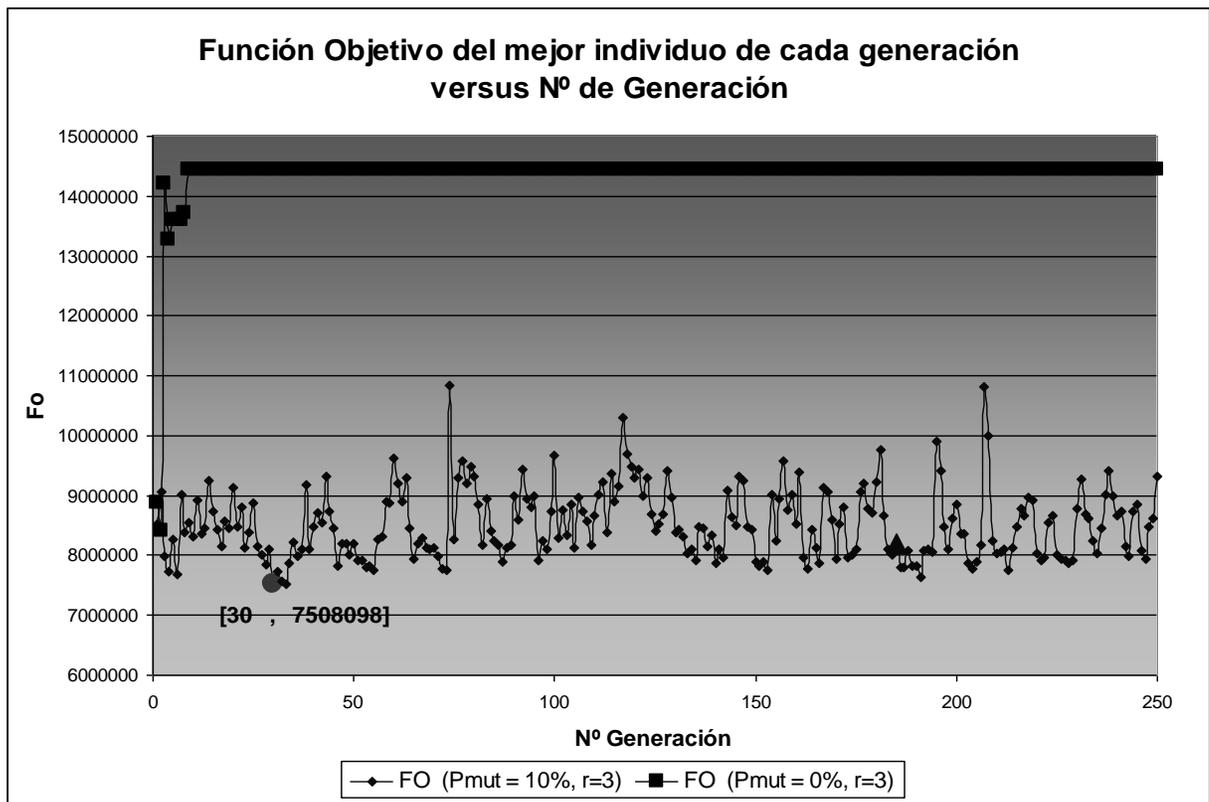


Figura 5.32 Resultados de la calibración de los FIS Q-Q

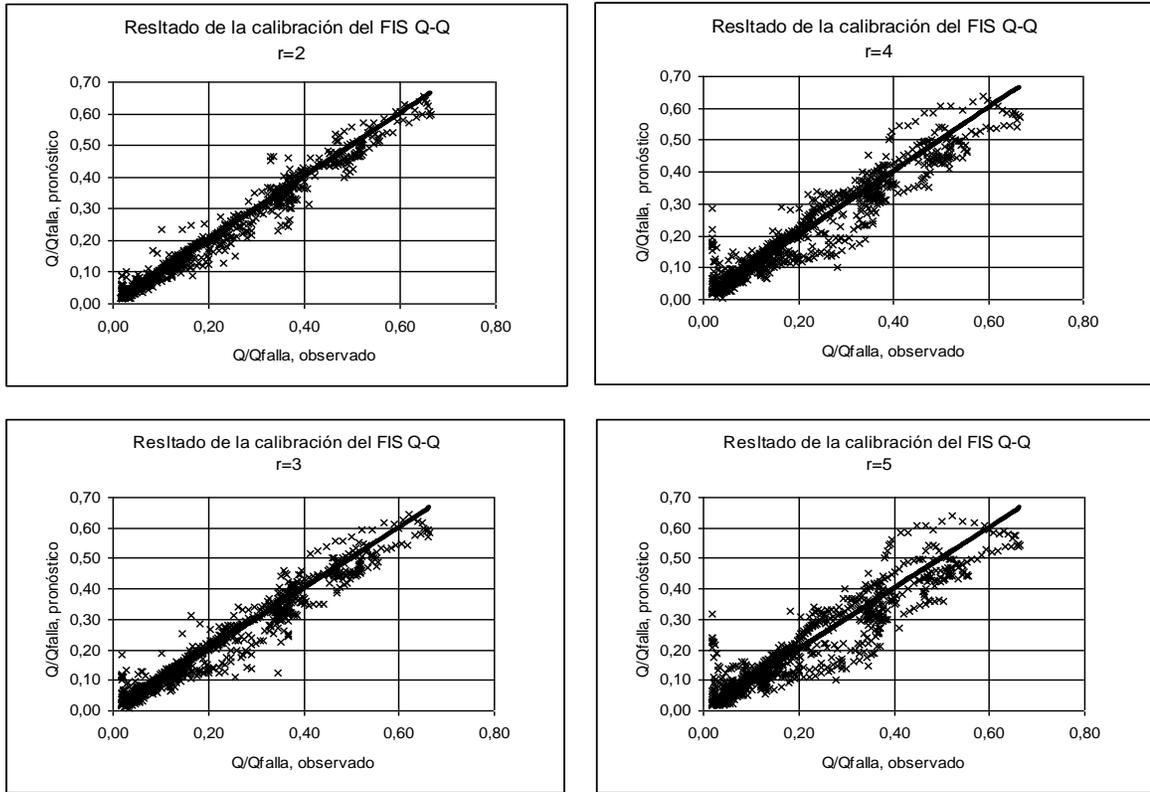
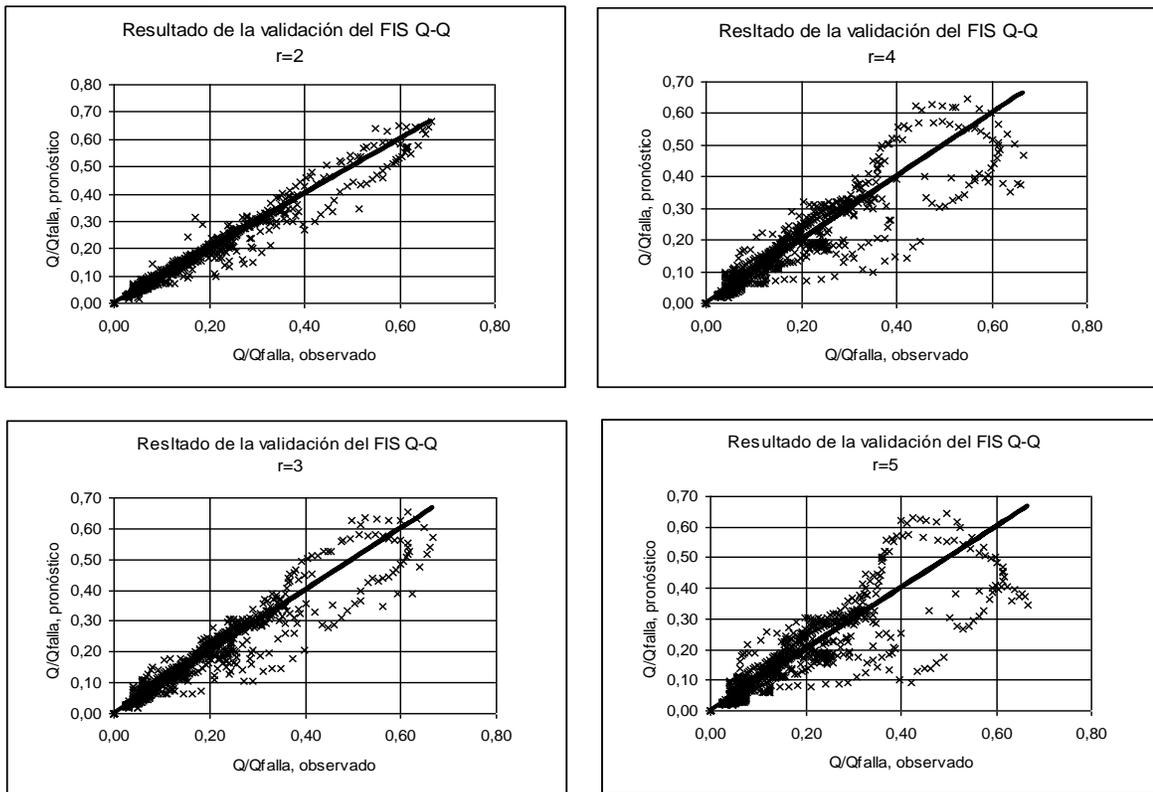


Figura 5.33 Resultados de la Validación de los FIS Q-Q



5.1.3 Análisis de Resultados de los modelos de pronóstico de caudales en la cuenca Piloto

En este punto se comparan los resultados obtenidos con los FIS y los modelos lineales de pronóstico de caudales, comparando los desempeños de los mismos en las cuencas donde fueron aplicados.

Esta evaluación pretende discutir aspectos referentes a los resultados brindados por los modelos de pronósticos de caudales que fueron empleados en las cuencas pertenecientes a la cuenca piloto. En particular, se analizan estos resultados bajo las directrices generales expuestas como objetivo de estudio en el capítulo 1.2, los cuales son los siguientes:

- Análisis de aplicabilidad de Lógica Difusa al pronóstico de caudales en tiempo real.
- Análisis del uso de algoritmo genético para la calibración de los modelos de pronóstico que emplean Lógica Difusa.

Bajo este enfoque se resume, mediante comparaciones cuantitativas y cualitativas, la conveniencia del uso de los FIS para el pronóstico de caudales en tiempo real, mediante el uso de la metodología planteada para estos fines. Además, se estudia el comportamiento del G.A para la calibración de los FIS. Todo lo anterior, con el propósito de dilucidar la metodología que sea más conveniente aplicar para la modelación de todos los sectores que son incluidos en el SATR.

En concordancia a lo señalado anteriormente, para evaluar el desempeño de los modelos se comparan sus bondades de ajuste a través de los coeficientes R^2 que éstos entregan. Además, otro criterio de comparación se obtiene considerando el índice de aciertos en el pronóstico de caudales que superan un cierto umbral dado, en este caso el umbral es el valor de Q_{falla} empleado para presentar el Índice de Amenaza en cada subcuenca modelada. Los valores del Índice de Amenaza mayores que 1 indican una emergencia en el sistema. Por lo tanto, el índice de aciertos, en términos porcentuales, se obtiene como la fracción del total de emergencias observadas, para las cuales el modelo también pronostica caudales sobre el valor umbral, para un elemento perteneciente a la cuenca modelada (asociado a Q_{falla}), ya sea para los datos de calibración como de validación. De manera análoga, se define el índice de falsas alarmas como el número de horas en las que se pronostica una emergencia, cuando en realidad ésta no ocurre, con respecto al total de emergencias observadas.

a) Resultados de los modelos lineales P-Q Y FIS P-Q

En general, todos los modelos de pronóstico de caudales en tiempo real estudiados entregan pronósticos con una precisión adecuada para adelantos de tres horas, sin embargo los resultados obtenidos para una antelación de seis horas son bastante más modestos, salvo en el caso de los modelos aplicados para el pronóstico de caudales en la estación Mataquito en Licantén, donde se obtienen resultados razonablemente precisos en ambos casos. Lo anterior se aprecia en la Tabla 5.23.

Por otro lado, se aprecia en la Tabla 5.23 que los FIS P-Q, en la mayoría de los resultados, no entregan pronósticos ostensiblemente más precisos que los modelos lineales P-Q. Lo anterior se resume en la Figura 5.34, donde también es posible notar el peor desempeño global que se obtiene de la aplicación recursiva de los modelos de pronóstico. En la Tabla 5.24 se presenta el resumen del desempeño de los modelos durante episodios de emergencia simulados y observados.

Se puede observar en la Tabla 5.24, que bajo este criterio de evaluación los FIS P-Q entregan una mejora en los pronósticos realizados, aunque poco significativa, con respecto a los modelos lineales. Este hecho se manifiesta de manera más clara en las figuras 5.35 y 5.36.

En las figuras 5.35 y 5.36 también se aprecia que el índice de falsas alarmas aumenta particularmente para las aplicaciones recursivas de los modelos de pronóstico, i.e. para un adelanto de seis horas, en las subcuencas más altas.

La respuesta de las cuencas altas, afluentes al río Matatquito en Licantén, a los pulsos de precipitación es más rápida (menores tiempos de concentración), lo que se traduce en una mayor disminución de la precisión de los pronósticos de seis horas con respecto a los de tres horas. Por lo tanto, el supuesto de mantener constante la variable exógena en el cálculo recursivo, dado que no se disponen de pronósticos de precipitación, no es lo suficientemente adecuado.

Tabla 5.23 Resumen coeficientes R² de ajuste de los modelos implementados en la cuenca piloto

| Resumen Coeficiente R ² de ajuste modelos aplicados en el Río Teno en junta con el Claro | | |
|---|-------------|------------|
| Modelo lineal P-Q | | |
| Antelación de pronóstico | Calibración | Validación |
| $\Delta = 3$ hrs. | 0,956 | 0,968 |
| $2\Delta = 6$ hrs. | 0,850 | 0,873 |
| FIS P-Q | | |
| Antelación de pronóstico | Calibración | Validación |
| $\Delta = 3$ hrs. | 0,958 | 0,982 |
| $2\Delta = 6$ hrs. | 0,862 | 0,901 |
| Resumen Coeficiente R ² de ajuste modelos aplicados en el Río Palos en Colorado | | |
| Modelo lineal P-Q | | |
| Antelación de pronóstico | Calibración | Validación |
| $\Delta = 3$ hrs. | 0,962 | 0,952 |
| $2\Delta = 6$ hrs. | 0,925 | 0,899 |
| FIS P-Q | | |
| Antelación de pronóstico | Calibración | Validación |
| $\Delta = 3$ hrs. | 0,970 | 0,980 |
| $2\Delta = 6$ hrs. | 0,928 | 0,877 |
| Resumen Coeficiente R ² de ajuste modelos aplicados en el Río Mataquito en Licantén | | |
| Modelo lineal P-Q | | |
| Antelación de pronóstico | Calibración | Validación |
| $\Delta = 3$ hrs. | 0,995 | 0,993 |
| $2\Delta = 6$ hrs. | 0,970 | 0,950 |
| FIS P-Q | | |
| Antelación de pronóstico | Calibración | Validación |
| $\Delta = 3$ hrs. | 0,995 | 0,982 |
| $2\Delta = 6$ hrs. | 0,976 | 0,937 |

Tabla 5.24 Resumen del desempeño de los modelos lineales P-Q y FIS P-Q implementados en las cuencas pertenecientes a la cuenca piloto (0*: No se observan datos sobre el caudal umbral Qfalla)

| Tabla resumen de desempeño de los modelos P-Q implementados en las cuencas pertenecientes a la cuenca piloto | | | | | | | | |
|--|---|--|-------------------------|-------------------------------|--|------------------------|------------------------------|---|
| Río Teno en junta con Claro (Qfalla = 370 m3/s) | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| Lineal P-Q pronóstico 3 hrs. | 95 | 100 | 88 | 11 | 7 | 89 | 14 | 11 |
| Lineal P-Q pronóstico 6 hrs. | 95 | 100 | 76 | 13 | 19 | 93 | 16 | 7 |
| FIS P-Q pronóstico 3 hrs. | 95 | 100 | 86 | 10 | 9 | 89 | 14 | 11 |
| FIS P-Q pronóstico 6 hrs. | 95 | 100 | 76 | 13 | 19 | 93 | 16 | 7 |
| Río Palos en junta con Colorado (Qfalla = 240 m3/s) | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| Lineal P-Q pronóstico 3 hrs. | 64 | 28 | 55 | 10 | 9 | 24 | 4 | 4 |
| Lineal P-Q pronóstico 6 hrs. | 64 | 28 | 51 | 13 | 13 | 22 | 4 | 6 |
| FIS P-Q pronóstico 3 hrs. | 64 | 28 | 56 | 13 | 8 | 26 | 1 | 2 |
| FIS P-Q pronóstico 6 hrs. | 64 | 28 | 54 | 17 | 10 | 22 | 4 | 6 |
| Río Mataquito en Licantén (Qfalla = 2700 m3/s) | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| Lineal P-Q pronóstico 3 hrs. | 13 | 0* | 12 | 1 | 1 | ----- | ----- | ----- |
| Lineal P-Q pronóstico 6 hrs. | 13 | 0* | 10 | 3 | 3 | ----- | ----- | ----- |
| FIS P-Q pronóstico 3 hrs. | 13 | 0* | 12 | 1 | 1 | ----- | ----- | ----- |
| FIS P-Q pronóstico 6 hrs. | 13 | 0* | 10 | 3 | 3 | ----- | ----- | ----- |

Figura 5.34 Comparación coeficientes R^2 de ajuste entre los FIS P-Q y modelos lineales P-Q

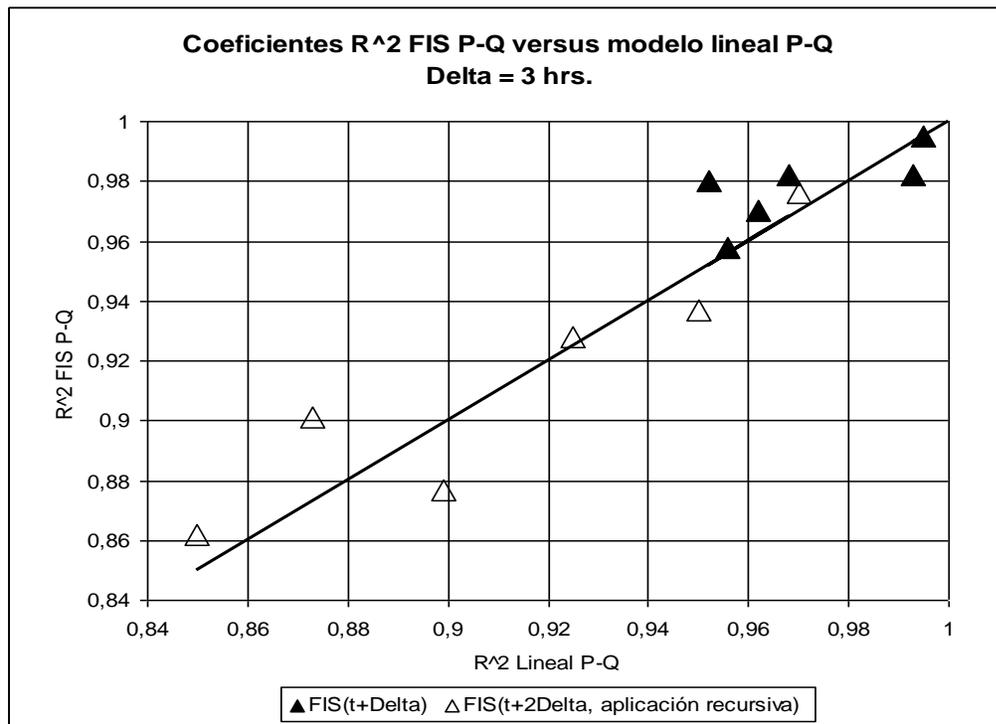


Figura 5.35 Índice de aciertos FIS P-Q versus índice de aciertos lineal P-Q

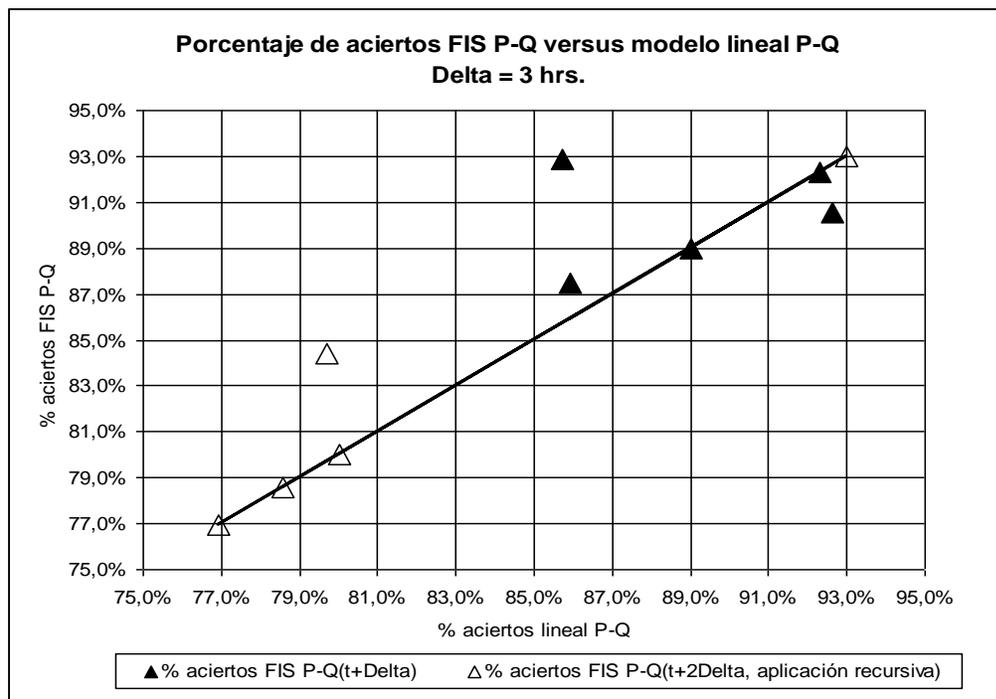
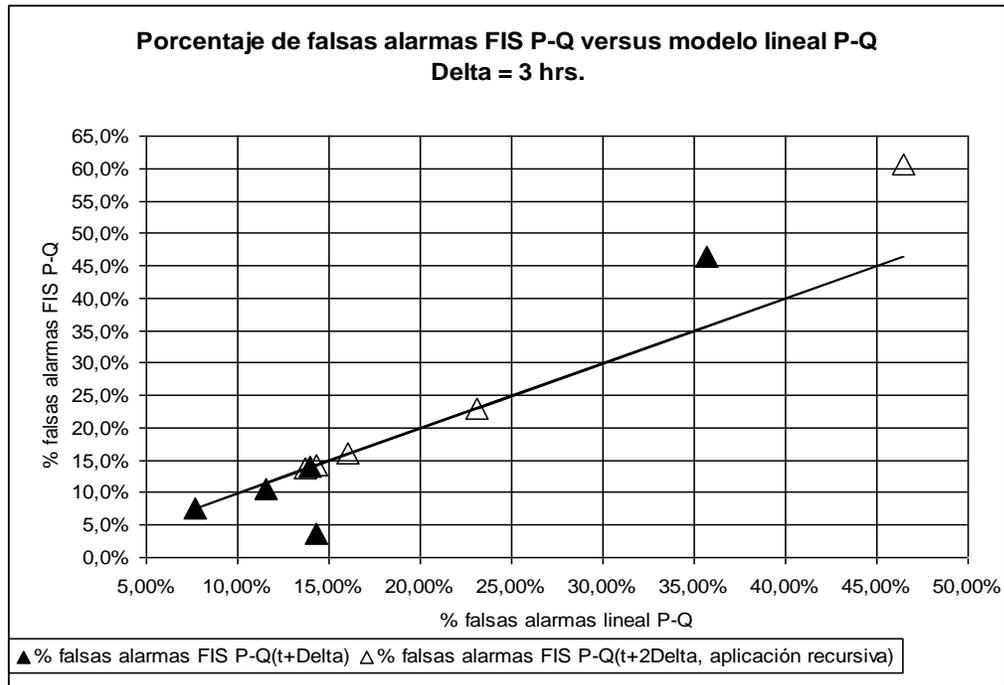


Figura 5.36 Índice de falsas alarmas FIS P-Q versus índice de falsas alarmas lineal P-Q



b) Resultados de los modelos lineales Q-Q Y FIS Q-Q

Estos modelos son implementados sólo en la estación limnigráfica Mataquito en Licantén, donde, según lo presentado en las Figuras 5.14, 5.15, 5.32 y 5.33, los modelos de pronóstico del tipo Q-Q, en general, presentan una precisión aceptable para tiempos iguales o inferiores a 9 hrs, es decir para valores de $r = \{1, 2, 3\}$.

Se obtiene que tanto los modelos lineales Q-Q, como FIS Q-Q, entregan mejores ajustes que los modelos P-Q para un horizonte de pronóstico de seis horas ($r=2$), según se aprecia de comparar los coeficientes R^2 de ajuste entre estos modelos.

Con el objetivo de evaluar el desempeño de los FIS Q-Q con respecto a los modelos lineales Q-Q, se presenta en la Figura 5.37 y Figura 5.38 una comparación gráfica de los coeficientes R^2 de ajuste de estos modelos. En particular, se observa en la Figura 5.38 que los FIS Q-Q presentan un mejor ajuste, singularmente para $r = 3$, con respecto a los modelos lineales Q-Q, aunque esta mejora sea de relativa significancia. Además, en la Figura 5.37 se aprecia un claro sobre ajuste de todos los modelos Q-Q para valores de r mayores que tres, lo cual queda de manifiesto por la disminución de los valores del coeficiente R^2 obtenidos para los datos de validación con respecto a los coeficientes calculados para los datos de calibración.

Figura 5.37 Resumen comparativo de los coeficientes R^2 de ajuste de los modelos lineal Q-Q y FIS Q-Q.

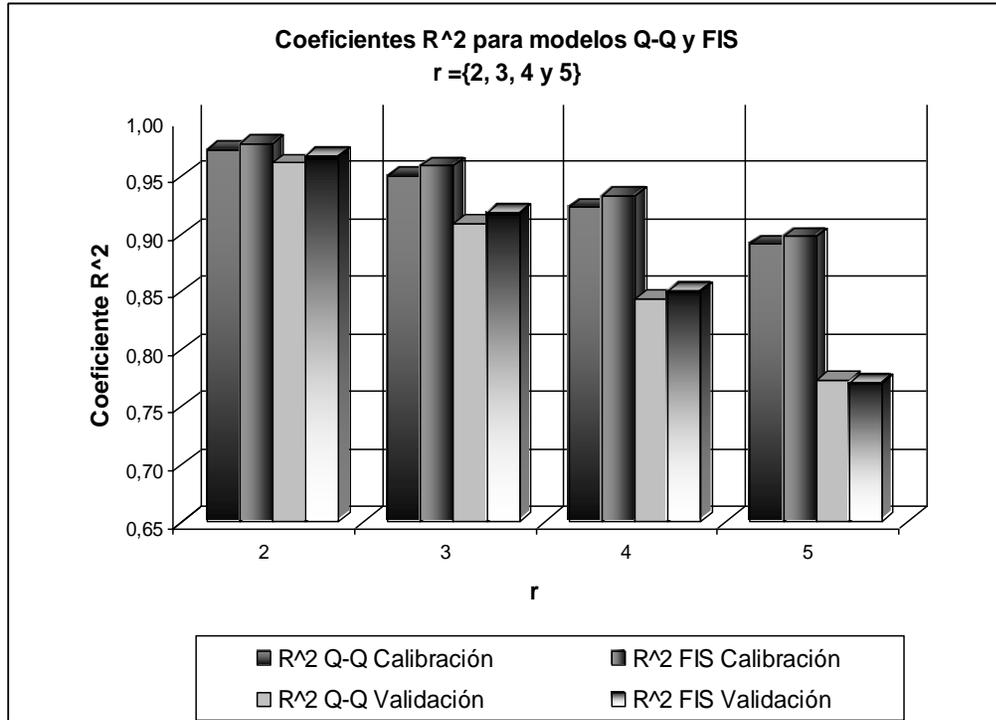
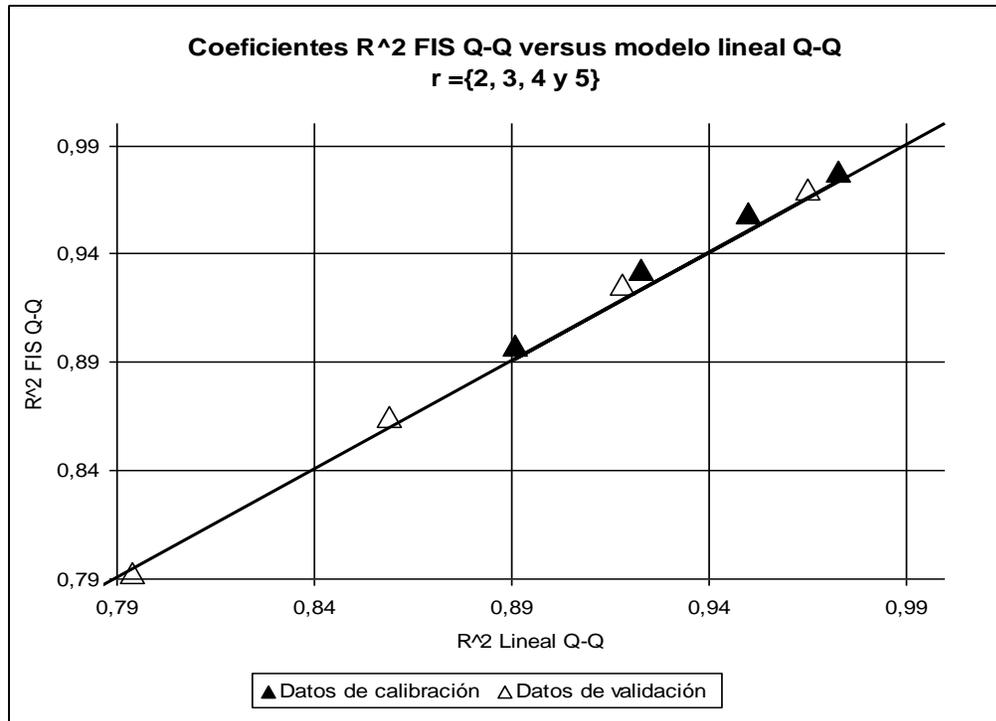


Figura 5.38 Comparación de los coeficientes R^2 de ajuste entre FIS Q-Q y modelos lineales Q-Q



c) Análisis del empleo del G.A. en la calibración de los FIS de pronóstico de caudales

Como puede apreciarse en todas las aplicaciones del G.A. para la calibración de los FIS, la “convergencia” del algoritmo es bastante errática y tortuosa, pudiendo cuestionarse la validez de los parámetros estimados, en cuanto éstos pueden proveer soluciones que no necesariamente sean la “óptima”. Sin embargo, en todos los casos los parámetros encontrados entregan ajustes razonables de los modelos asociados.

Además, es posible apreciar que la calibración de los FIS mediante G.A. está altamente sujeta al operador de mutación, el cual permite, tal como lo señala la bibliografía especializada, entregar una adecuada diversidad en las poblaciones generadas, impidiendo la convergencia a óptimos locales de la heurística empleada. Este hecho se ejemplifica claramente en la Figura 5.31, donde se calibra el FIS Q-Q con los mismos parámetros del G.A, salvo que en un caso se utiliza un probabilidad de mutación del 10% y en el otro del 0%, apreciándose que para el caso de $P_{mut} = 0\%$ el G.A. converge rápidamente, pero a una solución que presenta una heurística “FO” que casi duplica a la obtenida en el otro caso.

Finalmente, se observó que el G.A. demanda importantes recursos computacionales y que el tiempo total de ejecución es altamente dependiente del número de observaciones y tamaño de la población que se utilice para la calibración de los FIS.

d) Conclusiones sobre el uso de los FIS para el pronóstico de caudales

En general, los FIS_{Sugeno} permiten obtener mejoras en el ajuste, aunque poco significativas, con respecto a los pronósticos que entregan los modelos lineales, en todas las aplicaciones estudiadas. Por otro lado, los FIS y la calibración de los mismos mediante el G.A. son de alta complejidad en comparación a los modelos lineales. Esta complejidad se refleja en un significativo aumento en la cantidad de parámetros y en una estructura topológica más intrincada, por lo que las mejoras de los pronósticos que entregan los FIS son poco significativas en relación a la complejidad de éstos.

En consecuencia, se estima poco conveniente el uso en la VII región de los FIS para el pronóstico de caudales en tiempo real. Por lo tanto, para la modelación de todas las cuencas incluidas en el SATR se emplean modelos lineales concentrados para el pronóstico de caudales.

5.2 ÍNDICES DE RIESGO COMUNALES EN LA CUENCA PILOTO

Se evaluará la aplicación de los FIS para la definición de índices de riesgo “agregados” por comunas, pertenecientes a la cuenca piloto, en las cuales se presenta un conjunto de elementos bajo riesgo.

En la obtención de estos índices de riesgo se emplearán los FIS tipo Mandami, tal como se señala en el capítulo 3.4, para los elementos bajo riesgo pertenecientes a la Hoya del río Mataquito. Un esquema de ubicación de estas comunas y de los puntos amagados es presentado en la figura 5.39. Las comunas pertenecientes al valle del río Mataquito que poseen elementos bajo riesgo son las siguientes:

- Curepto
- Curicó
- Hualañé
- Molina
- Licantén
- Rauco
- Romeral

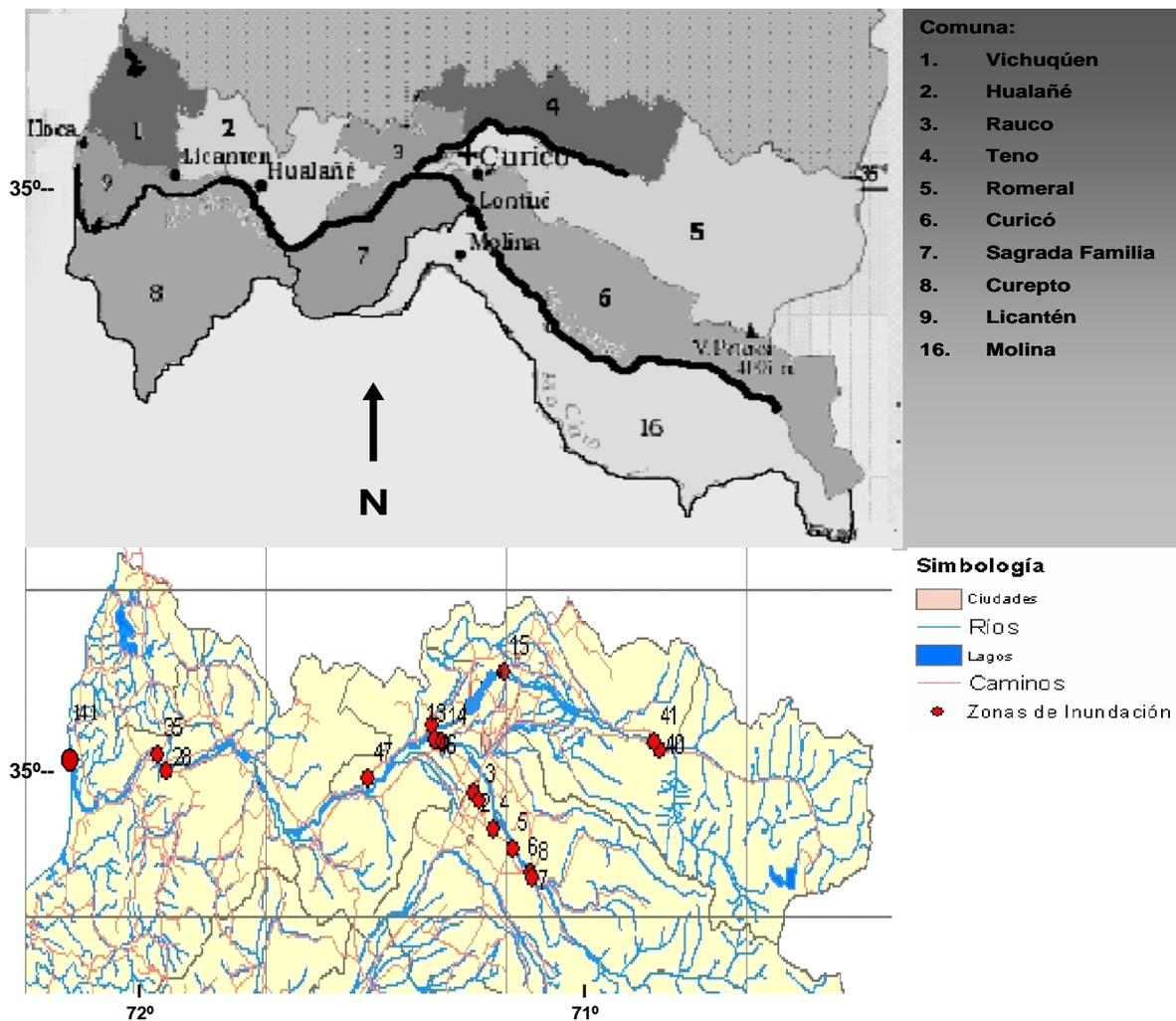
A su vez, la ubicación (coordenadas UTM) y propiedades de los puntos amagados pertenecientes a estas comunas se presenta en la tabla 4.59, de donde se resume en la tabla 5.25 los sectores que se encuentran dentro del valle del río Mataquito en dichas comunas.

Para obtener los índices de riesgo individuales “I_r” de los puntos o elementos bajo riesgo se ocupa la ecuación 3.19, ya que todos éstos afectan a un número inferior a 10.000 hab., como se aprecia en la tabla 5.25.

Tabla 5.25 Comunas de los elementos bajo riesgo en el Valle del río Mataquito

| Comuna | Nº Punto | Q falla (m3/s) | Vulnerabilidad | Elemento | Población >10,000 hab Si =1, No=0 | Cuenca Asociada |
|-----------------|----------|----------------|----------------|----------|-----------------------------------|-----------------------|
| Curepto | 28 | 800 | 1 | 50 | 0 | Mataquito en Licantén |
| Curicó | 15 | 210 | 3 | 50 | 0 | Teno en Claro |
| | 13 | 64 | 2 | 100 | 0 | Palos en Colorado |
| | 14 | 64 | 2 | 100 | 0 | Palos en Colorado |
| Hualañé | 35 | 2700 | 1 | 50 | 0 | Mataquito en Licantén |
| Molina | 2 | 240 | 3 | 50 | 0 | Palos en Colorado |
| | 3 | 240 | 3 | 50 | 0 | Palos en Colorado |
| | 4 | 240 | 3 | 40 | 0 | Palos en Colorado |
| | 5 | 240 | 2 | 50 | 0 | Palos en Colorado |
| | 6 | 240 | 3 | 40 | 0 | Palos en Colorado |
| | 7 | 160 | 3 | 40 | 0 | Palos en Colorado |
| | 8 | 160 | 3 | 40 | 0 | Palos en Colorado |
| Licantén | 141 | 1700 | 3 | 40 | 0 | Mataquito en Licantén |
| Rauco | 46 | 210 | 2 | 60 | 0 | Teno en Claro |
| | 47 | 1500 | 2 | 50 | 0 | Mataquito en Licantén |
| Romeral | 40 | 370 | 3 | 40 | 0 | Teno en Claro |
| | 41 | 370 | 3 | 40 | 0 | Teno en Claro |

Figura 5.39 División comunal de la Hoya del Río Mataquito



5.2.1 Estructura de los Índices de Riesgo Comunales

El esquema topológico de los FIS empleados contempla como variable de entrada los “ I_r ” individuales de los elementos pertenecientes a la comuna correspondiente, para cierto instante “ t ”, mientras que la salida del FIS corresponde al Índice de Riesgo comunal I_r^{Comuna} para el mismo instante. Consecuentemente, se definen estos términos de la siguiente forma:

- V_k : Corresponde a una variable de entrada del FIS y es igual al Índice de Riesgo individual del elemento k -ésimo “ $I_r^k(t)$ ” perteneciente a la comuna en la cual se obtiene el índice agregado, para el instante “ t ” (ver esquema de la Figura 3.17). Donde $k = \{1, \dots, p\}$, siendo “ p ” el número de elementos bajo riesgo de la comuna.
- $I_r^{\text{Comuna}}(t)$: Es el Índice de Riesgo comunal en el instante “ t ”, el cual se obtiene como salida del FIS Mandami, tal que:

$$I_r^{\text{Comuna}}(t) = \text{FIS}_{\text{Mandami}}(V_1, \dots, V_k, \dots, V_p)$$

La estructura topológica de los FIS contempla un total constante de cuatro reglas o inferencias ($n=4$), y que el valor de la membresía para una regla i -ésima “ W_i ” ($i=\{1, \dots, n\}$) se determina mediante la operación Unión (ecuación 2.15) entre los conjuntos difusos, definiéndose esta S-norma por el máximo de dichas funciones al ser evaluadas, tal como se presentó en la ecuación 3.9.

Para obtener la salida “difusa” del FIS de tipo Mandami se utiliza la operación Unión de las funciones de implicancia “ A_i ” (ecuación 2.11), estas funciones de implicancia se interpretarán de la siguiente forma:

- A_1 : $I_r^{\text{Comuna}}(t)$ es bajo
- A_2 : $I_r^{\text{Comuna}}(t)$ es Medio bajo
- A_3 : $I_r^{\text{Comuna}}(t)$ es Medio Alto
- A_4 : $I_r^{\text{Comuna}}(t)$ es Alto

Análogamente, las funciones de pertenencia “ MF_k^i ” también interpretan el estado individual de los elementos bajo riesgo, de modo que:

- MF_k^1 : V_k es bajo
- MF_k^2 : V_k es Medio
- MF_k^3 : V_k es Alto
- MF_k^4 : V_k es Muy Alto

En particular, se emplearán funciones de pertenencia “ MF_k^i ” e implicancia “ A_i ” triangulares y trapezoidales, las que fueron presentadas en las ecuaciones 2.5 y 2.9, respectivamente. Las funciones de pertenencia “ MF_k^i ” y los parámetros de las mismas, son iguales para todas las variables de entrada, lo anterior se resume en la

restricción de la ecuación 5.14. Por lo tanto, sólo se definen cuatro funciones de pertenencia para todas las variables de entrada.

$$MF_k^i = MF^i \quad \forall k \in \{1, \dots, p\} \quad \text{EC 5.14}$$

Los parámetros de las funciones de implicancia y pertenencia utilizados para determinar los índices de riesgo en todas las comunas se presentan en la tabla 5.26. Gráficamente estos conjuntos difusos tienen la forma que se presenta en la figura 5.40. Los conjuntos difusos señalados anteriormente se pueden caracterizar mediante las propiedades que se señalan en el capítulo 3.3, lo cual se presenta en la tabla 5.27.

Además, se obtienen las matrices de inclusión difusa “S” para las funciones de pertenencia y de implicancia que se presentan en las figuras 5.41 y 5.42, respectivamente.

Tabla 5.26 Parámetros de los conjuntos difusos

| Funciones de pertenencia “ $MF^i(V_k)$ ” | Funciones de implicancia “ $A_i(I_r^{Comuna(t)})$ ” |
|---|--|
| $MF^1 =$ Trapezoidal [0,0,60,80] | $A_1 =$ Trapezoidal [0,0,60,60] |
| $MF^2 =$ Triangular [60,80,100] | $A_2 =$ Triangular [50,60,70] |
| $MF^3 =$ Triangular [80,100,120] | $A_3 =$ Triangular [60,90,110] |
| $MF^4 =$ Trapezoidal [100,120, Ω , Ω] (Donde: $\Omega \rightarrow \infty$) | $A_4 =$ Trapezoidal [100,120,200,200] |

Tabla 5.27 Propiedades de los conjuntos difusos

| Propiedades de los conjuntos difusos | | | |
|--------------------------------------|------------------|------------------|--------------|
| Conjunto | Soporte | Núcleo | Cardinalidad |
| MF1 | [0,80] | [0,60] | 70 |
| MF2 | [60,100] | 80 | 20 |
| MF3 | [80,120] | 100 | 20 |
| MF4 | [100, Ω] | [120, Ω] | (*) |
| A1 | [0,60] | [0,60] | 60 |
| A2 | [50,70] | 60 | 10 |
| A3 | [60,110] | 90 | 25 |
| A4 | [100, 200] | [120, 200] | 90 |

(*): Cardinalidad infinita

Figura 5.40 Gráficos de los Conjuntos difusos

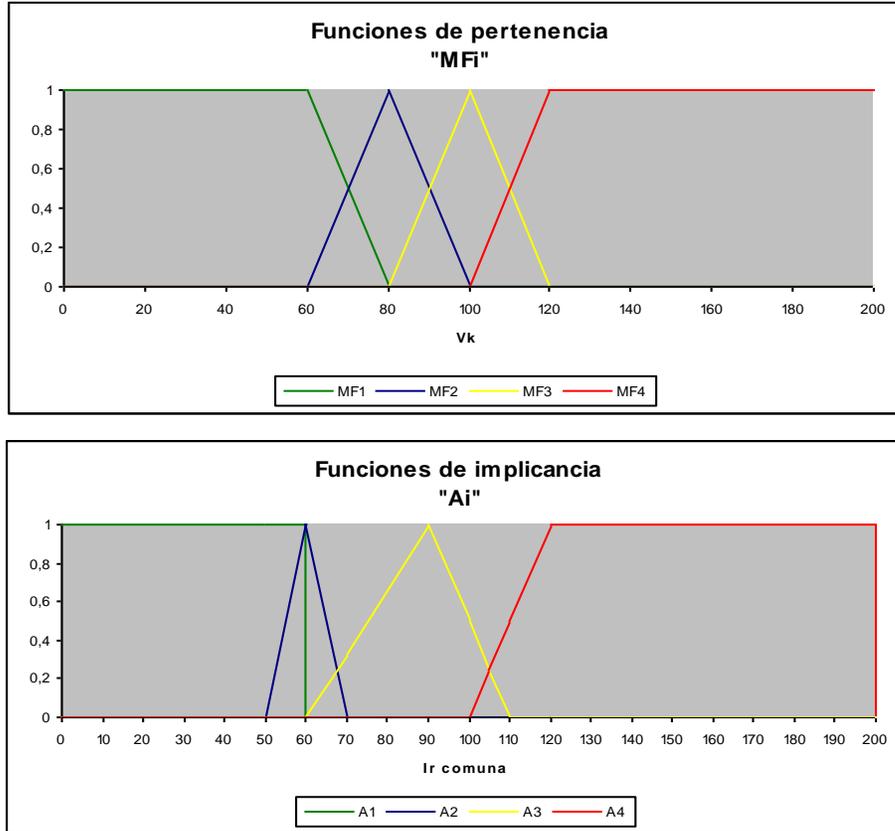


Figura 5.41 Matriz “S” de las funciones de pertenencia “MFⁱ”.

$$S(MF) = \begin{bmatrix} & MF^1 & MF^2 & MF^3 & MF^4 \\ MF^1 & 1 & 1/14 & 0 & 0 \\ MF^2 & 1/4 & 1 & 1/4 & 0 \\ MF^3 & 0 & 1/4 & 1 & 1/4 \\ MF^4 & 0 & 0 & 0(*) & 1 \end{bmatrix}$$

$$(*) : S(MF^4, MF^3) = \lim_{\Omega \rightarrow \infty} \frac{5}{\Omega - 10}$$

Figura 5.42 Matriz “S” de las funciones de implicancia “A_i”.

$$S(A) = \begin{bmatrix} & A_1 & A_2 & A_3 & A_4 \\ A_1 & 1 & 1/12 & 0 & 0 \\ A_2 & 1/2 & 1 & 1/8 & 0 \\ A_3 & 0 & 1/20 & 1 & 1/8 \\ A_4 & 0 & 0 & 1/72 & 1 \end{bmatrix}$$

Es importante destacar que estas matrices son tri diagonales, debido a que no existen intervalos en el espacio de las variables donde se traslapen más de dos conjuntos difusos a la vez. Lo anterior es lógico, en el sentido que intuitivamente no se esperaría que un valor sea simultáneamente “bajo”, “medio” y “alto” con cierto grado de cumplimiento en cada caso, esto podría interpretarse como una ambigüedad exagerada, sino que se intuye que un valor es por ejemplo “bajo-medio” o “medio-alto”.

Otra característica del FIS propuesto, es que las funciones de pertenencia “MFⁱ” están considerablemente traslapadas, este hecho queda de manifiesto en que el nivel de cubrimiento de nivel $\xi=0,5$ es el intervalo $[0,\Omega]$, es decir todo el espacio posible de valores de “V_k”.

Es necesario notar, que los índices comunales obtenidos mediante el empleo directo de los FIS antes planteados, fluctúan entre los valores en el eje horizontal del centro de gravedad de las funciones de implicancia extremas, tal como se señala en la ecuación 5.15. Esto, dado que cuando todos los “V_k” son lo suficientemente bajos la salida defuzzyficada del FIS corresponde a la proyección en la horizontal del centroide de A₁ “X_G(A₁)”, mientras que cuando todos los “V_k” son muy altos la salida defuzzyficada es igual a “X_G(A₄)”.

$$X_G(A_1) \leq I_r^{Comuna}(t) = FIS_{Mandami}(V_1, \dots, V_p) \leq X_G(A_4) \quad \text{EC 5.15}$$

Debido a lo señalado en el párrafo anterior, se obtiene el Índice de Riesgo comunal definitivo “I_R^{Comuna(t)}” re-escalando linealmente los valores entregados por el FIS, como se plantea en la ecuación 5.16.

$$I_R^{Comuna}(t) = I_R^{\max} \left[\frac{FIS_{Mandami}(V_1, \dots, V_p) - X_G(A_1)}{X_G(A_4) - X_G(A_1)} \right] \quad \text{EC 5.16}$$

Considerando que “X_G(A₁)” = 30, “X_G(A₄)” = 157 y definiendo el valor máximo del Índice de Riesgo Comunal “I_R^{max}” igual a 100, se obtiene de la ecuación 5.16 el “I_R^{Comuna(t)}” mediante la ecuación 5.17.

$$I_R^{Comuna}(t) = 100 \left[\frac{FIS_{Mandami}(V_1, \dots, V_p) - 30}{127} \right] \quad \text{EC 5.17}$$

Para obtener un valor cualitativo del Índice de Riesgo comunal, a partir de los índices de riesgo obtenidos con lo FIS tipo Mandami (sin reescalar), se propone el concepto de “grado de riesgo comunal” “G_r^{Comuna(t)}”, el cual es un valor discreto, de tal forma que “G_r^{Comuna(t)}” posee los siguientes valores:

- $G_r^{Comuna}(t) = 1$: Riesgo bajo.
- $G_r^{Comuna}(t) = 2$: Riesgo medio - bajo.
- $G_r^{Comuna}(t) = 3$: Riesgo medio - alto.
- $G_r^{Comuna}(t) = 4$: Riesgo Alto.

Empleando los Soportes de las funciones de implicancia “ A_i ” y la matriz $S(A)$, se define el grado de riesgo comunal de la forma que se señala en la ecuación 5.18.

$$\text{Sea: } \text{Soport}(A_i) = [\alpha_i, \beta_i] \quad i=\{1,2,3,4\}$$

$$\text{Si } \alpha_1 \leq I_r^{Comuna}(t) \leq \alpha_2 \Rightarrow G_r^{Comuna}(t) = 1$$

$$\text{Si } \beta_3 \leq I_r^{Comuna}(t) \Rightarrow G_r^{Comuna}(t) = 4$$

$$\text{Si } \alpha_4 \leq I_r^{Comuna}(t) < \beta_3 \Rightarrow G_r^{Comuna}(t) = 3$$

EC 5.18

$\forall i \in \{2,3\}$:

$$\text{Si } \beta_{i-1} \leq I_r^{Comuna}(t) \leq \alpha_{i+1} \Rightarrow G_r^{Comuna}(t) = i$$

$$\text{Si } \alpha_i \leq I_r^{Comuna}(t) < \beta_{i-1} \Rightarrow G_r^{Comuna}(t) = \begin{cases} i-1 & \text{Si } S(A_{i-1}, A_i) \geq S(A_i, A_{i-1}) \\ i & \text{en otro caso} \end{cases}$$

En este esquema está implícitamente supuesto que todas las funciones de implicancia A_i están traslapadas de a pares, supuesto que en esta aplicación se satisface y que es reflejado en que la matriz $S(A)$ es tridiagonal. Por lo tanto, se cumple siempre que α_{i-1} es menor α_i y que β_{i-1} es menor que β_i , con β_{i-1} mayor que α_i .

5.2.2 Resultados de la aplicación de los Índices de Riesgo Comunales

Los resultados de la aplicación de los índices de riesgo comunales en la Hoya del río Mataquito se presentan para las crecidas producidas en los meses de Mayo de los años 1991 y 1992, Julio de 1994 y Junio de 1997, para las fechas y horas que se señalan en la tabla 5.28.

Tabla 5.28

| Fechas y hora de las crecidas | | | |
|-------------------------------|------|---------------|-------|
| Fecha inicio | Hora | Fecha término | Hora |
| 16-05-1991 | 0:00 | 30-05-1991 | 23:00 |
| 23-05-1992 | 0:00 | 26-05-1992 | 23:00 |
| 22-07-1994 | 0:00 | 26-07-1994 | 23:00 |
| 15-06-1997 | 0:00 | 18-06-1997 | 23:00 |

Es importante señalar, que en el caso de las comunas de Licantén y Hualañé, se obtiene un solo un Índice de Riesgo agregado que representa a ambas, debido a que estas comunas son las más cercanas a la desembocadura del río Mataquito, y que las amenazas de inundación en ellas están directamente ligadas a crecidas en dicho cauce.

Por otro lado, en la comuna de Curepto se calcula de todas formas el Índice de Riesgo “agregado”, aunque sólo exista un elemento bajo riesgo dentro de ésta. Es importante señalar al respecto, que no se agregará esta comuna al índice de las comunas de Hualañé y Licantén debido a que si bien la amenaza del elemento bajo riesgo está asociada a los caudales observados en la desembocadura del río Licantén, la comuna de Curepto presenta otros elementos bajo riesgo fuera del valle del Mataquito (ver anexo A.1).

El resultado de la aplicación tanto de los índices de riesgo comunales, como de los grados de riesgo, para las crecidas ocurridas en las fechas que se presentan en la tabla 5.28, es resumido en los gráficos que se presentan en las figuras 5.43, 5.44, 5.45 y 5.46. Además, en dichas figuras se muestran los hidrogramas durante estas crecidas en las estaciones fluviométricas utilizadas.

Figura 5.43 Hidrogramas e Índices comunales (Mayo 1991)

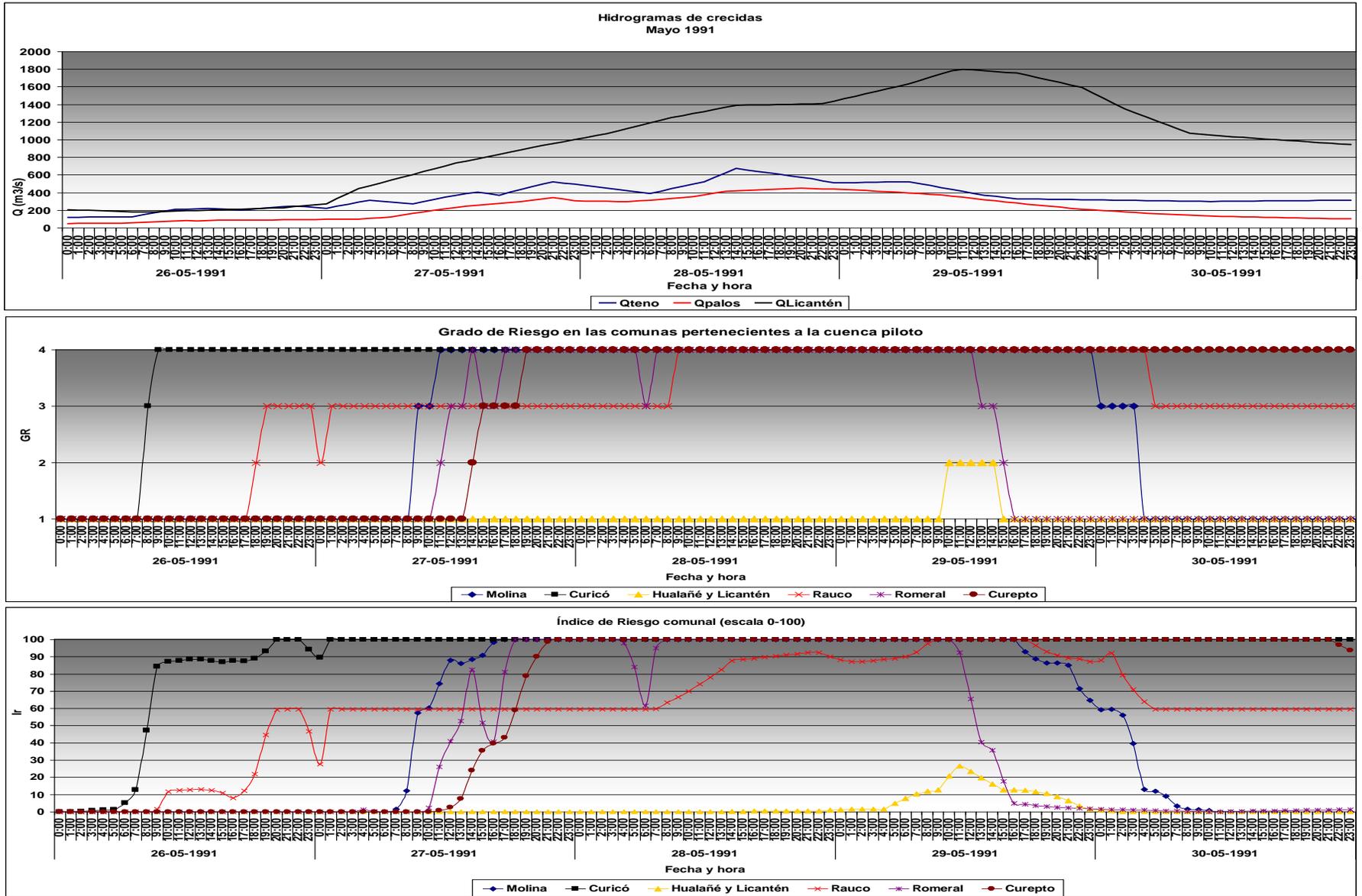


Figura 5.44 Hidrogramas e Índices comunales (Mayo 1992)

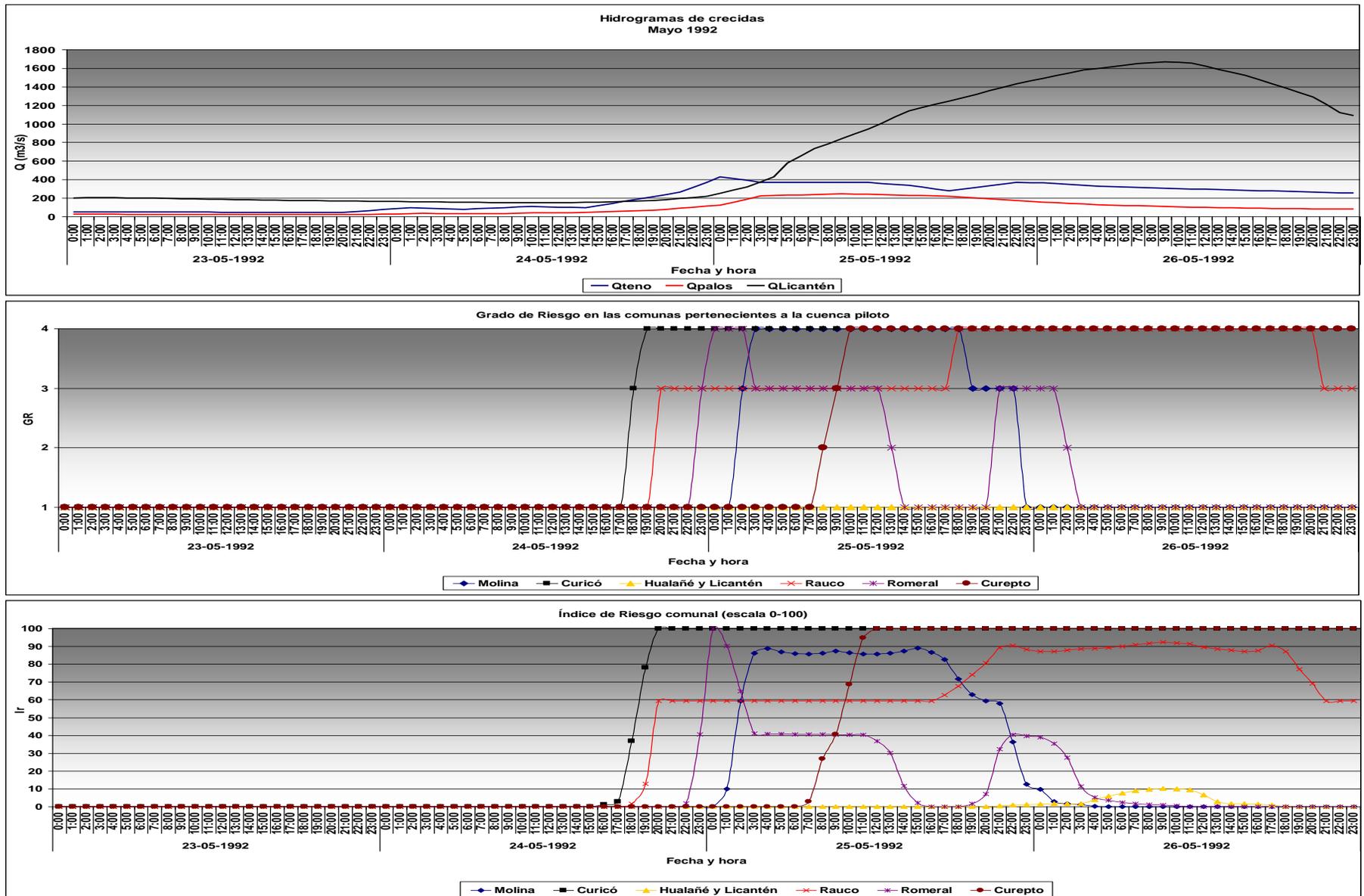


Figura 5.45 Hidrogramas e Índices comunales (Julio 1994)

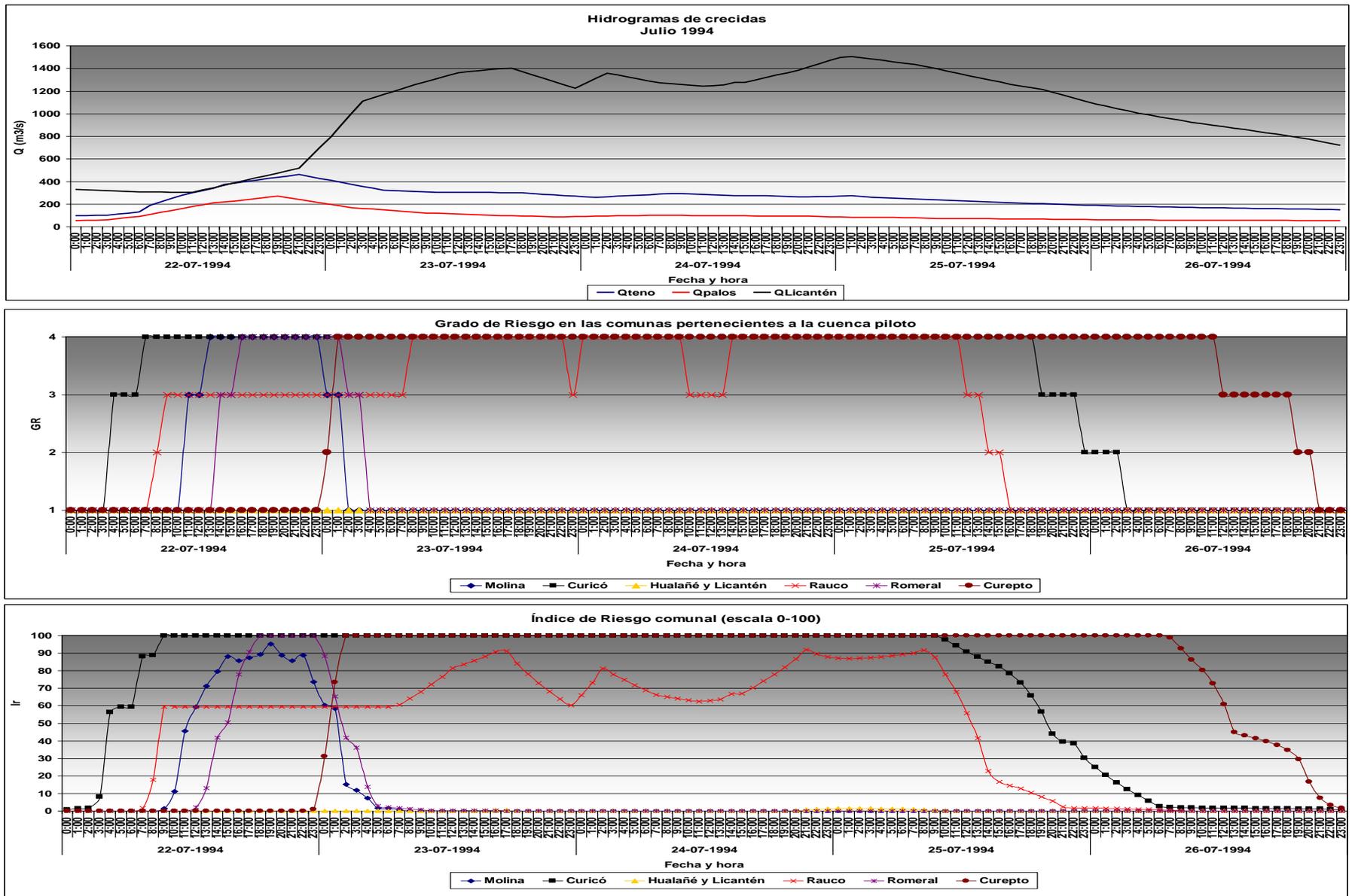
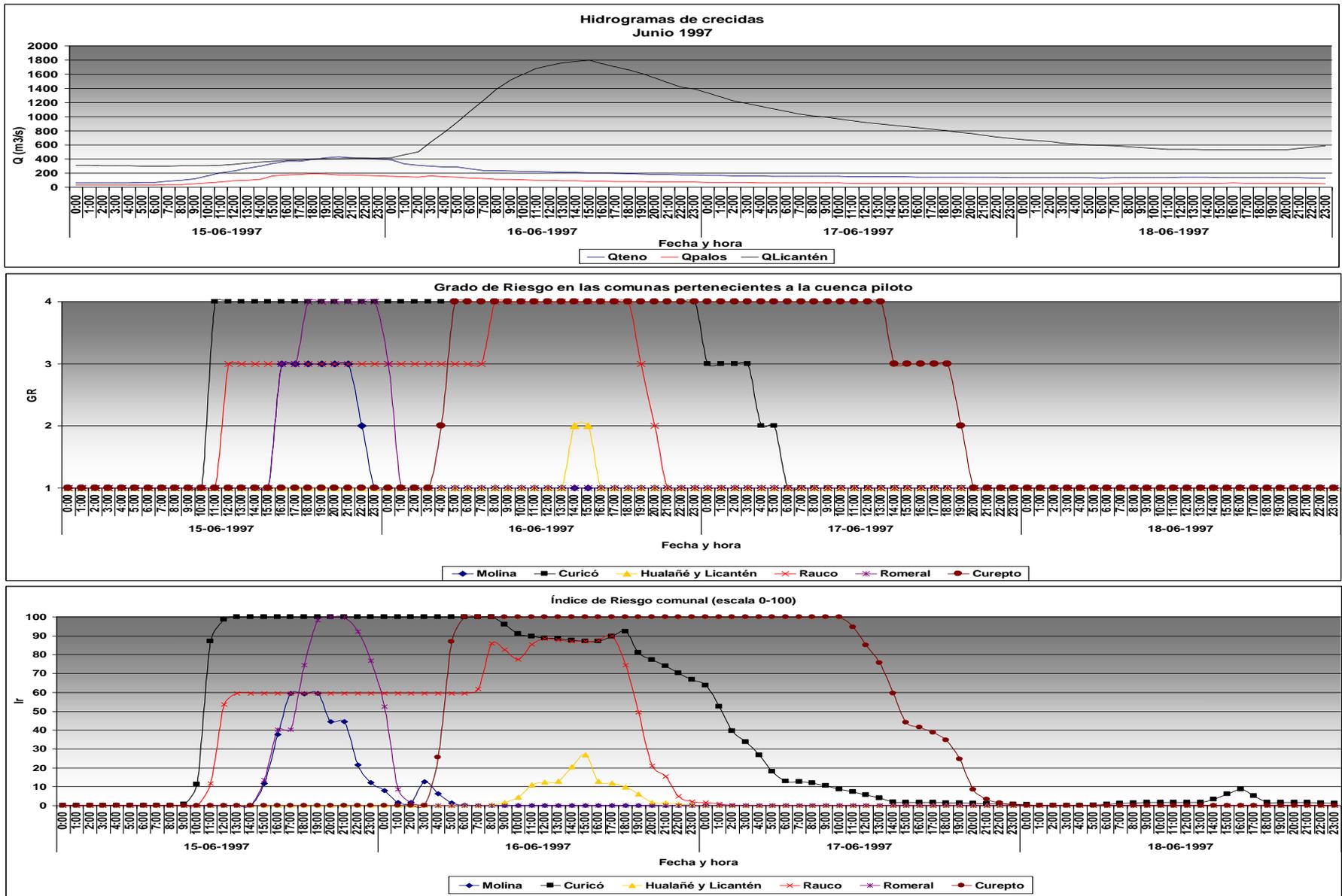


Figura 5.46 Hidrogramas e Índices comunales (Junio 1997)



5.2.3 Análisis del uso de los Índices Comunales

Para analizar la consistencia de los resultados, se compararon los índices obtenidos durante las crecidas ocurridas en las fechas presentadas en la tabla 5.28 (ver figuras 5.43, 5.44, 5.45 y 5.46) con la información recopilada durante la etapa de revisión de la prensa escrita para dichos episodios (anexo A.1). En particular, según el catastro de inundaciones, se presenta un resumen de los elementos afectados en estas crecidas en la tabla 5.29.

Tabla 5.29 Resumen de daños en los elementos bajo riesgo pertenecientes a las comunas de la Provincia de Curicó

| 1. CRECIDAS OCURRIDAS EN MAYO DE 1991 | | |
|---|---|------------------------|
| Fecha | Elementos amagados | Comuna afectada |
| 29-05-91 | Puntos 40 y 41: Aislamiento de la localidad de Los Queñes. | Romeral |
| 29-05-91 | Punto 46: Desborde del río Teno, provoca corte de camino. | Rauco |
| 30-05-1991 | Punto 141: Corte de camino (ruta J-60). | Licantén |
| 30-05-1991 | Punto 28: Anegamiento en la comuna de Curepto por desborde del río Mataquito. | Curepto |
| 30-05-1991 | Puntos 2, 3, 4, 5 y 6: Río Lontué amenaza con desbordarse. | Molina |
| 2. CRECIDAS OCURRIDAS EN MAYO DE 1992 | | |
| Fecha | Elementos amagados | Comuna afectada |
| Entre los días: 23-05-1992 y 26-05-1992 | Puntos 2, 3, 4, 5 y 6: Desborde del Río Lontué. | Molina |
| Entre los días: 23-05-1992 y 26-05-1992 | Puntos 13 y 14: Desborde del Río Lontué. | Curicó |
| 25-05-1992 | Punto 141: Corte de camino (ruta J-60). | Licantén |
| 3. CRECIDAS OCURRIDAS EN JULIO DE 1994 | | |
| Fecha | Elementos amagados | Comuna afectada |
| 25-07-1994 | Puntos 40 y 41: Aislamiento de la localidad de Los Queñes. | Romeral |
| 25-07-1994 | Punto 46: Desborde del río Teno, provoca corte de camino. | Rauco |
| 4. CRECIDAS OCURRIDAS EN JUNIO DE 1997 | | |
| Fecha | Elementos amagados | Comuna afectada |
| 16-06-1997 | Puntos 40 y 41: Aislamiento de la localidad de Los Queñes. | Romeral |

Según se puede comparar entre los resultados presentados en las Figuras 5.43, 5.44, 5.45 y 5.46, tanto los “ I_R ” como los “ G_r ” comunales son absolutamente consistentes con respecto a los hidrogramas registrados en las fechas concurrentes. Además, se aprecia un desfase lógico entre la información entregada por la prensa escrita y la fecha de ocurrencia de los valores máximos de los hidrogramas del orden de un día, por ejemplo lo anterior se aprecia en la crecida ocurrida los días 29 y 30 de Mayo de 1991, donde se informa de problemas en la comuna de Licantén el día 30, mientras que el máximo horario en la estación Mataquito en Licantén se registra durante el día 29. En adición a este hecho, también existe una antelación entre los índices determinados y la falla de los elementos, puesto que en muchos casos estos últimos se ubican a una distancia aguas abajo considerable con respecto a la estaciones limnográficas que les corresponden.

Por otro lado, se observa que no es recomendable obtener índices agregados entre las comunas de Licantén y Hualañé, puesto que éstas presentan elementos con umbrales de falla muy disímiles. Lo anterior queda de manifiesto en que los índices determinados en estas son siempre relativamente bajos, dado que en todas las crecidas estudiadas se observan valores de la amenaza muy altos en la comuna de Licantén mientras que en Hualañé estos son considerablemente menores. Según la prensa escrita, durante la mayoría de estos episodios la comuna de Licantén presenta importantes problemas de inundaciones.

Dado lo señalado en el párrafo anterior, es recomendable aplicar esta metodología de forma separada en ambas comunas tal como se realizó en el caso de Curepto, donde se obtuvo estos índices para un solo elemento bajo riesgo.

También es importante señalar, que en la comuna de Curicó los puntos 13 y 14 presentan inundaciones frecuentes, según es visto en la prensa escrita y por los testimonios entregados por lugareños, hecho que queda de manifiesto en los bajos umbrales de falla que estos presentan. Esto incide en que ésta sea la comuna más vulnerable de todas a las inundaciones, seguida de las comunas de Molina y Rauco, respectivamente.

Otro aspecto, que a juicio del autor merece un posterior análisis en futuras aplicaciones de los $FIS_{Mandami}$ para la estimación de índices de riesgo de inundación, es el estudio de la relación entre la estructura y propiedades de las matrices $S(A)$ y $S(MF)$, y el comportamiento de los “ I_R ” y “ G_r ”.

Lógicamente, esta metodología también puede ser aplicada en la modalidad de pronóstico, independiente de la forma en que los caudales se pronostiquen, lo que sumado al efecto de desfase natural de crecidas entre las estaciones de medición y las zonas amagadas, dado que estas se encuentran en la mayoría de los casos aguas arriba, permite que ésta sea una útil herramienta de conocimiento e interpretación de la información entregada por el SATR.

A la luz de los resultados obtenidos, se puede concluir que esta metodología es útil para interpretar en tiempo real los índices de riesgo de manera global, adicionando el hecho que esta puede ser aplicada a los índices de riesgo individuales de los elementos (por ejemplo se emplea en la Comuna de Curepto donde existe un solo elemento bajo riesgo), obteniéndose de esta forma un “ I_R ” continuo y escalado con rangos bien definidos y por lo tanto con sus respectivos valores de los “ G_r ”.

Es importante señalar, que en casi todas las cuencas en las se implementan modelos lineales de pronóstico de caudales P-Q, se emplea la medición de la variable exógena (precipitación) en las estaciones pluviográficas que se consideran como representativas de las condiciones de precipitación de estas, utilizando para la calibración y validación de estos modelos los datos en las estaciones pluviográficas indicadas en el capítulo 4.2, según sea la fecha del evento, para cada cuenca. Además, se presenta en cada una de estas cuencas la aplicación recursiva de estos modelos como se señala en la ecuación 3.6.

A continuación, se presenta un resumen de las estructuras y parámetros de estos modelos lineales, con los resultados obtenidos para las crecidas utilizadas en la calibración y validación de los mismos, además de los coeficientes R^2 de los ajustes respectivos.

5.3.1 Río Claro en Talca

En esta cuenca se identificó un modelo lineal P-Q (ecuación 3.4), para valores de los parámetros $k = 3$ y $r = 3$ (ecuaciones 3.1 y 3.2), con un intervalo de adelanto elemental de pronóstico " Δ " igual a 3 hrs. El valor de los parámetros estimados se presenta en la tabla 5.30.

Los resultados que se presentan a continuación pertenecen a los asociados al punto 25 ($Q_{falla} = 950 \text{ m}^3/\text{s}$), obteniéndose el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en las figuras 5.47 a 5.50, para las crecidas presentadas en las tablas 5.31 y 5.32. (Los hidrogramas adimensionalizados están en orden correlativo con respecto a la tabla de tormentas de calibración y validación)

Tabla 5.30 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico punto 25

| Δ (hrs.) | Pp. media anual (Pencahue) (mm./año) | Q_{falla} (m^3/s) | α | β | γ |
|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------|---------|----------|
| 3 | 582,2 | 950 | 1,96 | -0,98 | 1,39 |

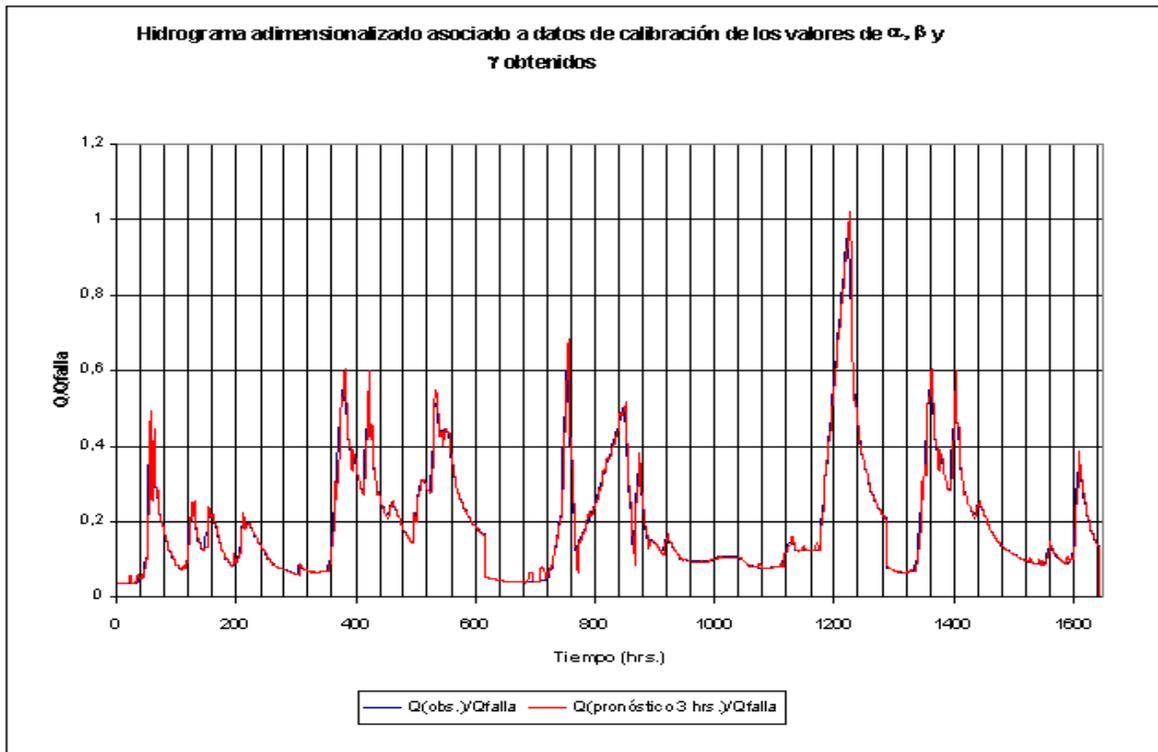
Tabla 5.31 Crecidas de calibración: "Río Claro en Talca"

| Tormentas de Calibración | | | |
|--------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 01-05-93 | 06:00 | 13-05-93 | 23:00 |
| 01-06-93 | 03:00 | 08-06-93 | 23:00 |
| 01-07-93 | 00:00 | 05-07-93 | 23:00 |
| 01-05-92 | 00:00 | 28-05-92 | 23:00 |
| 01-06-93 | 03:00 | 15-06-93 | 23:00 |

Tabla 5.32 Crecidas de validación: “Río Claro en Talca”

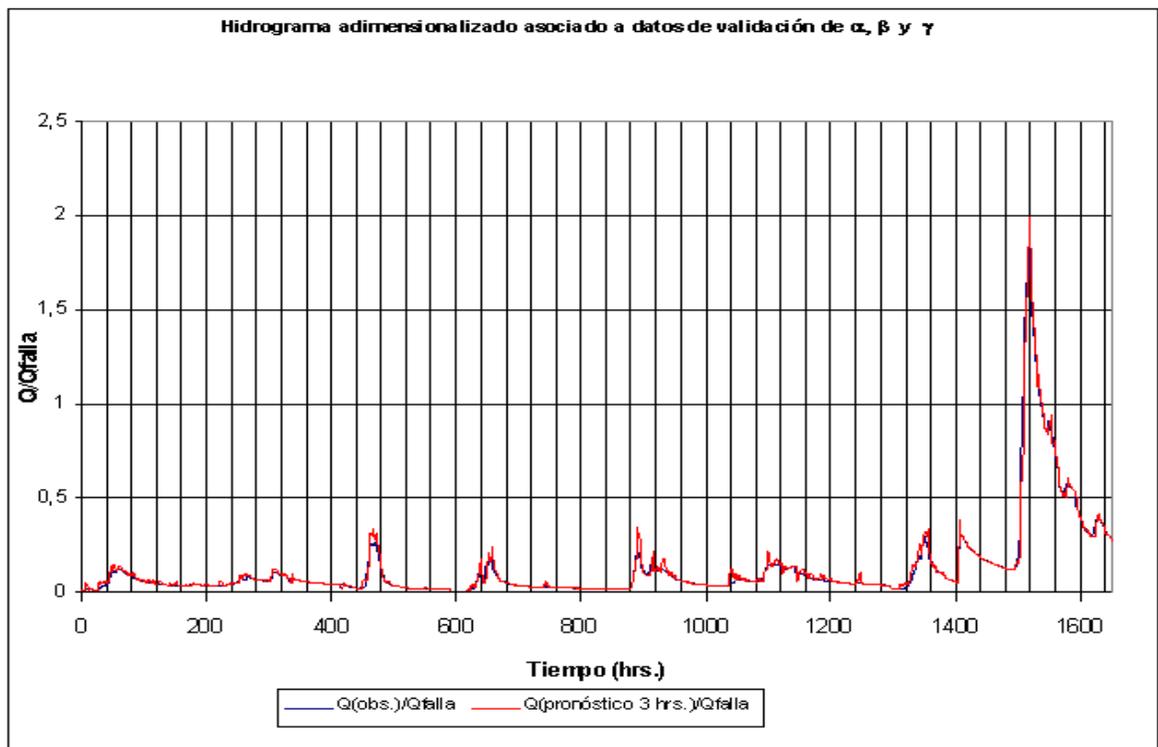
| Tormentas de Validación | | | |
|--------------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 07-09-00 | 00:00 | 12-09-00 | 23:00 |
| 13-09-00 | 00:00 | 24-09-00 | 23:00 |
| 14-03-02 | 00:00 | 20-03-02 | 13:00 |
| 13-05-02 | 00:00 | 31-05-02 | 13:00 |
| 01-06-02 | 00:00 | 11-06-02 | 10:00 |
| 05-08-02 | 00:00 | 09-08-02 | 10:00 |
| 01-06-92 | 00:00 | 12-06-92 | 23:00 |

Figura 5.47 Calibración pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): “Río Claro en Talca”



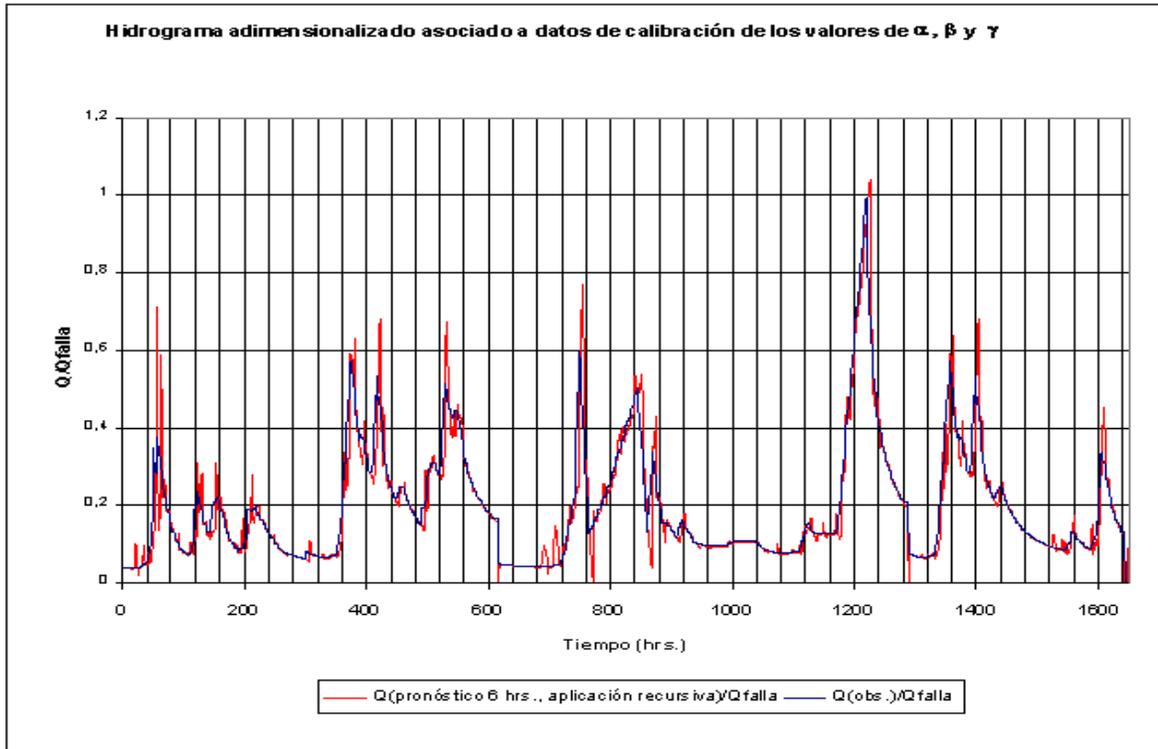
Coefficiente $R^2 = 0,978$

Figura 5.48 Validación pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): “Río Claro en Talca”



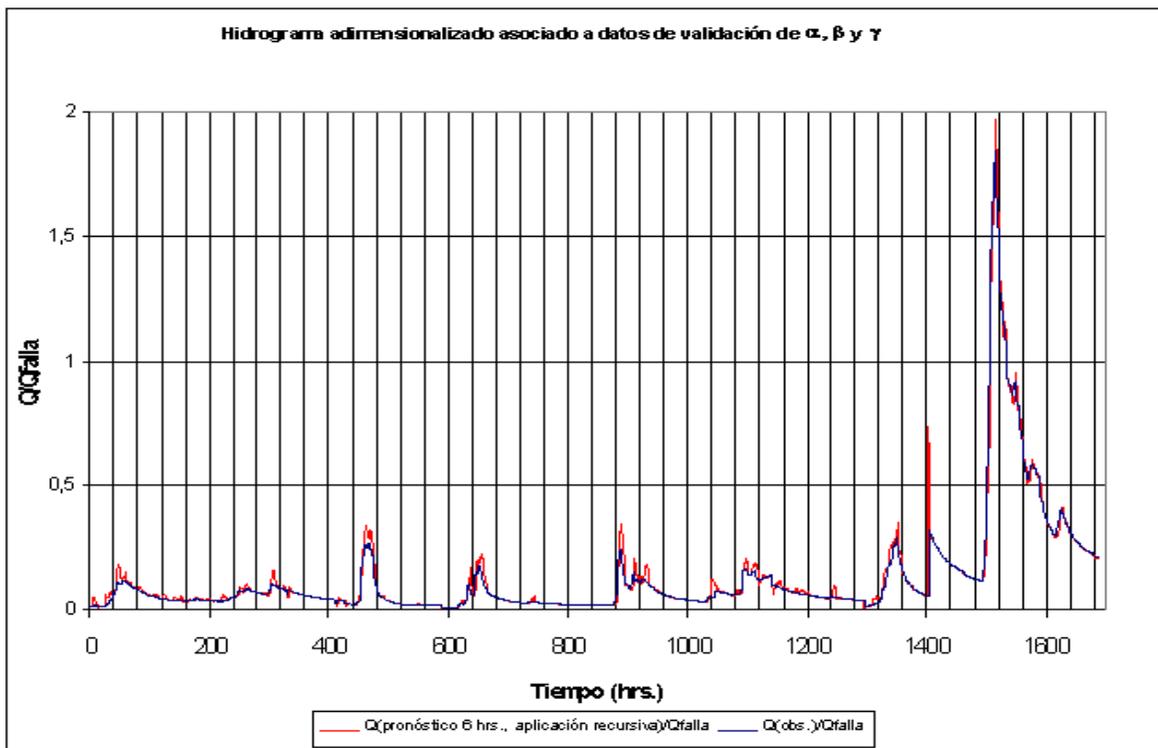
Coefficiente $R^2 = 0,988$

Figura 5.49 Calibración pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): “Río Claro en Talca”



Coefficiente $R^2 = 0,912$

Figura 5.50 Validación pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Claro en Talca”



Coefficiente $R^2 = 0,977$

5.3.2 Estero Los Puercos

En esta cuenca se identificó un modelo lineal P-Q (ecuación 3.4), para valores de los parámetros $k = 6$ y $r = 1$ (ecuaciones 3.1 y 3.2), con un intervalo de adelanto elemental de pronóstico " Δ " igual a 6 hrs. El valor de los parámetros estimados se presenta en la tabla 5.33.

Los resultados que se presentan a continuación pertenecen a los asociados al punto 24 ($Q_{falla} = 60 \text{ m}^3/\text{s}$), obteniéndose el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en las figuras, 5.51 a 5.54, para las crecidas ocurridas en las fechas presentadas en las tablas 5.34 y 5.35. (Los hidrogramas adimensionalizados están en orden correlativo con respecto a la tabla de tormentas de calibración y validación)

Tabla 5.33 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico punto 24

| Δ (hrs.) | Pp. media anual (Pencahue) (mm./año) | Q_{falla} (m^3/s) | α | β | γ |
|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------|---------|----------|
| 6 | 582,2 | 60 | 3,99 | -3,02 | 7,45 |

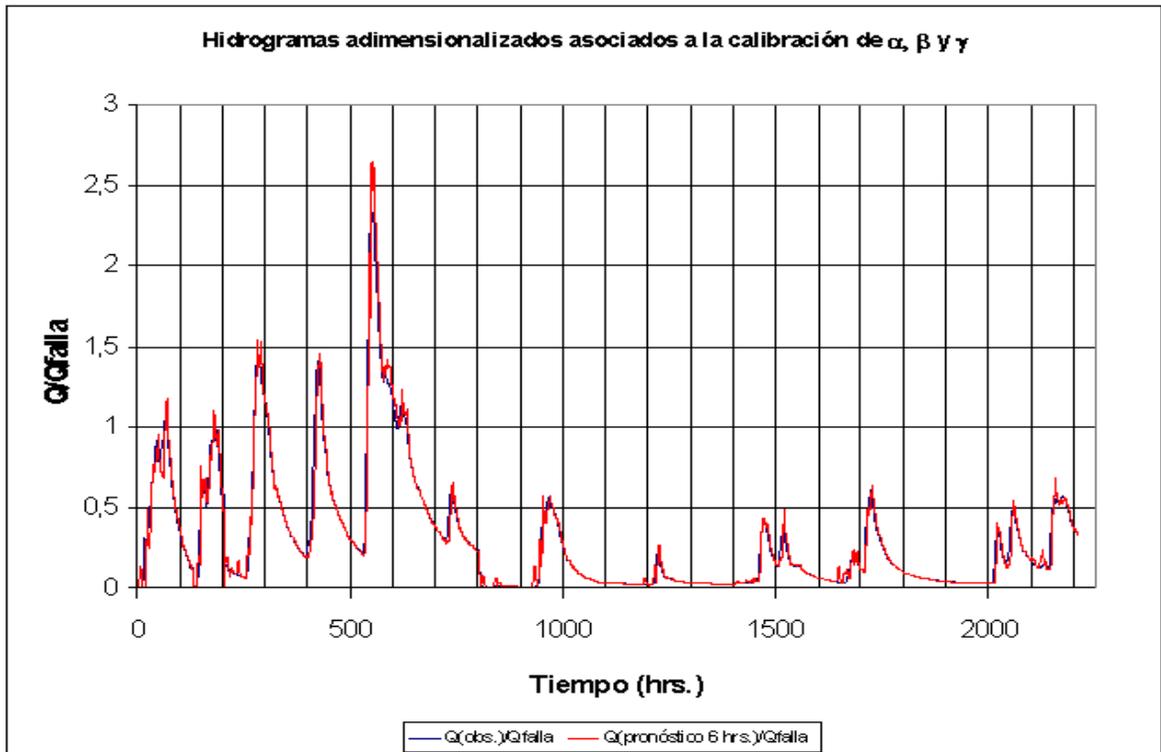
Tabla 5.34 Crecidas de calibración: "Estero Los Puercos"

| Tormentas de Calibración | | | |
|--------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 26-05-91 | 00:00 | 31-05-91 | 12:00 |
| 09-05-92 | 13:00 | 11-05-92 | 12:00 |
| 22-05-92 | 16:00 | 15-06-92 | 23:00 |
| 07-08-96 | 00:00 | 31-08-96 | 23:00 |
| 01-06-93 | 03:00 | 30-06-93 | 21:00 |
| 01-07-93 | 03:00 | 04-07-93 | 23:00 |

Tabla 5.35 Crecidas de validación: "Estero Los Puercos"

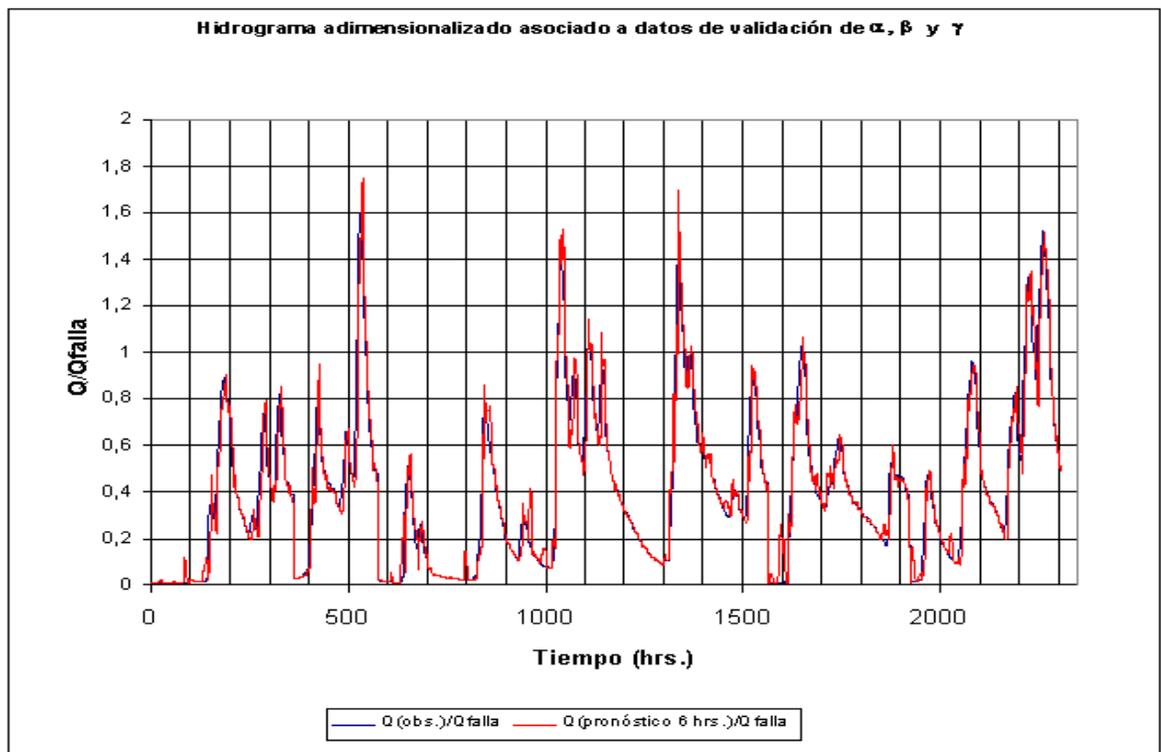
| Tormentas de Validación | | | |
|-------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 13-07-94 | 00:00 | 27-07-94 | 23:00 |
| 21-07-95 | 00:00 | 29-07-95 | 23:00 |
| 01-06-97 | 01:00 | 01-07-97 | 04:00 |
| 04-09-99 | 00:00 | 14-09-99 | 23:00 |
| 05-07-93 | 00:00 | 19-07-93 | 23:00 |
| 07-07-01 | 00:00 | 22-07-01 | 23:00 |

Figura 5.51 Calibración pronóstico de seis horas ($t + \Delta$): “Estero Los Puercos”



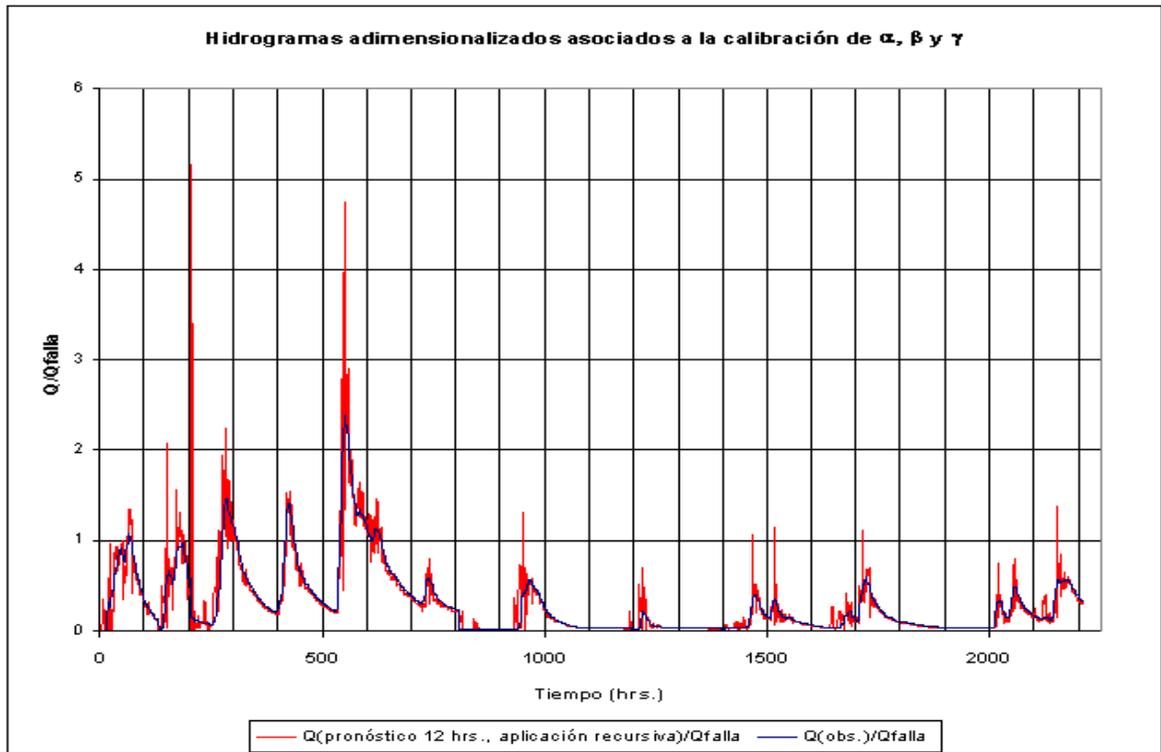
Coefficiente $R^2 = 0,963$

Figura 5.52 Validación pronóstico de seis horas ($t + \Delta$): “Estero Los Puercos”



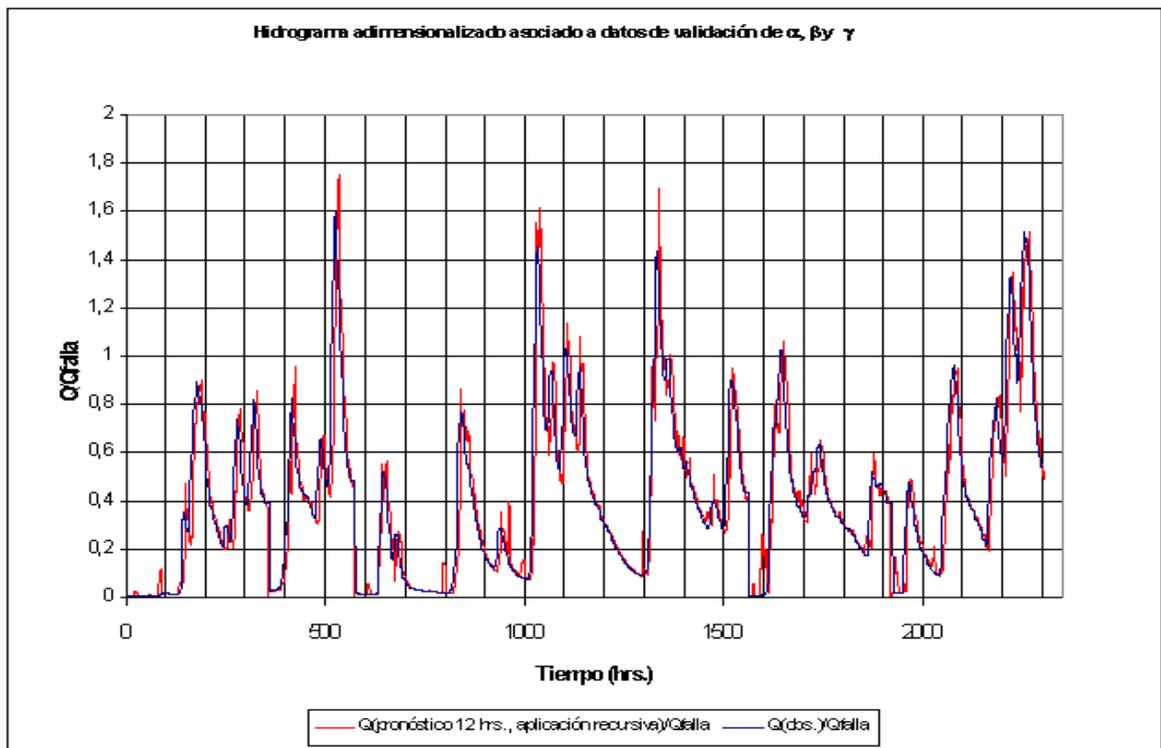
Coefficiente $R^2 = 0,949$

Figura 5.53 Calibración pronóstico de doce horas ($t + 2\Delta$): “Estero Los Puercos”



Coefficiente $R^2 = 0,72$

Figura 5.54 Validación pronóstico de doce horas ($t + 2\Delta$): “Estero Los Puercos”



Coefficiente $R^2 = 0,839$

5.3.3 Río Maule en Forel

En este lugar se procedió a identificar un modelo lineal de pronóstico de caudales del tipo Caudal-Caudal (Q-Q), el que utiliza como información de entrada los datos controlados en las estaciones D.G.A. “**Maule en Forel**”, “**Loncomilla en Las Brisas**” y “**Claro en Talca**”, las que poseen equipamiento para la transmisión de información en tiempo real. En la tabla 5.36 se presenta la información requerida por el modelo para el pronóstico de caudales.

Tabla 5.36 Información requerida por el modelo lineal Q-Q

| Tiempo “t” (hrs.) | Caudal en Maule en Forel (m ³ /s) | Caudal en Claro en Talca (m ³ /s) | Caudal en Loncomilla en las Brisas (m ³ /s) |
|-------------------------------|--|--|--|
| t = -6 | QMF(t) | QCT(t) | |
| t = -3 | QMF(t) | QCT(t) | QLB(t) |
| t = 0 (instante presente) | QMF(t) | QCT(t) | QLB(t) |
| t = 3 (instante pronosticado) | | QCT(t) | |

Con la información de la tabla 5.36, se definen las siguientes variables de entrada del modelo lineal Q-Q para el primer intervalo temporal (“Δ” igual a tres horas):

- V1 = (QCT (t-3) - QCT(t-6)) / QCT(t-6)
- V2 = (QLB(t) - QLB(t-3)) / QLB(t-3)
- V3 = QMF (t)

Se obtiene como salida del modelo de pronóstico el caudal en Maule en Forel en el tiempo “t + Δ”, lo que se señala en la ecuación 5.19.

$$\mathbf{QMF (t + \Delta) = \alpha * V1 + \beta * V2 + \gamma * V3} \quad \text{EC 5.19}$$

Además, en este caso no se utiliza una aplicación recursiva del modelo para estimar $QMF_{(t+2\Delta)}$, con “2Δ” igual a seis horas, sino se realiza mediante la relación de la ecuación 5.20, en la cual se utilizaron las variables definidas a continuación:

- V1 = (QCT(t+3) - QCT(t)) / QCT(t)
- V2 = QLB (t)
- V3 = QMF (t+3)
- V4 = QCT (t)

Donde: $QCT_{(t+3)}$ se obtiene del pronóstico de caudales asociado a este lugar (modelo lineal P-Q Río Claro en Talca).

$$QMF(t + 2\Delta) = \alpha \cdot V1 + \beta \cdot V2 + \gamma \cdot V3 + \theta \cdot V4$$

EC 5.20

Con lo anterior, el índice de amenaza “A” pronosticado para la zona de inundación se obtiene de dividir el caudal pronosticado por el umbral de falla respectivo.

Los resultados que se presentan a continuación pertenecen a los asociados al punto 20 ($Q_{falla} = 9.000 \text{ m}^3/\text{s}$), obteniéndose el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en las figuras 5.55 a 5.58, para las crecidas ocurridas en las fechas presentadas en las tablas 5.39 y 5.40. (Los hidrogramas adimensionalizados están en orden correlativo con respecto a la tabla de tormentas de calibración y validación). El valor de los parámetros estimados se presenta en las tablas 5.37 y 5.38.

Tabla 5.37 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico punto 20

| Δ (hrs.) | Q_{falla} (m^3/s) | α | β | γ |
|-----------------|---------------------------------------|----------|---------|----------|
| 3 | 9000 | 4,43 | -0,08 | 0,97 |

Tabla 5.38 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico punto 20

| 2Δ (hrs.) | Q_{falla} (m^3/s) | α | β | γ | θ |
|------------------|---------------------------------------|----------|---------|----------|----------|
| 6 | 9000 | 5,71 | -0,09 | 0,784 | 1,82 |

Tabla 5.39 Crecidas de calibración: “Río Maule en Forel”

| Tormentas de Calibración | | | |
|--------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 18-06-92 | 00:00 | 30-06-92 | 16:00 |
| 01-05-93 | 09:00 | 17-05-93 | 23:00 |
| 01-06-93 | 09:00 | 30-06-93 | 15:00 |
| 15-06-94 | 00:00 | 30-06-94 | 17:00 |

Tabla 5.40 Crecidas de validación: “Río Maule en Forel”

| Tormentas de Validación | | | |
|-------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 01-06-95 | 08:00 | 30-06-95 | 07:00 |
| 09-06-96 | 00:00 | 27-06-96 | 23:00 |
| 03-07-96 | 00:00 | 13-07-96 | 23:00 |
| 24-02-02 | 00:42 | 09-03-02 | 23:42 |
| 15-07-94 | 00:00 | 31-07-94 | 11:00 |

Figura 5.55 Calibración pronóstico de tres horas (t + Δ): “Río Maule en Forel”

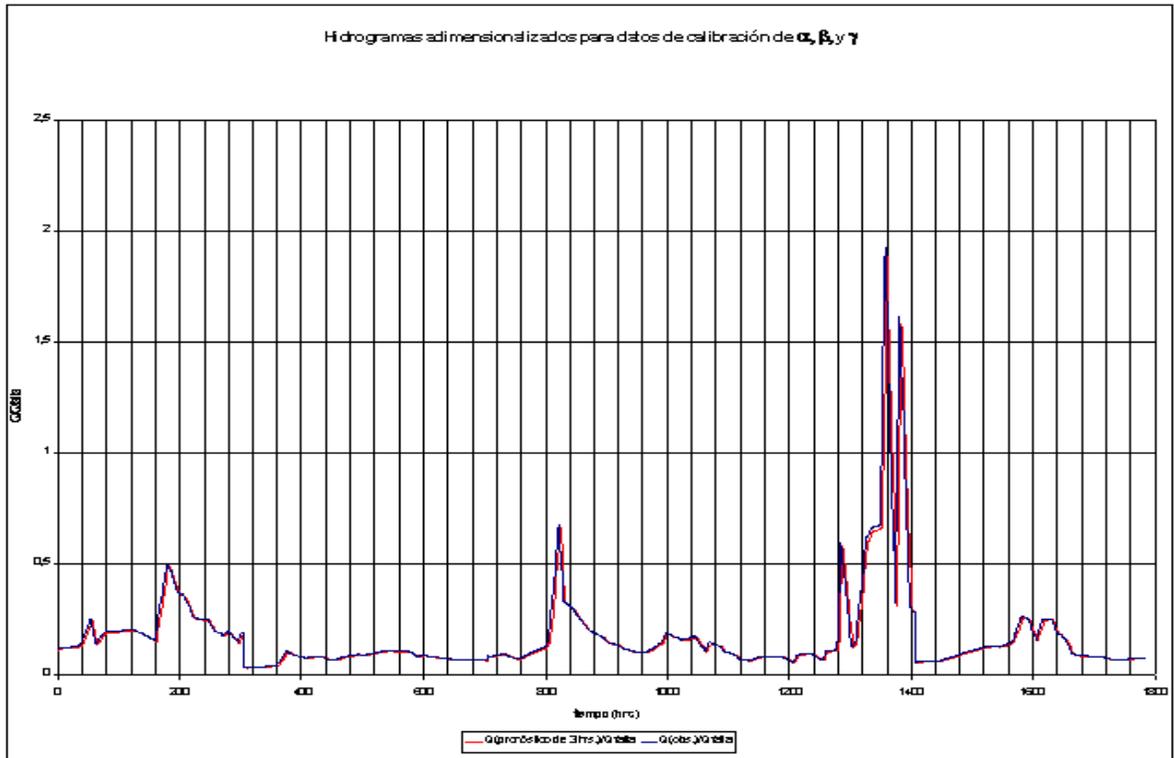


Figura 5.56 Validación pronóstico de tres horas (t + Δ): “Río Maule en Forel”

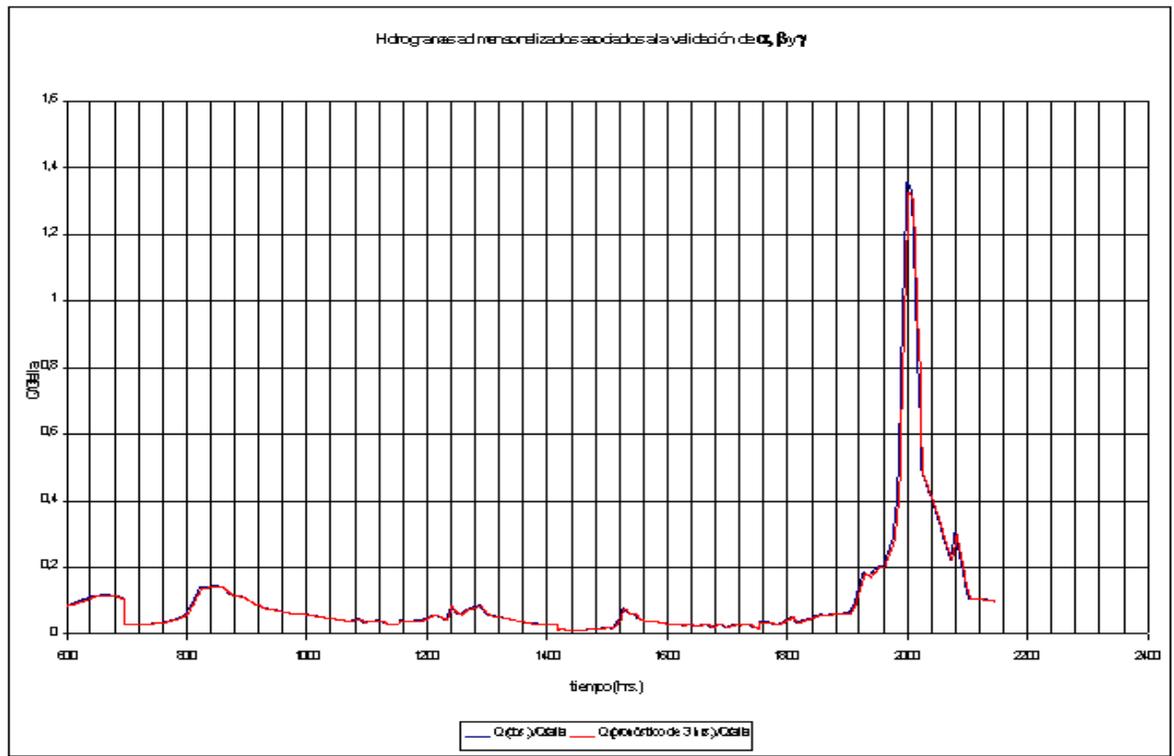
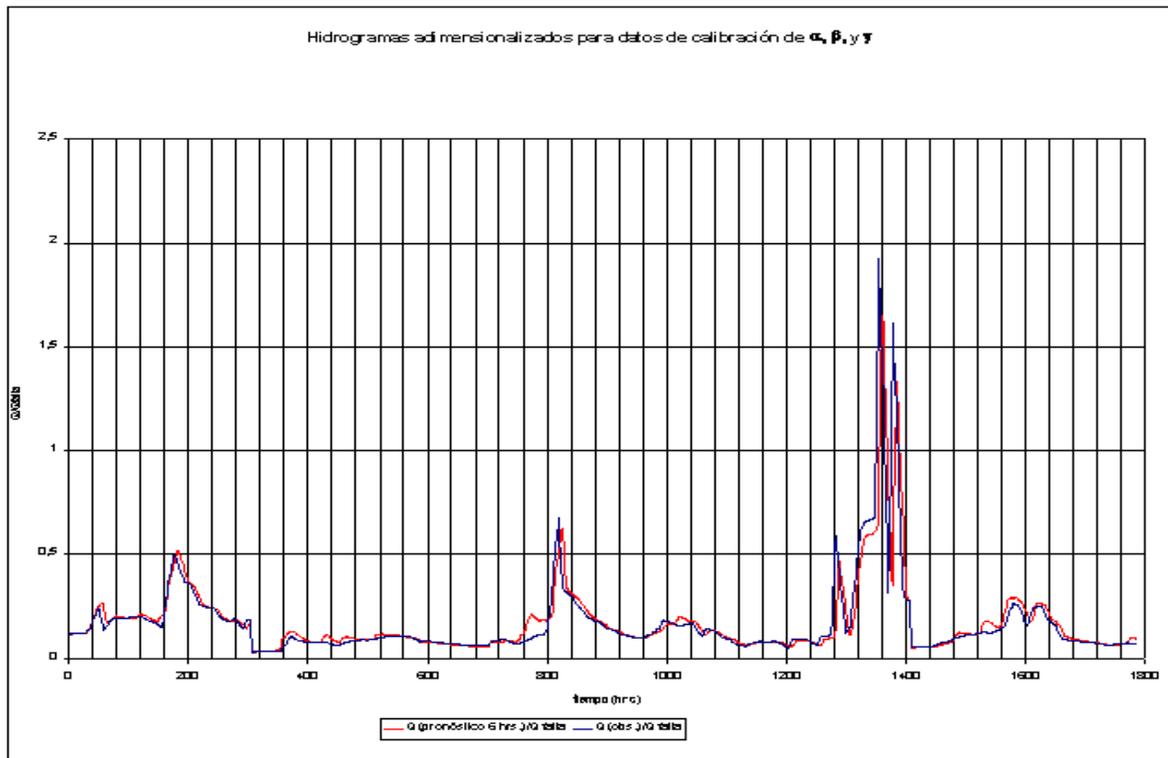
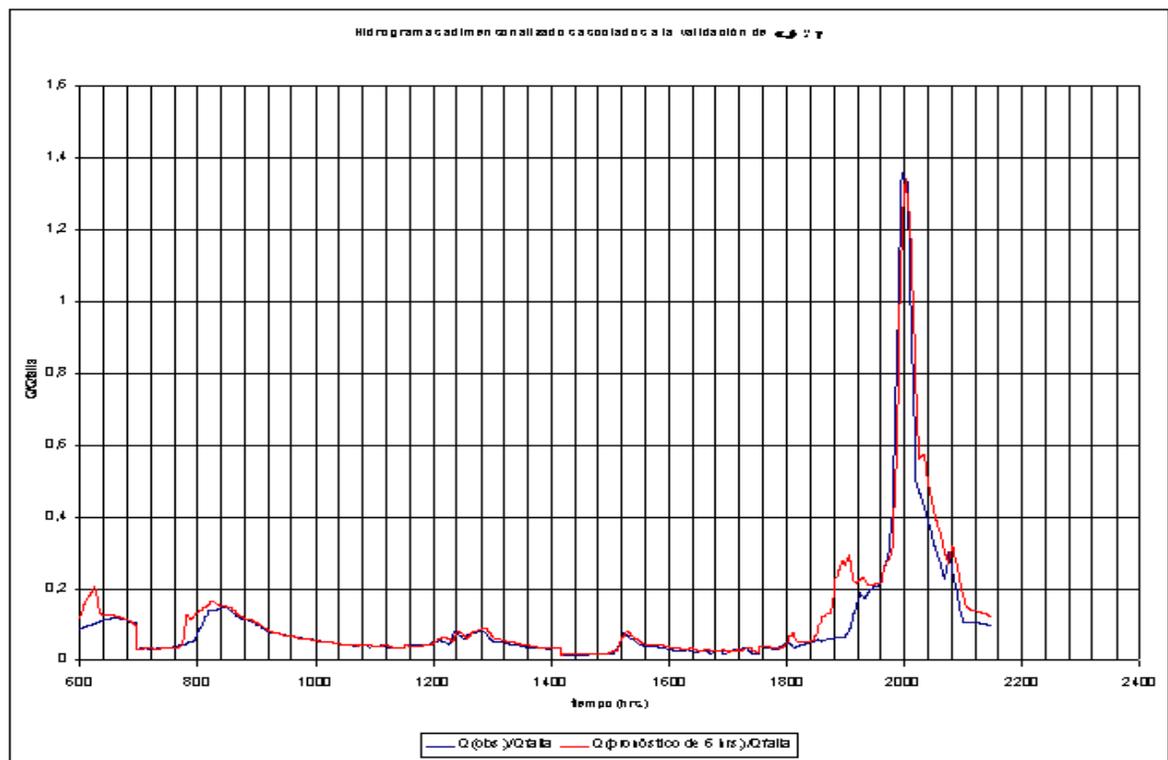


Figura 5.57 Calibración pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Maule en Forel”



Coefficiente $R^2 = 0,762$

Figura 5.58 Validación pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Maule en Forel”



Coefficiente $R^2 = 0,93$

5.3.4 Río Longaví en La Quiriquina

En esta cuenca se identificó un modelo lineal P-Q (ecuación 3.4), para valores de los parámetros $k = 3$ y $r = 3$ (ecuaciones 3.1 y 3.2), con un intervalo de adelanto elemental de pronóstico " Δ " igual a 3 hrs. El valor de los parámetros estimados se presenta en la tabla 5.41.

Los resultados que se presentan a continuación corresponden al punto 81 ($Q_{falla} = 1.600 \text{ m}^3/\text{s}$), obteniéndose el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en las figuras 5.59 a 5.62, para las crecidas ocurridas en las fechas presentadas en las tablas 5.42 y 5.43. (Los hidrogramas adimensionalizados están en orden correlativo con respecto a la tabla de tormentas de calibración y validación)

Tabla 5.41 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico punto 81

| Δ (hrs.) | Pp. media anual (Melozal) | Q_{falla} (m^3/s) | α | β | γ |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------------|----------|---------|----------|
| 3 | 750,2 | 1.600 | 1,09 | -0,08 | 0,3 |

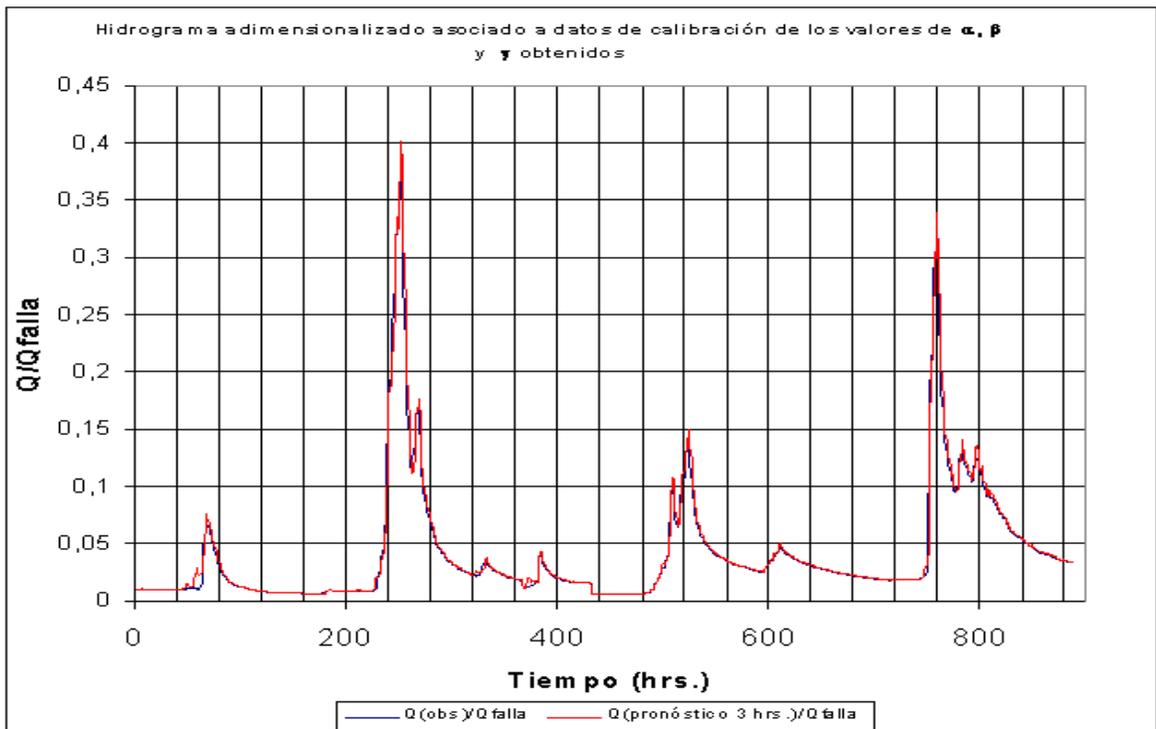
Tabla 5.42 Crecidas de calibración: "Río Longaví en La Quiriquina"

| Tormentas de Calibración | | | |
|--------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 25-02-02 | 00:33 | 04-03-02 | 05:33 |
| 13-03-02 | 00:33 | 20-03-02 | 13:33 |
| 06-04-02 | 00:33 | 08-04-02 | 16:33 |
| 12-05-02 | 00:33 | 30-05-02 | 23:33 |

Tabla 5.43 Crecidas de validación: "Río Longaví en La Quiriquina"

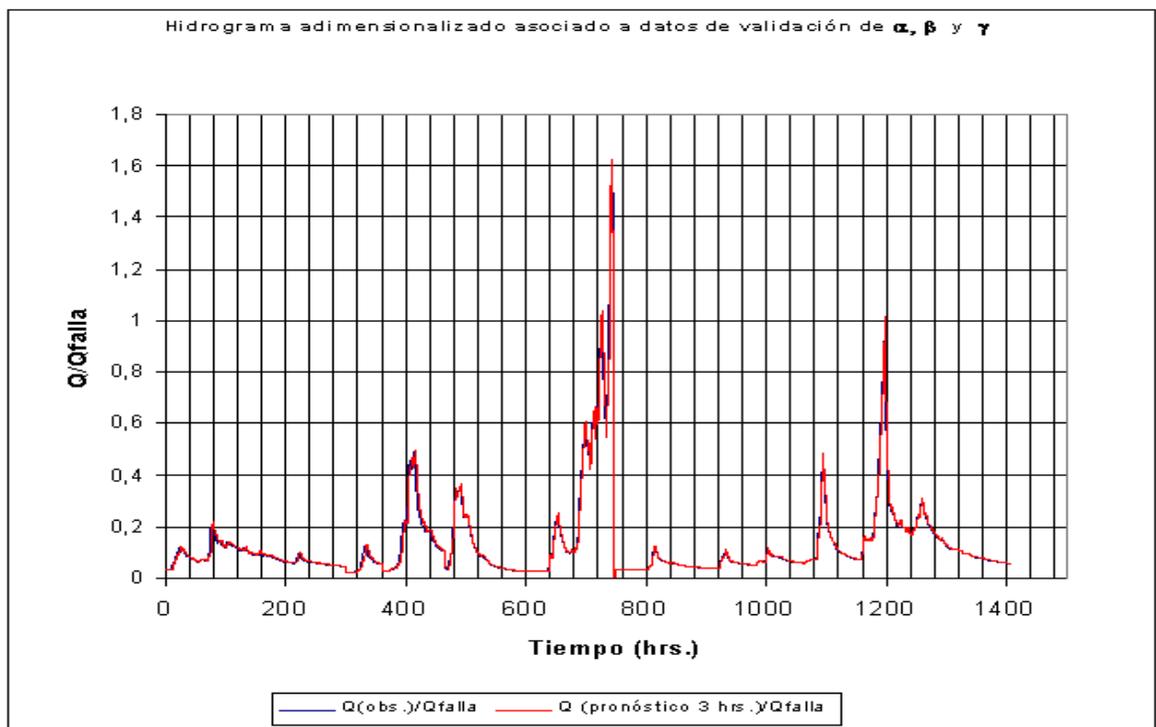
| Tormentas de Validación | | | |
|-------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 31-05-02 | 00:33 | 12-06-02 | 10:33 |
| 26-06-02 | 00:33 | 28-06-02 | 13:33 |
| 05-08-02 | 00:33 | 09-08-02 | 07:33 |
| 17-05-91 | 00:00 | 28-05-91 | 15:00 |
| 01-06-97 | 07:00 | 28-06-97 | 23:00 |

Figura 5.59 Calibración pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): “Río Longaví en La Quiriquina”



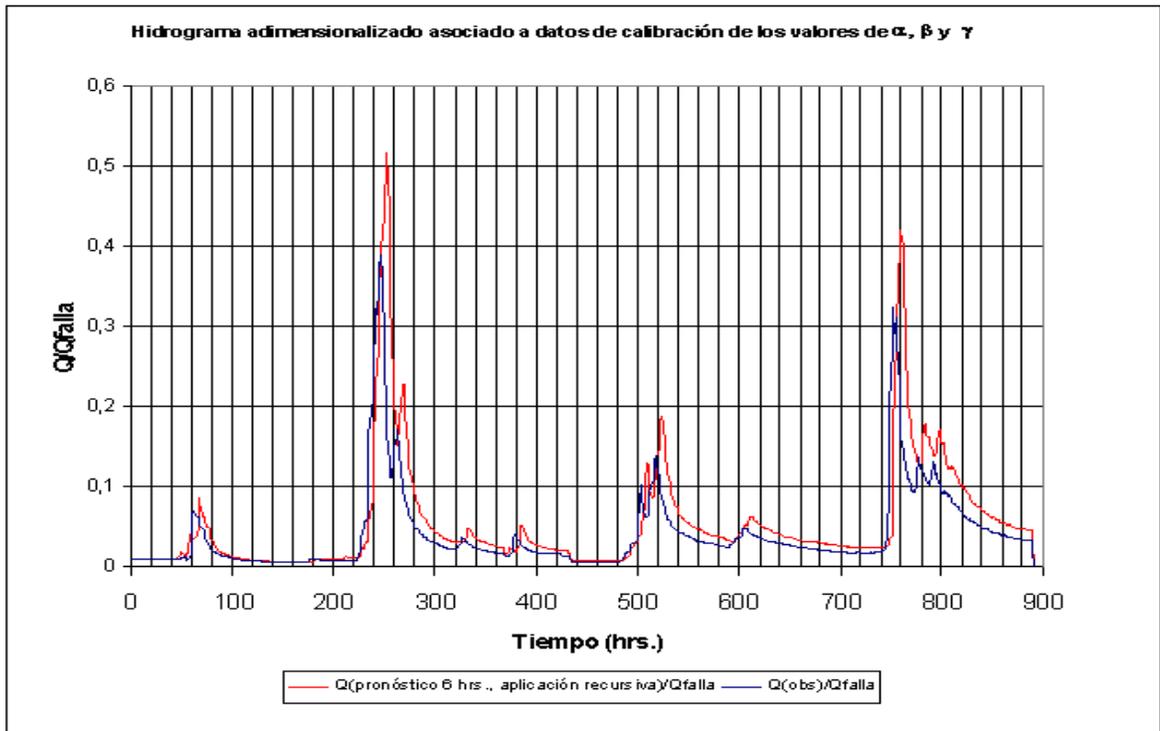
Coefficiente $R^2 = 0,988$

Figura 5.60 Validación pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): “Río Longaví en La Quiriquina”



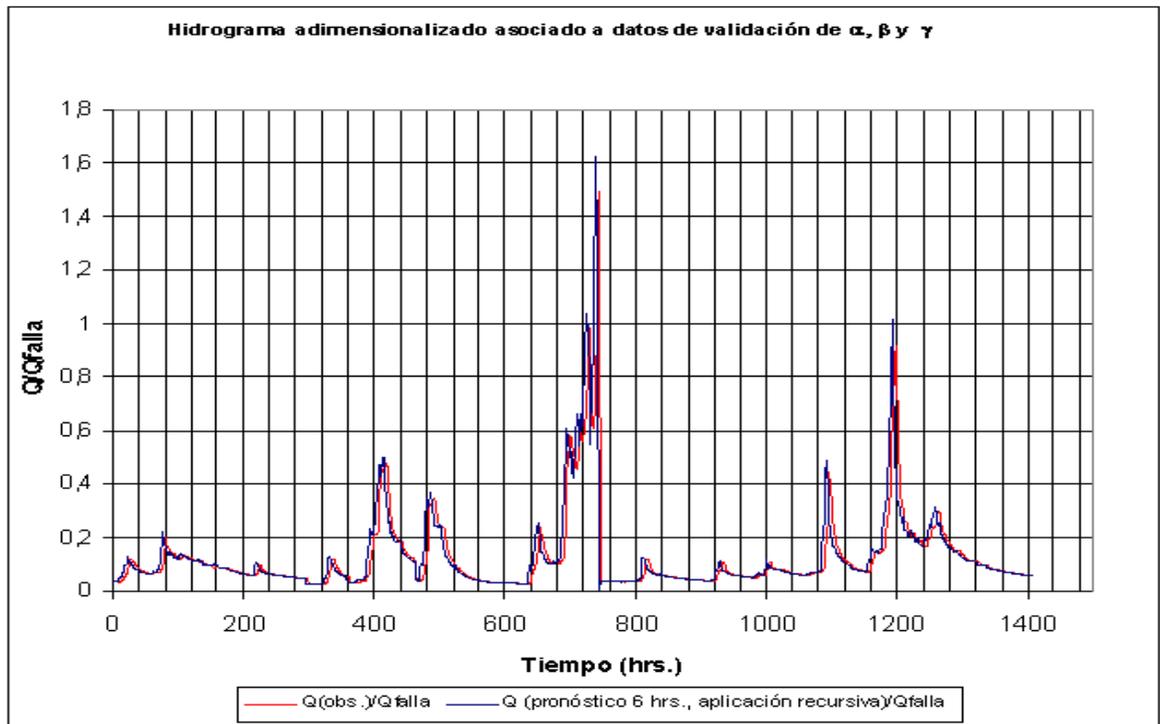
Coefficiente $R^2 = 0,983$

Figura 5.61 Calibración pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Longaví en La Quiriquina”



Coefficiente $R^2 = 0,648$

Figura 5.62 Validación pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Longaví en La Quiriquina”



Coefficiente $R^2 = 0,797$

5.3.5 Río Cauquenes en Arrayán

En esta cuenca se identifica un modelo lineal P-Q (ecuación 3.4), para valores de los parámetros $k = 6$ y $r = 3$ (ecuaciones 3.1 y 3.2), con un intervalo de adelanto elemental de pronóstico " Δ " igual a 6 hrs. El valor de los parámetros estimados se presenta en la tabla 5.44.

Los resultados que se presentan a continuación pertenecen a los asociados al punto 145 ($Q_{falla} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$), obteniéndose el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en las figuras 5.63 a 5.66, para las crecidas ocurridas en las fechas presentadas en las tablas 5.45 y 5.46. (Los hidrogramas adimensionalizados están en orden correlativo con respecto a la tabla de tormentas de calibración y validación)

Tabla 5.44 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico punto 145

| Δ (hrs.) | Pp. media anual (Melozal) | Q_{falla} (m^3/s) | α | β | γ |
|-----------------|---------------------------|---------------------------------------|----------|---------|----------|
| 3 | 750,2 | 500 | 1,09 | -0,08 | 0,3 |

Tabla 5.45 Crecidas de calibración: "Río Cauquenes en Arrayán"

| Tormentas de Calibración | | | |
|--------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 02-05-92 | 00:00 | 12-05-92 | 23:00 |
| 20-05-92 | 00:00 | 27-05-92 | 23:00 |
| 03-06-92 | 00:00 | 08-06-92 | 23:00 |
| 01-06-93 | 03:00 | 06-06-93 | 23:00 |
| 18-07-94 | 00:00 | 23-07-94 | 23:00 |
| 22-07-95 | 00:00 | 29-07-95 | 23:00 |

Tabla 5.46 Crecidas de validación: "Río Cauquenes en Arrayán"

| Tormentas de Validación | | | |
|-------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 16-06-97 | 00:00 | 25-06-97 | 23:00 |
| 11-06-00 | 00:00 | 30-06-00 | 23:00 |
| 08-07-01 | 00:00 | 23-07-01 | 23:00 |

Figura 5.63 Calibración pronóstico de seis horas ($t + \Delta$): “Río Cauquenes en Arrayán”

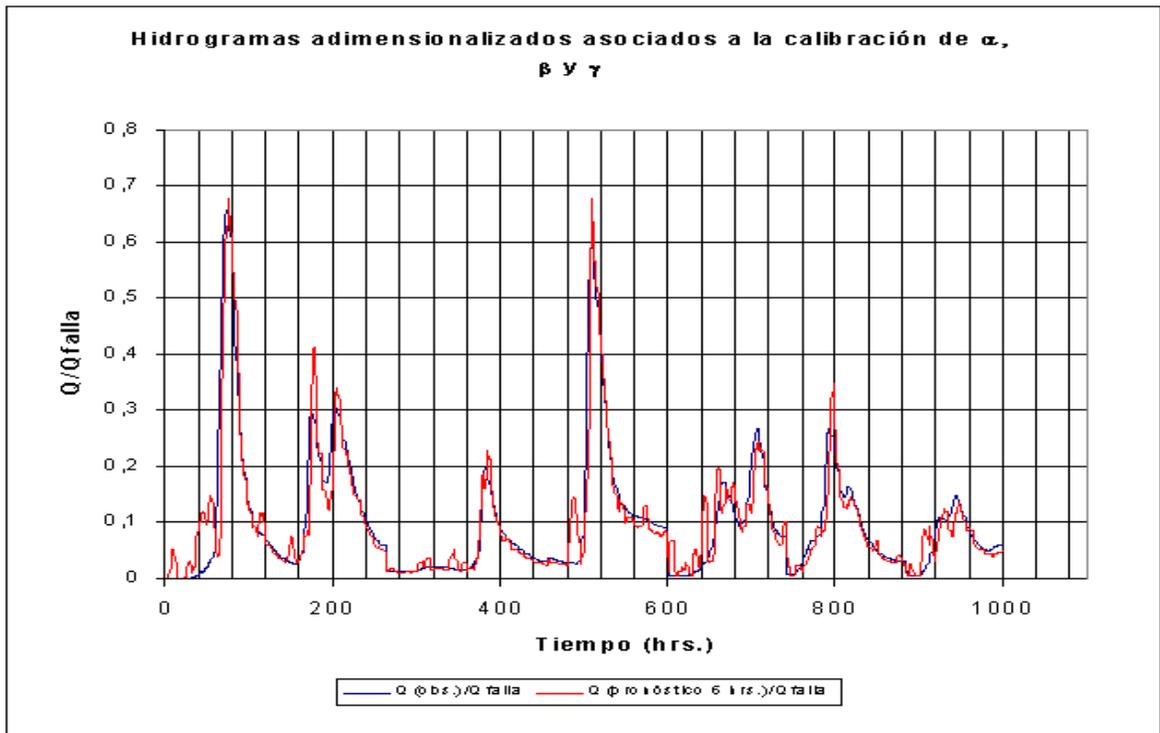


Figura 5.64 Validación pronóstico de seis horas ($t + \Delta$): “Río Cauquenes en Arrayán”

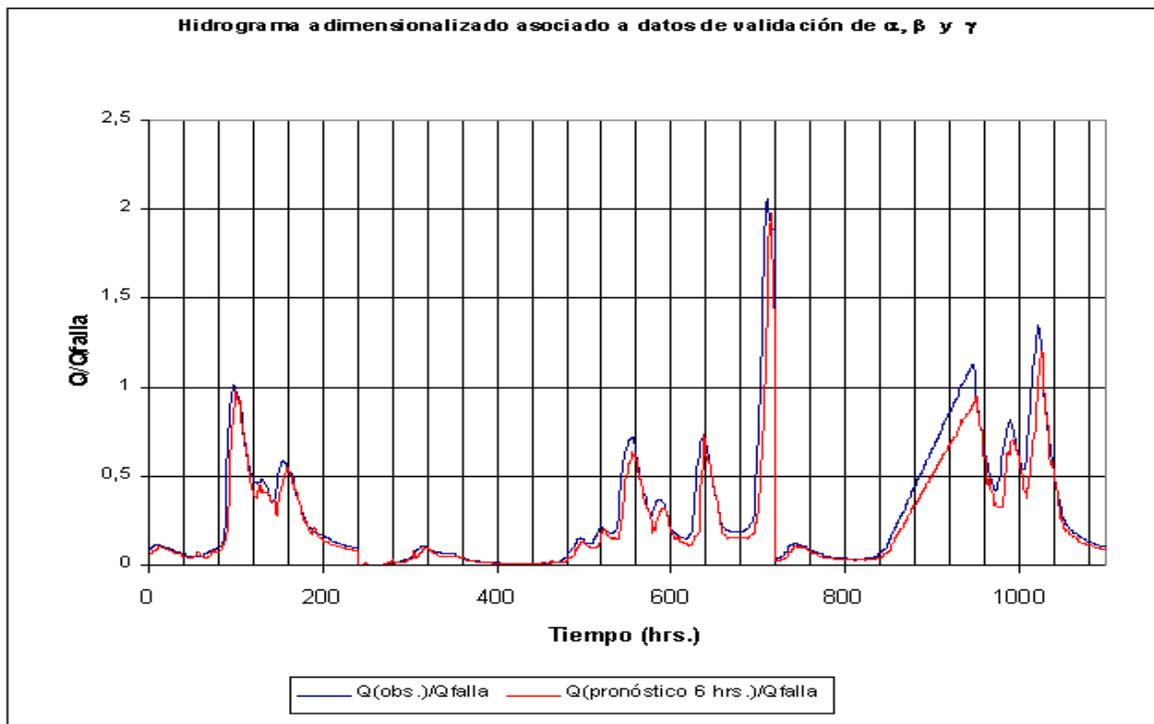
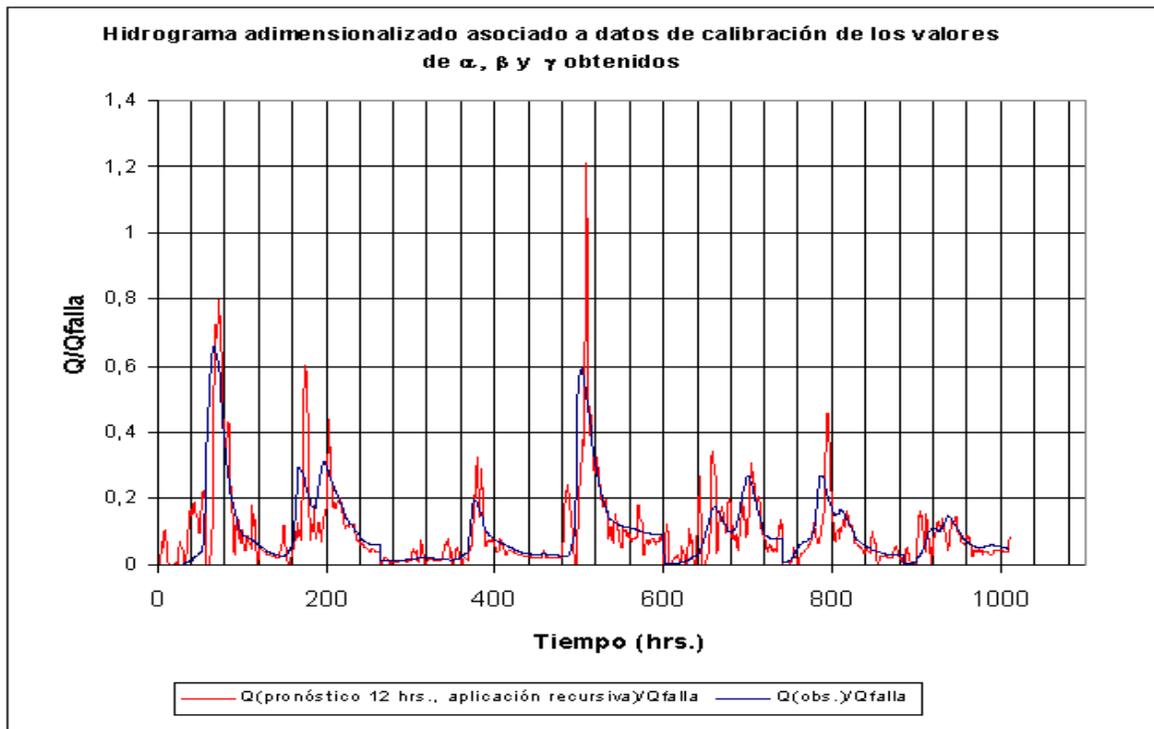
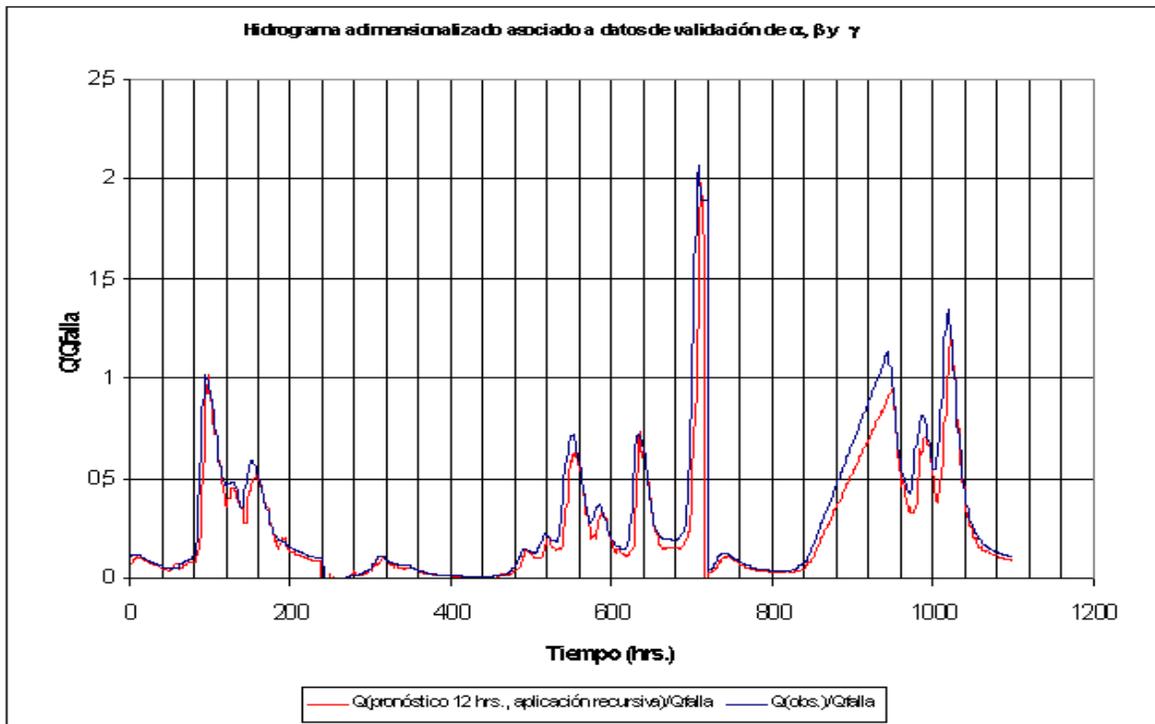


Figura 5.65 Calibración pronóstico de doce horas ($t + 2\Delta$): “Río Cauquenes en Arrayán”



Coefficiente $R^2 = 0,520$

Figura 5.66 Validación pronóstico de doce horas ($t + 2\Delta$): “Río Cauquenes en Arrayán”



Coefficiente $R^2 = 0,654$

5.3.6 Río Perquilauquén en San Manuel

En esta cuenca se identifica un modelo lineal P-Q (ecuación 3.4), para valores de los parámetros $k = 3$ y $r = 3$ (ecuaciones 3.1 y 3.2), con un intervalo de adelanto elemental de pronóstico " Δ " igual a 3 hrs. El valor de los parámetros estimados se presenta en la tabla 5.47.

Los resultados que se presentan a continuación pertenecen a los asociados al punto 70 ($Q_{falla} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$), obteniéndose el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en las figuras 5.65 a 5.68, para las crecidas ocurridas en las fechas presentadas en las tablas 5.48 y 5.49. (Los hidrogramas adimensionalizados están en orden correlativo con respecto a la tabla de tormentas de calibración y validación)

Tabla 5.47 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico punto 70

| Δ (hrs.) | Pp. media anual (Embalse Digua) | Q_{falla} (m^3/s) | α | β | γ |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|----------|---------|----------|
| 3 | 1509 | 400 | 1,42 | -0,45 | 3,6 |

Tabla 5.48 Crecidas de calibración: "Río Perquilauquén en San Manuel"

| Tormentas de Calibración | | | |
|--------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 01-06-97 | 06:00 | 28-06-97 | 23:00 |
| 01-05-92 | 02:00 | 31-05-92 | 21:00 |

Tabla 5.49 Crecidas de validación: "Río Perquilauquén en San Manuel"

| Tormentas de Validación | | | |
|-------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 21-04-97 | 00:00 | 30-04-97 | 23:00 |
| 20-06-99 | 00:00 | 30-06-99 | 23:00 |
| 13-07-94 | 00:00 | 24-07-94 | 21:00 |

Figura 5.67 Calibración pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): "Río Perquilauquén en San Manuel"

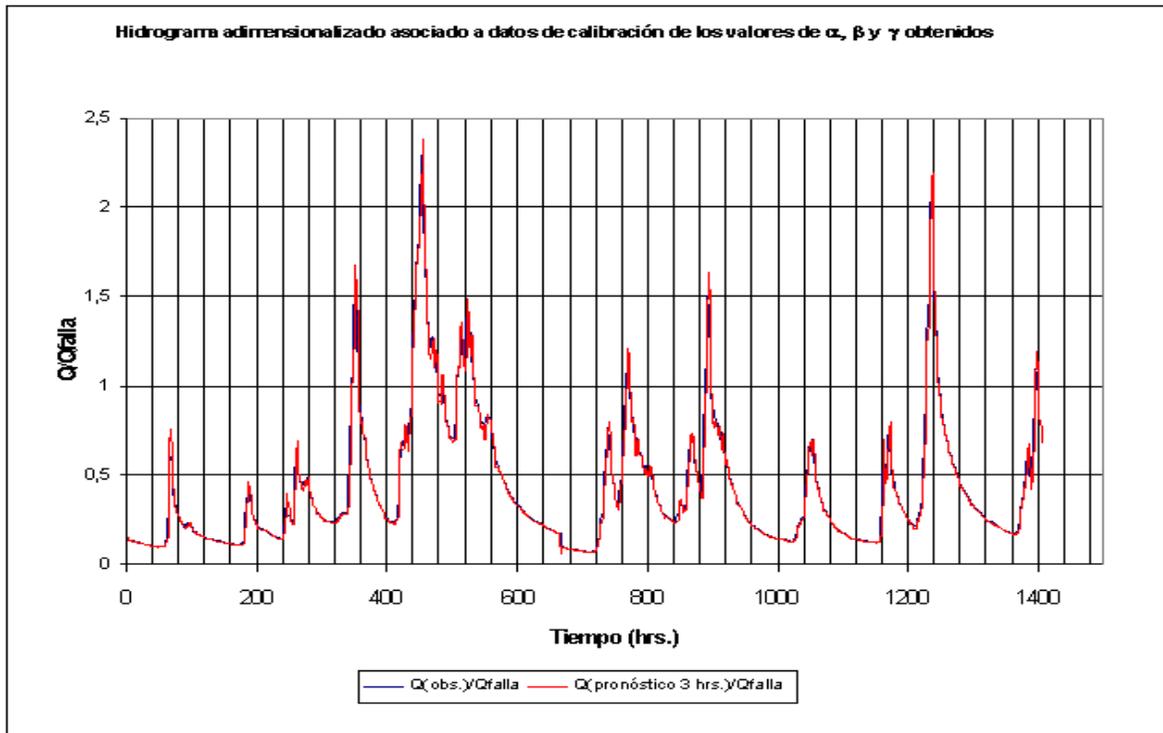


Figura 5.68 Validación pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): "Río Perquilauquén en San Manuel"

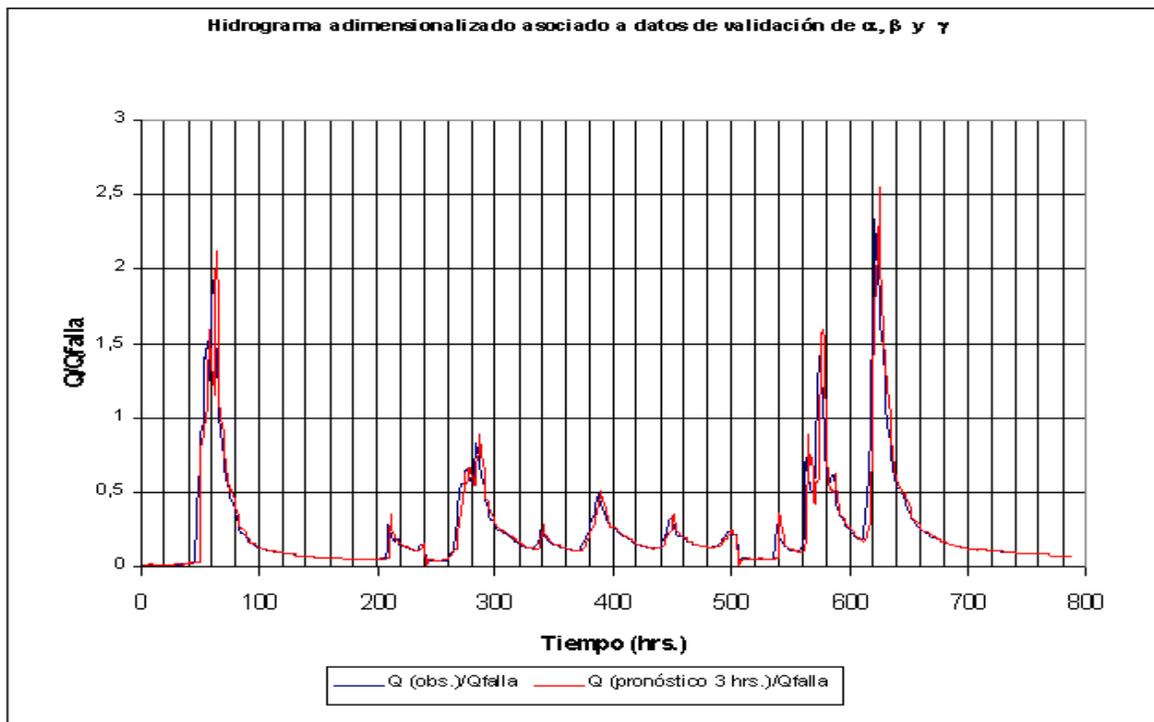
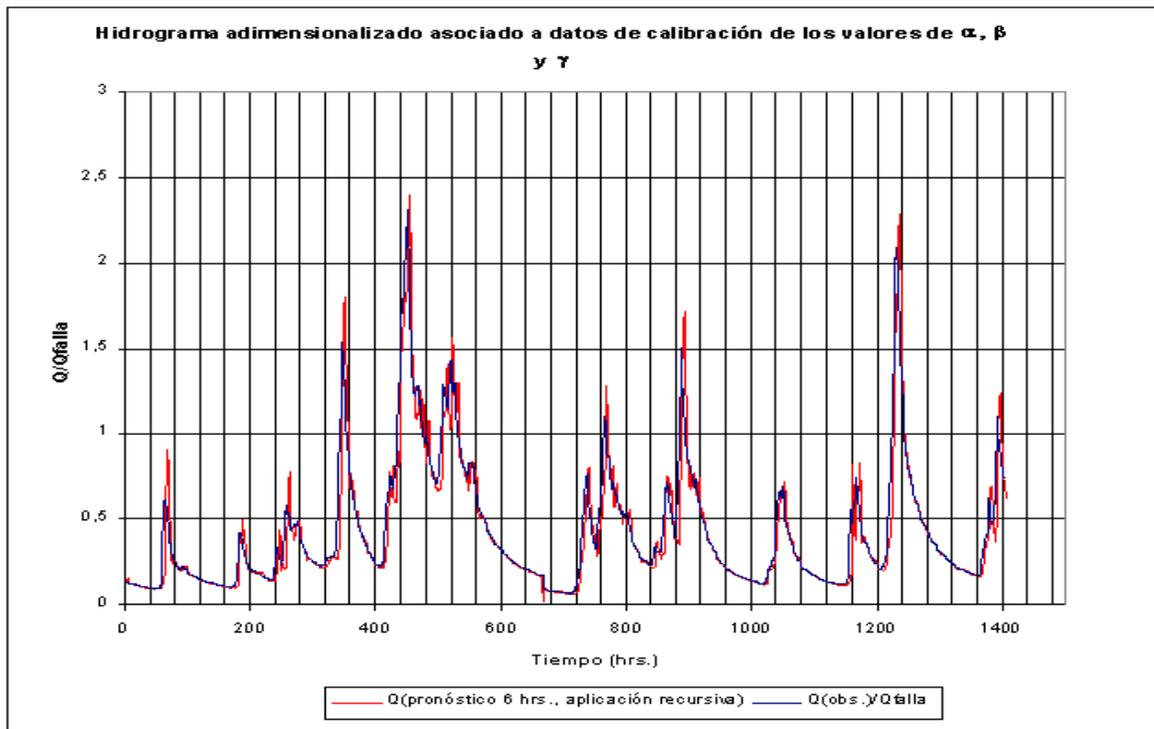
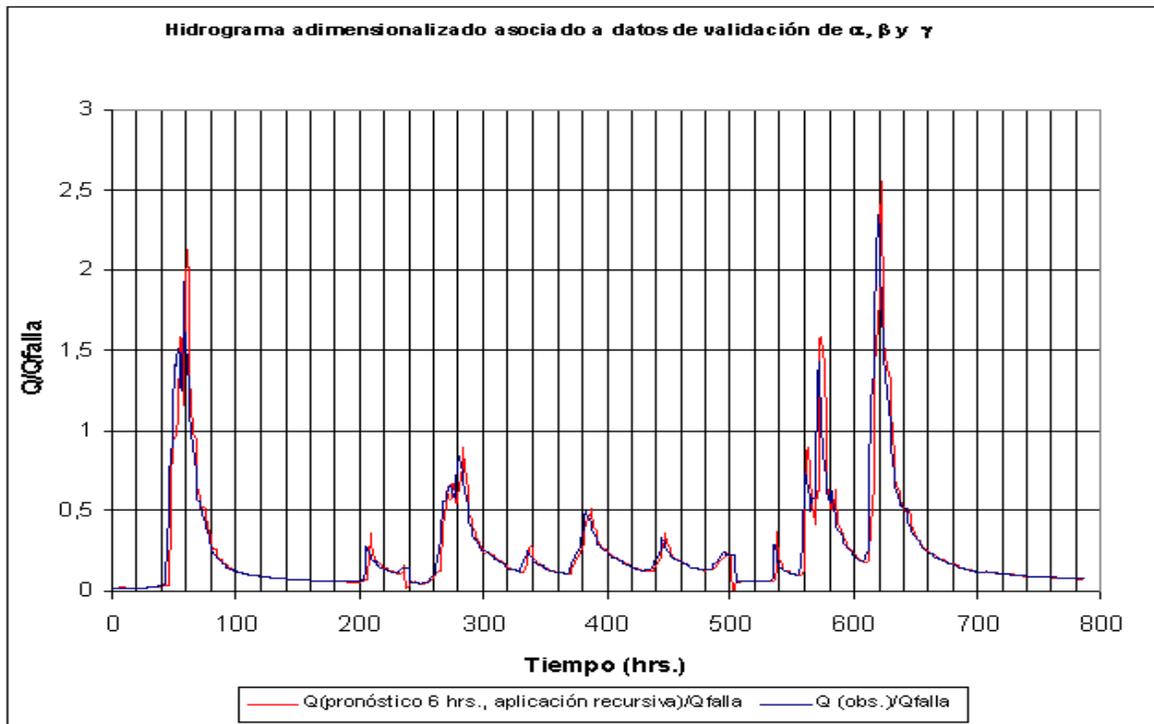


Figura 5.69 Calibración pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Perquilauquén en San Manuel”



Coefficiente $R^2 = 0,892$

Figura 5.70 Validación pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Perquilauquén en San Manuel”



Coefficiente $R^2 = 0,857$

5.3.7 Río Ancoa en El Morro

En esta cuenca se identifica un modelo lineal P-Q (ecuación 3.4), para valores de los parámetros $k = 3$ y $r = 3$ (ecuaciones 3.1 y 3.2), con un intervalo de adelanto elemental de pronóstico " Δ " igual a 3 hrs. El valor de los parámetros estimados se presenta en la tabla 5.50.

Los resultados que se presentan a continuación pertenecen a los asociados a los puntos 75, 76 y 77 ($Q_{falla} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$), obteniéndose el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en las figuras 5.71 a 5.74, para las crecidas ocurridas en las fechas presentadas en las tablas 5.51 y 5.52. (Los hidrogramas adimensionalizados están en orden correlativo con respecto a la tabla de tormentas de calibración y validación)

Tabla 5.50 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico puntos 75,76 y 77

| Δ (hrs.) | Pp. media anual (Embalse Ancoa) | Q_{falla} (m^3/s) | α | β | γ |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|----------|---------|----------|
| 3 | 1492 | 400 | 1,84 | -0,86 | 2,53 |

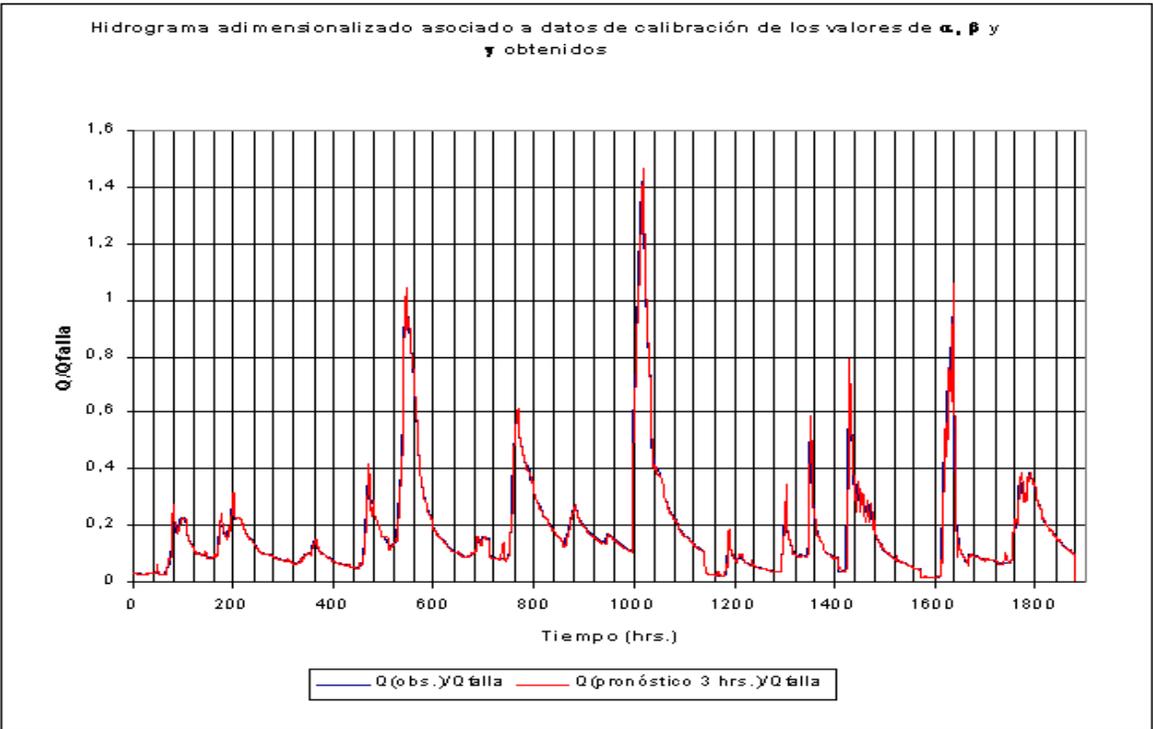
Tabla 5.51 Crecidas de calibración: "Río Ancoa en El Morro"

| Tormentas de Calibración | | | |
|--------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 02-05-92 | 07:00 | 31-05-92 | 18:00 |
| 03-06-92 | 00:00 | 14-06-92 | 23:00 |
| 24-07-94 | 00:00 | 29-07-94 | 23:00 |
| 03-06-95 | 00:00 | 13-06-95 | 23:00 |
| 11-06-96 | 00:00 | 17-06-96 | 23:00 |
| 21-04-97 | 00:00 | 24-04-97 | 23:00 |
| 01-09-99 | 03:00 | 09-09-99 | 23:00 |

Tabla 5.52 Crecidas de validación: "Río Ancoa en El Morro"

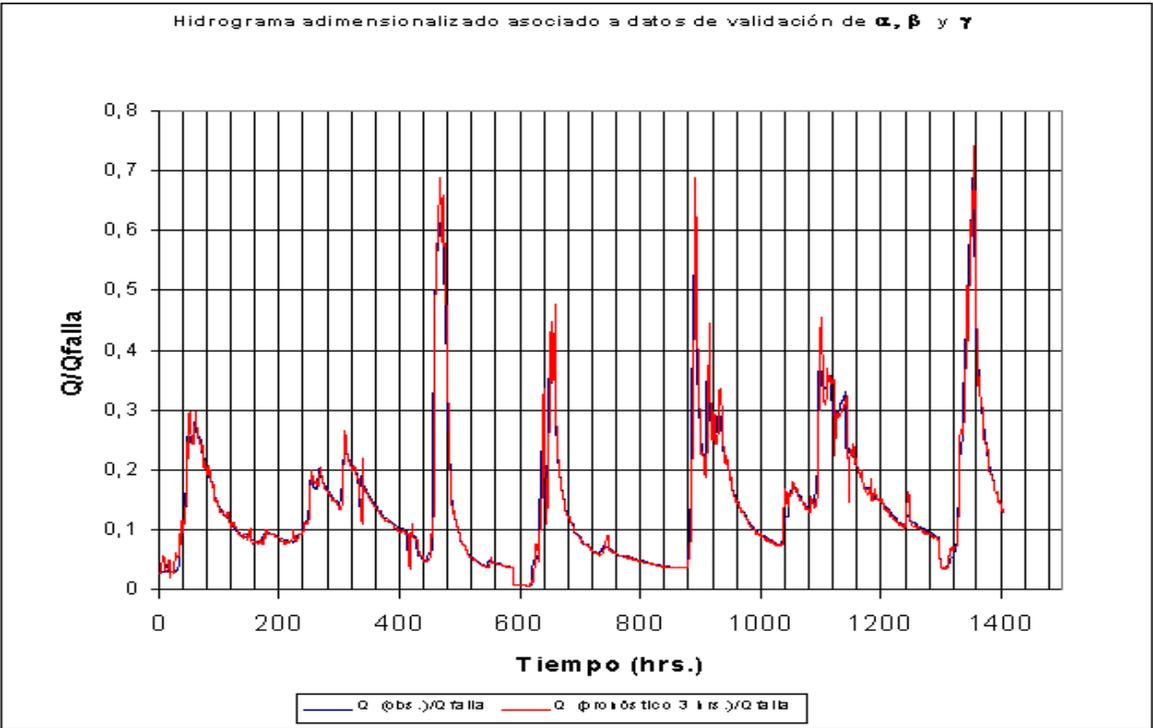
| Tormentas de Validación | | | |
|-------------------------|-------|---------------|-------|
| Fecha inicio | hora | Fecha término | hora |
| 07-09-00 | 00:00 | 12-09-00 | 23:00 |
| 13-09-00 | 00:00 | 24-09-02 | 00:00 |
| 14-03-02 | 00:00 | 20-03-02 | 00:00 |
| 13-05-02 | 00:00 | 31-05-02 | 13:00 |
| 01-06-02 | 01:00 | 11-06-02 | 10:00 |
| 05-08-02 | 00:00 | 09-08-02 | 10:00 |

Figura 5.71 Calibración pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): “Río Ancoa en El Morro”



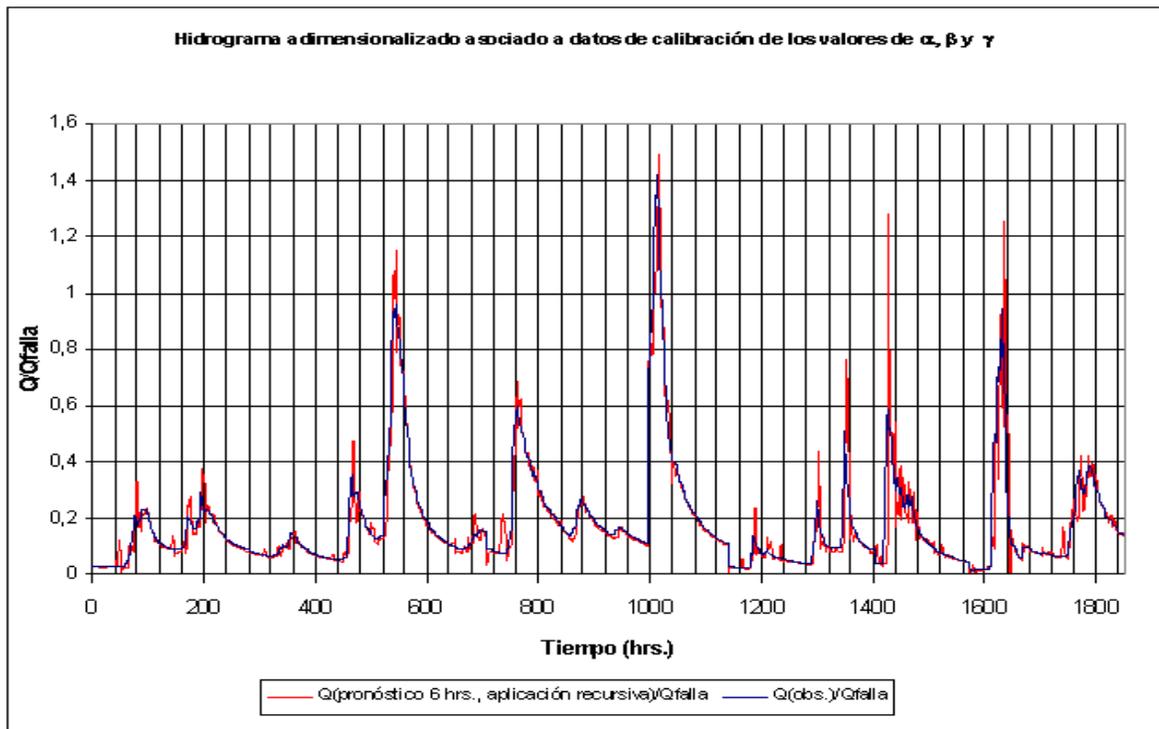
Coeficiente $R^2 = 0,972$

Figura 5.72 Validación pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): “Río Ancoa en El Morro”



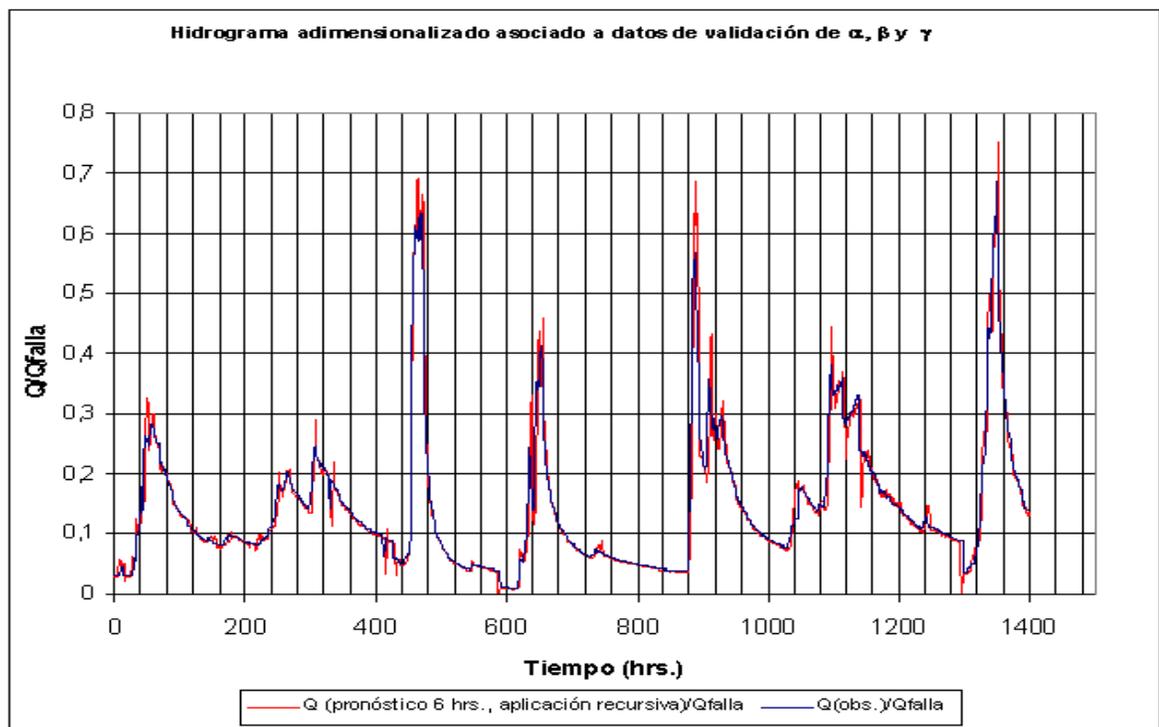
Coeficiente $R^2 = 0,950$

Figura 5.73 Calibración pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Ancoa en El Morro”



Coefficiente $R^2 = 0,892$

Figura 5.74 Validación pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Ancoa en El Morro”



Coefficiente $R^2 = 0,945$

5.3.8 Río Achibueno en La Recova

En esta cuenca se identifica un modelo lineal P-Q (ecuación 3.4), para valores de los parámetros $k = 3$ y $r = 3$ (ecuaciones 3.1 y 3.2), con un intervalo de adelanto elemental de pronóstico " Δ " igual a 3 hrs. El valor de los parámetros estimados se presenta en la tabla 5.53. Es importante señalar, que en la aplicación recursiva de este modelo se recalibraron los parámetros de la ecuación 3.6, de manera que se determinaron en este caso los parámetros que se presentan en la tabla 5.54, para dicho esquema. Por lo tanto, el índice de amenaza $A_{(t+2\Delta)}$, se obtiene mediante la ecuación 5.21.

$$A(t + 2\Delta) = \alpha' * V1^c + \beta' * V2^c + \gamma' * V3 \quad \text{EC 5.21}$$

Los resultados que se presentan a continuación pertenecen a los asociados a los puntos 73 y 74 ($Q_{falla} = 1400 \text{ m}^3/\text{s}$), obteniéndose el desempeño de los modelos para la calibración y validación mostrados en las figuras 5.75 a 5.78, para las crecidas ocurridas en las fechas presentadas en las tablas 5.55 y 5.56. (Los hidrogramas adimensionalizados están en orden correlativo con respecto a la tabla de tormentas de calibración y validación)

Tabla 5.53 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico puntos 73 y 74

| Δ (hrs.) | Pp. media anual (Embalse Ancoa) | Q_{falla} (m^3/s) | α | β | γ |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|----------|---------|----------|
| 3 | 1492 | 1400 | 1,64 | -0,7 | 3,74 |

Tabla 5.54 Parámetros relevantes del modelo de pronóstico puntos 73 y 74 (aplicación recursiva)

| Δ (hrs.) | Pp. media anual (Embalse Ancoa) | Q_{falla} (m^3/s) | α' | β' | γ' |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|-----------|----------|-----------|
| 3 | 1492 | 1400 | 1,4 | -0,53 | 0,1 |

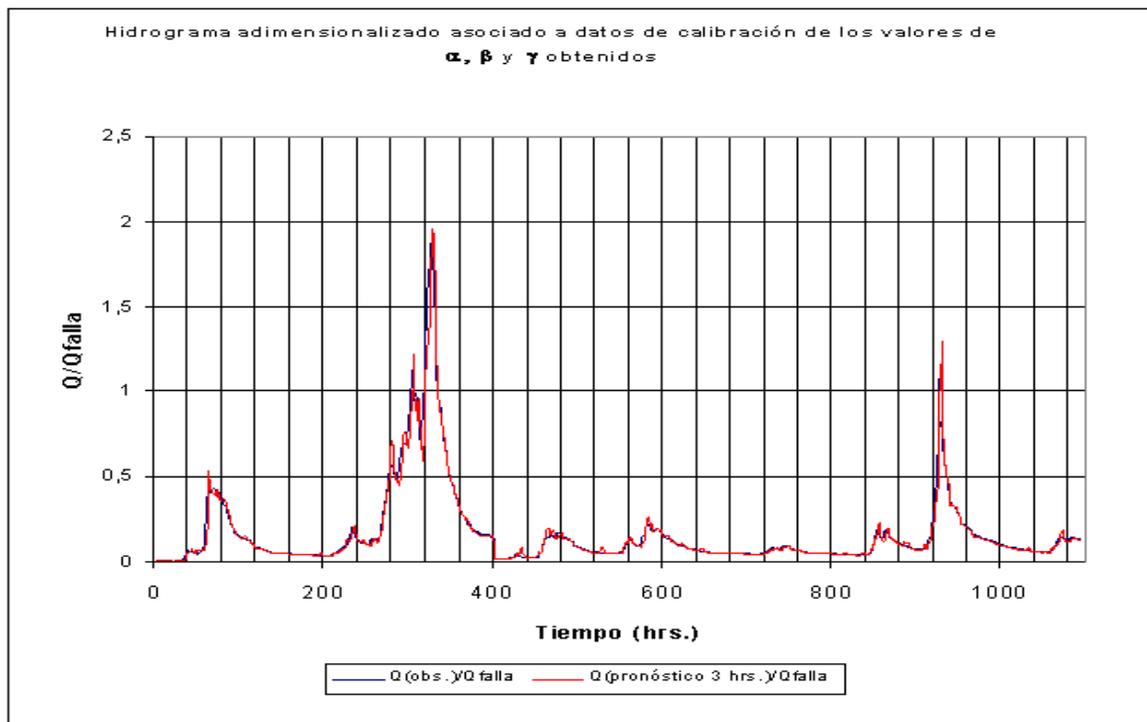
Tabla 5.55 Crecidas de calibración: "Río Achibueno en La Recova"

| Fecha inicio | Tormentas de Calibración | | hora |
|--------------|--------------------------|---------------|-------|
| | hora | Fecha término | |
| 15-05-91 | 00:00 | 31-05-91 | 18:00 |
| 03-05-92 | 00:00 | 31-05-92 | 20:00 |

Tabla 5.56 Crecidas de validación: “Río Achibueno en La Recova”

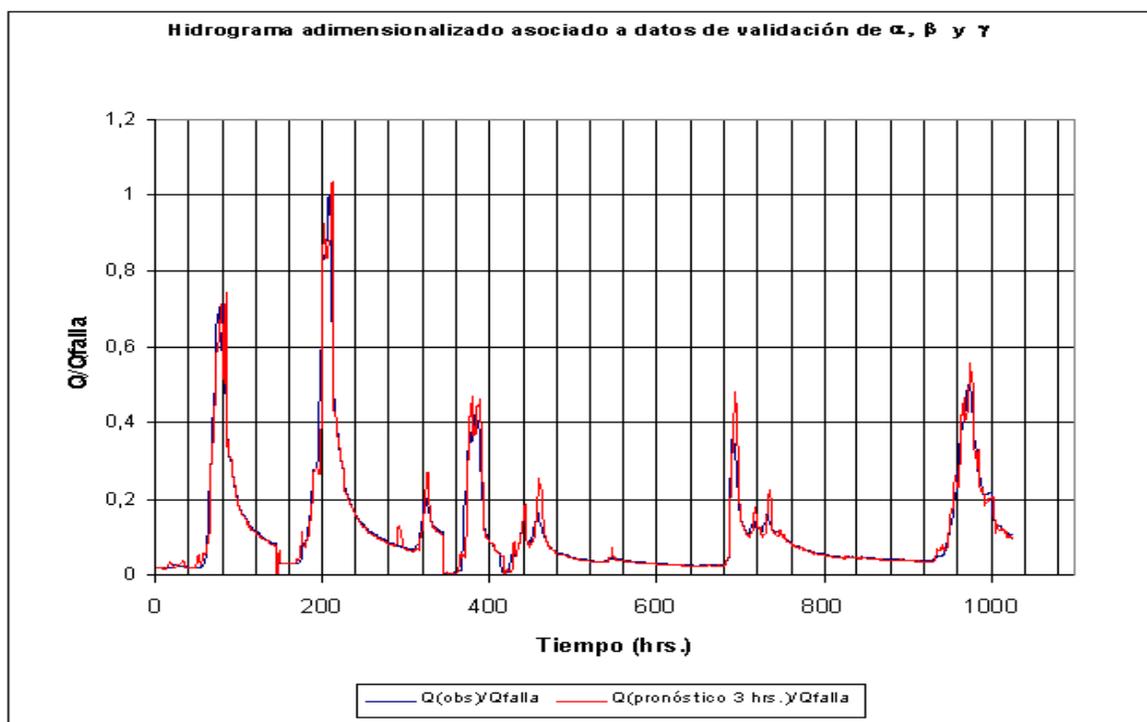
| Fecha inicio | Tormentas de Validación | | hora |
|---------------------|--------------------------------|----------------------|-------------|
| | hora | Fecha término | |
| 11-06-01 | 00:00 | 16-06-01 | 23:00 |
| 01-07-01 | 02:00 | 09-07-01 | 09:00 |
| 14-03-02 | 00:00 | 16-03-02 | 23:00 |
| 14-05-02 | 00:00 | 30-05-02 | 23:00 |
| 01-08-02 | 00:00 | 09-08-02 | 09:00 |

Figura 5.75 Calibración pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): "Río Achibueno en La Recova"



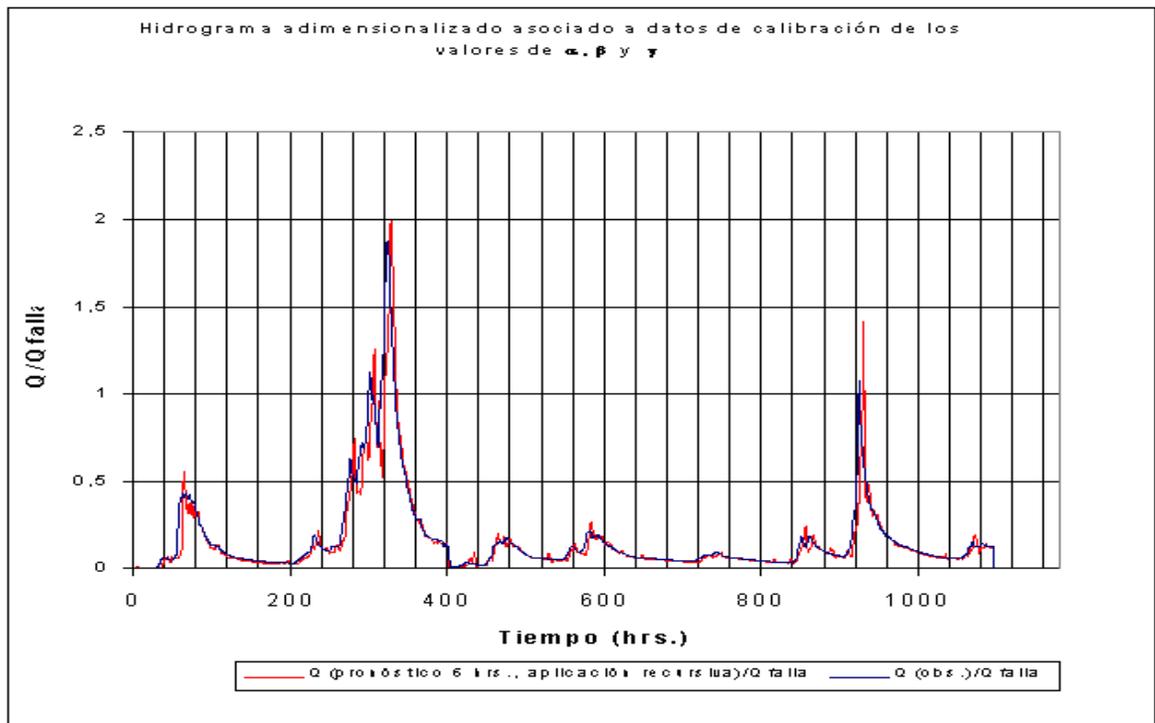
Coefficiente $R^2 = 0,965$

Figura 5.76 Validación pronóstico de tres horas ($t + \Delta$): "Río Achibueno en La Recova"



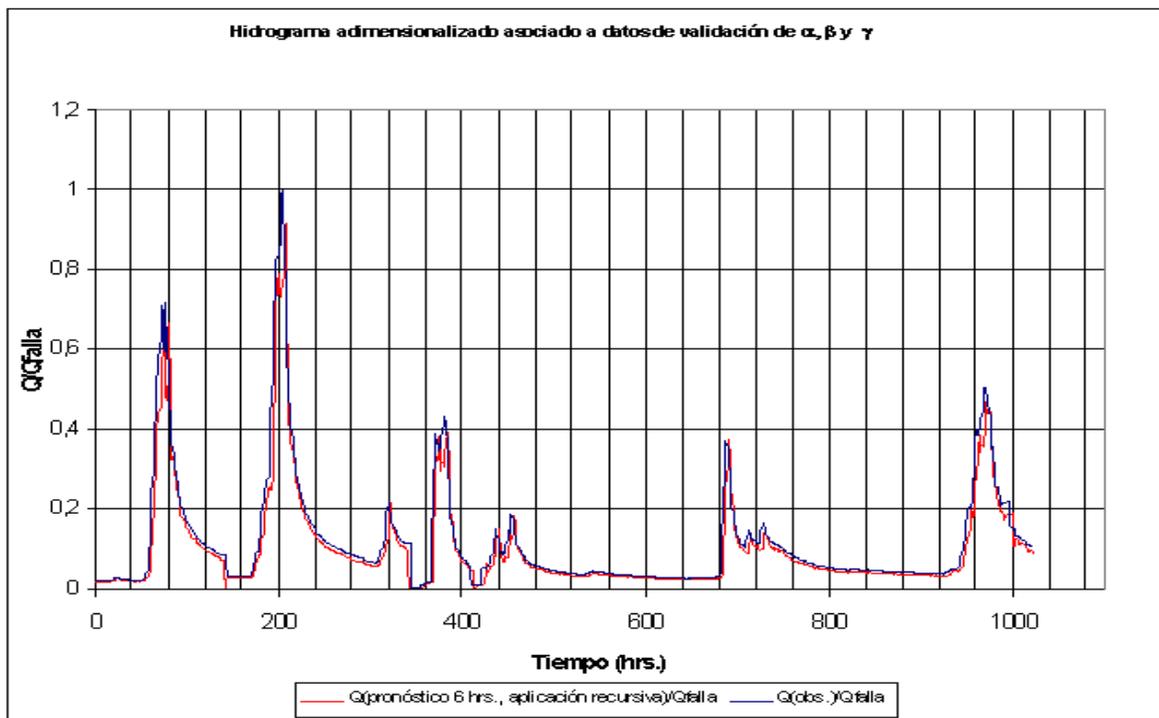
Coefficiente $R^2 = 0,940$

Figura 5.77 Calibración pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Achibueno en La Recova”



Coefficiente $R^2 = 0,874$

Figura 5.78 Validación pronóstico de seis horas ($t + 2\Delta$): “Río Achibueno en La Recova”

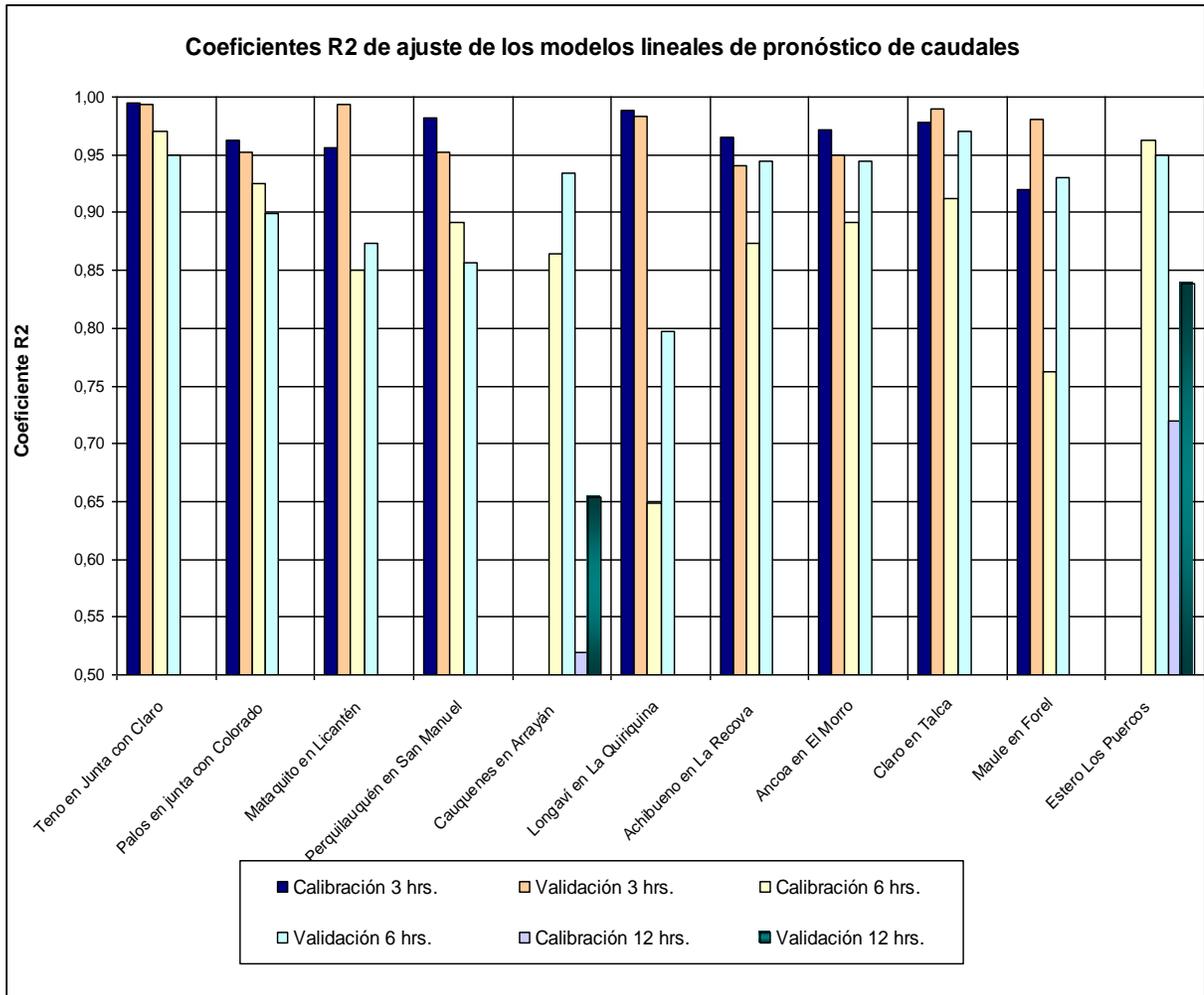


Coefficiente $R^2 = 0,945$

5.3.9 Análisis y conclusiones de la aplicación de los modelos lineales

En general, los modelos lineales de pronóstico de caudales muestran ciertas deficiencias para los pronósticos asociados a la aplicación recursiva de estos, lo que puede explicarse en parte por el hecho que dichos intervalos temporales de pronóstico son más cercanos a los tiempos de respuesta de las cuencas aportantes a las estaciones limnigráficas utilizadas. Esto hecho se refleja en los coeficientes R^2 de ajuste de los modelos lineales presentados por cuenca en el gráfico de la figura 5.79.

Figura 5.79 Coeficientes R^2 de ajuste de los modelos lineales



Con respecto a la elección de los puntos o sectores amagados que fueron modelados, sólo se escogieron aquellos en los cuales se disponía de antecedentes suficientes de las ocasiones en que presentaron problemas y además pertenecían a cuencas controladas.

No es posible incorporar en la actualidad al SATR algunos sectores amagados, dado que las estaciones de control existentes en las cuencas asociadas a dichos sectores no poseen equipos para la transmisión de datos en tiempo real. En este caso se encuentran las estaciones que se señalan en la tabla 5.57, para las cuales sería aconsejable implementar dichos equipos con el fin de incorporar las respectivas zonas amagadas al SATR, utilizando los modelos de pronóstico de caudales ya determinados.

Tabla 5.57 Cuencas en las cuales no existe control fluvigráfico y pluviográfico en tiempo real

| Nombre Estación | Información Limnigráfica (SI/NO) | Información Pluviográfica (SI/NO) |
|---------------------------------|---|--|
| Río Cauquenes en Arrayán | SI | SI |
| Río Perquilauquén en San Manuel | SI | SI |
| Estero Los Puercos | SI | SI |

Finalmente, se presenta en la tabla 5.58 un resumen del desempeño de los modelos lineales P-Q en todas las cuencas modeladas, según los índices de aciertos y fallas durante emergencias, que se describen en el análisis de resultados del capítulo 5.1.3.

Tabla 5.58 Resumen del desempeño de los modelos lineales

| Río Palos en junta Colorado (Qfalla = 240 m3/s) | | | | | | | | |
|---|---|--|-------------------------|-------------------------------|--|------------------------|------------------------------|---|
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 3 hrs. | 64 | 28 | 55 | 14 | 9 | 25 | 2 | 3 |
| pronóstico 6 hrs. | 64 | 28 | 54 | 18 | 10 | 22 | 4 | 6 |
| Río Teno en Claro (Qfalla = 370 m3/s) | | | | | | | | |
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 3 hrs. | 95 | 100 | 87 | 10 | 8 | 89 | 14 | 11 |
| pronóstico 6 hrs. | 95 | 100 | 76 | 13 | 19 | 93 | 16 | 7 |
| Río Mataquito en Licantén (Qfalla = 2700 m3/s) | | | | | | | | |
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 3 hrs. | 13 | 0 | 12 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| pronóstico 6 hrs. | 13 | 0 | 10 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| Río Claro en Talca (Qfalla = 950 m3/s) | | | | | | | | |
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 3 hrs. | 0 | 29 | 0 | 0 | 0 | 28 | 1 | 1 |
| pronóstico 6 hrs. | 0 | 29 | 0 | 0 | 0 | 28 | 1 | 1 |
| Estero Los Puercos (Qfalla = 60 m3/s) | | | | | | | | |
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 6 hrs. | 151 | 133 | 144 | 18 | 7 | 115 | 18 | 18 |
| pronóstico 12 hrs. | 151 | 133 | 134 | 29 | 17 | 93 | 37 | 40 |
| Río Maule en Forel (Qfalla = 9000 m3/s) | | | | | | | | |
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 3 hrs. | 26 | 21 | 20 | 6 | 6 | 17 | 2 | 4 |
| pronóstico 6 hrs. | 26 | 21 | 12 | 9 | 14 | 18 | 4 | 3 |
| Río Cauquenes en Arrayán (Qfalla = 500 m3/s) | | | | | | | | |
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 6 hrs. | 0 | 54 | 0 | 0 | 0 | 24 | 0 | 30 |
| pronóstico 12 hrs. | 0 | 54 | 0 | 0 | 0 | 21 | 1 | 33 |
| Río Perquilauquén en San Manuel (Qfalla = 380 m3/s) | | | | | | | | |
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 3 hrs. | 121 | 35 | 109 | 7 | 12 | 26 | 5 | 9 |
| pronóstico 6 hrs. | 121 | 35 | 93 | 20 | 28 | 26 | 5 | 9 |
| Río Longaví En La Quiriquina (Qfalla = 1600 m3/s) | | | | | | | | |
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 3 hrs. | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 6 | 2 | 1 |
| pronóstico 6 hrs. | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 7 | 3 |
| Río Achibueno en la Recova (Qfalla = 1400 m3/s) | | | | | | | | |
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 3 hrs. | 23 | 0 | 17 | 5 | 6 | 0 | 0 | 0 |
| pronóstico 6 hrs. | 23 | 0 | 13 | 8 | 10 | 0 | 0 | 0 |
| Río Ancoa en El Morro (Qfalla = 400 m3/s) | | | | | | | | |
| | Nº Total de horas sobre el umbral Calibración | Nº Total de horas sobre el umbral Validación | Nº aciertos Calibración | Nº Falsas alarmas Calibración | Nº de alarmas no pronosticadas Calibración | Nº aciertos Validación | Nº Falsas alarmas Validación | Nº de alarmas no pronosticadas Validación |
| pronóstico 3 hrs. | 0 | 16 | 0 | 0 | 0 | 14 | 2 | 2 |
| pronóstico 6 hrs. | 0 | 16 | 0 | 0 | 0 | 12 | 8 | 4 |

5.4 DISEÑO GRÁFICO PARA EL DESPLIEGUE Y OPERACIÓN DEL SATR

El desarrollo de este componente del SATR tiene como objeto facilitar la toma de decisiones en tiempo real durante episodios de emergencia, a través de una visualización práctica y clara del estado de la zona de estudio.

En esta parte se propone una implementación genérica, a modo de ejemplo, para el despliegue del SATR, el cual se basa en presentar en ambiente *Windows* los resultados de los índices de Riesgo en tiempo real, tanto para los sectores amagados, como para las comunas en las cuales éstos pertenecen.

El programa para la visualización de los resultados se soporta en la información contenida en el SIG (Sistema de Información Geográfico) que constituye el Mapa de Amenazas (ver figura 4.4), en el cual se encuentra la ubicación y propiedades de las zonas amagadas, las cuales son por ejemplo una descripción del elemento afectado, foto del mismo (si está disponible), comuna y provincia a las cuales éstos pertenecen. El SIG del Mapa de Amenazas, fue elaborado en *Arcview 8.2*, mientras que el Programa de despliegue propuesto fue elaborado en *Visual Basic 6.0*.

Al ejecutar el programa aparece la ventana presentada en la figura 5.80. Además, este software supone que la información de las estaciones de control, que es recibida en tiempo real, está almacenada en una base de datos, por lo mismo se requiere, como paso inicial, la recopilación de estos datos (Click en botón superior izquierdo “cargar datos”). Al realizar esta acción, el color de fondo de los botones ubicados al lado derecho cambiará, dependiendo del valor del Índice de Riesgo que presenten los puntos asociados a éstos en el instante actual y en los instantes futuros (pronósticos), para estos efectos de visualización se identifican tres intervalos de valores del “ I_r ”:

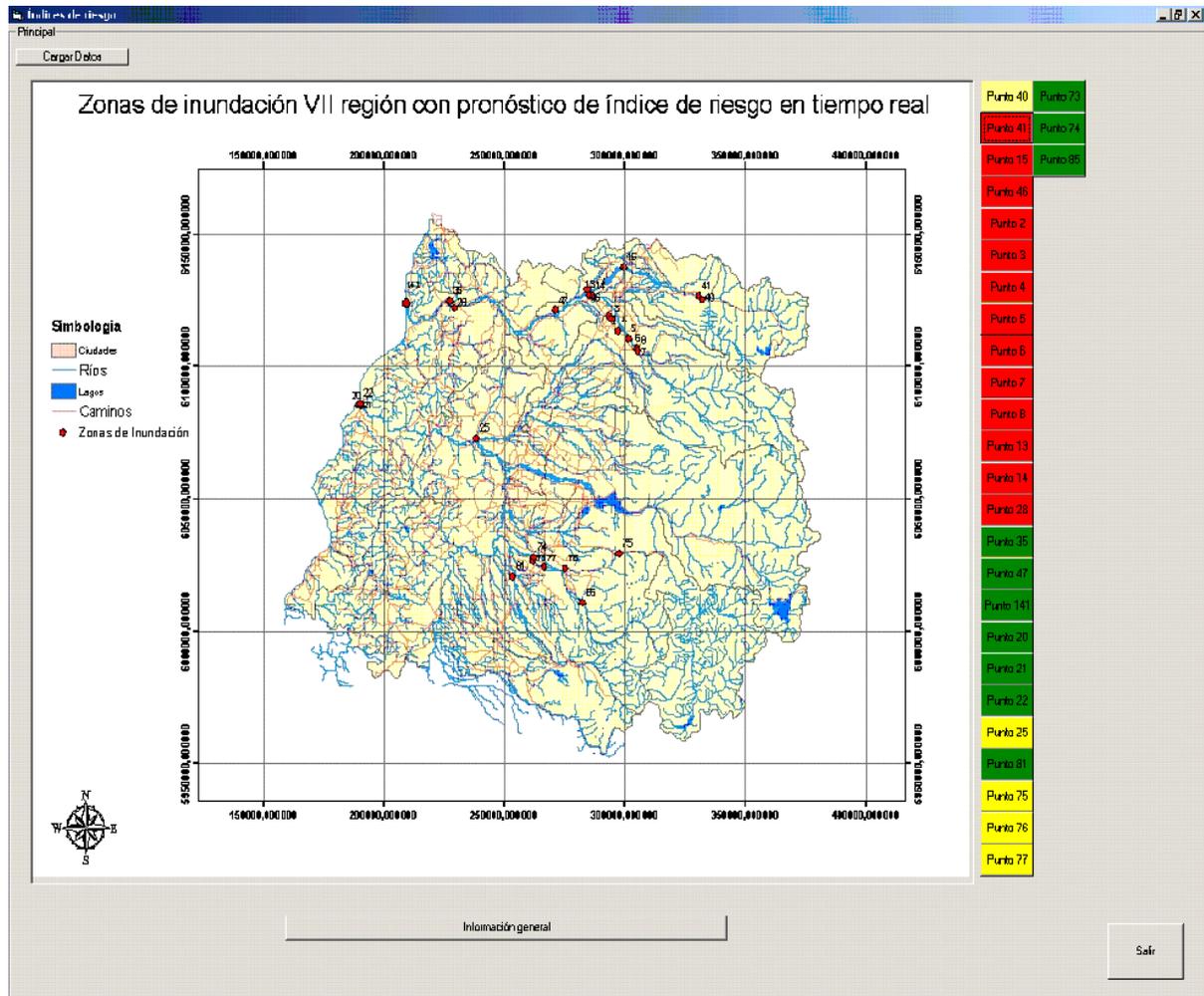
- Color verde: $0 < I_r < 60$
- Color Amarillo: $60 < I_r < 80$
- Color Rojo: $80 < I_r$

A modo de ejemplificar la operación del SATR, se realiza una simulación de operación del sistema para el día el día 27 de Mayo de 1991, a las 17:00 hrs.

Una vez cargados los datos de entrada, se puede obtener la información de los índices de riesgo individuales de los puntos afectados, al hacer Click en los botones que se encuentran en el lado derecho de la ventana (Figura 5.80). Si por ejemplo se acciona el botón “Punto 41”, aparecerá en pantalla la ventana que se presenta en la figura 5.81, en esta ventana aparece una descripción general del elemento afectado, ubicación (coordenadas UTM), provincia, comuna y una foto del mismo. Luego, dentro de la ventana que se presenta en la figura 5.81, al presionar el botón del extremo superior izquierdo, debajo de la etiqueta que dice “ver Índice de Riesgo”, aparece un gráfico (hecho en *Microsoft Excel*) que presenta el Índice de

Riesgo “observado” al instante actual y los pronósticos hechos para los mismos tiempos, además de los I_r pronosticados, tal como se aprecia en la figura 5.82.

Figura 5.80 Ventana principal programa de despliegue del SATR



Por otro lado, en la ventana principal se encuentra en la parte inferior, debajo del mapa de Amenaza, un botón con la etiqueta “Información general”, el cual al ser accionado abre la ventana que se presenta en la figura 5.83, la cual contiene un resumen del estado del SATR, incluyendo comunas que poseen elementos con I_r mayor a 80 y 100 durante las próximas 6 horas y las localidades que probablemente quedarán aisladas durante este período.

Además, en la ventana que se presenta en la figura 5.83 en la parte superior derecha hay dos botones, los cuales al ser activados entregan los índices de riesgo “ I_r ” y grados de riesgos comunales “ G_R ” (los cuales se obtienen mediante el uso de los FIS de tipo Mandami, ver capítulo 5.1.4) de las comunas pertenecientes a las Hoyas hidrográficas de los ríos Mataquito y Maule. En la figura 5.84 se presenta el resultado de activar el botón “Hoya del Río Mataquito”, al realizar esta acción

aparecen tres gráficos que resumen los hidrogramas de las cuencas pertenecientes, además de los valores de los I_r y G_r comunales durante las últimas 24 horas, además de los valores pronosticados de estas variables para las próximas seis horas.

Figura 5.81 Ventana “Punto 41”

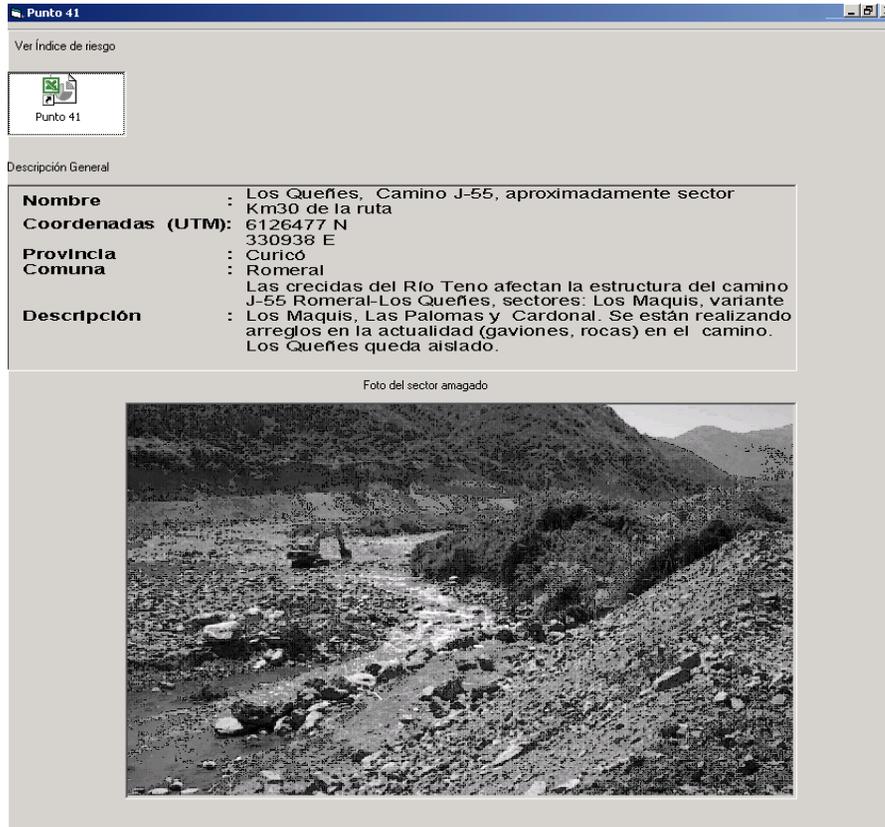


Figura 5.82 Gráfico de Ir “Punto 41” (Hora cero = 17:00 hrs. del día 27 de Mayo de 1991)

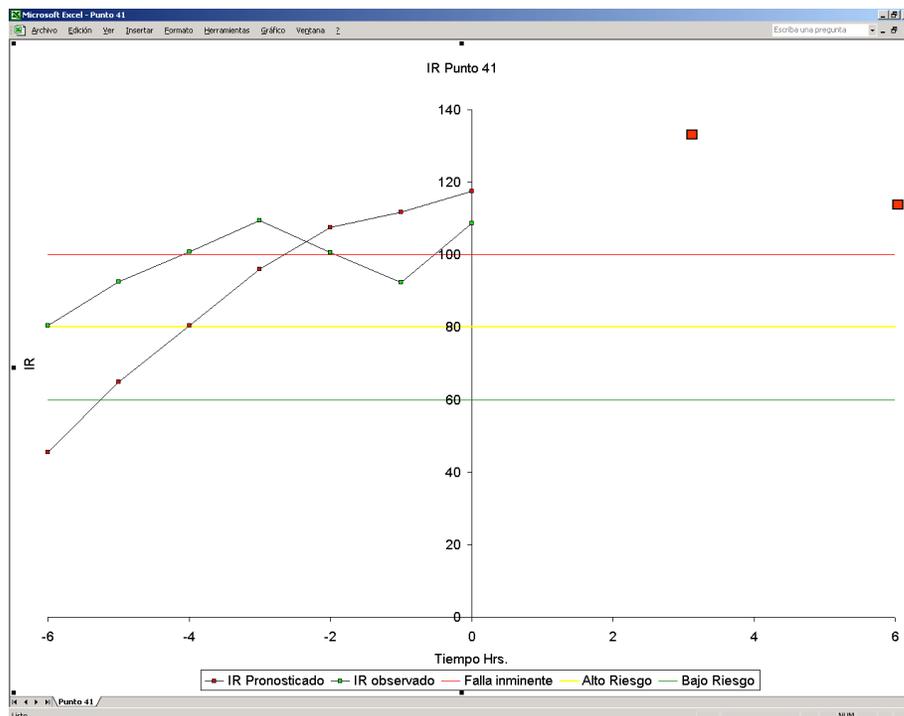
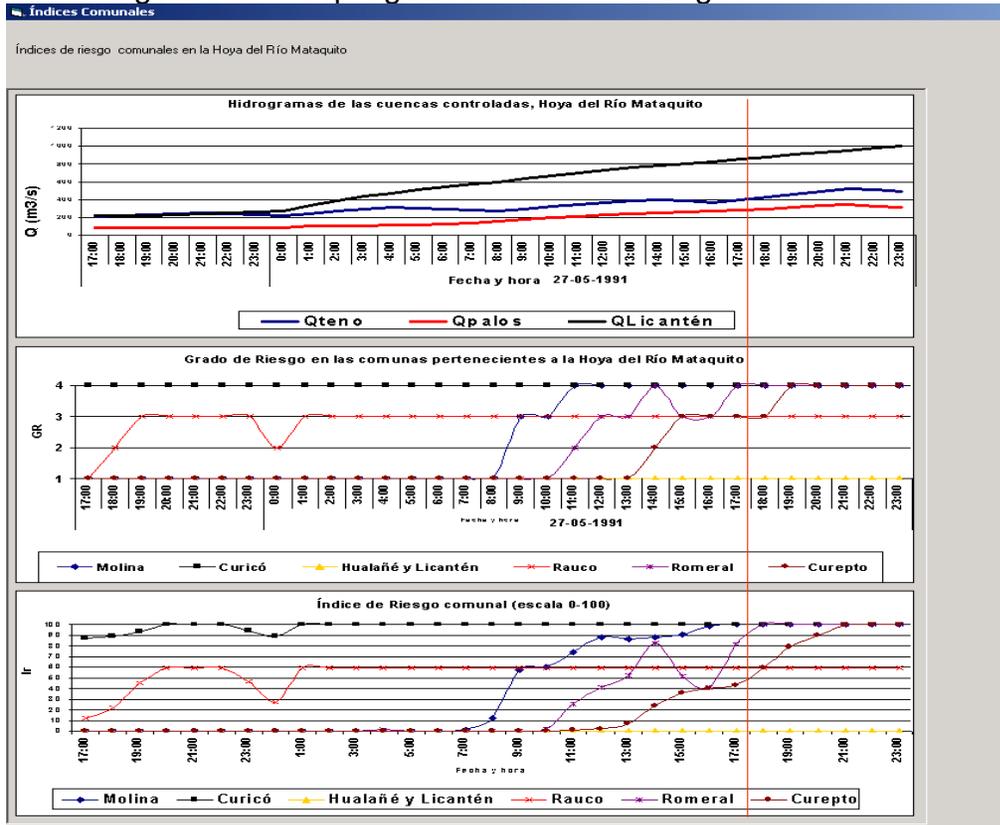


Figura 5.83 Despliegue del cuadro resumen de los sectores afectados

| Resumen | |
|---|---|
| Comunas con IR>80 en las próximas 6 horas | |
| Romeral | Índices de Riesgo Comunales: <input type="text" value="Hoya del Río Mataquito"/> <input type="text" value="Hoya del Río Maule"/> Fecha consulta: 27-05-1991 Hora Consulta: 17:00 hrs. |
| Curicó | |
| Rauco | |
| Molina | |
| Curepto | |
| Licantén | |
| Constitución | |
| Pencahue | |
| Longaví | |
| Linares | |
| Comunas con IR>100 en las próximas 6 horas | |
| Romeral | |
| Curicó | |
| Rauco | |
| Molina | |
| Curepto | |
| Licantén | |
| Constitución | |
| Pencahue | |
| Longaví | |
| Linares | |
| Sectores posiblemente aislados (IR>100 en próximas 6 horas) | |
| Ruta J-55 Km32 | |
| Ruta J-55 Km30 | |
| Sector Rincón de Sarmiento | |
| Pobladors de Iloca y La Pesca | |
| Sector Corinto | |
| Ruta L-431 | |
| Sector El Llepo | |
| Sector Huapi Alto (El Pastor) | |

Figura 5.84 Despliegue de Índices de riesgos comunales



6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

6.1.1 Recopilación de antecedentes y características hidrológicas de la zona de estudio

Con respecto a los antecedentes recopilados de inundaciones y fallas en los elementos incluidos al SATR, se aprecia en general que los valores de los umbrales de falla son altos con respecto al promedio de los caudales instantáneos máximos mensuales (acápites 4.3 y 4.4), lo que se traduce en una relativa poca frecuencia de las fallas en dichos puntos. También se observa en el punto 4.3, que el promedio de los caudales instantáneos máximos mensuales son mayores con respecto al promedio de los caudales medios mensuales en cuencas pluviales que en las nivopluviales durante los meses de invierno (sección 4.3).

Es interesante notar el hecho, según la información obtenida durante las campañas de terreno, que del total catastro de sectores amagados (160 puntos) la mayoría de los problemas no incorporados al SATR son de menor envergadura o bien están internalizados por la población.

Además, las precarias condiciones de ciertos elementos no incluidos en el SATR, hacen que las fallas que se producen en los mismos sean frecuentes. Un ejemplo de lo antes señalado es la existencia de caminos que cruzan por badenes el cauce de algunos esteros, lo que hace que éstos queden cortados prácticamente durante toda la temporada de lluvias. Por lo tanto, aún cuando este tipo de elementos no pertenece al SATR, la información recabada es de gran utilidad ya que representa un buen antecedente sobre falencias en la infraestructura para soportar la época lluviosa en la región de estudio.

No se incluyeron aspectos económicos para la definición del Índice de Riesgo, tales como análisis de frecuencias, curvas de daños en función de la probabilidad de excedencia de los caudales, entre otros. Lo anterior en vista de la escala, objetivos del estudio e información que sería necesario reunir con este fin, por lo cual esto está fuera de los alcances de este trabajo.

6.1.2 Uso de Lógica Difusa

Los modelos de Lógica Difusa para el pronóstico de caudales (“FIS_{Sugeno}”) son complejos en estructura y con una considerable cantidad de parámetros, no aportando una mejora significativa con respecto a los modelos lineales de pronóstico de caudales. Entre las posibles causas que pueden explicar este hecho, se destacan las siguientes:

- [1] Los datos de entrada que emplean los “FIS_{Sugeno}” no son suficientemente explicativos, en relación al grado de cumplimiento de las reglas sobre las cuales estos operan. La conjunción de ciertos rangos de las distintas variables de entrada no siempre implican un mismo comportamiento de la cuenca.
- [2] El método de calibración de los FIS mediante el uso del “G.A.” no asegura la obtención de los parámetros “óptimos”, considerando la cantidad de parámetros a estimar y la alta no – linealidad del esquema del FIS empleado, lo cual genera una apreciable cantidad de óptimos locales para la minimización de la heurística utilizada en la calibración de dichos parámetros.

Además, en cuanto al uso del “G.A.” para calibrar los “FIS_{Sugeno}” de pronóstico de caudales, es interesante apreciar la alta convergencia que el G.A. presenta para valores de la probabilidad de mutación “P_{mut}” bajos, aún cuando en la cruce (Crossover) de los padres de una generación, los genes a intercambiar entre estos sean escogidos de manera aleatoria, y que por lo tanto no siempre se intercambien los mismos genes. Hecho por el cual el “G.A.”, para una probabilidad de mutación nula, no necesariamente debiese ser absolutamente convergente.

Otro estudio (Stüber et al., 2000) donde se empleó los FIS_{Sugeno} para el pronóstico caudales, se desarrolló en la cuenca del Río “Mosel” en la localidad de “Trier” (Área de la cuenca = 23.860 km², afluente al Rhin) en Alemania, el cual emplea como variables de entrada los caudales aguas arriba y en los afluentes a esta cuenca, por lo tanto es del tipo Q-Q. Los resultados entregados por dicho estudio son consistentes con respecto a los obtenidos en la presente Tesis, ya que en el citado trabajo se logra obtener una mejora poco significativa con respecto al modelo lineal Q-Q que ahí se propone, para un pronóstico con adelanto de seis horas. Este tiempo de adelanto del pronóstico parece ser bastante modesto, en proporción al tamaño de la cuenca del “Mosel”, lo cual puede explicarse debido a que el desfase entre los afluentes y el lugar donde se realizan los pronósticos es pequeño, según figuras presentadas en la misma publicación.

En lo que respecta al uso de los FIS de tipo Mandami (FIS_{Mandami}), la definición de los “G_R^{Comuna}” permite concluir que a través de este método **es posible obtener valores bivaluados, de pertenencia o no pertenencia, a partir de un razonamiento difuso**, ya que es posible determinar intervalos disjuntos de decisión en los cuales los “I_r^{Comuna}” (sin escalar) toman distintos significados (valores discretos de “G_R^{Comuna}”). Lo anterior basado en la definición de la matriz de inclusión difusa de los conjuntos difusos de implicancia “S(A)”.

Lo señalado en el párrafo anterior es un resultado de importancia, puesto que el razonamiento subjetivo y cualitativo de identificación de rangos en los cuales una variable, en este caso el Índice de Riesgo comunal, posee un **valor** con *significado* (bajo, medio, etc.) distinto entre intervalos es una decisión difusa, en el sentido que los valores frontera de dichos intervalos a priori son inciertos.

Sin embargo, tradicionalmente se definen a priori estos conjuntos de forma disjunta y con pertenencia completa (lógica bivaluada), dada la necesidad de rangos bien definidos de estas variables para la ejecución de ciertas acciones, aún cuando no haya certeza de los límites de estos intervalos.

Gracias a las propiedades de la matriz de inclusión difusa de los conjuntos difusos de implicancia “S(A)”, es posible definir los intervalos de variación del Índice de Riesgo comunal de manera difusa, con distintos grados de pertenencia y con intersección no vacía, para obtener como resultado la matriz “S(A)” y en consecuencia, mediante la definición del estado de la variable “ G_R^{Comuna} ” como se plantea en la ecuación 5.18, los rangos disjuntos de variación de los índices de riesgo comunales, a los cuales se les asocia un valor discreto del grado de Riesgo de la comuna.

Además, la definición del grado de riesgo de la ecuación 5.18 permite interpretar la pertenencia de una variable incluida en la intersección de dos conjuntos difusos, es decir que tiene un valor de pertenencia superior a cero en dos conjuntos simultáneamente, de la siguiente forma:

“Los elementos pertenecientes a la intersección de dos conjuntos difusos pertenecen en mayor medida al conjunto de menor tamaño de ambos”

Correspondiendo el tamaño de un conjunto difuso, al valor de la cardinalidad del mismo. De lo anterior, se vislumbra el alcance que pueda tener esta metodología en el campo de la toma de decisiones y control del SATR, ya que los “ G_R^{Comuna} ”, pueden ser interpretados como acciones a ejecutar durante eventos extremos (por ejemplo alertar a las autoridades comunales en función del valor de los “ G_R^{Comuna} ”).

Se concluye que los FIS_{Mandami}, son una herramienta útil para la confección de Índices de Riesgo agregados (“ I_r^{Comuna} ”), los cuales son continuos y con una escala fija.

6.1.3 Modelos lineales de pronóstico de caudales

Tanto los modelos lineales P-Q, como Q-Q, de pronóstico de caudales muestran desempeños aceptables para tiempos de adelanto del pronóstico del orden de tres horas. Sin embargo, para los tiempos de adelanto o pronóstico mayores, el ajuste de estos modelos empeora, ello se explica por el hecho que dichos intervalos temporales de pronóstico son cercanos a los tiempos de respuesta de las cuencas aportantes a las estaciones limnigráficas utilizadas. Adicionalmente, en la aplicación recursiva de los modelos P-Q no existe certeza de la intensidad acumulada de precipitación futura.

Se observa que modelos lineales P-Q obtenidos, presentan valores relativamente bajos de los parámetros de la variable precipitación, en comparación a los parámetros asociados a los caudales. Por lo tanto, este tipo de modelo es básicamente dependiente de los caudales registrados en instantes anteriores.

En el caso de los modelos lineales Q-Q de pronóstico de caudales, se aprecia una sobreajuste de los parámetros, lo que indica la variabilidad del comportamiento de la onda de crecida entre distintos eventos. Esto se debe a la dependencia de la crecida con respecto a otras variables no consideradas por los modelos Q-Q, como son por ejemplo la distribución e intensidad de la precipitación, y en cuencas de régimen nivo-pluvial al área aportante neta durante las tormentas.

No obstante, una ventaja fundamental de los modelos lineales con respecto a los no lineales es la facilidad para calibrar los parámetros, utilizando el método de los mínimos cuadrados, donde se asegura que el óptimo local encontrado es el óptimo global de la función error utilizada para la calibración.

A juicio del Autor, se plantea la necesidad de contar con datos pronosticados de precipitación y temperatura (con cierta precisión, para escalas temporales del orden de horas), con objeto de aumentar los tiempos de adelanto de los pronósticos de caudales y mejorar la calidad de estos, ya que estas variables podrían ser incorporadas a los modelos de pronósticos de caudales.

Al respecto, los avances en la modelación de la circulación atmosférica proporcionan alentadoras visiones acerca de la posibilidad de establecer pronósticos de precipitaciones a nivel diario y horario, a escalas espaciales que hacen atractivo el intentar modelar el fenómeno precipitación-escorrentía en forma distribuida.

6.1.4 Aplicabilidad del SATR

Para la operación del SATR es fundamental contar con una alimentación continua de los datos controlados en tiempo real por las estaciones de control, a intervalos de una hora durante las crecidas y con un día de antelación, por lo que se sugiere comenzar a cargar los datos necesarios cuando sea prevista la llegada a la VII Región de sistemas frontales de importancia.

Se concluye que el SATR es una útil herramienta de información para la gestión durante el desarrollo de las emergencias por inundación y falla de obras hidráulicas, aún cuando no se empleen los pronósticos de caudales. El sólo hecho de disponer de índices de riesgo en tiempo presente puede entregar una información de interés durante emergencias por inundaciones o fallas de obras hidráulicas.

Además, con frecuencia el pronóstico de los índices de riesgo (sin el uso de modelos de pronóstico de caudales) es inherente al SATR, ya que en la mayoría de los casos las estaciones de control se ubican a una considerable distancia aguas arriba de los elementos bajo riesgo asociados.

La metodología utilizada para el diseño del SATR puede ser implementada en otras Regiones del País, empleando la Lógica Difusa en la obtención de índices de Riesgo Comunales e individuales de los elementos, tal como se propone en el capítulo 5.2.

6.2 RECOMENDACIONES

Es necesario un apegado seguimiento del comportamiento de los modelos de pronóstico durante la operación del SATR, esto con el objeto de recalibrar, cuando corresponda, dichos modelos.

Se recomienda realizar una evaluación continua de los umbrales de falla para cada zona, ya que éstos pueden no ser los adecuados. Lo cual puede deberse, entre otras causas, a que la información empleada en la asignación de los umbrales de falla en general es escasa e inexacta, además de la subjetividad para aplicar el criterio de selección de éste. Además, los valores de los umbrales son variables en el tiempo, debido a mejoras o cambios en la infraestructura que pueden haber tanto en las zonas amagadas como en los cauces asociados a las mismas.

En las cuencas que presentan embalses que alteren el régimen natural, es recomendable contar con la regla de operación e información de las variables de estado en tiempo real de los mismos; con el objetivo de incorporar los vertimientos de éstos como datos de entrada de los modelos de pronóstico, además de analizar la importancia de los embalses en la amortiguación de los caudales máximos.

Se prevé que en el futuro el pronóstico de caudales se realice mediante el uso de modelos distribuidos de rastreo de crecidas, que a su vez incorporen pronóstico de precipitación y temperatura a escalas adecuadas.

La potencialidad del uso de los FIS tipo Sugeno, está orientada hacia la modelación de fenómenos bajo ambientes de incertidumbre del estado del sistema, donde la modelación Hidráulica no logra resultados adecuados en todo el rango de variación del sistema. Sería adecuado el uso de los FIS_{Sugeno}, calibrados por ejemplo mediante el uso del G.A., para acoplar modelos que tienen una validez limitada en el valor de alguna variable de estado. Estos modelos constituirían las reglas de inferencia del FIS, mientras que la variable difusa correspondería al conjunto de variables de estado de las cuales depende la validez de los modelos planteados. Un ejemplo sencillo de aplicación se presentó en el capítulo 3.2.3, donde se aproxima la función coseno en el intervalo $[0, 2\pi]$ mediante un FIS tipo Sugeno.

Además, las estructuras y en particular las reglas de los FIS_{Sugeno} pueden definirse de manera conveniente para poder acoplar modelos no lineales mediante esta técnica.

Otro aspecto, que a juicio del autor merece un posterior análisis en futuras aplicaciones de los FIS_{Mandami}, es el estudio de las propiedades y la relación entre la estructura entre matrices $S(A)$ y $S(MF)$.

Adicionalmente, se propone como tema de interés el estudio de la calibración de los FIS_{Mandami} utilizando G.A., aspecto que en la presente Tesis no fue tratado, dado que no se poseían datos cuantitativos para calibrar y validar este tipo de modelos.

BIBLIOGRAFÍA

1. BF Ingenieros Civiles, 1987, "Investigación de Sistemas de Alerta de Crecidas Fluviales", Dirección General de Aguas, MOP.
2. Brown E. y Vargas X., 1988, "Modelos de Función de Transferencia. Su Uso en el Pronóstico en Tiempo Real". XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Vol. 2, La Habana, Cuba.
3. Butnario D., Klement E.P., 1993, "Triangular Norm-Based Measures and Games with fuzzy Coalitions". Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
4. Estévez P., 1997, "Optimización Mediante Algoritmos Genéticos" Anales del Instituto de Ingenieros de Chile, pp. 83-92.
5. Herrera F., Lozano M., Verdegay J. L., 1993, "Algoritmos Genéticos con Parámetros Reales". V Congreso de la A. Española de Inteligencia Artificial, CAEPIA'93, pp. 41-50.
6. Jacoby D., 2001, "Vulnerabilidad del sector urbano de La Reina frente a desbordes de la Quebrada San Ramón", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, U. de Chile.
7. Kosko B., 1992, "Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence", Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
8. Mandami E.H. and Assilian S., 1975, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", Int. J. Man-Machine Studies, vol. 7, N° 1, pp. 1-13.
9. Matlab Users Guide, 1999, "Fuzzy Logic Toolbox for Use With Matlab", The Math Works Inc.
10. Plantamura I., Fanelli A., Cangelli E., Castellano G., 2003, "An Environmental Performance Evaluation System: a Neuro-Fuzzy Modeling Approach", The 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Santiago, Chile.
11. Santander A., Vargas X., 2003, "Uso de Algoritmo Genético para calibrar un modelo de Lógica Difusa de pronóstico de Caudales en Tiempo Real", XVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile.

12. Stüber M., Gemmar P., Greving M., 2000, "Machine supported Development of Fuzzy - Flood Forecast Systems", European Conference on Advances in Flood Research, Potsdam, PIK Report Nr. 65 Axel Bronstert, Christine Bismuth, Lucas Menzel (Ed.), Reprint of Proceedings Vol. 2, Pp. 504 – 515.
13. Sugeno M., 1985, "Industrial applications of Fuzzy control", Elsevier Science Pub. Co.
14. Túpac Y., Pacheco M. A., Vellasco M., Tanscheit R., 1999, "Controlador Difuso con Evolución del Conjunto de Reglas de Inferencia", V Congreso Internacional de Ingeniería Informática (ICIE99), Buenos Aires, Argentina.
15. Vargas X. y Brown E., 1988, "Modelos de Función de Transferencia de Múltiples Entradas para el Pronóstico de Crecidas en Tiempo Real". XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Vol. 2, La Habana, Cuba.
16. Vargas X., Brown E. y Sandoval G., 1986, "Un Modelo de Función de Transferencia para el Pronóstico de Caudales en Tiempo Real". XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Vol. 2, Sao Paulo, Brasil.
17. Vargas X., Santander A., 2002, "Uso de Lógica Difusa para la estimación de Índices de Riesgo de Inundación y falla de obras hidráulicas en tiempo Real", XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba.
18. Vargas X., Valck P. y Santander A., 2002, "Pronóstico de caudales en tiempo real. ¿Modelación concentrada o semidistribuida?", XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba.
19. Yen B.C. and Ang A.H.-S., 1971, "Risk Analysis in Design of Hydraulic Projects", Stochastic Hydraulics, proceedings of First Internat. Symp., University of Pittsburgh, ed. By C. L. Chiu, pp. 694-701, Pittsburgh, PA.
20. Yen B. C., Cheng, S. T. and Melching C. S., 1986, "First-Order Reliability Analysis", Stochastic and Risk Analysis in Hydraulic Engineering, ed. By B.C. yen, pp. 1-36, Water Resources Publications, Littleton, CO.
21. Yeshewatesfa H. Bardossy A. and Theisen H., 2001, "Development of a fuzzy logic based rainfall-runoff model" Hydrological Sciences Journal, Vol 46 N°3, pp. 363-376.
22. Zadeh Lofti A., 1965, "Fuzzy Sets", Information and Control, vol. 8, pp. 338-353.