



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

**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA SEGURIDAD
HIDROLÓGICA DE OBRAS HIDRÁULICAS. ANÁLISIS EN
CUENCAS PLUVIALES DE LA ZONA CENTRAL DE CHILE PARA
EL ESCENARIO A2**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DANIELA ALEJANDRA RADDATZ DELGADO

PROFESOR GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ERNESTO BROWN FERNÁNDEZ
RICARDO GONZÁLEZ VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2011

Resumen

A nivel mundial existe una creciente preocupación por las consecuencias del cambio climático global, debido a las variaciones que se han observado en los eventos meteorológicos actuales, y que se espera, se intensifiquen en el futuro. Esta situación puede alterar la seguridad hidrológica de las obras hidráulicas construidas y en proyecto, al haber sido diseñadas a base de información considerada invariante en el tiempo, lo que se traduce en modificaciones de los períodos de retorno con que éstas se diseñan y generar por consiguiente problemas para la población ubicada aguas abajo de estas obras.

Este trabajo es desarrollado en cuencas pluviales de la zona costera de la Región del Bio Bio y su objetivo principal es estudiar la variación de la seguridad hidrológica de obras hidráulicas para el escenario de emisiones A2 en el período 2070-2100. Para esto, se calibra y valida el modelo hidrológico GR4J en aquellas cuencas con información fluviométrica, utilizando como entradas al modelo las series de precipitación y evaporación media diaria observadas en estaciones cercanas a las cuencas de estudio. Posteriormente los modelos calibrados son utilizados para determinar las series de caudales actuales y futuros, a partir de la información meteorológica proporcionada por el modelo PRECIS DGF, previamente corregida de modo que sea representativa de las cuencas estudiadas. Finalmente se realiza un análisis de frecuencia con el que se determinan los caudales y períodos de retorno para la línea base y el escenario A2.

Se realiza también un análisis en cuencas sin información fluviométrica, para lo cual se determinan los parámetros operacionales del modelo por medio de correlaciones entre éstos e índices que dependen de la geomorfología de la cuenca. Estos parámetros permiten determinar la variación de los períodos de retorno y caudales actuales y futuros del mismo modo en el que se realizó para las cuencas con información fluviométrica.

Los resultados obtenidos indican una disminución de los caudales de crecidas en un rango entre 56% y 8%, dependiendo de la cuenca y del período de retorno considerado. En general, mientras mayor es el período de retorno, menor es la variación del caudal. La seguridad hidrológica de las obras hidráulicas presenta un incremento en el período 2070-2100, debido al aumento de los períodos de retorno de diseño en el escenario A2.

Agradecimientos

A Ximena Vargas, mi profesora guía, por brindarme un interesante tema de investigación y apoyarme durante su desarrollo.

A mi familia, en especial a mis padres y hermanas, que siempre me han apoyado a pesar de la distancia.

A mis amigos y compañeros, en especial a quienes me han acompañado en estos últimos años.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2. Organización del Informe	4
2. Antecedentes Bibliográficos	5
2.1. Modelo GR4J	5
2.1.1. Descripción del modelo	5
2.2. Criterios de Diseño de obras Hidráulicas	10
3. Caracterización de la zona de estudio	13
3.1. Ubicación Geográfica e información de entrada al modelo GR4J	13
3.2. Geomorfología de la Zona	17
3.3. Uso de Suelo	19
3.4. Clima	19
3.5. Recursos Hídricos	21
4. Calibración y Validación del modelo hidrológico GR4J	22
4.1. Estación Río Pingueral en Dichato	23
4.2. Cuenca Río Andalién	27
4.3. Estación Río Laraquete en el Cajón	32
4.4. Estación Río Carampangue en Carampangue	36
4.5. Estación Río Lebu en las Corrientes	41
4.6. Estación Río Caramávida en Caramávida	45
4.7. Estación Río Butamalal en Butamalal	50
4.8. Estación Río Cayucupil en Cayucupil	54

4.9. Estación Río Reputo en Reputo	59
5. Análisis de Frecuencia y determinación de Períodos de Retorno actuales y futuros	64
5.1. Cuencas con información Fluviométrica	64
5.1.1. Estación Río Pingual en Dichato	65
5.1.2. Estación Río Andalién camino a Penco	68
5.1.3. Estación Río Laraquete en el Cajón	70
5.1.4. Estación Río Carampangue en Carampangue	73
5.1.5. Estación Río Lebu en Las Corrientes	75
5.1.6. Estación Río Caramávida en Caramávida	77
5.1.7. Estación Río Butamalal en Butamalal	79
5.1.8. Estación Río Cayucupil en Cayucupil	82
5.1.9. Estación Río Reputo en Reputo	84
5.2. Cuencas sin información fluviométrica	87
6. Conclusiones	100
Bibliografía	104

Índice de figuras

2.1. Descripción del modelo GR4J. Fuente: Instituto CEMAGREF	6
3.1. Estaciones Utilizadas	15
3.2. Delimitación de las Cuencas	18
3.3. Uso de Suelo	20
4.1. Series de Caudal Observadas y Modeladas para el Período de Calibración en Estación Río Pingueral en Dichato (Mar 1985-Dic 1988)	24
4.2. Series de Caudal Observadas y Modeladas para el Período de Validación en Estación Río Pingueral en Dichato (Ene 1989-Dic 1989)	25
4.3. Caudal Observado vs Modelado para el Período de Calibración en Estación Río Pingueral en Dichato (Mar 1985-Dic 1988)	25
4.4. Caudal Observado vs Modelado para el Período de Validación en Estación Río Pingueral en Dichato (Ene 1989-Dic 1989)	26
4.5. Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Pingueral en Dichato (Mar 1985-Dic 1989)	26
4.6. Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Pingueral en Dichato (Mar 1985-Dic 1989)	27
4.7. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1983-Dic 1992)	29
4.8. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1993-Dic 1995)	29
4.9. Caudal Observado vs Modelado para el Período de Calibración en Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1983-Dic 1992)	30
4.10. Caudal Observado vs Modelado para el Período de Validación en Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1993-Dic 1995)	30

4.11. Simulación Caudales Medios Mensuales Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1983-Dic 1995)	31
4.12. Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1983-Dic 1995)	31
4.13. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Laraquete en el Cajón (Mar 1986-Dic 1992)	33
4.14. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Laraquete en el Cajón (Ene 1993-Dic 1995)	34
4.15. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Laraquete en el Cajón (Mar 1986-Dic 1992)	34
4.16. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Laraquete en el Cajón (Ene 1993-Dic 1995)	35
4.17. Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Laraquete en el Cajón (Mar 1986-Dic 1995)	35
4.18. Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Laraquete en el Cajón (Mar 1986-Dic 1995)	36
4.19. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ago 1976-Dic 1981)	38
4.20. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ene 1982-Dic 1983)	38
4.21. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ago 1976-Dic 1981)	39
4.22. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ene 1982-Dic 1983)	39
4.23. Simulación de Caudales Medios Mensuales en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ago 1976-Dic 1983)	40
4.24. Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ago 1976-Dic 1983)	40
4.25. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Lebu en las Corrientes (Abr 1980-Mar 1984)	42
4.26. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Lebu en las Corrientes (Abr 1984-Jun 1986)	43
4.27. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Lebu en las Corrientes (Abr 1980-Mar 1984)	43

4.28. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Lebu en las Corrientes (Abr 1984-Jun 1986)	44
4.29. Simulación Caudales Medios Mensuales Estación Río Lebu en las Corrientes(Abr 1980-Jun 1986)	44
4.30. Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Lebu en las Corrientes (Abr 1980-Jun 1986)	45
4.31. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Caramávida en Caramávida (Ene 1983-Ago 1988)	47
4.32. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Caramávida en Caramávida (Sep 1988-Ago 1990)	47
4.33. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Caramávida en Caramávida (Ene 1983-Ago 1988)	48
4.34. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Caramávida en Caramávida(Sep 1988-Ago 1990)	48
4.35. Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Caramávida en Caramávida (Ene 1983-Ago 1990)	49
4.36. Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Caramávida en Caramávida (Ene 1983-Ago 1990)	49
4.37. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Butamalal en Butamalal (May 1982-Dic 1985)	51
4.38. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Butamalal en Butamalal(Ene 1986-Jul 1987)	52
4.39. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Butamalal en Butamalal(May 1982-Dic 1985)	52
4.40. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Butamalal en Butamalal(Ene 1986-Jul 1987)	53
4.41. Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Butamalal en Butamalal (May 1982-Jul 1987)	53
4.42. Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Butamalal en Butamalal(May 1982-Jul 1987)	54
4.43. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1976-Dic 1979)	56
4.44. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1980-Dic 1982)	56

4.45. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1976-Dic 1979)	57
4.46. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Cayucupil en Cayucupil(Ene 1980-Dic 1982)	57
4.47. Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1976-Dic 1982)	58
4.48. Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1976-Dic 1982)	58
4.49. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1976-Dic 1979)	60
4.50. Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1980-Dic 1982)	61
4.51. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1976-Dic 1979)	61
4.52. Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1980-Dic 1982)	62
4.53. Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1976-Dic 1982)	62
4.54. Curva de Duración Caudales Medios Diarios Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1976-Dic 1982)	63
5.1. Curvas de Duración	65
5.2. Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Pingüeral en Dichato	67
5.3. Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Pingüeral en Dichato . .	67
5.4. Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Andalién camino a Penco	69
5.5. Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Andalién camino a Penco	69
5.6. Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Laraquete en el Cajón	71
5.7. Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Laraquete en el Cajón . .	72
5.8. Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Carampangue en Carampangue	73
5.9. Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Carampangue en Carampangue	74
5.10. Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Lebu en Las Corrientes	75
5.11. Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Lebu en Las Corrientes .	76

5.12. Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Caramávida en Caramávida	78
5.13. Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Caramávida en Caramávida	79
5.14. Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Butamalal en Butamalal	80
5.15. Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Butamalal en Butamalal	81
5.16. Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Cayucupil en Cayucupil	83
5.17. Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Cayucupil en Cayucupil .	83
5.18. Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Reputo en Reputo .	85
5.19. Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Reputo en Reputo	85
5.20. Relación Geomorfológica parámetro X_1	88
5.21. Relación Geomorfológica parámetro X_2	89
5.22. Relación Geomorfológica parámetro X_3	90
5.23. Relación Geomorfológica parámetro X_4	91
5.24. Variación de los caudales de 10 años de período de retorno	94
5.25. Variación de los caudales de 100 años de período de retorno	95
5.26. Variación de los caudales de 1000 años de período de retorno	96
5.27. Variación de la Seguridad hidrológica de obras diseñadas con 10 años de período de retorno	97
5.28. Variación de la Seguridad hidrológica de obras diseñadas con 100 años de período de retorno	98
5.29. Variación de la Seguridad hidrológica de obras diseñadas con 1000 años de período de retorno	99

Índice de Tablas

2.1. Criterios de diseño generalizados para estructuras de control de agua (Fuente: Chow et al. (1994)	10
2.2. Criterios de diseño generalizados para estructuras de control de agua (Fuente: Chow et al. (1994)(Continuación)	11
2.3. Períodos de retorno para diseño (Fuente: Manual de Carreteras, MOP 2010)	11
2.4. Valores mínimos recomendados del Período de Retorno de Lluvias de Diseño para Obras Alternativas de Drenaje Urbano	12
3.1. Estaciones fluviométricas	14
3.2. Estaciones Meteorológicas	14
3.4. Características de las cuencas de estudio	16
3.3. Estaciones pluviométricas usadas en la obtención de factores de corrección .	16
3.5. Información disponible	17
4.1. Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Pingual	23
4.2. Resultados de Calibración y Validación	24
4.3. Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Andalién	27
4.4. Coeficientes de Nash-Sutcliffe para los períodos de Calibración y Validación	28
4.5. Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Laraquete	32
4.6. Resultados de Calibración y Validación	33
4.7. Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Carampangue	36
4.8. Resultados de Calibración y Validación	37
4.9. Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Lebu	41
4.10. Resultados de Calibración y Validación	42
4.11. Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Caramávida	45
4.12. Resultados de Calibración y Validación	46
4.13. Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Butamalal	50

4.14. Resultados de Calibración y Validación	51
4.15. Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Cayucupil	54
4.16. Resultados de Calibración y Validación	55
4.17. Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Reputo	59
4.18. Resultados de Calibración y Validación	60
5.1. Variación de las precipitaciones actuales y futuras	65
5.2. Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Pingueral en Dichato	66
5.3. Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Pingueral en Dichato	66
5.4. Períodos de Retorno y caudales asociados Río Pingueral	68
5.5. Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Andalién Camino a Penco	68
5.6. Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Andalién Camino a Penco	70
5.7. Períodos de Retorno y caudales asociados Río Andalién	70
5.8. Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Laraquete en el Cajón	71
5.9. Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Laraquete en el Cajón	71
5.10. Períodos de Retorno y caudales asociados Río Laraquete	72
5.11. Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Carampangue en Carampangue	73
5.12. Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Carampangue en Carampangue	74
5.13. Períodos de Retorno y caudales asociados Río Carampangue	75
5.14. Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Lebu en las Corrientes	76
5.15. Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Lebu en las Corrientes	76
5.16. Períodos de Retorno y caudales asociados Río Lebu	77
5.17. Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Caramávida en Caramávida	77
5.18. Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Caramávida en Caramávida	78
5.19. Períodos de Retorno y caudales asociados Río Caramávida	79
5.20. Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Butamalal en Butamalal	80
5.21. Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Butamalal en Butamalal	80
5.22. Períodos de Retorno y caudales asociados Río Butamalal	81
5.23. Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Cayucupil en Cayucupil	82
5.24. Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Cayucupil en Cayucupil	82
5.25. Períodos de Retorno y caudales asociados Río Cayucupil	84
5.26. Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Reputo en Reputo	84
5.27. Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Reputo en Reputo	86
5.28. Períodos de Retorno y caudales asociados Río Reputo	86
5.29. Parámetros geomofológicos base	87

5.30. Vida Útil según Período de Retorno utilizado	93
--	----

Capítulo 1

Introducción

En el diseño de obras hidráulicas resultan determinantes los factores económicos y de seguridad hidrológica de la misma. Dado que en la mayoría de los casos no resulta rentable diseñar una obra utilizando el caudal asociado a la crecida máxima probable, que sería aquel que proporcionaría la mayor seguridad hidrológica a la obra, se diseña con tormentas de períodos de retorno definidos en gran medida por la experiencia del ingeniero a cargo del proyecto y antecedentes de obras similares. Chow et al. (1994) recomienda algunos períodos de retorno en función el tipo de obra y los riesgos que implica la posible falla de ésta para la población ubicada aguas abajo de la obra. Es claro que si el período de retorno escogido no es el adecuado, las consecuencias económicas y para la población pueden ser significativas.

Considerando que durante los últimos años el clima de la tierra ha experimentado un importante proceso de cambio, que se observa principalmente en un aumento de temperatura a nivel global y una modificación de los patrones de precipitación, se vuelve de gran importancia determinar cómo variará la seguridad de las obras hidráulicas, en base a la variación de los períodos de retorno asociados a los caudales de diseño de las mismas.

Para homogeneizar criterios en cuanto a los cambios que se podrían producir en el futuro, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC (2007)) determinó 4 familias de escenarios de emisiones posibles (A1, A2, B1 B2) que consideran vías de desarrollo diferentes incorporando una serie de variables demográficas, económicas y tecnológicas, las que resultan en diferentes magnitudes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

El escenario A1 supone un crecimiento mundial muy rápido, con un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B). B1 describe un mundo con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida hacia una economía de servicios y de información. B2 describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental. A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento.

Para evaluar los cambios que se producirían bajo los distintos escenarios de emisiones, se han desarrollado una serie de modelos globales de circulación de la atmósfera y de los océanos. Sin embargo estos modelos tienen una resolución espacial (cientos de kilómetros) que imposibilita la obtención de buenos resultados en zonas específicas, especialmente donde existen importantes variaciones de relieve, como es el caso de Chile. Para mejorar esta situación el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, ha implementado el modelo PRECIS-DGF, que corresponde a un modelo de circulación regional forzado en sus bordes por el modelo global HadCM3, y que entrega proyecciones hacia fines del siglo XXI para Chile continental en una grilla de 25x25 km, considerando los escenarios A2 y B2.

La información derivada del modelo PRECIS, puede ser usada como entrada de modelos hidrológicos que permitan estimar los caudales que se generarían en cada escenario simulado. En particular, se propone utilizar el modelo GR4J (Gènie Rural à 4 paramètres Journaliere) desarrollado por Edijatno y Michel (1989) y mejorado por Perrin et al. (2003), ya que con sólo 4 parámetros permite generar caudales medios diarios en cuencas pluviales a partir de información de precipitación y evaporación. Aplicaciones como la realizada por López (2007) muestran que el modelo es capaz de representar los caudales medios diarios en cuencas chilenas, de manera similar a modelos más complejos, en tanto que Salvatierra (2008) determinó que los parámetros del modelo pueden obtenerse a partir de relaciones geomorfológicas en cuencas sin información fluviométrica.

En este trabajo se pretende utilizar los resultados de los modelos antes mencionados, para definir la variación de los períodos de retorno asociados a caudales de diseño de obras hidráulicas en cuencas costeras de la Región del Bio Bio, de manera de verificar si

se producen cambios en la seguridad hidrológica en una situación futura que considere el escenario de emisiones A2.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es estimar el impacto del cambio climático en los períodos de retorno asociados a caudales de diseño de obras hidráulicas en cuencas pluviales chilenas, para el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2.

1.1.2. Objetivos Específicos

Entre los objetivos específicos se encuentran:

- Cuantificar la variación de los caudales de diseño de obras hidráulicas en el período actual y futuro.
- Verificar la validez de las relaciones Geomorfológicas propuestas por Salvatierra (2008).
- Verificar la aplicabilidad del modelo GR4J en las cuencas de estudio.

1.2. Organización del Informe

El presente informe se encuentra organizado en seis capítulos cuya descripción se presenta a continuación:

El capítulo 2 contiene una revisión bibliográfica de los antecedentes necesarios para desarrollar el tema analizado. Se describe el modelo utilizado y los criterios para la definición de los períodos de retorno asociados al diseño de obras hidráulicas.

En el capítulo 3 se realiza una descripción del lugar de estudio, donde se presentan las características climáticas, de uso de suelo y topográficas de la zona. Además se detalla la información de entrada al modelo y se realiza la delimitación de las cuencas.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de la calibración y validación de las cuencas con información fluviométrica, obteniéndose los parámetros del modelo que serán utilizados en etapas posteriores del trabajo.

El capítulo 5 muestra el análisis de frecuencia realizado en las cuencas con información fluviométrica, lo que permite determinar los períodos de retorno y los caudales en los escenarios actuales y futuros. Además contiene el análisis realizado para determinar correlaciones geomorfológicas con las que se calculan los parámetros operacionales del modelo en las cuencas sin información fluviométrica. Se presentan también mapas con la variación de los caudales de crecidas y seguridad hidrológica asociados a períodos de retorno de 10, 100 y 1000 años.

El capítulo 6 contiene las conclusiones y comentarios que se deducen del desarrollo del trabajo, cuyo foco principal se centra en el cumplimiento de los objetivos planteados.

Capítulo 2

Antecedentes Bibliográficos

2.1. Modelo GR4J

2.1.1. Descripción del modelo

El modelo GR4J es una versión modificada del modelo GR3J propuesto por Edijatno y Michel (1989), posteriormente mejorado por Edijatno et al. (1999). Fue desarrollado por Perrin et al. (2003) y corresponde a un modelo conceptual de precipitación- escorrentía que proporciona información a nivel diario, utilizando 4 parámetros, y 2 variables de entrada: precipitación y evaporación.

En la Figura 2.1 se muestra un esquema del funcionamiento del modelo, el que consiste en la realización de balances de flujos e interacción entre los estanques ficticios creados con el fin de representar los procesos que se producen en la cuenca.

Es importante destacar que todas las variables involucradas en la operación del modelo deben ser expresadas en mm, por lo que cuando corresponda, se deberá dividir las variables por el área de la cuenca.

En los siguientes puntos se explica de manera detallada el modo en que opera el modelo y las ecuaciones que utiliza.

Precipitación y evaporación potencial neta

La primera operación a realizar es la sustracción de la evaporación de la precipitación para determinar la precipitación neta P_n , o una evaporación neta E_n . En el modelo esta

operación es realizada considerando una capacidad de intercepción nula.

$$\text{Si } P \leq E \longrightarrow P_n = P - E \wedge E_n = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{Si } E \leq P \longrightarrow E_n = E - P \wedge P_n = 0 \quad (2.2)$$

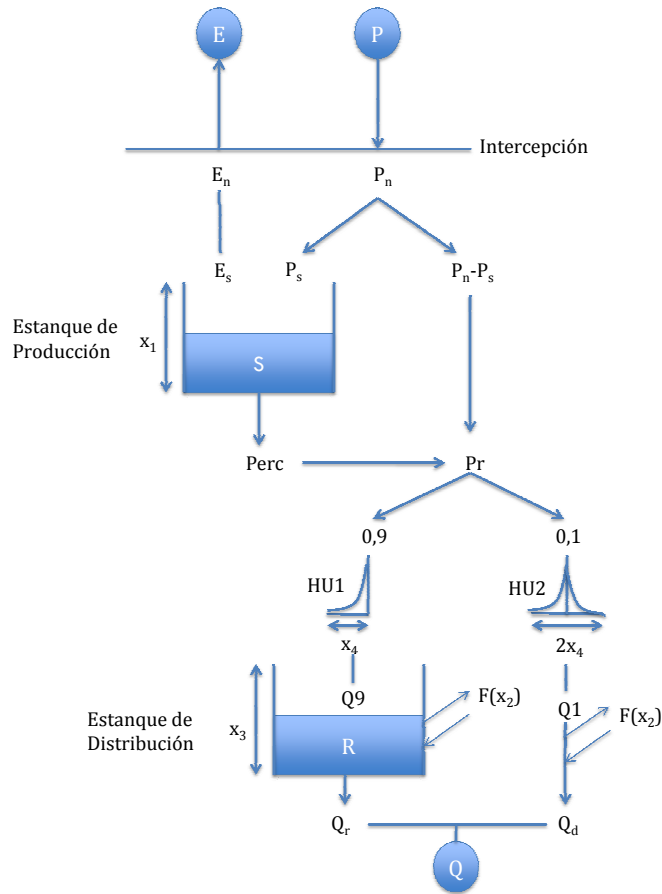


Figura 2.1: Descripción del modelo GR4J. Fuente: Instituto CEMAGREF

Estanco de producción

Cuando la precipitación neta P_n es distinta de cero, una parte P_s de ésta ingresa al estanco de producción. Esta fracción es determinada en función del nivel del estanco S y el parámetro x_1 , que representa el nivel máximo del estanco de almacenamiento.

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)}{1 + \frac{S}{x_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{x_1}\right)} \quad (2.3)$$

En el caso en que la evaporación es distinta de cero, se determina una tasa de evaporación real E_s , que representa el agua que se evaporará del estanque de producción.

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{x_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{x_1}\right)} \quad (2.4)$$

Las ecuaciones 2.3 y 2.4 son el resultado de la integración en el tiempo de ecuaciones diferenciales parabólicas con términos en $(S/x_1)^2$, presentadas por Edijatno y Michel (1989).

El contenido de agua en el estanque de producción se actualiza a través de la ecuación 2.5.

$$S = S - E_s + P_s \quad (2.5)$$

Es importante notar que S nunca puede exceder a x_1 .

El modelo considera además una pérdida de agua del estanque por percolación, representada por término P_{erc} .

$$P_{erc} = S \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4}{9} \cdot \frac{S}{x_1} \right)^4 \right]^{(1/4)} \right\} \quad (2.6)$$

Considerando todo lo anterior, el contenido final de agua en el estanque se determina utilizando la ecuación 2.7.

$$S = S - P_{erc} \quad (2.7)$$

Distribución lineal con hidrogramas unitarios

La cantidad de agua total que se distribuye a través de los hidrogramas unitarios está dada por la ecuación 2.8.

$$P_r = P_{erc} + (P_n - P_s) \quad (2.8)$$

P_r se divide en dos flujos distintos: el 90 % se distribuye a través de un hidrograma unitario $UH1$ y luego ingresa a un tanque de distribución no lineal; y el 10 % restante se distribuye a partir de un hidrograma unitario $UH2$.

Con los hidrogramas $UH1$ y $UH2$ es posible simular el tiempo de desfase entre el evento de precipitación y la escorrentía resultante. Ambos hidrogramas están relacionados con el parámetro x_4 , que corresponde al tiempo base de $UH1$ y a la mitad del tiempo base de $UH2$.

En su forma discreta, los hidrogramas unitarios $UH1$ y $UH2$ poseen n y m ordenadas respectivamente, las que corresponden a los menores enteros mayores a x_4 y $2 \cdot x_4$. Para el cálculo de estas ordenadas es necesario determinar las curvas S correspondientes, representadas por $SH1$ y $SH2$. La curva $SH1$ es descrita por las siguientes expresiones:

$$\text{Si } t \leq 0 \rightarrow SH1(t) = 0 \quad (2.9)$$

$$\text{Si } 0 \leq t \leq x_4 \rightarrow SH1(t) = \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \quad (2.10)$$

$$\text{Si } t \geq x_4 \rightarrow SH1(t) = 1 \quad (2.11)$$

La curva $SH2$ se define de la siguiente manera en función del tiempo t :

$$\text{Si } t \leq 0 \rightarrow SH2(t) = 0 \quad (2.12)$$

$$\text{Si } 0 \leq t \leq x_4 \rightarrow SH2(t) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \quad (2.13)$$

$$\text{Si } x_4 \leq t \leq 2 \cdot x_4 \rightarrow SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \quad (2.14)$$

$$\text{Si } t \geq 2 \cdot x_4 \rightarrow SH2(t) = 1 \quad (2.15)$$

Finalmente la determinación de las ordenadas de los hidrogramas $UH1$ y $UH2$ se realiza como sigue:

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \quad (2.16)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \quad (2.17)$$

Donde j es un valor entero.

Intercambio de agua en la cuenca

Se define un término de intercambio entre las aguas subterráneas y la escorrentía superficial del sistema, que se determina utilizando la expresión 2.18.

$$F = x_2 \cdot \left(\frac{R}{x_3} \right)^{7/2} \quad (2.18)$$

Donde R es el nivel del estanque de distribución, x_3 es la capacidad de referencia y x_2 es el coeficiente de intercambio, que puede ser positivo si el agua ingresa al estanque o negativo si sale agua del mismo. En valor absoluto, el término F no puede ser mayor a x_2 , puesto que este parámetro representa la cantidad máxima de agua que entra (o sale) del estanque de distribución.

Estanque de distribución no lineal

El nivel en el estanque de distribución es actualizado incorporando los términos F y Q_9 , que corresponde al caudal de salida del hidrograma $UH1$.

$$R = \max(0; R + Q_9 + F) \quad (2.19)$$

El caudal de salida del estanque se calcula según la ecuación 2.20, que posteriormente permite actualizar el nivel del estanque utilizando la ecuación 2.21.

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_4} \right) \right]^{-1/4} \right\} \quad (2.20)$$

$$R = R - Q_r \quad (2.21)$$

Caudal total

El caudal de salida del hidrograma unitario $UH2$, definido como Q_1 , también se ve afectado por el mismo factor de intercambio F , por lo que se debe actualizar según la ecuación 2.22.

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F) \quad (2.22)$$

Finalmente, el caudal que sale del sistema es determinado a través de la expresión 2.23

$$Q = Q_r + Q_d \quad (2.23)$$

2.2. Criterios de Diseño de obras Hidráulicas

En esta sección se presentan algunos criterios para la definición de los períodos de retorno a utilizar en el diseño de obras hidráulicas. En la Tabla 2.1 se muestran los períodos de retorno sugeridos por Chow et al. (1994) para el diseño de obras según su tipo y el riesgo asociado a su posible falla.

Tabla 2.1: Criterios de diseño generalizados para estructuras de control de agua (Fuente: Chow et al. (1994))

Tipo de estructura	Período de retorno [años]	ELV [%]
Alcantarillas de carreteras		
Volúmenes de tráfico bajos	5-10	-
Volúmenes de tráfico intermedios	10-25	-
Volúmenes de tráfico altos	50-100	-
Puentes de carreteras		
Sistema secundario	10-50	-
Sistema primario	50-100	-
Drenaje agrícola		
Culverts	5-50	-
Surcos	5-50	-
Drenaje urbano		
Alcantarillas en ciudades pequeñas	2-25	-
Alcantarillas en ciudades grandes	25-50	-
Aeropuertos		
Volúmenes bajos	5-10	-
Volúmenes intermedios	10-25	-
Volúmenes altos	50-100	-
Diques		
En fincas	2-50	-
Alrededor de ciudades	50-200	-
Presas con poca probabilidad de pérdidas de vida (baja amenaza)		
Presas pequeñas	50-100	-
Presas intermedias	100+	-
Presas grandes	-	50-100

Tabla 2.2: Criterios de diseño generalizados para estructuras de control de agua (Fuente: Chow et al. (1994)(Continuación)

Tipo de estructura	Período de retorno		ELV
	[años]		[%]
Presas con probabilidad de pérdidas de vida (amenaza significativa)			
Presas pequeñas	100+		50
Presas intermedias	-		50-100
Presas grandes	-		100
Presas con alta probabilidad de pérdidas de vida (alta amenaza)			
Presas pequeñas	-		50-100
Presas intermedias	-		100
Presas grandes	-		100

En el Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas se establecen los períodos de retorno mínimos que se deben utilizar en el diseño de obras de drenaje de carreteras, además de la vida útil supuesta de las mismas. Estos criterios son presentados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Períodos de retorno para diseño (Fuente: Manual de Carreteras, MOP 2010)

Tipo de Obra	Tipo de Ruta	Período de Retorno [años]		Vida útil [años]
		Diseño	Verificación	
Puentes y viaductos	Carreteras	200	300	50
	Caminos	100	150	50
Alcantarillas ($S > 1,75m^2$) y Estructuras Enterradas	Carreteras	100	150	50
	Caminos	50	100	30
Alcantarillas ($S < 1,75m^2$)	Carreteras	50	100	50
	Caminos	25	50	30
Drenaje de la plataforma	Carreteras	10	25	10
	Caminos	5	10	5
Defensas de Ribera	Carreteras	100	-	20
	Caminos	100	-	20

Por último, se presentan los criterios de diseño definidos en el Estudio sobre Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos, realizado por el MINVU, 1996.

Tabla 2.4: Valores mínimos recomendados del Período de Retorno de Lluvias de Diseño para Obras Alternativas de Drenaje Urbano

Obra Alternativa	Condiciones de la Red de Drenaje hacia aguas Abajo	
	Red Desarrollada	Sin Red Desarrollada
Obras de Infiltración		
Estanques	5	10
Zanjas	5	10
Pozos	5	10
Pavimentos Porosos	5	10
Pavimentos Celulares	5	10
Obras de Almacenamiento		
Estanques de Retención		
Volumen Base	5	5
Cámara de Descarga	10	10
Vertedero	100	200
Lagunas de Retención		
Volumen Base	5	5
Cámara de Descarga	10	10
Vertedero	100	200
Obras Anexas		
Franjas Filtrantes	5	10
Zanjas con Vegetación		
Sección Base	5	10
Revancha	50	100
Canales de Pasto	100	200
Canales con Vegetación	100	200
Caídas	100	200

Capítulo 3

Caracterización de la zona de estudio

En el presente capítulo se realiza una descripción general de la zona de estudio que comprende nueve cuencas pluviales, seleccionadas en base a un estudio encargado por la DGA y realizado por RODHOS (2008), donde se identifican este tipo de cuencas en las regiones del Maule y del Bio Bio. Este punto es relevante para la aplicación del modelo GR4J, ya que éste simula el caudal sólo a partir de evaporación y precipitación, por lo que cualquier influencia nival en la cuenca no sería representada. Además, dentro de las cuencas no debe existir ningún tipo de obra de regulación, pues esto afectaría el caudal observado lo que impediría una correcta calibración del modelo.

3.1. Ubicación Geográfica e información de entrada al modelo GR4J

Las cuencas de estudio se ubican en la costa de la Región del Bio Bio y quedan definidas por las estaciones fluviométricas de la Tabla 3.1. Las cuencas definidas por las estaciones Río Pingueral en Dichato y Andalién camino a Penco se ubican en la provincia de Concepción, mientras que las cuencas restantes se encuentran en la provincia de Arauco.

Tabla 3.1: Estaciones fluviométricas

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud msnm
Río Pingual en Dichato	36 32'	72 54'	5
Río Andalién camino a Penco	36 49'	73 01'	7
Río Laraquete en el Cajón	37 10'	73 10'	15
Río Carampangue en Carampangue	37 15'	73 16'	3
Río Lebu en las Corrientes	37 41'	73 21'	60
Río Caramávida en Caramávida	37 36'	73 29'	15
Río Cayucupil en Cayucupil	37 49'	73 15'	47
Río Butamalal en Butamalal	37 49'	73 15'	51
Río Reputo en Reputo	37 49'	73 22'	53

Tabla 3.2: Estaciones Meteorológicas

Nombre	Tipo	Latitud S	Longitud W	Altitud msnm
Coelemu	Pluviométrica	36 29'	72 42'	30
Chillancito	Pluviométrica	36 45'	72 25'	40
Laja	Pluviométrica	37 15'	72 43'	100
Las Achiras Fundo	Pluviométrica	37 20'	72 22'	125
Los Ángeles	Pluviométrica	37 30'	72 31'	90
Cañete	Pluviométrica	37 47'	73 23'	50
Tutuvén Embalse	Evaporimétrica	35 53'	72 22'	179
El Vergel	Evaporimétrica	37 49'	72 39'	75
Angol	Evaporimétrica	37 46'	72 38'	101
Traiguén	Evaporimétrica	38 15'	72 39'	234

La información referente a las estaciones pluviométricas y evaporimétricas a utilizar en los procesos de calibración y validación del modelo GR4J están contenidas en la Tabla 3.2 y posteriormente se presenta su ubicación gráficamente en la Figura 3.1.

Como se observa en la Figura 3.1, en todos los casos analizados las estaciones pluviométricas se ubican fuera de las cuencas de estudio, por lo que es necesario realizar correcciones para que la precipitación a utilizar sea representativa: Para esto se cuenta con la información contenida en el mapa de isoyetas de precipitación anual del Balance Hídrico de Chile. Existen estaciones pluviométricas que, además de situarse fuera de las cuencas de estudio, se ubican al Este de la cordillera de la costa. Para resolver esta situación, se cuenta con 2 estaciones pluviométricas (ver Tabla 3.3) ubicadas dentro de las cuencas del

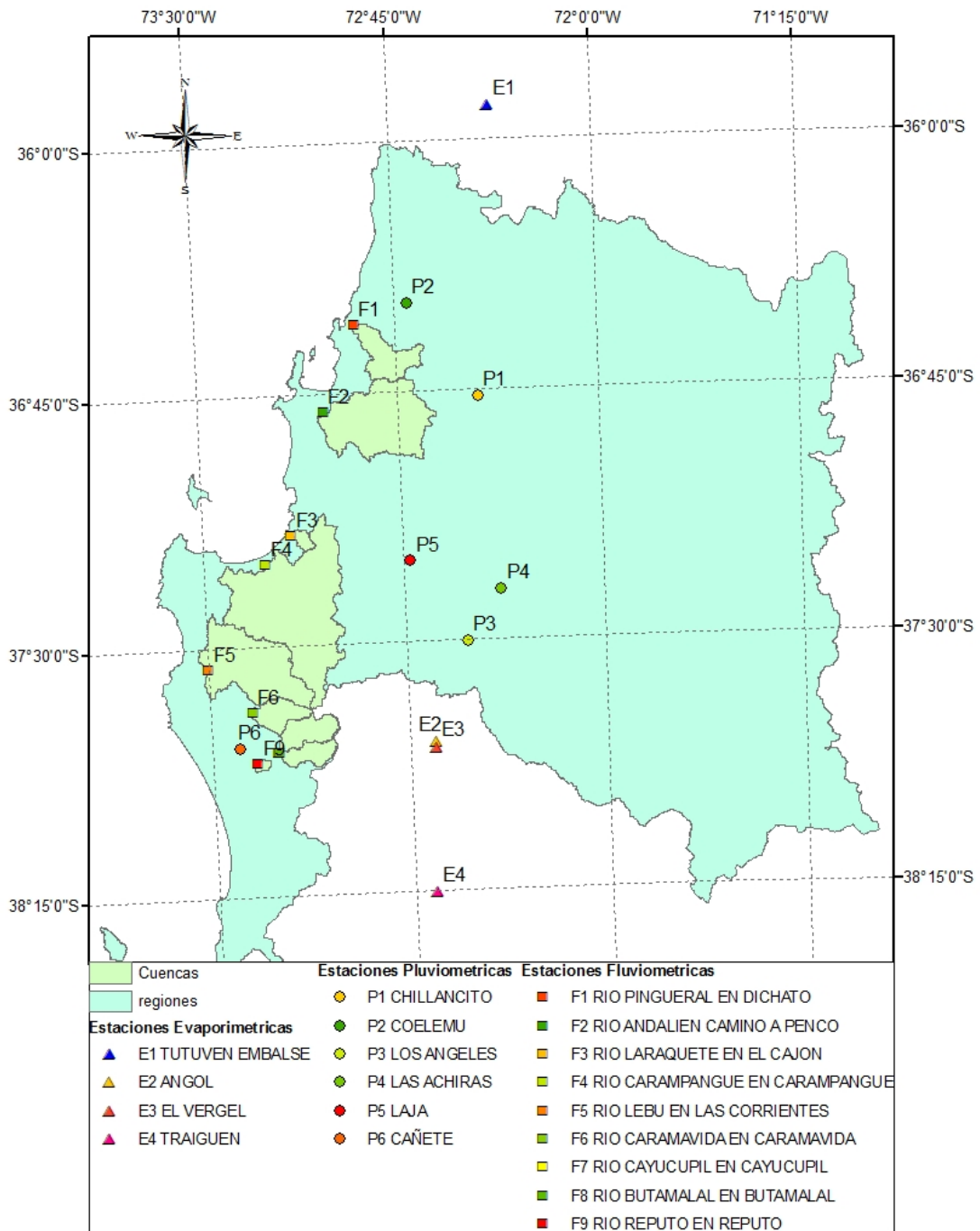


Figura 3.1: Estaciones Utilizadas

Tabla 3.4: Características de las cuencas de estudio

Cuenca	Área km	Pendiente media	Elevación media msnm	Orden de Strahler
Río Pingueral	220,37	0,13	246,40	3
Río Andalién	702,54	0,14	206,16	4
Río Laraquete	34,02	0,25	387,71	1
Río Carampangue	1278,48	0,19	406,23	4
Río Lebu	645,6	0,19	378,5	3
Río Caramávida	139,81	0,29	622,02	3
Río Butamalal	111,42	0,24	792,57	2
Río Cayucupil	159,73	0,24	724,44	2
Río Reputo	14,02	0,30	330,98	1

Río Andalién y Río Lebu, que no tienen períodos de información coincidentes con las estaciones fluviométricas analizadas, pero sí con las estaciones pluviométricas a usar en la calibración, por lo que es posible encontrar un factor de corrección que permita mejorar al menos en magnitud la precipitación de las estaciones utilizadas.

Tabla 3.3: Estaciones pluviométricas usadas en la obtención de factores de corrección

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud msnm
Andalién	36 49'	72 55'	40
Curanilahue	37 28'	73 20'	160

La delimitación de las cuencas se realizó mediante el uso de los softwares ArcGIS y WMS, utilizando el modelo de elevación digital Aster GDEM. La definición de los cauces en cada cuenca se realizó comparando lo obtenido entre los dos programas y planchetas IGM. Algunos de los parámetros geomorfológicos de las cuencas se exponen en la Tabla 3.4, donde es posible observar que la cuenca de mayor área corresponde a la cuenca del Río Carampangue, mientras que la de menor tamaño es la cuenca del Río Reputo. Las cuencas de los Ríos Caramávida, Butamalal y Cayucupil se ubican plenamente en la cordillera de la costa por lo que presentan altas pendientes y elevaciones. Las demás cuencas se ubican entre las planicies litorales y la cordillera, por lo que sus pendientes y elevaciones son menores.

Las cuencas sin información fluviométrica se definen eligiendo una subcuenca por cada

Tabla 3.5: Información disponible

	Estación	Información Disponible
Fluviométrica	Río Pingueral en Dichato	Mar 1985-Mar 1989
	Río Andalién camino a Penco	Ene 1983-Ene 2001
	Río Laraquete en el Cajón	Mar 1985-Mar 1996
	Río Carampangue en Carampangue	Ene 1976-Dic 1983
	Río Lebu en las Corrientes	Abr 1980-Jun 1986
	Río Caramávida en Caramvida	Ene 1983-Nov 1991
	Río Butamalal en Butamalal	Ene 1979-Oct 1996
	Río Cayucupil en Cayucupil	Ene 1976-Dic 1983
	Río Reputo en Reputo	Ene 1976-Dic 1983
Pluviométrica	Coelemu	Oct 1961-Dic 2009
	Chillancito	Ene 1960-Dic 2009
	Los Ángeles	Jul 1962-Dic 2009
	Las Achiras	Ene 1964-Dic 2009
	Laja	Nov 1961-Dic 1995
	Cañete	Dic 1961-Dic 2009
Evaporimétrica	Tutuvén Embalse	Ene 1981-Dic 2009
	El Vergel	Ago 1982-Dic 1995
	Angol	Jun 1976-Mar 1981
	Traiguén	Ene 1979-Dic 2009

orden de Strahler presente en las cuencas de la Tabla 3.4. Es decir, en el caso de la cuenca del Río Andalién, cuyo orden es 4, existen tres cuencas sin información fluviométrica que corresponden a cauces de orden 1,2 y 3. La delimitación de las cuencas con y sin información fluviométrica se presenta en la Figura 3.2.

En la Tabla 3.5 se presentan los períodos con información disponible en cada estación fluviométrica, pluviométrica y evaporimétrica usada en este trabajo. Usando como base esta información se definen los períodos de calibración y validación en el capítulo 4.

3.2. Geomorfología de la Zona

Las cuencas de estudio se ubican entre dos unidades de relieve de la región del Bio Bio: la Cordillera de Nahuelbuta y las planicies litorales. La cordillera de Nahuelbuta corresponde a un sector de la cordillera de la costa ubicado entre la desembocadura del Río Itata y la desembocadura del Río Imperial, cuya principal característica es su altura, ya que alcanza los 1472 m en el cerro Nahuel, en la provincia de Arauco. Respecto a las

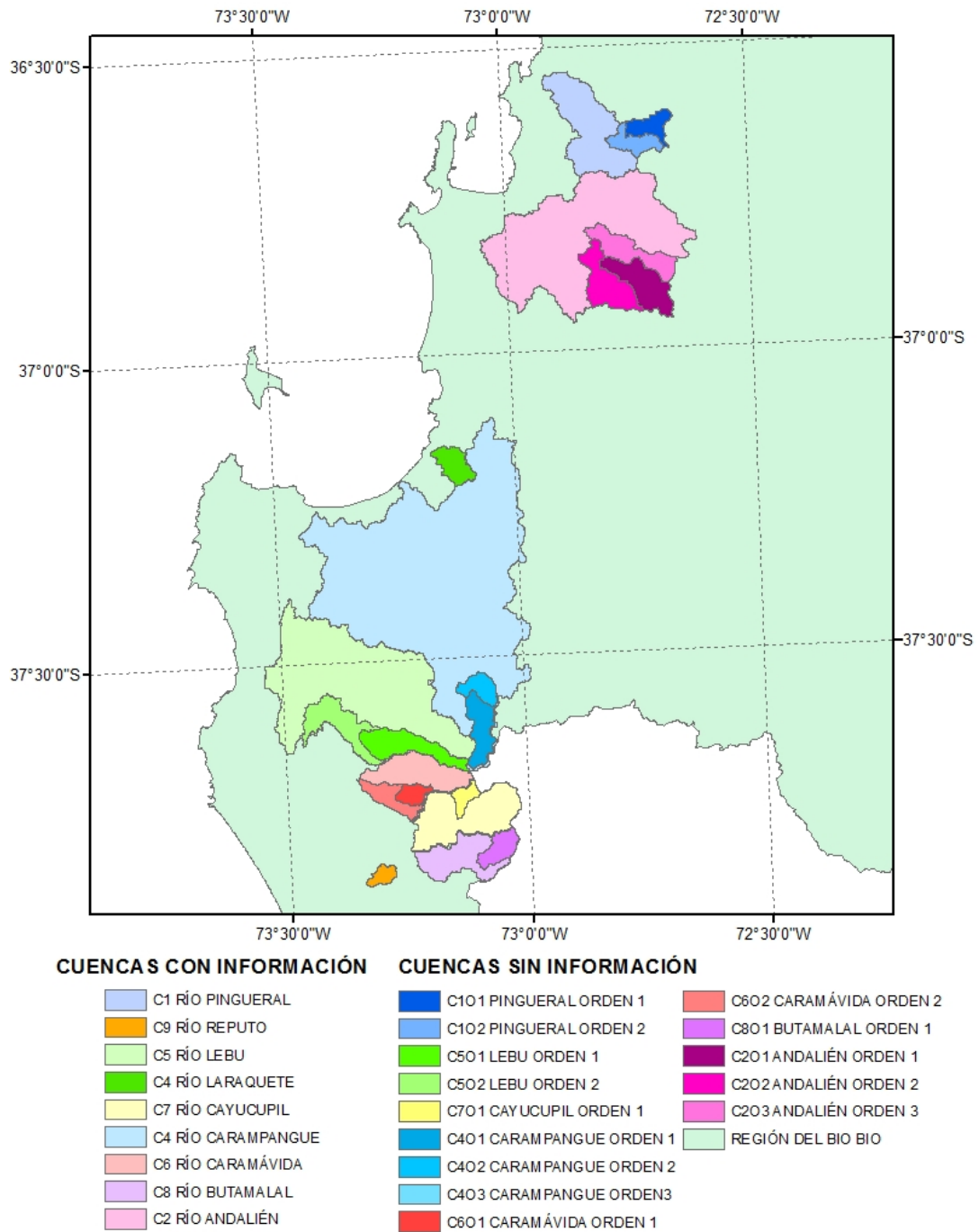


Figura 3.2: Delimitación de las Cuencas

planicies litorales, en la zona donde se ubican las cuencas de los Ríos Andalién y Pingueral son relativamente angostas, en tanto que al sur del Golfo de Arauco se vuelven amplias y con terrazas marinas que alcanzan hasta los 25 km.

3.3. Uso de Suelo

Según la información obtenida del Sistema de Información Geográfico de la Comisión Nacional de Riego (ver Figura 3.3), el principal uso de suelo de la zona costera de la Región del Bio Bio corresponde a plantaciones de bosque y bosque nativo, las que representan aproximadamente un 65 % de la superficie total de las cuencas de los ríos Pingueral y Andalién, y entre un 86 % y un 99,9 % de la superficie total de las cuencas de estudio restantes. Entre las especies nativas se encuentran el Roble, Raulí y Tapa, en la zona media de la cordillera de Nahuelbuta y Araucarias en la parte alta de ésta. Las plantaciones forestales corresponden principalmente a pinos en sus distintas variedades. En las planicies litorales ubicadas al sur de la cuenca del Río Lebu, en las cuencas del Río Andalién y Pingueral, y en la parte baja de la cuenca del Río Carampangue, existen algunos terrenos de uso agrícola.

3.4. Clima

Según la dirección Meteorológica de Chile, en la provincia de Concepción puede distinguirse un clima templado cálido con estación seca corta. Éste clima abarca la mayor parte de la región del Bio Bio y se caracteriza por una estación seca cuya duración es inferior a los 4 meses. Las precipitaciones se concentran entre Mayo y Agosto, donde el agua caída equivale entre un 65 % a 70 % del total anual, en tanto que la precipitación en los meses de verano corresponde a un 5 % del total anual. En la zona costera, donde se ubican las cuencas del Río Andalién y Río Pingueral, la cordillera de la costa produce un leve aumento en las precipitaciones a barlovento de la misma, mientras que la influencia del mar hace que la amplitud térmica anual y diaria sean inferiores que hacia el interior de la región.

En la Provincia de Arauco, se observa un clima templado lluvioso con influencia mediterránea, generado por la presencia de la parte más alta de la cordillera de Nahuelbuta, donde se producen grandes diferencias pluviométricas y térmicas, entre la ladera oriente y poniente de dicha cordillera. La precipitación anual en la estación de Cañete, ubicada en las planicies litorales, es de 1200 mm aproximadamente; sin embargo en las zonas más

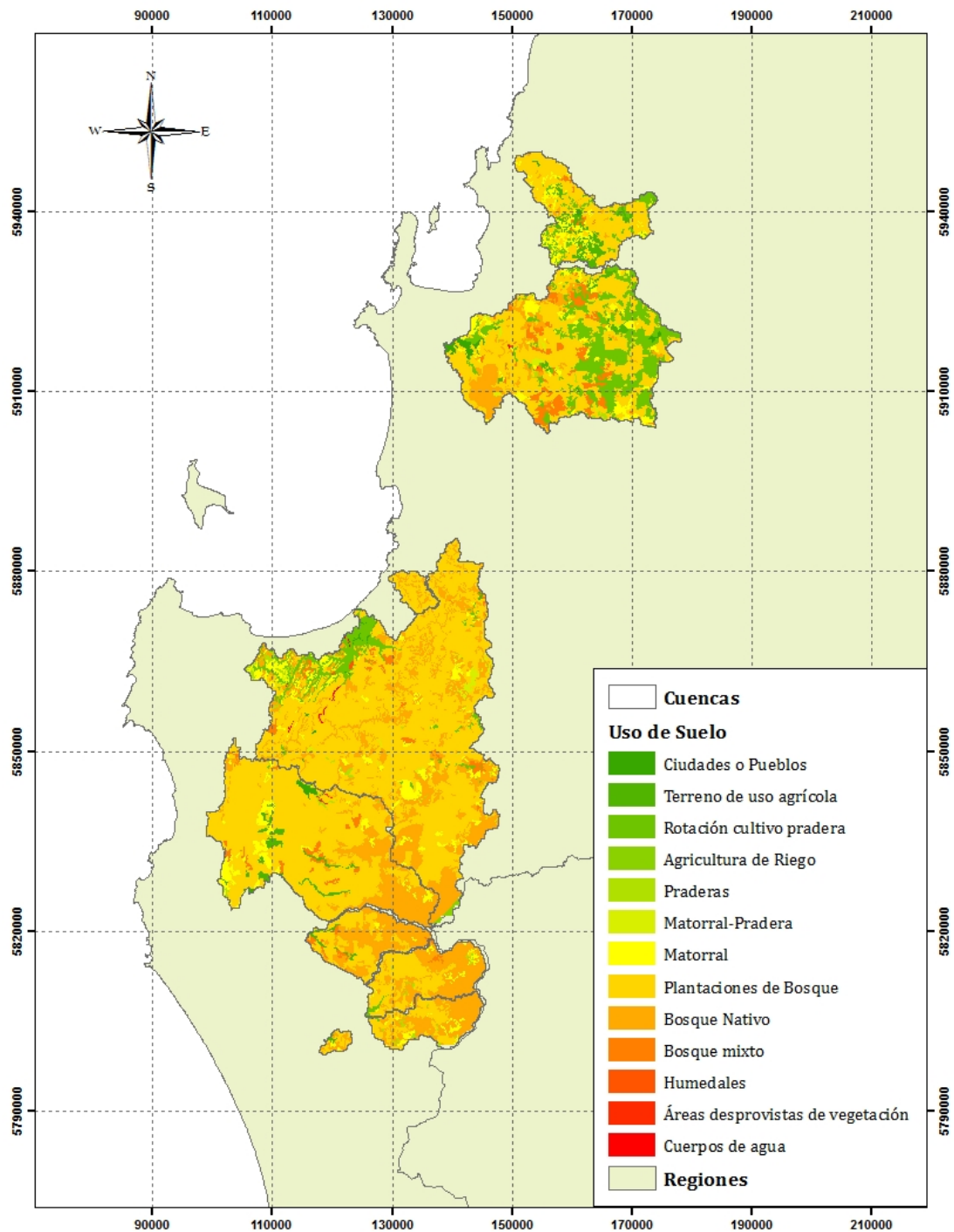


Figura 3.3: Uso de Suelo

altas de la cordillera puede alcanzar hasta los 4000 mm, según el Balance Hídrico de Chile, DGA (1987).

3.5. Recursos Hídricos

Respecto a los recursos hídricos se pueden distinguir dos tipos: los superficiales y subterráneos. En cuanto a los superficiales, todos los cauces estudiados tienen un régimen netamente pluvial pues nacen en la cordillera de Nahuelbuta y desembocan en el Océano Pacífico. Los caudales medios van desde los $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Río Reputo a los $65,7 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Río Carampangue.

Los acuíferos presentes en las distintas cuencas de estudio son los siguientes: Río Carampangue, Río Lebu, Costeras sur, Río Rafael y Río Bio Bio bajo. Sus espesores van desde los 9 m a los 20 m y sus coeficientes de almacenamiento desde 0,01 a 0,08. Sin embargo la relevancia de éstos es menor en comparación a la de los recursos superficiales, pues representan menos del 10 % de la superficie total de las cuencas con información fluviométrica, y en las cuencas sin información el porcentaje es aún menor.

Capítulo 4

Calibración y Validación del modelo hidrológico GR4J

Una vez caracterizadas las cuencas de estudio es posible comenzar con los procesos de calibración y validación del modelo hidrológico GR4J. La calibración del modelo se realiza manualmente tomando como base los valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe (Ecuación 4.1), aplicado al caudal y al logaritmo del caudal, además de una modificación de este coeficiente en el que se aplica un factor de amplificación a todos los caudales mayores a un valor umbral que corresponde al caudal de 10% de probabilidad de excedencia en cada cuenca a calibrar. El proceso se realiza de este modo pues la maximización individual de estos coeficientes no asegura un buen ajuste de los caudales de crecida, que son el objeto de este trabajo. En este punto es relevante indicar que la mayoría de los caudales de crecida corresponden a extrapolaciones de la curva de descarga de las distintas estaciones fluviométricas y son destacados en las Figuras que presentan las series de caudales para los procesos de calibración y validación.

$$C = 1 - \frac{\sum [Q(sim)_i - Q(obs)_i]^2}{\sum [Q(obs)_i - \bar{Q}(obs)_i]^2} \quad (4.1)$$

El primer año de calibración se excluye del cálculo de los coeficientes antes mencionados, pues está sujeto a las condiciones iniciales impuestas al modelo. Para la definición de los períodos de calibración de las distintas cuencas se buscó que este corresponda a 2/3 del tiempo total en el que se cuenta con información, y que el tercio restante corresponda al período de validación.

A continuación se muestran los resultados de calibración y validación para cada una de

las cuencas estudiadas.

4.1. Estación Río Pingueral en Dichato

La información de entrada para los procesos de calibración y validación de la estación Río Pingueral en Dichato corresponde a la serie de evaporación diaria de la estación El Vergel y la serie de precipitación diaria de la estación Coelemu, corregida usando las isoyetas de precipitación contenidas en el Balance Hídrico de Chile.

En la Tabla 4.1 se presentan los parámetros del modelo GR4J calibrados para la estación Río Pingueral en Dichato, en el período comprendido entre Marzo de 1985 y Diciembre de 1988.

Tabla 4.1: Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Pingueral

Parámetro	Valor	Unidad
X_1	4,30	[<i>mm</i>]
X_2	0,05	[<i>mm</i>]
X_3	905,28	[<i>mm</i>]
X_4	1,39	[<i>días</i>]

Los coeficientes de Nash-Sutcliffe (ver Tabla 4.2) obtenidos para el período de calibración en la cuenca del río Pingueral indican un buen ajuste general. Sin embargo, la Figura 4.1 muestra una subestimación de los caudales en período estival y en los caudales máximos. Estos últimos corresponden en su mayoría a extrapolaciones de la curva de descarga.

En la Figura 4.3 se presentan los resultados obtenidos para el período de calibración, donde se aprecia que los puntos asociados a caudales observados menores a $40m^3/s$ se ubican en torno a la línea de pendiente 45° , con una mayor dispersión a medida que aumenta el caudal. Todos los caudales mayores a $40m^3/s$ son subestimados. Sin embargo, como ya se mencionó, estos caudales fueron obtenidos a partir de extrapolaciones de la curva de descarga por lo que pueden existir errores en su determinación.

Las Figuras 4.4 y 4.2 muestran los resultados obtenidos para el proceso de validación comprendido en el período Enero 1988-Diciembre 1988, donde se presenta una crecida que se extiende por varios días y que no es bien representada por el modelo ni en magnitud

ni duración. Además los caudales medios son sobrestimados, por lo que el ajuste general disminuye con respecto al período de calibración.

A nivel mensual, el ajuste es bastante superior al obtenido a nivel diario. A pesar de esto, en la Figura 4.5 es posible observar que en los años 1985 y 1988 el caudal modelado es notoriamente superior al observado entre los meses de mayo a septiembre, en tanto que en los años 1986 y 1987, sólo se produce una sobrestimación en el mes de mayor caudal observado. En la curva de duración de la Figura 4.6 se observa una sobrestimación de los caudales medios y bajos y una subestimación de los caudales de crecidas.

Tabla 4.2: Resultados de Calibración y Validación

Coefficiente	Calibración	Validación
Nash-Sutcliffe(Q_{md})	71,8	45,5
Nash-Sutcliffe(Crecidas ($Q_{md} = 6,3 [m^3/s]$))	62,6	34,1
Nash-Sutcliffe($\ln(Q_{md})$)	81,1	60,8
Nash-Sutcliffe(Q_{mm})	90,0	68,7

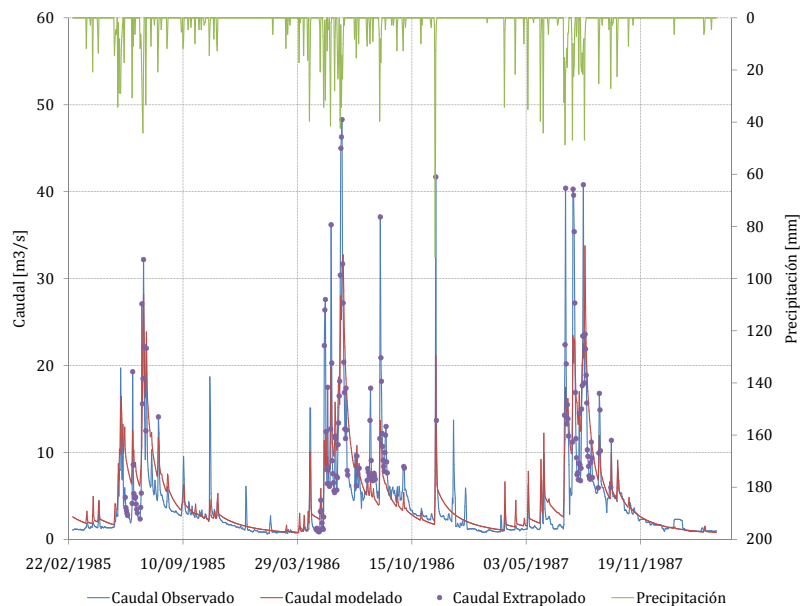


Figura 4.1: Series de Caudal Observadas y Modeladas para el Período de Calibración en Estación Río Pingueral en Dichato (Mar 1985-Dic 1988)

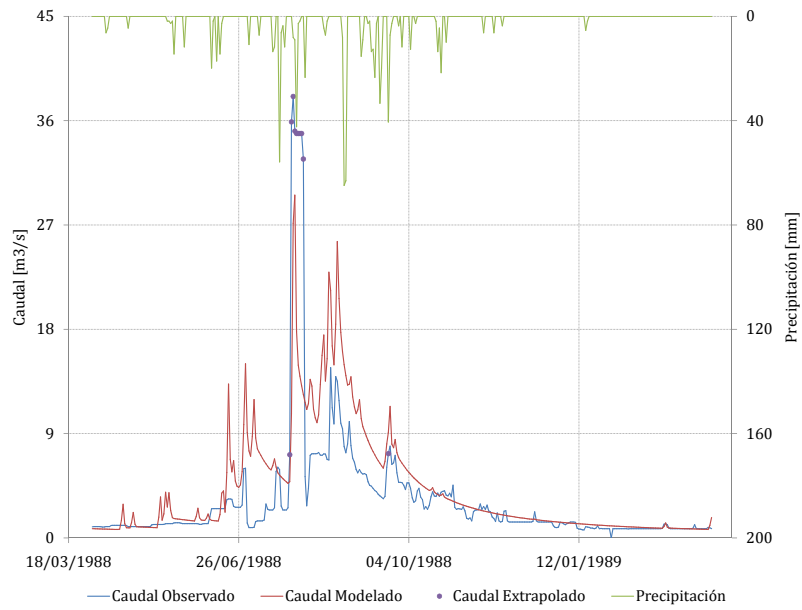


Figura 4.2: Series de Caudal Observadas y Modeladas para el Período de Validación en Estación Río Pingueral en Dichato (Ene 1989-Dic 1989)

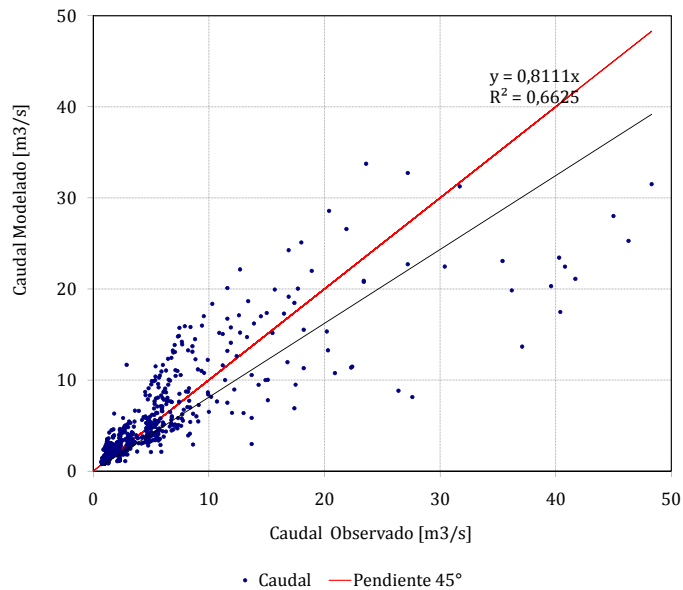


Figura 4.3: Caudal Observado vs Modelado para el Período de Calibración en Estación Río Pingueral en Dichato (Mar 1985-Dic 1988)

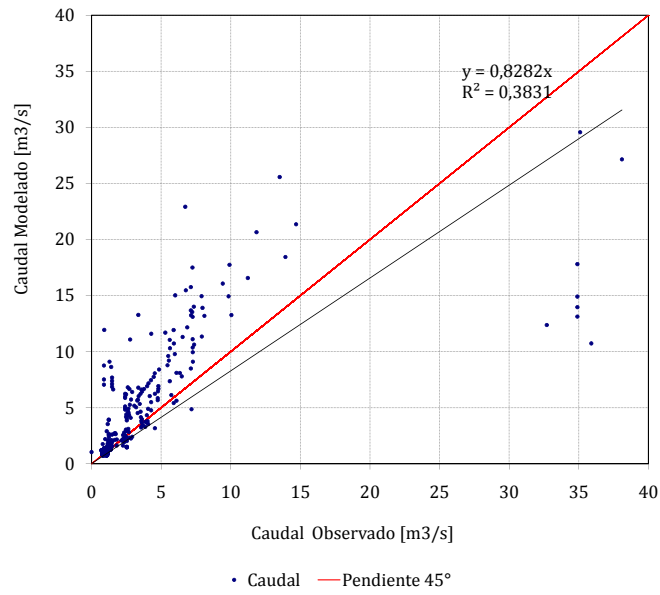


Figura 4.4: Caudal Observado vs Modelado para el Período de Validación en Estación Río Pingular en Dichato (Ene 1989-Dic 1989)

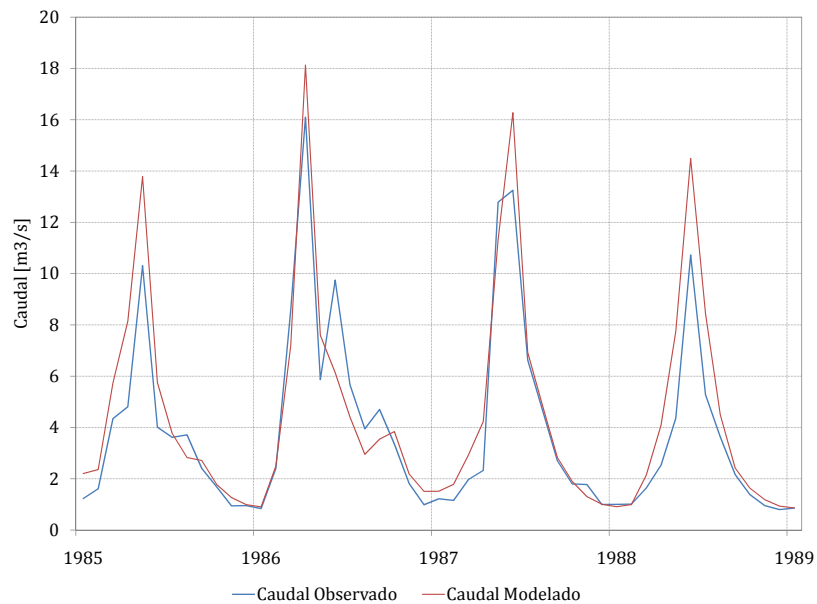


Figura 4.5: Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Pingular en Dichato (Mar 1985-Dic 1989)

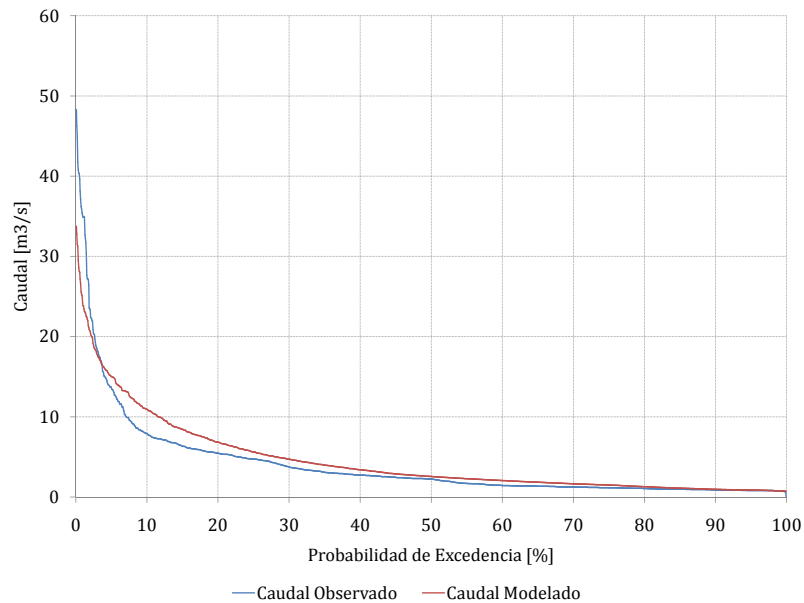


Figura 4.6: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Pingueral en Dichato (Mar 1985-Dic 1989)

4.2. Cuenca Río Andalién

La información de entrada para los procesos de calibración y validación de la estación Río Andalién camino a Penco corresponde a la serie de evaporación media diaria de la estación Tutuvén Embalse y la serie de precipitación a nivel diario de la estación Chillancito, corregida usando la información de la estación pluviométrica Andalién.

Los parámetros obtenidos en la calibración del modelo GR4J usando el período Enero 1983-Diciembre 1992 en la estación Río Andalién Camino a Penco se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Andalién

Parámetro	Valor	Unidad
X_1	0,01	[mm]
X_2	-11,79	[mm]
X_3	317,88	[mm]
X_4	1,53	[días]

Las curvas de caudales observados y modelados para el período de calibración presentadas en la Figura 4.7 muestran un buen ajuste general, principalmente para los caudales medios y bajos. Respecto a los caudales de crecidas, en general son subestimados, exceptuando los caudales del invierno de 1986 y 1991, donde los caudales modelados superan en magnitud a los observados.

La Figura 4.9 muestra que la nube de puntos generada al comparar los caudales observados y modelados para el período de calibración, sigue una tendencia de pendiente muy similar a los 45° . Se observa también que se produce una mayor dispersión a medida que aumenta el caudal, y una subestimación de los caudales observados cuyos valores se encuentran entre 100 y $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

Durante el período de Validación (Enero 1993-Diciembre 1995, ver Figura 4.8) tienden a presentarse varias crecidas por año, las que no son bien representadas por el modelo, sobre todo las ocurridas en el invierno de 1993 y de 1995, además de aquellas que se producen en temporada estival. Las crecidas que sí son representadas por el modelo tienden a ser sobrestimadas. Esto sumado a una subestimación de los caudales bajos, produce una disminución de un $14,2\%$ en el coeficiente de Nash-Sutcliffe.

En la Figura 4.10 es posible observar una mayor dispersión en la nube de puntos comparado con el período de calibración, además de una clara subestimación de los caudales observados mayores a $100\text{m}^3/\text{s}$.

A nivel mensual, el coeficiente de Nash-Sutcliffe mejora considerablemente respecto de lo obtenido a nivel diario. Sin embargo, tiende a producirse una sobrestimación de los caudales durante junio y julio, especialmente en el año 1992 donde el caudal modelado duplica al observado. Las curvas de duración se ajustan bastante bien para los caudales extremos; sin embargo, los caudales medios tienden a ser sobrestimados.

Tabla 4.4: Coeficientes de Nash-Sutcliffe para los períodos de Calibración y Validación

Coeficiente	Calibración	Validación
Nash-Sutcliffe(Q_{md})	65,5	51,3
Nash-Sutcliffe(Crecidas($Q_{md} = 25,7 \text{ [m}^3/\text{s]})$)	40,0	37,3
Nash-Sutcliffe($\ln(Q_{md})$)	76,6	54,5
Nash-Sutcliffe(Q_{mm})	80,0	53,5

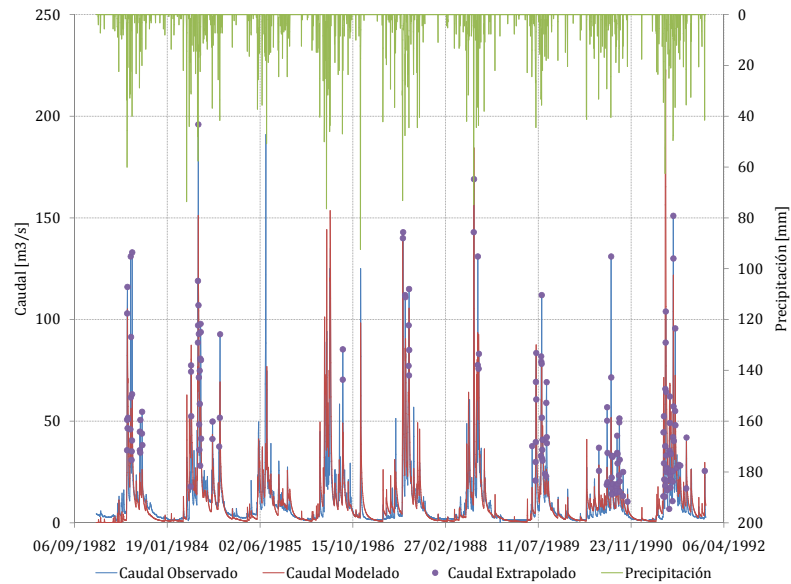


Figura 4.7: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1983-Dic 1992)

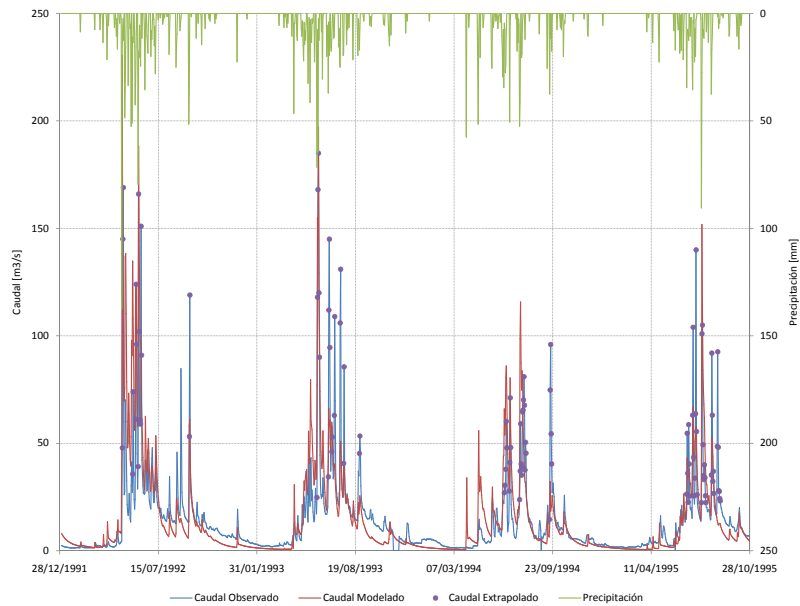


Figura 4.8: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1993-Dic 1995)

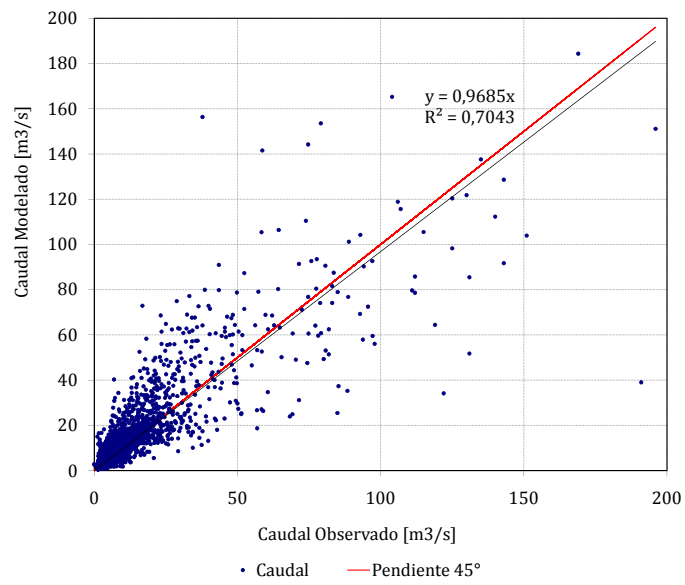


Figura 4.9: Caudal Observado vs Modelado para el Período de Calibración en Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1983-Dic 1992)

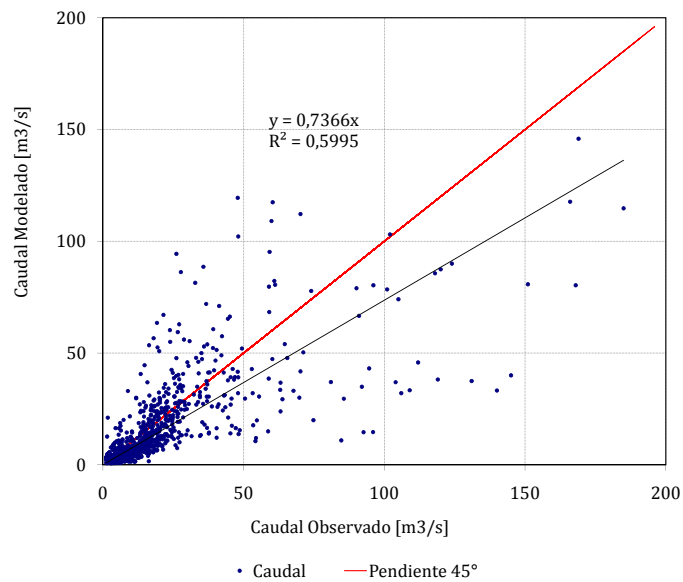


Figura 4.10: Caudal Observado vs Modelado para el Período de Validación en Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1993-Dic 1995)

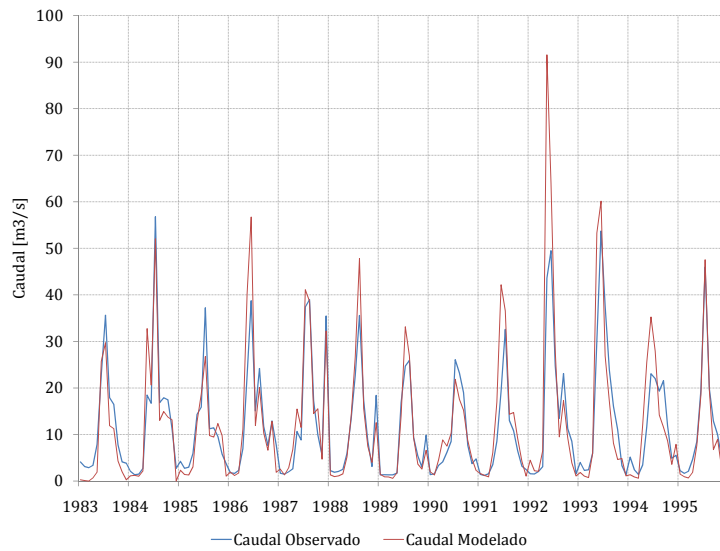


Figura 4.11: Simulación Caudales Medios Mensuales Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1983-Dic 1995)

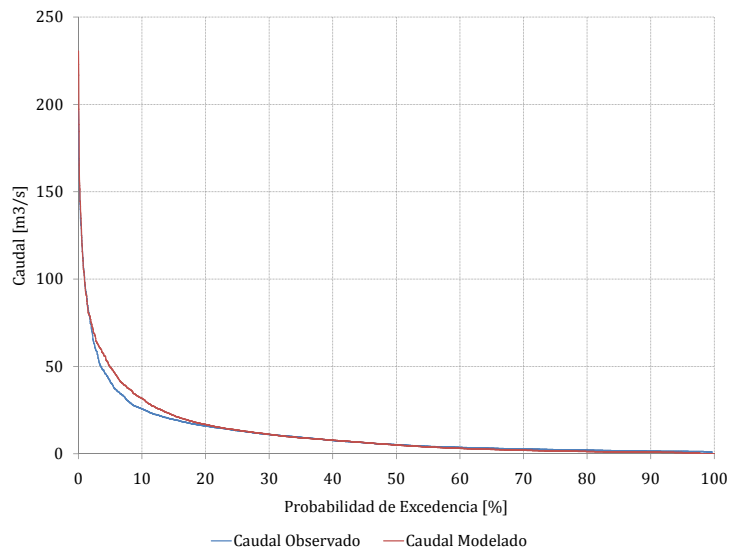


Figura 4.12: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Andalién camino a Penco (Ene 1983-Dic 1995)

4.3. Estación Río Laraquete en el Cajón

La información de entrada para los procesos de calibración y validación de la estación Río Laraquete en el Cajón corresponde a la serie de evaporación media diaria de la estación El Vergel y la serie de precipitación a nivel diario de la estación pluviométrica Laja, corregida usando las isoyetas de precipitación contenidas en el Balance Hídrico de Chile.

Los parámetros resultantes de la calibración del modelo GR4J en la cuenca del Río Laraquete usando el período comprendido entre Marzo 1986 y Diciembre 1992, se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Laraquete

Parámetro	Valor	Unidad
X_1	10,00	[<i>mm</i>]
X_2	0,00	[<i>mm</i>]
X_3	1800,00	[<i>mm</i>]
X_4	1,08	[<i>días</i>]

Los coeficientes de Nash-Sutcliffe (ver Tabla 4.6) determinados para esta cuenca son los peores comparados con los obtenidos en las demás cuencas de estudio, puesto que el ajuste de los caudales bajos es regular y el de los caudales altos es malo, ya que el modelo no es capaz de alcanzar la magnitud de los caudales de crecidas observados.

Los caudales observados vs los modelados para el período de calibración presentados en la Figura 4.15, muestran una clara subestimación de los caudales observados mayores a $10m^3/s$. Los caudales menores a este valor son mejor representados por el modelo; sin embargo, se genera mayor dispersión a medida que aumenta el caudal.

Durante el período de validación (Enero 1993-Diciembre 1995) existen datos de la serie de caudales de la estación Laraquete en el Cajón que son menores a los observados y que no fue posible corregir, por lo que claramente no son reproducidos por el modelo. Además en la Figura 4.16 se aprecia una notoria subestimación de los caudales observados mayores a $5m^3/s$. A pesar de esto, los coeficientes de Nash mejoran durante este período.

En la Figura 4.17 es posible apreciar que entre los años 1986 y 1988 las series de caudales a nivel mensual muestran un buen ajuste. Posterior a esto, el modelo sobrestima los

caudales de los meses de verano, mientras que en invierno se producen subestimaciones y sobrestimaciones alternadas. La curva de duración obtenida usando el modelo calibrado se ajusta de buena forma para probabilidades de excedencia altas; sin embargo, para probabilidades de excedencia bajas, se produce una clara subestimación de los caudales.

Tabla 4.6: Resultados de Calibración y Validación

Coefficiente	Calibración	Validación
Nash-Sutcliffe(Q_{md})	48,1	49,9
Nash-Sutcliffe(Crecidas($Q_{md} = 3,0 [m^3/s]$))	8,9	11,4
Nash-Sutcliffe($\ln(Q_{md})$)	48,7	48,7
Nash-Sutcliffe((Q_{mm}))	87,8	84,8

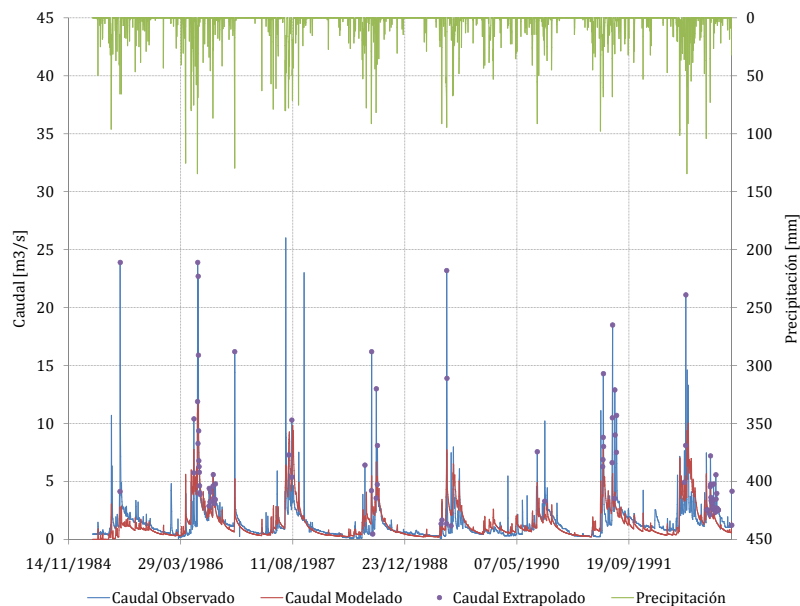


Figura 4.13: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Laraquete en el Cajón (Mar 1986-Dic 1992)

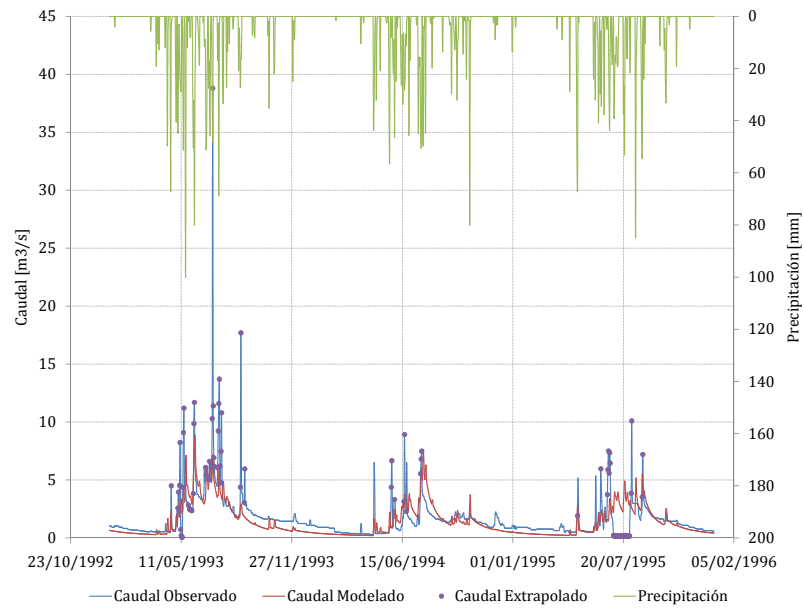


Figura 4.14: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Laraquete en el Cajón (Ene 1993-Dic 1995)

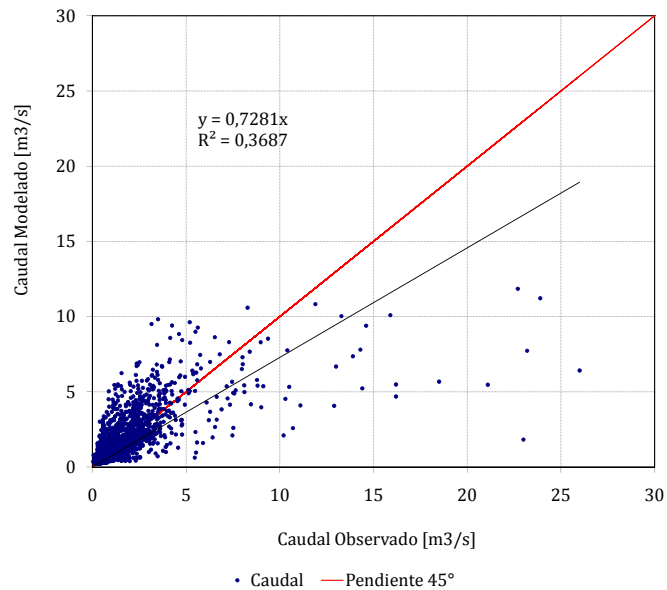


Figura 4.15: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Laraquete en el Cajón (Mar 1986-Dic 1992)

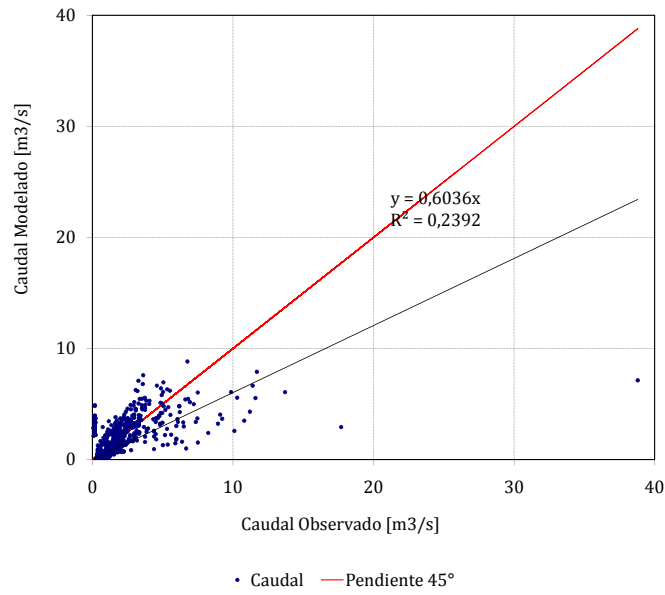


Figura 4.16: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Laraquete en el Cajón (Ene 1993-Dic 1995)

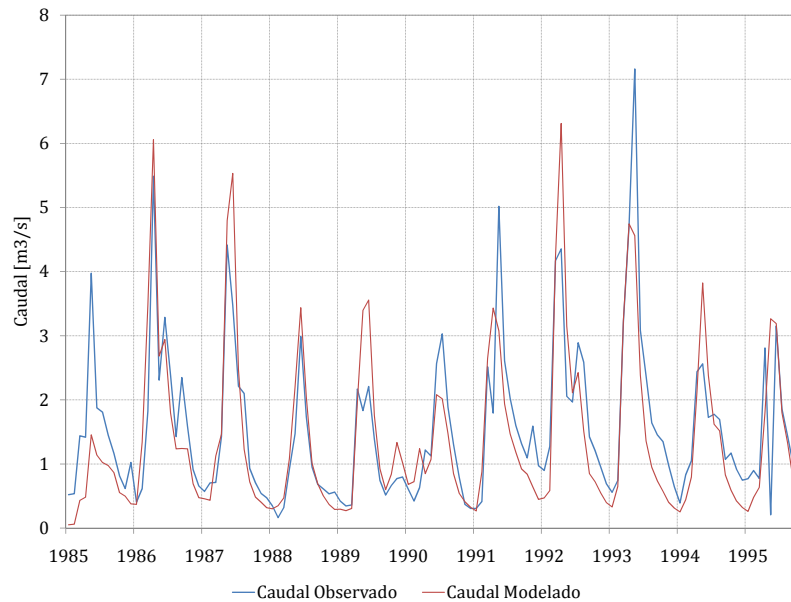


Figura 4.17: Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Laraquete en el Cajón (Mar 1986-Dic 1995)

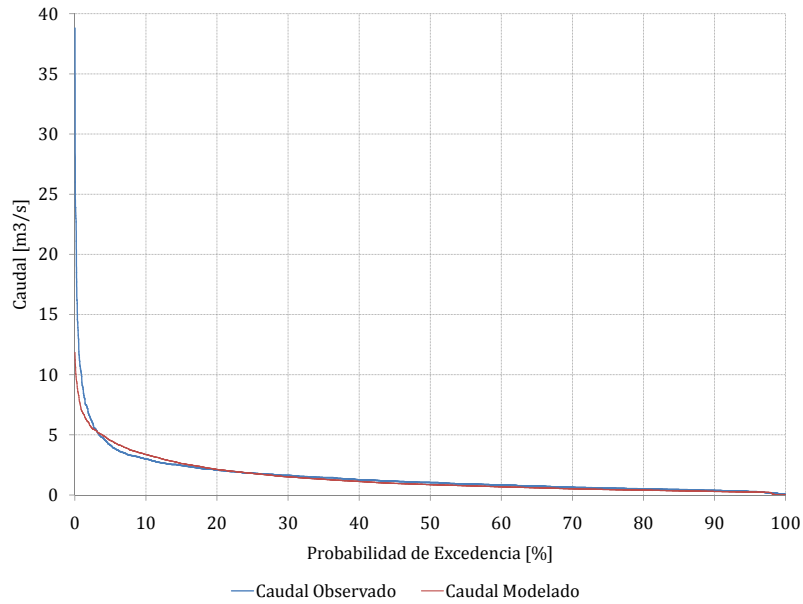


Figura 4.18: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Laraquete en el Cajón (Mar 1986-Dic 1995)

4.4. Estación Río Carampangue en Carampangue

La información de entrada para los procesos de calibración y validación de la estación Río Laraquete en el Cajón corresponde a la serie de evaporación media diaria de la estación Angol y la serie de precipitación a nivel diario de la estación Los Ángeles, corregida usando la información de la estación pluviométrica Curanilahue.

Los parámetros del modelo GR4J calibrados en el período comprendido entre Agosto 1976 y Diciembre 1981 para la cuenca del Río Carampangue se presentan en Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Carampangue

Parámetro	Valor	Unidad
X_1	246,96	[mm]
X_2	21,43	[mm]
X_3	711,42	[mm]
X_4	1,17	[días]

Comparando los coeficientes de Nash-Sutcliffe presentados en la Tabla 4.8 es claro que

el ajuste mostrado en la etapa de calibración disminuye en la etapa de validación (Enero 1982-Diciembre 1983). Si se analizan las Figuras 4.19 y 4.20 se advierte que durante la validación, los caudales de crecidas observados son bastante similares en magnitud a los de la etapa de calibración; sin embargo, las precipitaciones máximas son bastante inferiores, por lo que el modelo no obtiene tan buenos resultados en este período. Además, durante la calibración los caudales bajos son muy bien representados por el modelo, pero durante la validación, aparecen máximos de precipitación durante el verano que no se manifiestan en el caudal observado, pero si en el modelado por lo que el ajuste disminuye.

La Figura 4.21 presenta los caudales observados vs los modelados para el período de calibración de la cuenca del río Carampangue. En esta figura es posible observar que los caudales menores a $300m^3/s$ siguen una tendencia de pendiente similar a los 45° , con una leve sobrestimación para los caudales cuyos valores se encuentran entre 100 y $300m^3/s$. Respecto a los caudales observados superiores a este valor, existen algunos que mantienen la tendencia, y otros que tienden a ser claramente subestimados.

En la etapa de Validación, los caudales observados mayores a $200m^3/s$ son subestimados, ya que ninguno de los caudales modelados sobrepasa este valor. Para los caudales observados entre 100 y $200m^3/s$ se produce una subestimación menos pronunciada, en tanto que los caudales inferiores a este rango son mejor representados por el modelo.

El ajuste a nivel mensual es bastante pobre comparado con lo obtenido en otras cuencas: entre los años 1979 y 1981, se sobrestiman bastante los caudales de los meses de invierno, y durante los años correspondientes a la etapa de calibración se subestiman los caudales durante el invierno y se sobrestiman durante el verano. La curva de duración (ver Figura 4.24) se ajusta bastante bien, excepto en los caudales altos y en los caudales más bajos. Esto último se debe a lo sucedido durante el primer año calibración, por lo que no es relevante.

Tabla 4.8: Resultados de Calibración y Validación

Coefficiente	Calibración	Validación
Nash-Sutcliffe(Q_{md})	70,6	52,9
Nash-Sutcliffe(Crecidas($Q_{md} = 158, 0 [m^3/s]$))	55,4	20,7
Nash-Sutcliffe($\ln(Q_{md})$)	81,5	60,1
Nash-Sutcliffe(Q_{mm})	81,5	68,7

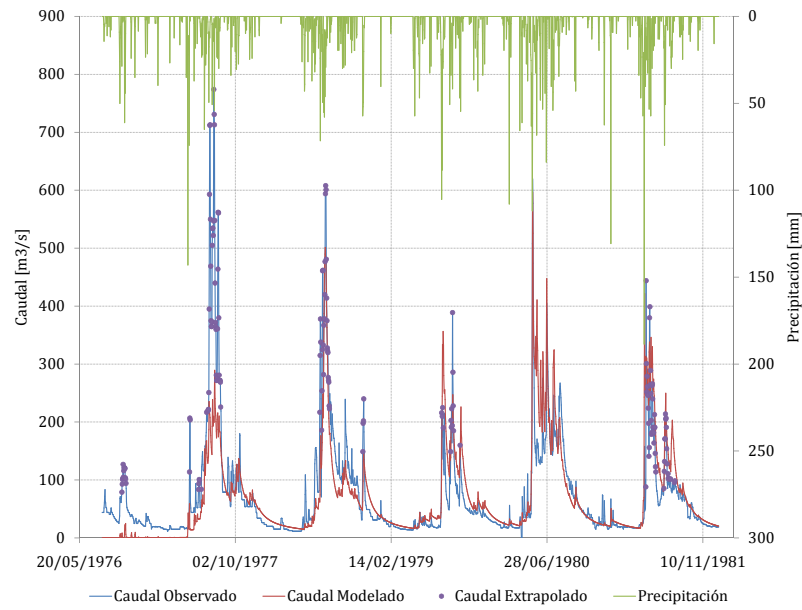


Figura 4.19: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ago 1976-Dic 1981)

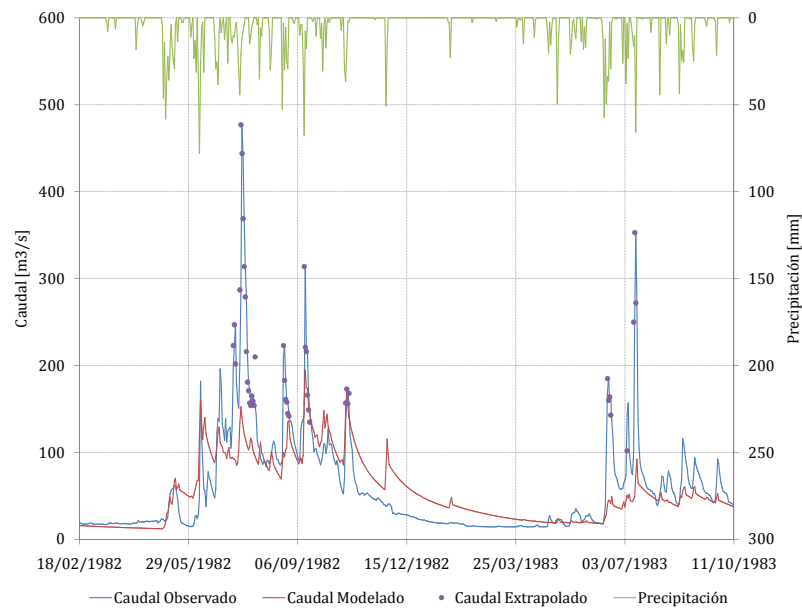


Figura 4.20: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ene 1982-Dic 1983)

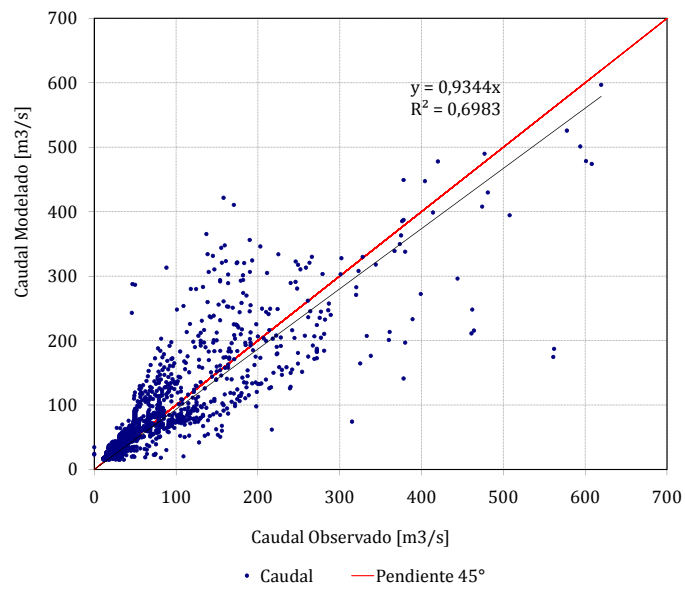


Figura 4.21: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ago 1976-Dic 1981)

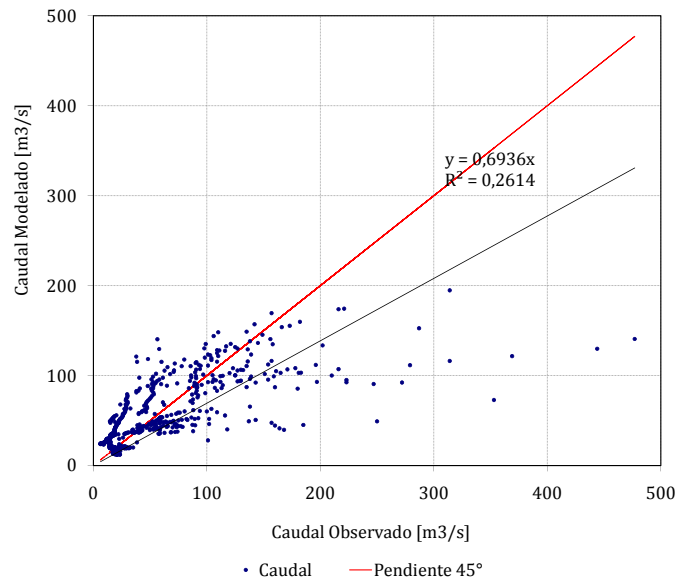


Figura 4.22: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ene 1982-Dic 1983)

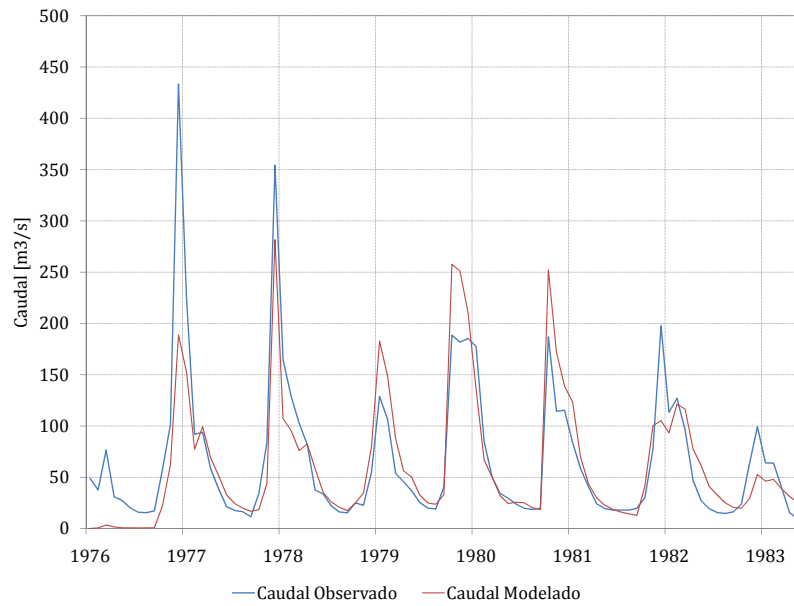


Figura 4.23: Simulación de Caudales Medios Mensuales en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ago 1976-Dic 1983)

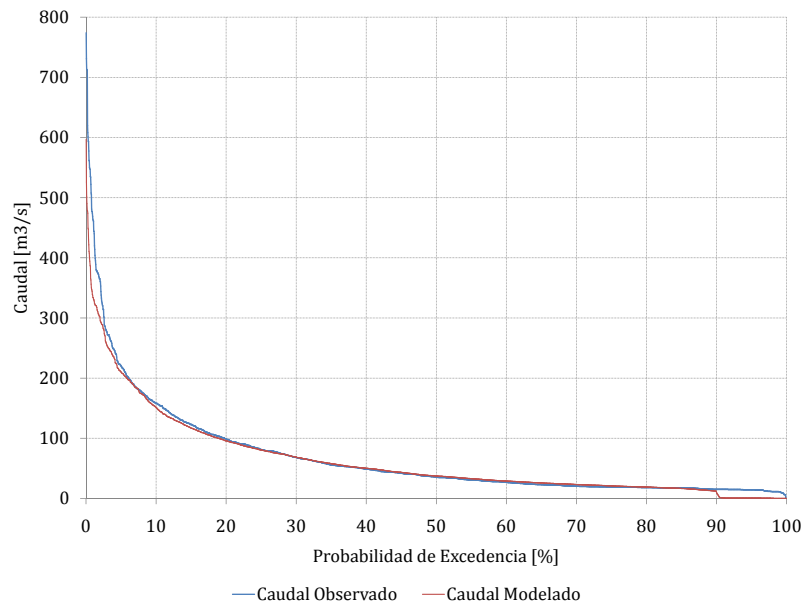


Figura 4.24: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Carampangue en Carampangue (Ago 1976-Dic 1983)

4.5. Estación Río Lebu en las Corrientes

La información de entrada para los procesos de calibración y validación de la estación Río Lebu en las Corrientes corresponde a la serie de evaporación media diaria de la estación Angol y la serie de precipitación a nivel diario de la estación Las Achiras, corregida usando la información de la estación pluviométrica Curanilahue.

Los parámetros del modelo GR4J calibrado usando el período Abril 1980-Marzo 1984 para la Estación Río Lebu en las Corrientes, se presentan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Lebu

Parámetro	Valor	Unidad
X_1	21,70	[<i>mm</i>]
X_2	20,47	[<i>mm</i>]
X_3	592,09	[<i>mm</i>]
X_4	1,33	[<i>días</i>]

La Tabla 4.10 contiene los coeficientes de Nash-Sutcliffe calculados en las etapas de calibración y validación del modelo, estos indican un ajuste regular durante el período de calibración, que empeora para el período de validación. El modelo reproduce correctamente los caudales bajos, no así los caudales de crecidas los que son subestimados en ambos períodos presentando coeficientes de Nash-Sutcliffe bastante inferiores a lo esperado. Las Figuras 4.25 y 4.26 muestran las series de caudales observados y simulados para los períodos de calibración y validación respectivamente.

La Figura 4.27 muestra que durante el período de calibración existe una notoria subestimación de los caudales observados mayores a $150m^3/s$. Los puntos correspondientes a caudales observados inferiores a este valor siguen una tendencia cuya pendiente es muy cercana a los 45° .

Para el período de validación (ver Figura 4.28) se observa una menor tendencia a la subestimación de los caudales altos, pero una mayor dispersión que la observada en la etapa de calibración. Además es posible observar una crecida que es generada por el modelo pero que no se manifiesta en los caudales observados.

La curva de duración (ver Figura 4.30) permite detectar que el modelo sobrestima los

caudales bajos, mientras que los caudales altos son subestimados, lo que se condice con los resultados obtenidos nivel mensual (ver Figura 4.29) donde se produce una subestimación del caudal en los meses de invierno y una sobrestimación en los meses de verano.

Tabla 4.10: Resultados de Calibración y Validación

Coefficiente	Calibración	Validación
Nash-Sutcliffe(Q_{md})	53,7	40,9
Nash-Sutcliffe(Crecidas($Q_{md} = 198,4 [m^3/s]$))	17,4	4,1
Nash-Sutcliffe($\ln(Q_{md})$)	79,2	66,2
Nash-Sutcliffe(Q_{mm})	90,6	77,2

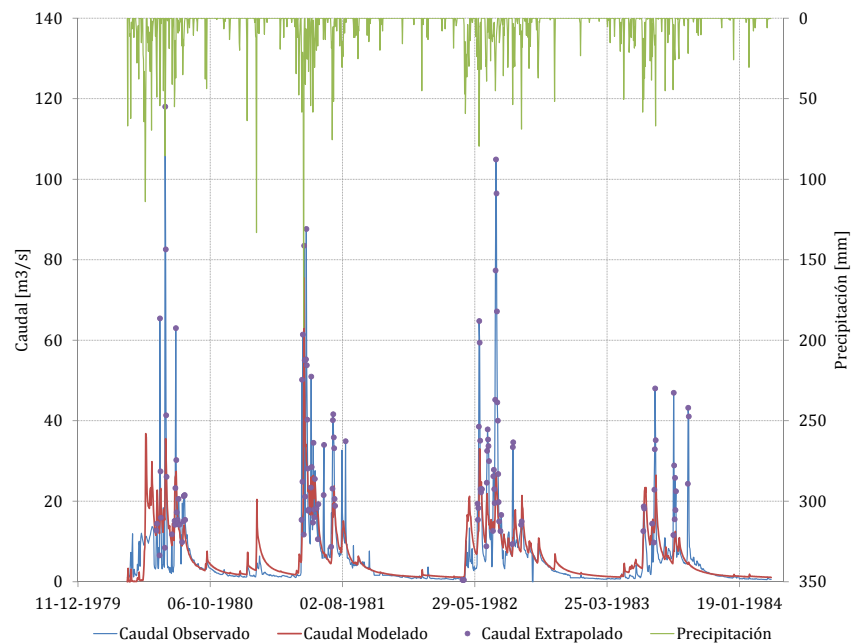


Figura 4.25: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Lebu en las Corrientes (Abr 1980-Mar 1984)

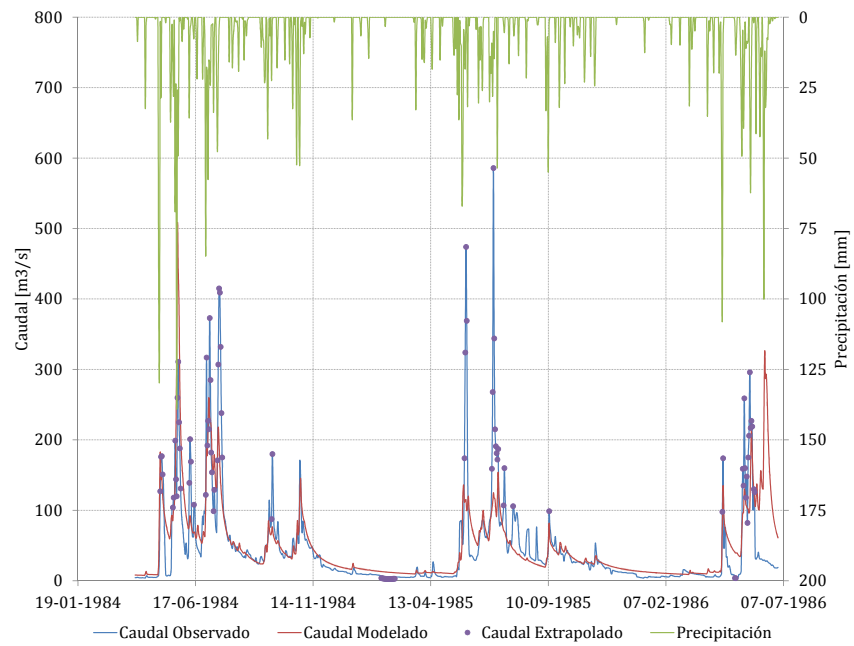


Figura 4.26: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Lebu en las Corrientes (Abr 1984-Jun 1986)

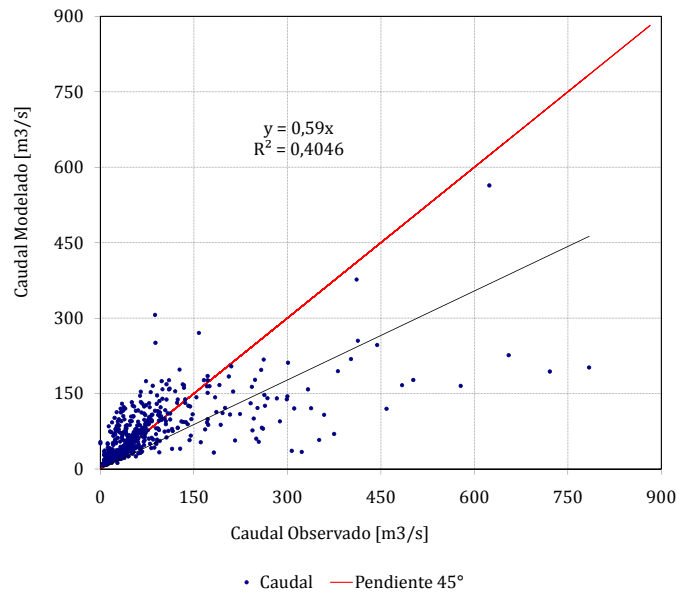


Figura 4.27: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Lebu en las Corrientes (Abr 1980-Mar 1984)

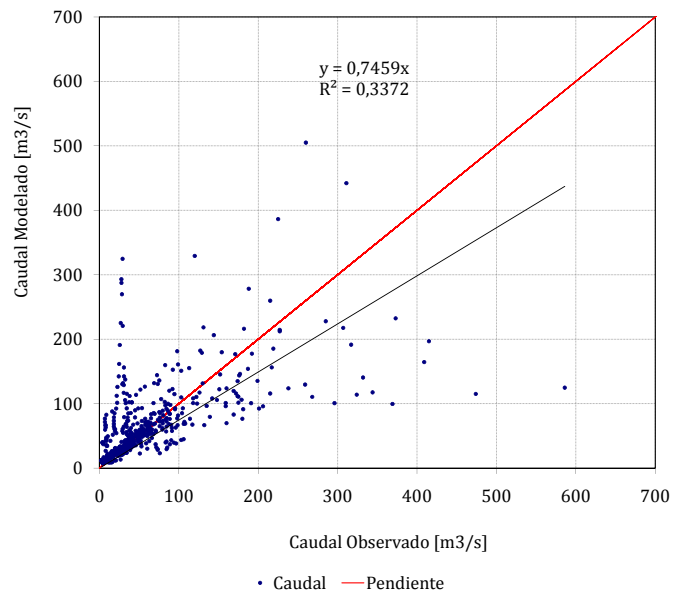


Figura 4.28: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Lebu en las Corrientes (Abr 1984-Jun 1986)

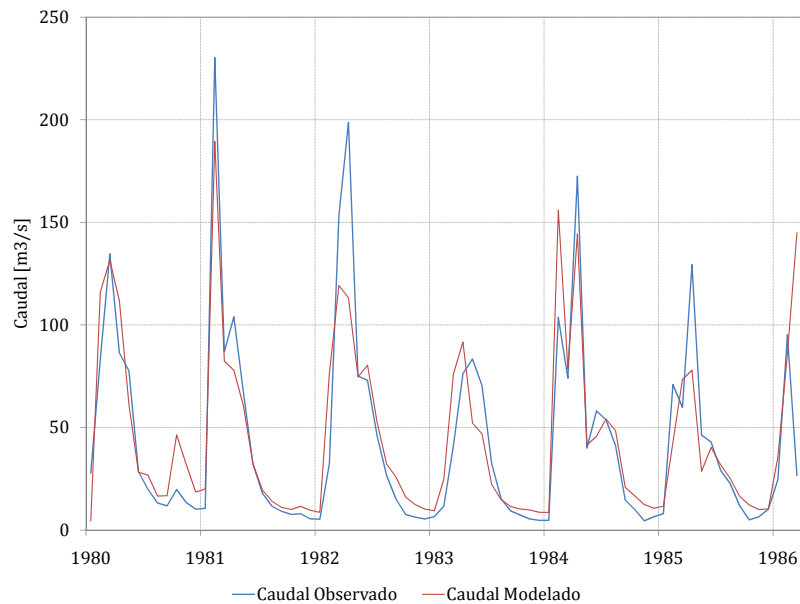


Figura 4.29: Simulación Caudales Medios Mensuales Estación Río Lebu en las Corrientes(Abr 1980-Jun 1986)

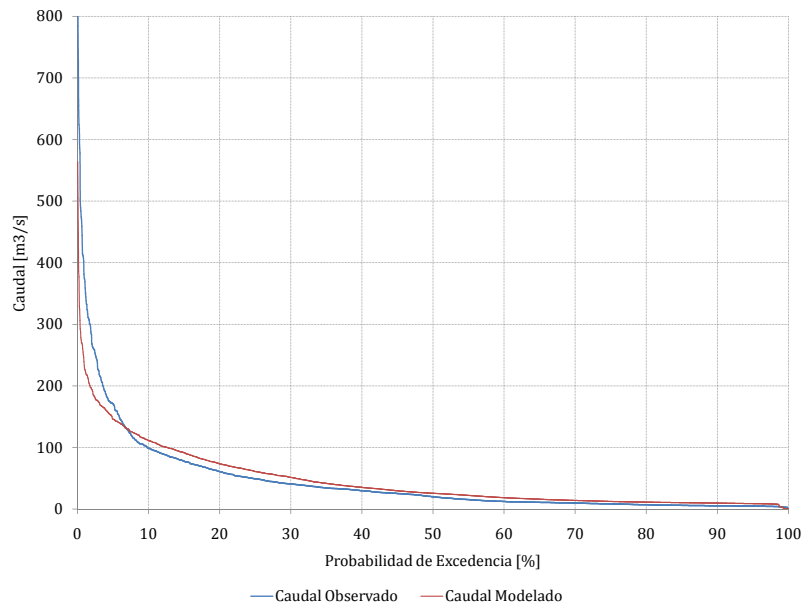


Figura 4.30: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Lebu en las Corrientes (Abr 1980-Jun 1986)

4.6. Estación Río Caramávida en Caramávida

La información de entrada para los procesos de calibración y validación de la estación Río Caramávida en Caramávida corresponde a la serie de evaporación de la estación El Vergel y la serie de precipitación media diaria de la estación pluviométrica Cañete, corregida usando las isoyetas de precipitación contenidas en el Balance Hídrico de Chile.

La Tabla 4.11 contiene los parámetros resultantes del proceso de calibración realizado en el período Enero 1983- Agosto 1987 del modelo GR4J en la Estación Río Caramávida en Caramávida.

Tabla 4.11: Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Caramávida

Parámetro	Valor	Unidad
X_1	30,00	[mm]
X_2	0,00	[mm]
X_3	943,08	[mm]
X_4	1,15	[días]

La Figura 4.31 muestra las series de caudal modelado y observado durante el período de calibración, donde se aprecia que el modelo representa correctamente el caudal observado, especialmente durante los meses de verano, sin embargo las crecidas normalmente son subestimadas, exceptuando el invierno de 1986 donde el caudal peak queda bien representado.

La Figura 4.33 muestra durante el período de calibración, los caudales observados menores a $60m^3/s$ siguen una tendencia lineal de pendiente similar a 45° . Los caudales superiores a este valor son subestimados por el modelo.

Durante el período de validación presentado en la Figura 4.32 se produce una clara sobrestimación de los caudales medios, y se acentúa la subestimación de los caudales de crecidas, lo que se resume en un menor ajuste y en una disminución en los valores de los coeficientes de Nash respecto del período de calibración (ver Tabla 4.12).

La nube de puntos obtenida al comparar los caudales observados con los modelados para el período de validación, muestra una subestimación de los caudales observados mayores a $30 m^3/s$. Los caudales menores a este valor presentan una tendencia lineal de pendiente cercana a 45° .

Respecto a los caudales medios mensuales de la Figura 4.35 se puede decir que durante los meses de verano los caudales generados por el modelo son menores a los observados, mientras que durante los meses de invierno son superiores en la mayor parte del período analizado. Esto se produce por una sobrestimación de los caudales medios, lo que es claramente observable en las curvas de duración expuestas en la Figura 4.36.

Tabla 4.12: Resultados de Calibración y Validación

Coefficiente	Calibración	Validación
Nash-Sutcliffe(Q_{md})	71,0	58,1
Nash-Sutcliffe(Crecidas($Q_{md} = 10,6 [m^3/s]$))	47,5	35,6
Nash-Sutcliffe($\ln(Q_{md})$)	75,5	32,3
Nash-Sutcliffe(Q_{mm})	85,1	84,8

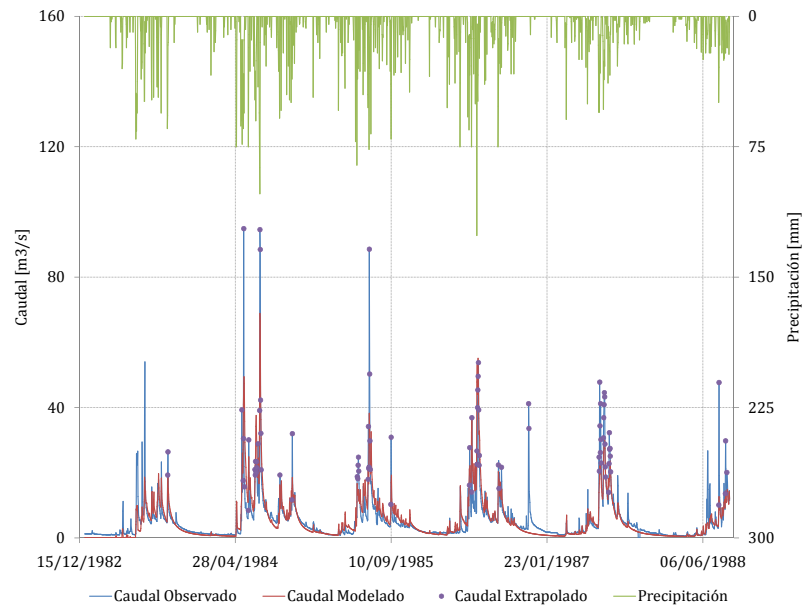


Figura 4.31: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Caramávida en Caramávida (Ene 1983-Ago 1988)

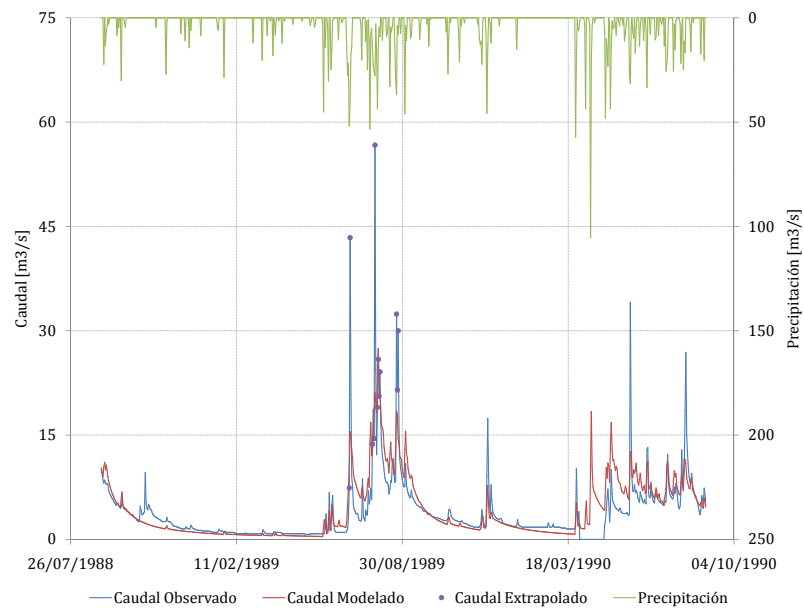


Figura 4.32: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Caramávida en Caramávida (Sep 1988-Ago 1990)

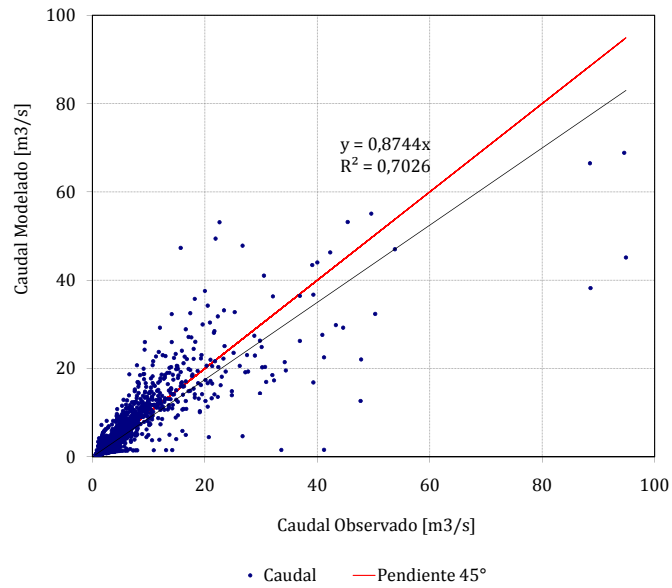


Figura 4.33: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Caramávida en Caramávida (Ene 1983-Ago 1988)

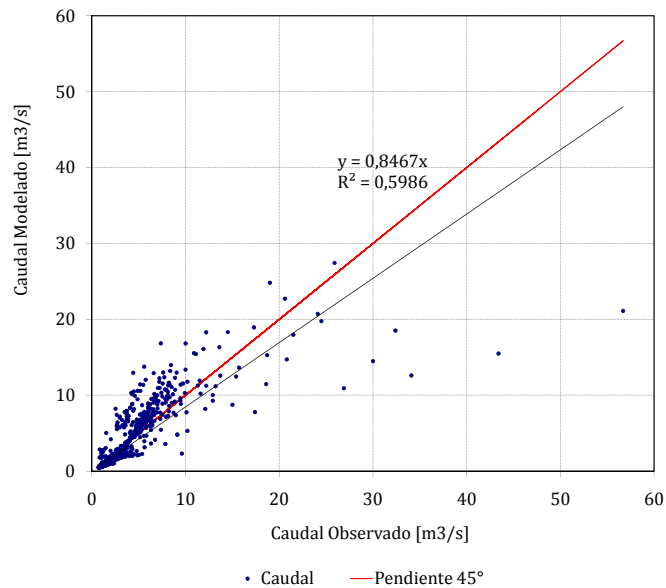


Figura 4.34: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Caramávida en Caramávida (Sep 1988-Ago 1990)

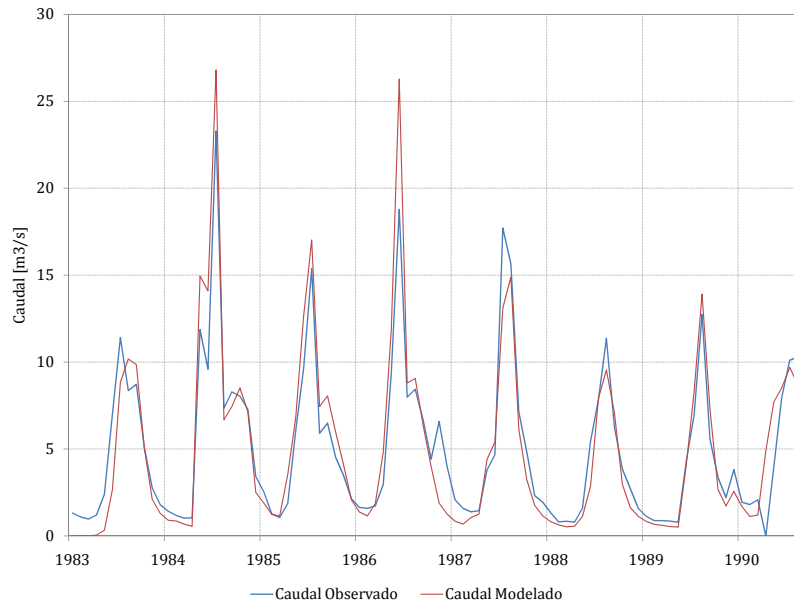


Figura 4.35: Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Caramávida en Caramávida (Ene 1983-Ago 1990)

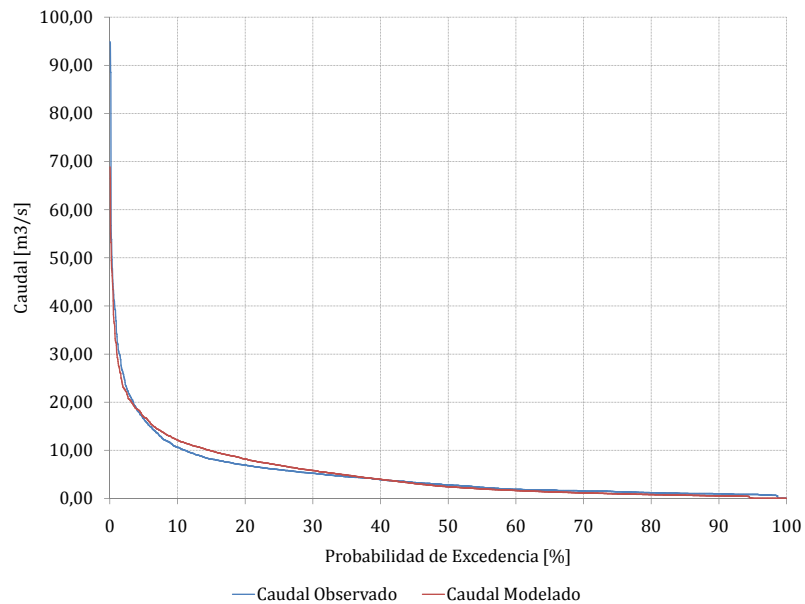


Figura 4.36: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Caramávida en Caramávida (Ene 1983-Ago 1990)

4.7. Estación Río Butamalal en Butamalal

La información de entrada para los procesos de calibración y validación de la estación Río Butamalal en Butamalal corresponde a la serie de evaporación de la estación Traiguén y la serie de precipitación media diaria de la estación pluviométrica Caete, corregida usando las isoyetas de precipitación contenidas en el Balance Hídrico de Chile.

La Tabla 4.13 muestra los coeficientes determinados durante el período de calibración comprendido entre Mayo 1982-Diciembre 1985 en la cuenca del Río Butamalal.

Tabla 4.13: Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Butamalal

Parámetro	Valor	Unidad
X_1	10,00	[<i>mm</i>]
X_2	-4,00	[<i>mm</i>]
X_3	3319,79	[<i>mm</i>]
X_4	1,59	[<i>días</i>]

Los coeficientes de Nash-Sutcliffe contenidos en la Tabla 4.14 muestran un aumento durante el proceso de validación (Enero 1986-Julio 1987), debido principalmente a que se produce un mejor ajuste de los caudales de crecida, puesto que el Nash asociado a los caudales bajos disminuye ($\text{Nash}(\ln(Q))$). En las Figuras 4.37 y 4.38 se puede observar gráficamente lo inferido a partir de los valores de los coeficientes. En el período de calibración además es posible notar que sólo durante el primer año se producen crecidas importantes, posterior a esto se presentan crecidas de menor magnitud.

En la Figura 4.39 se aprecia que, para el período de calibración, la nube de puntos obtenida al contrastar los caudales observados vs los modelados sigue una tendencia con una pendiente similar a los 45° , con una leve subestimación de los caudales observados cuyos valores se encuentran entre 10 y $25\text{m}^3/\text{s}$. El caudal máximo observado es muy subestimado por el modelo.

La nube de puntos presentada en la Figura 4.40, que muestra los resultados del proceso de validación, sigue una tendencia de pendiente muy cercana a los 45° . Se aprecia que existen algunos puntos que se alejan bastante de la línea de tendencia, principalmente aquellos caudales observados superiores a $17\text{m}^3/\text{s}$.

Las series de caudales a nivel mensual presentadas en la Figura 4.41 son bastante similares entre sí exceptuando lo ocurrido durante el primer año de calibración, que como se dijo anteriormente está sujeto a las condiciones iniciales impuestas al modelo. En la curva de duración (ver Figura 4.42) se advierte que existe una clara subestimación de los caudales medios y altos por parte del modelo calibrado, mientras que los caudales bajos son bien representados.

Tabla 4.14: Resultados de Calibración y Validación

Coefficiente	Calibración	Validación
Nash-Sutcliffe(Q_{md})	67,9	68,2
Nash-Sutcliffe(Crecidas($Q_{md} = 9,3 [m^3/s]$))	43,9	49,9
Nash-Sutcliffe($\ln(Q_{md})$)	82,8	71,1
Nash-Sutcliffe(Q_{mm})	89,0	89,3

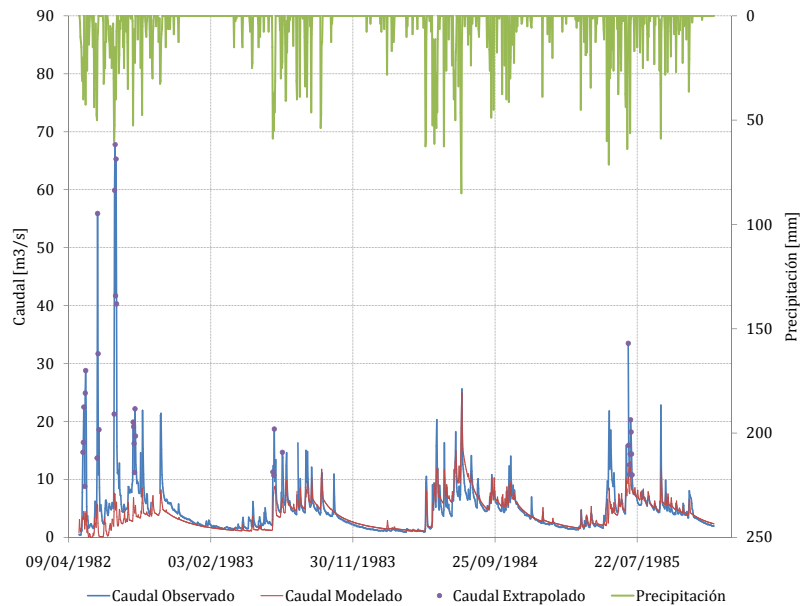


Figura 4.37: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Butamalal en Butamalal (May 1982-Dic 1985)

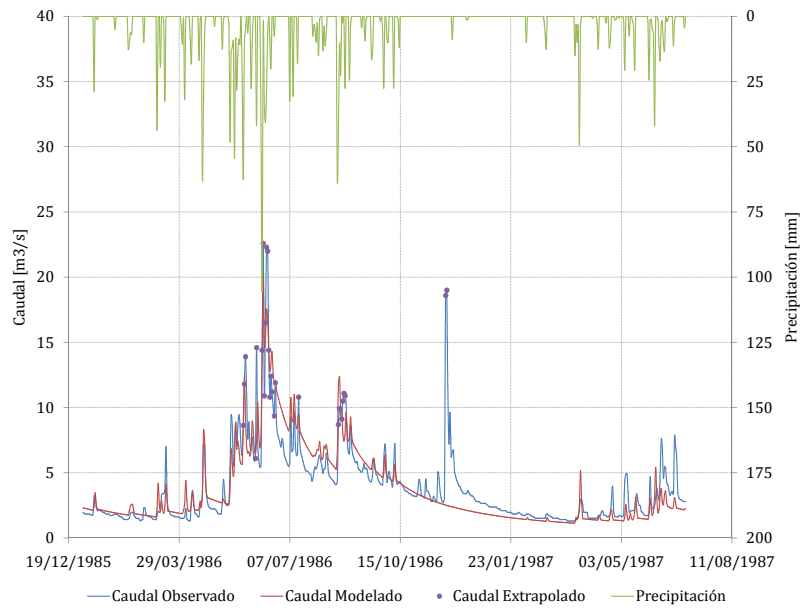


Figura 4.38: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Butamalal en Butamalal(Ene 1986-Jul 1987)

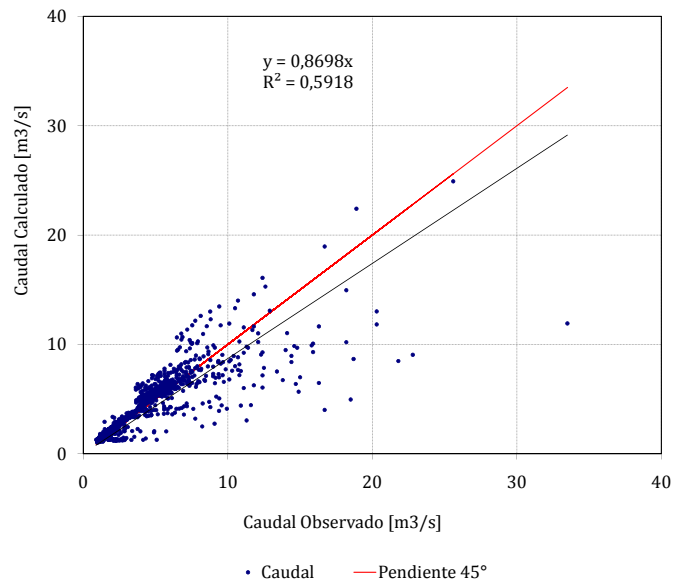


Figura 4.39: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Butamalal en Butamalal(May 1982-Dic 1985)

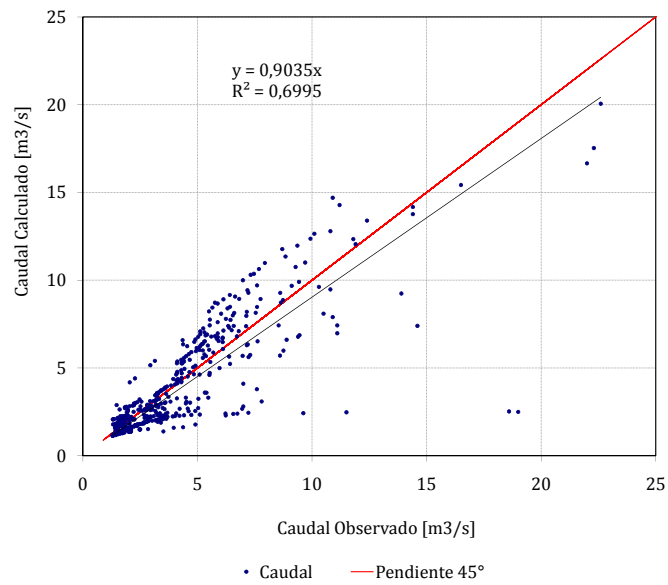


Figura 4.40: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Butamalal en Butamalal(Ene 1986-Jul 1987)

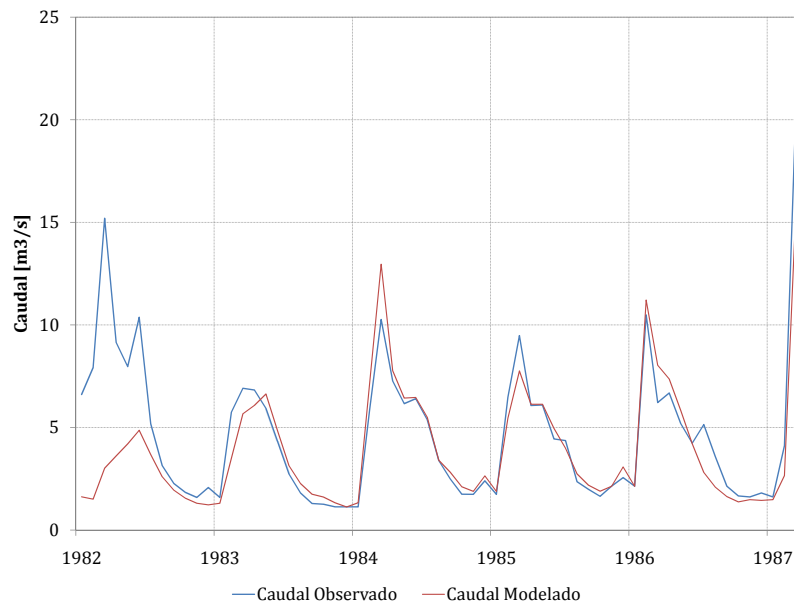


Figura 4.41: Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Butamalal en Butamalal (May 1982-Jul 1987)

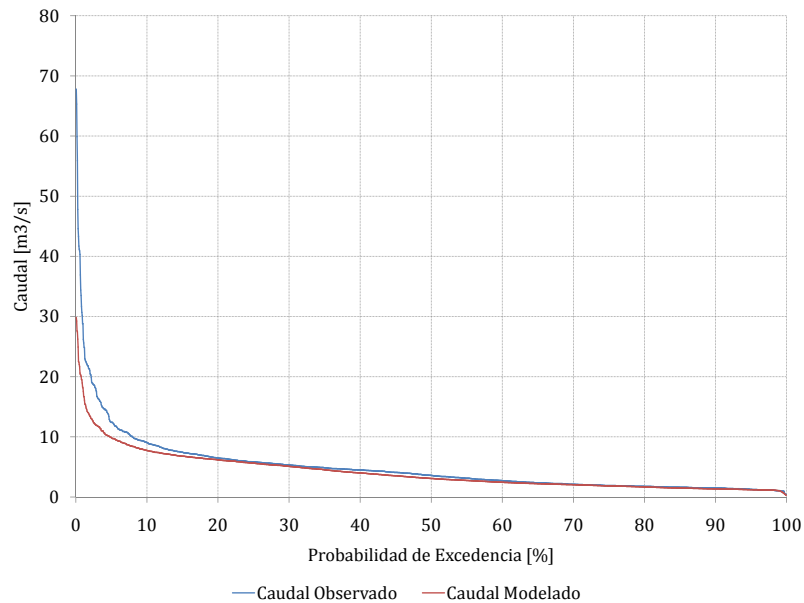


Figura 4.42: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Butamalal en Butamalal(May 1982-Jul 1987)

4.8. Estación Río Cayucupil en Cayucupil

La información de entrada para los procesos de calibración y validación de la estación Río Cayucupil en Cayucupil corresponde a la serie de evaporación de la estación Angol y la serie de precipitación a nivel diario de la estación pluviométrica Caete, corregida usando las isoyetas de precipitación contenidas en el Balance Hídrico de Chile.

La Tabla 4.15 presenta los parámetros del modelo GR4J obtenidos en el proceso de calibración de la Estación Río Cayucupil en Cayucupil en el período Enero 1976-Diciembre 1979.

Tabla 4.15: Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Cayucupil

Parámetro	Valor	Unidad
X_1	0,01	[mm]
X_2	8,670	[mm]
X_3	2012,51	[mm]
X_4	1,00	[días]

Los resultados presentados en la Tabla 4.16 muestran un ajuste regular en los caudales de crecidas, esto se explica porque el río presenta varias crecidas importantes durante el año, de las cuales sólo una o dos son bien representadas por el modelo, lo que se distingue claramente en las Figuras 4.43 y 4.44 que exponen las series de caudales para los períodos de calibración y validación respectivamente.

La Figura 4.45 presenta los caudales observados vs los modelados para el período de calibración. En esta figura se observa una gran dispersión en la nube de puntos para los caudales mayores a $20m^3/s$. Para los caudales menores a este valor la nube de puntos sigue una tendencia de pendiente muy cercana a los 45° .

En el período de validación (ver Figura 4.45) al igual que en el período de calibración la nube de puntos presenta una gran dispersión. En este caso se observa además una clara subestimación de los caudales observados mayores a $30m^3/s$.

A nivel mensual (ver Figura 4.47) el modelo replica bastante bien la serie de caudales en el período de calibración sin embargo en el período de validación, principalmente durante el año 1982, los caudales máximos no son bien representados. Las curvas de duración presentadas en la Figura 4.48 muestran que el modelo subestima los caudales altos y sobrestima los caudales bajos.

Tabla 4.16: Resultados de Calibración y Validación

Coefficiente	Calibración	Validación
Nash-Sutcliffe(Q_{md})	68,9	63
Nash-Sutcliffe(Crecidas($Q_{md} = 19,5 [m^3/s]$))	47,2	33,4
Nash-Sutcliffe($\ln(Q_{md})$)	77,7	76,7
Nash-Sutcliffe(Q_{mm})	89,7	87,2

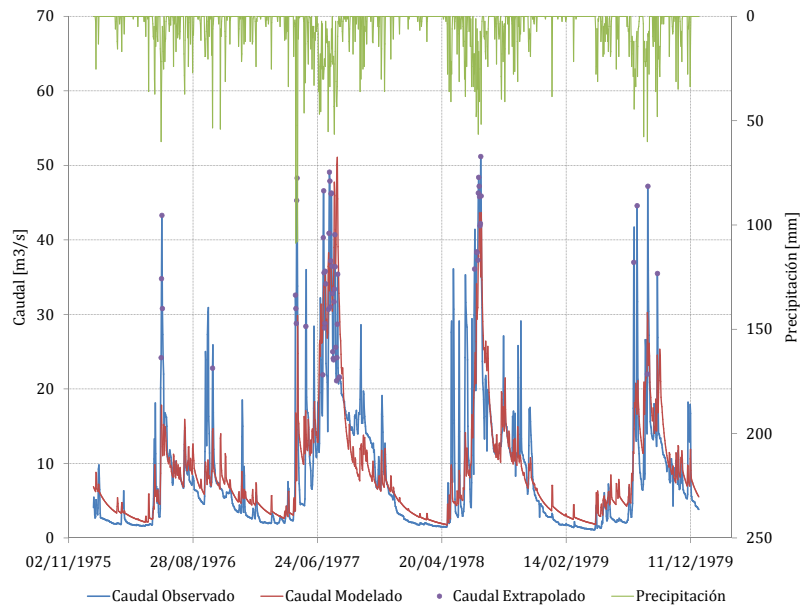


Figura 4.43: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1976-Dic 1979)

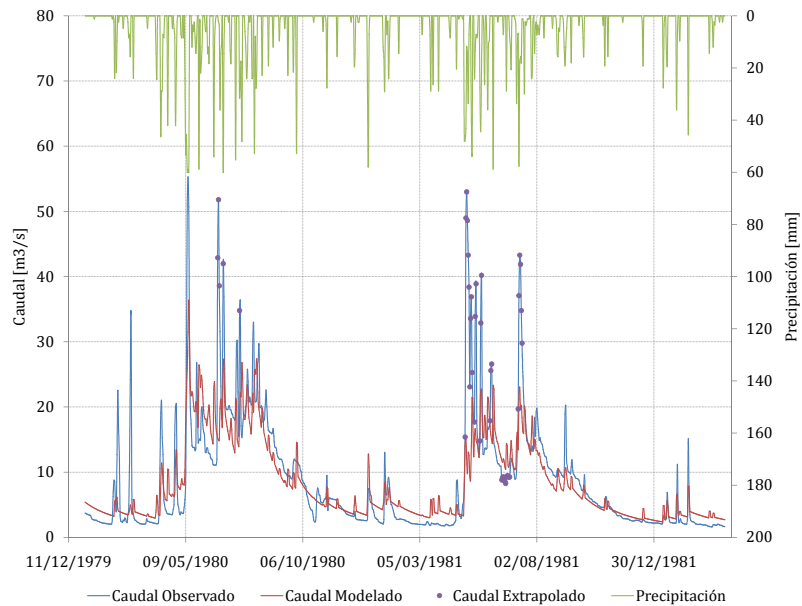


Figura 4.44: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1980-Dic 1982)

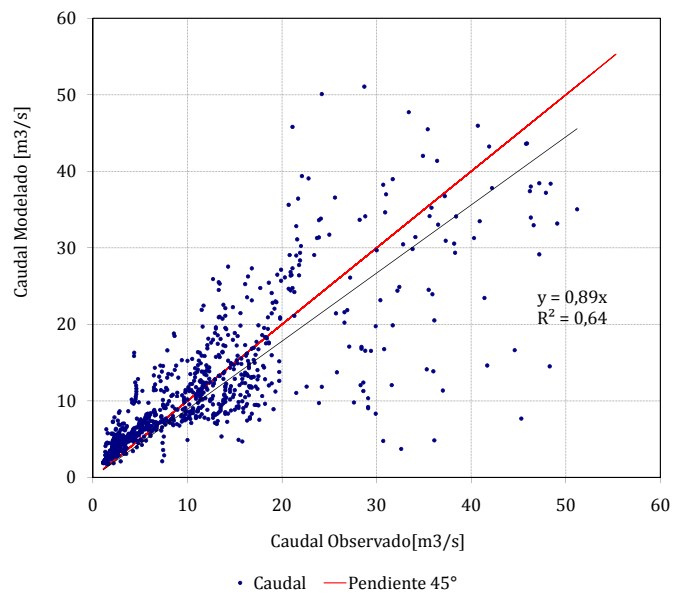


Figura 4.45: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1976-Dic 1979)

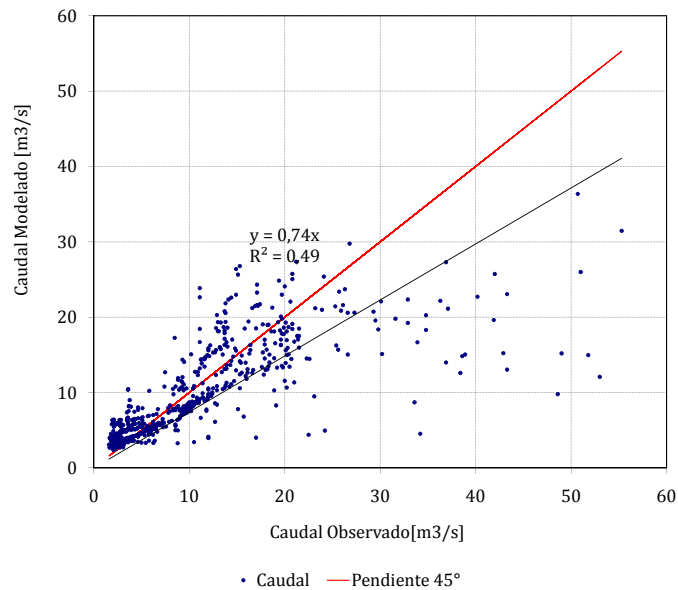


Figura 4.46: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1980-Dic 1982)

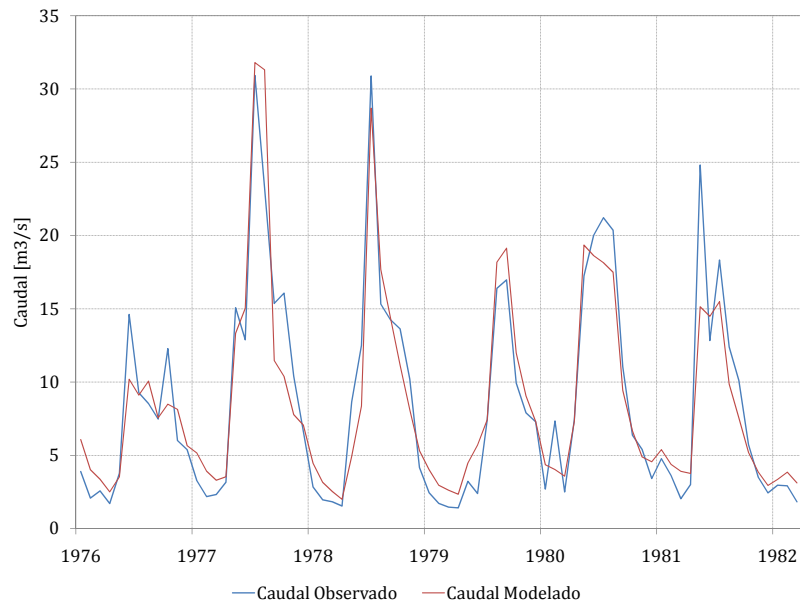


Figura 4.47: Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1976-Dic 1982)

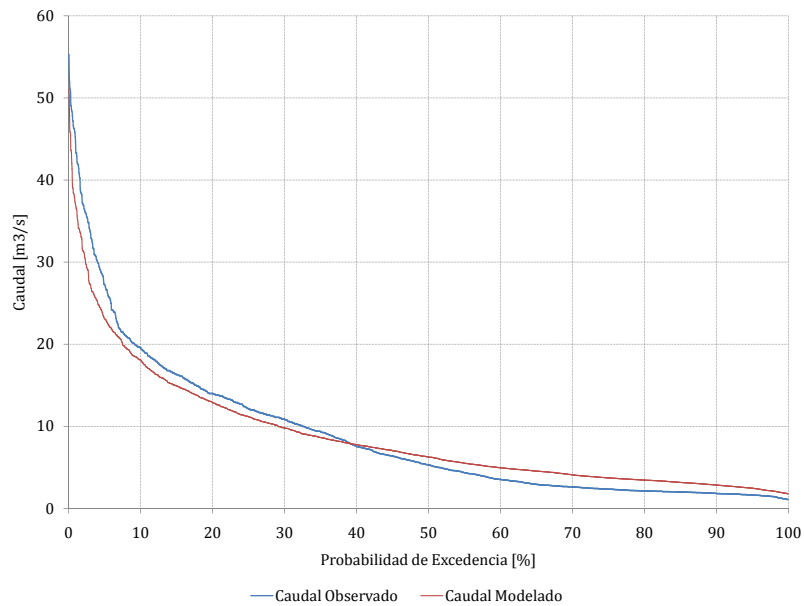


Figura 4.48: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios en Estación Río Cayucupil en Cayucupil (Ene 1976-Dic 1982)

4.9. Estación Río Reputo en Reputo

La información de entrada para los procesos de calibración y validación de la estación Río Reputo en Reputo corresponde a la serie de evaporación de la estación Angol y la serie de precipitación a nivel diario de la estación pluviométrica Caete, corregida usando las isoyetas de precipitación contenidas en el Balance Hídrico de Chile.

Los parámetros obtenidos para el período de calibración comprendido entre Enero 1976 y Diciembre de 1980, en la Estación Río Reputo en Reputo se muestran en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17: Parámetros del modelo GR4J en la cuenca del Río Reputo

Parámetro	Valor	Unidad
X_1	8,45	[<i>mm</i>]
X_2	4,89	[<i>mm</i>]
X_3	1698,84	[<i>mm</i>]
X_4	0,66	[<i>días</i>]

Esta cuenca es la que presenta el mejor ajuste de todas las cuencas analizadas, tanto para el período de calibración como de validación, lo que queda en evidencia al observar los coeficientes de Nash obtenidos (ver Tabla 4.18). Los caudales medios y bajos quedan muy bien representados por el modelo sobre todo en la etapa de calibración (ver Figuras 4.49 y 4.50). Respecto a las crecidas, hay algunas que el modelo reproduce adecuadamente, como la del invierno de 1978, sin embargo existen otras que son subestimadas.

Al contrastar los caudales observados con los modelados en el período de calibración se genera una nube de puntos cuya tendencia presenta una pendiente cercana a los 45° . Sin embargo los caudales observados mayores a $3m^3/s$ son subestimados por el modelo.

En el período de validación la tendencia de la nube de puntos obtenida al contrastar los caudales observados vs los modelados, es muy similar a la alcanzada para el período de calibración. Sin embargo en este caso la subestimación de los caudales observados se produce para caudales mayores a $2m^3/s$.

En la Figura 4.53 se exponen las series de caudales modelados y observados a nivel mensual, las que presentan un buen ajuste general, los mayores problemas se producen durante el año 1983, que corresponde al último año del período de validación, donde la

forma de la curva no se reproduce de manera correcta en el modelo. La curva de duración generada por el modelo es muy similar a la observada, sólo se produce una subestimación de los caudales altos.

Tabla 4.18: Resultados de Calibración y Validación

Coefficiente	Calibración	Validación
Nash-Sutcliffe(Q_{md})	76,8	74,5
Nash-Sutcliffe(Crecidas($Q_{md} = 1 [m^3/s]$))	59,2	59,6
Nash-Sutcliffe($\ln(Q_{md})$)	83,4	78,6
Nash-Sutcliffe(Q_{mm})	93,8	85,0

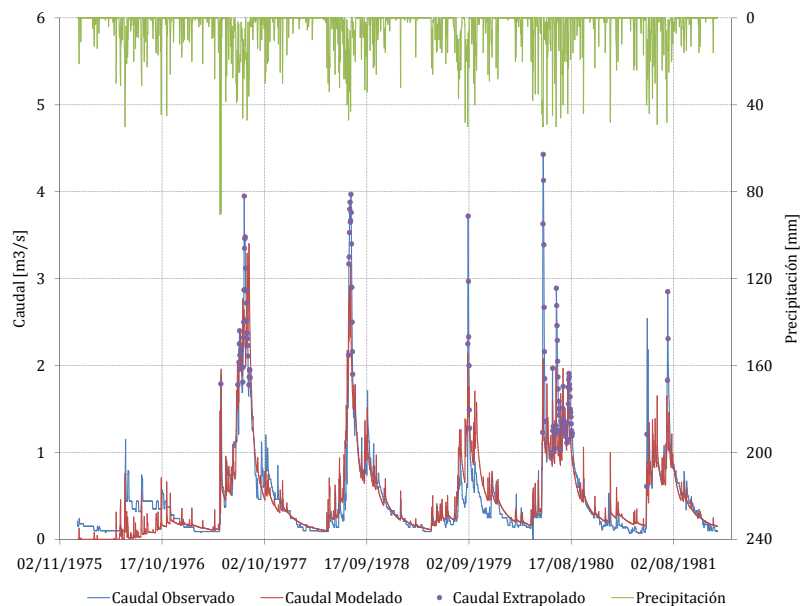


Figura 4.49: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1976-Dic 1979)

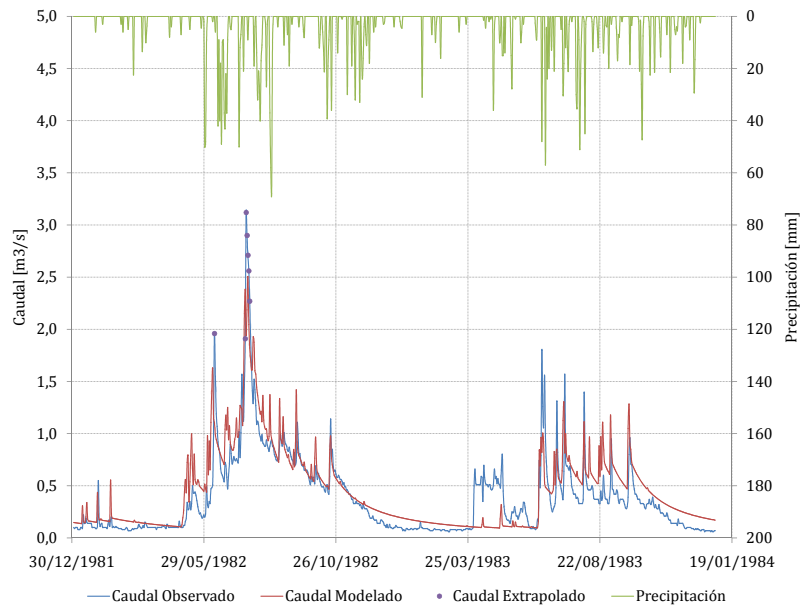


Figura 4.50: Series de Caudales Observados y Modelados para el Período de Validación en Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1980-Dic 1982)

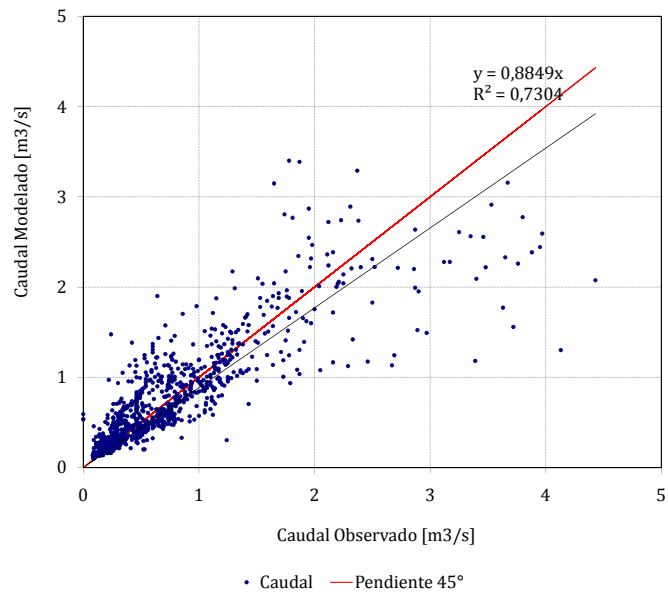


Figura 4.51: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Calibración en Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1976-Dic 1979)

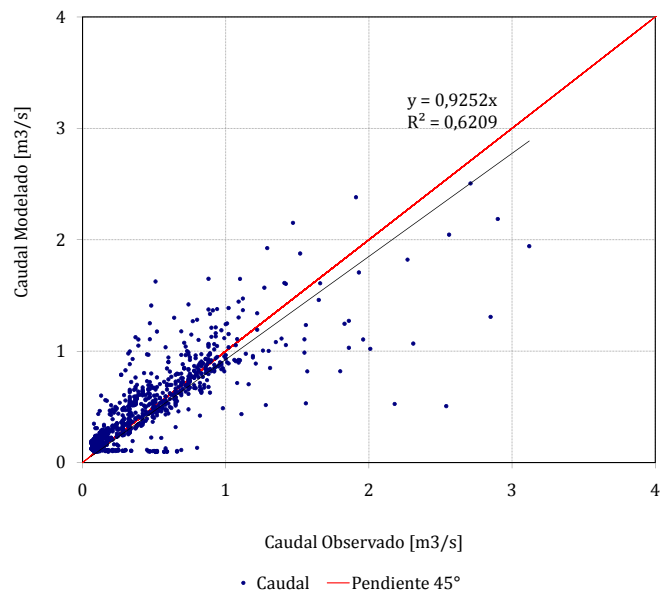


Figura 4.52: Caudales Observados vs Caudales Modelados para el Período de Validación en Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1980-Dic 1982)

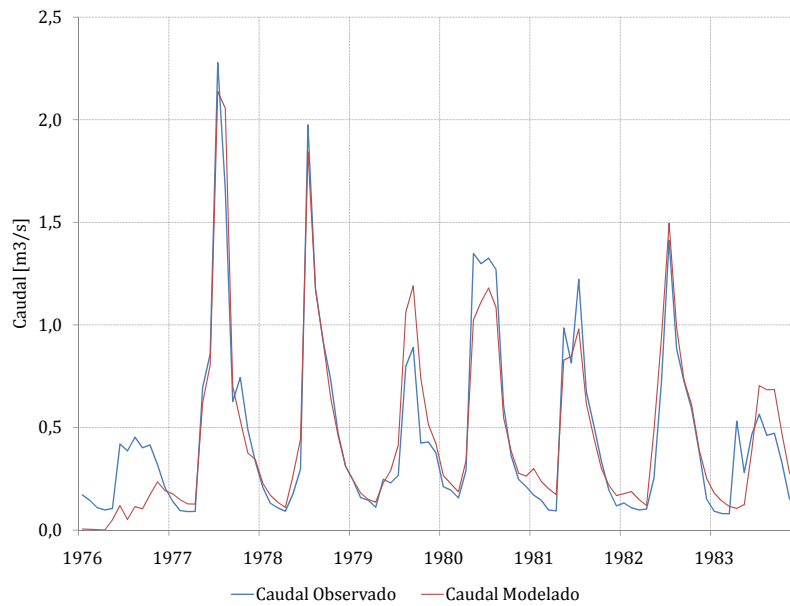


Figura 4.53: Simulación Caudales Medios Mensuales en Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1976-Dic 1982)

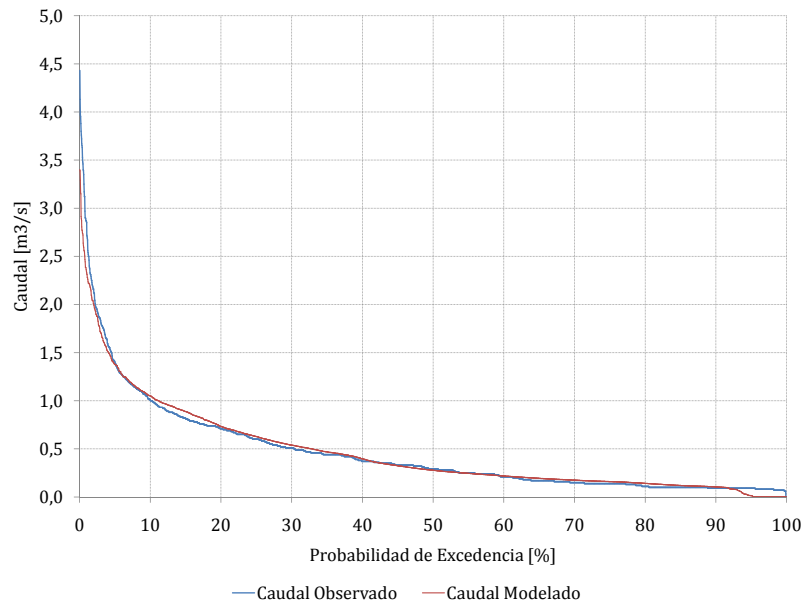


Figura 4.54: Curva de Duración Caudales Medios Diarios Estación Río Reputo en Reputo (Ene 1976-Dic 1982)

Capítulo 5

Análisis de Frecuencia y determinación de Períodos de Retorno actuales y futuros

5.1. Cuencas con información Fluviométrica

Utilizando los modelos previamente calibrados y validados se determinan las series de caudales actuales y futuras. Adoptando como información de entrada las series de precipitación y evaporación del modelo PRECIS-DGF para la línea base y el escenario A2, las que fueron previamente corregidas de modo que sean representativas de cada cuenca. En el proceso de corrección se determinan correlaciones mensuales en los períodos coincidentes de la línea base y la información pluviométrica y evaporimétrica, las que luego se aplican en la totalidad del período que comprende la línea base y el escenario A2.

A modo de ejemplo de las variaciones producidas entre la línea base del modelo y el escenario A2 se presentan las curvas de duración (ver Figura 5.1) de la estación pluviométrica Cañete y de la estación Evaporimétrica El Vergel, en ambos casos se produce una disminución general de la precipitación y evaporación según corresponda, exceptuando los valores más altos en los que se produce un leve aumento.

En la Tabla 5.1 se presentan las precipitaciones diarias de 50% y 10% de probabilidad de excedencia para la línea base y el escenario A2. Los resultados muestran una clara disminución de las precipitaciones en todas las estaciones utilizadas en este estudio. La estación Coelemu es aquella que presenta las mayores disminuciones que corresponden

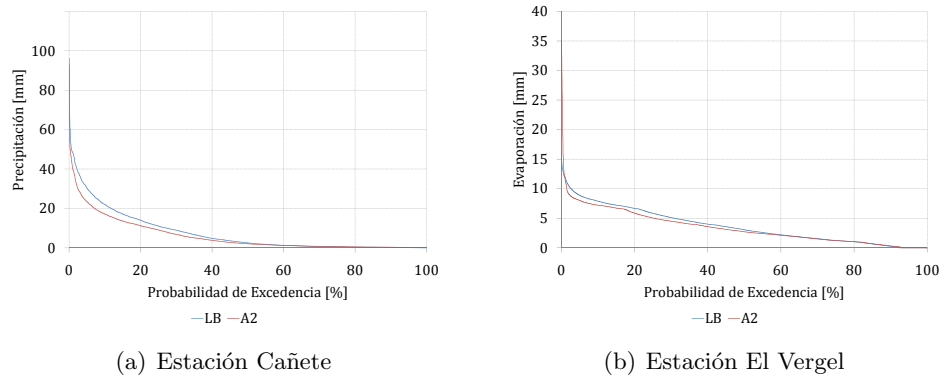


Figura 5.1: Curvas de Duración de Precipitación y Evaporación Diarias

aproximadamente a un 24 % para ambas probabilidades de excedencia.

Tabla 5.1: Variación de las precipitaciones actuales y futuras

Estación	Probabilidad de excedencia			
	50 %		10 %	
	LB	A2	LB	A2
Chillancito	9,2	7,2	34,6	27,7
Coilemu	7,9	6,0	29,6	22,6
Los Ángeles	7,8	6,5	30,5	26,1
Laja	9,2	8,2	32,0	26,3
Las Achiras	5,9	5,0	27,9	23,4
Cañete	2,5	2,0	22,0	17,1

De los caudales modelados para la línea base y el escenario A2, se extraen las series de máximos anuales con las que se realiza un análisis de frecuencia. En éste se analizan las siguientes distribuciones para cada cuenca: Gumbel, Normal, Pearson III, Log-Normal y Log Pearson. La distribución escogida será aquella que sea aceptada según el test Chi-Cuadrado y que presente un menor error cuadrático medio y un mayor R^2 . El detalle del cálculo realizado se encuentra en Anexos Digitales.

5.1.1. Estación Río Pingual en Dichato

El mejor ajuste de los caudales modelados para la línea base y el escenario A2 se obtiene utilizando la distribución Log-Pearson, ya que es la que presenta un menor error cuadrático

medio y un mayor R^2 (ver Tablas 5.2 y 5.3). Sin embargo, si se observan las Figuras 5.2 y 5.3, es posible notar que durante la línea base dos de los caudales más altos modelados son subestimados, y para el escenario A2 el caudal más alto se encuentra bastante alejado de la curva. Es importante destacar además que en el ajuste de ambos períodos se eliminó un dato por encontrarse fuera de rango, y es imposible de ajustar a alguna de las distribuciones utilizadas.

Los caudales resultantes del análisis de frecuencia en la estación Río Pingueral en Dichato muestran una disminución importante entre la línea base y el escenario A2, la que en porcentaje es superior para los menores períodos de retorno y se reduce a medida que éste aumenta. La última columna de la Tabla 5.4 presenta los futuros períodos de retorno de los caudales determinados para la línea Base, los que tienden a aumentar en mayor medida para los caudales más bajos.

Tabla 5.2: Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Pingueral en Dichato

Distribución	Test Chi Cuadrado				
	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	18,34	16,92	Rechazado	0,858	1,5
Log-Normal	9,45	16,92	Aprobado	0,924	1,3
Pearson III	6,60	15,51	Aprobado	0,950	1,0
Log-Pearson	7,06	15,51	Aprobado	0,956	1,0
Gumbel	7,84	16,92	Aprobado	0,939	1,0

Tabla 5.3: Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Pingueral en Dichato

Distribución	Test Chi Cuadrado				
	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	34,27	16,92	Rechazado	0,849	1,7
Log-Normal	6,31	16,92	Aprobado	0,939	1,2
Pearson III	6,68	15,51	Aprobado	0,945	1,2
Log-Pearson	10,17	15,51	Aprobado	0,948	1,1
Gumbel	6,70	16,92	Aprobado	0,928	1,2

Los intervalos de confianza determinados para los dos períodos analizados se intersectan a partir de un período de retorno de 10 años, siendo en general más amplio el intervalo

correspondiente al escenario A2. Para los períodos de retorno de 500 y 1000 años, la cota superior del intervalo de confianza asociado al escenario A2 (Q_{MaxA2}) es mayor a la cota superior del intervalo asociado a la línea base Q_{MaxLB} .

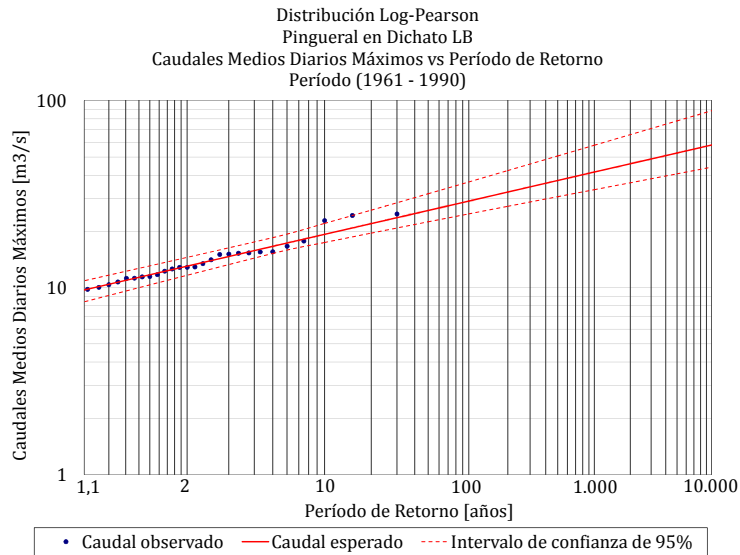


Figura 5.2: Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Pingueral en Dichato

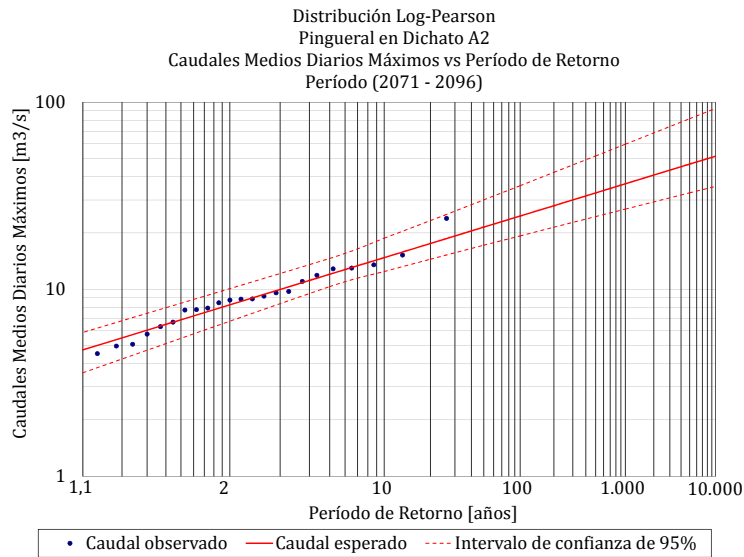


Figura 5.3: Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Pingueral en Dichato

Tabla 5.4: Períodos de Retorno y caudales asociados Río Pingual

T_{Actual} [años]	Q_{MinLB} [m^3/s]	Q_{LB} [m^3/s]	Q_{MaxLB} [m^3/s]	Q_{MinA2} [m^3/s]	Q_{A2} [m^3/s]	Q_{MaxA2} [m^3/s]	T_{Futuro} [años]
5	15,2	16,6	18,5	10,3	12,0	14,6	16
10	17,4	19,3	22,1	12,4	14,8	18,8	30
50	22,5	25,9	31,8	17,2	21,5	30,1	130
100	24,8	29,1	36,8	19,3	24,6	35,8	247
500	30,7	37,4	50,7	24,5	32,8	51,7	1.142
1000	33,5	41,6	57,8	26,8	36,7	59,7	2.255

5.1.2. Estación Río Andalién camino a Penco

Las Figuras 5.4 y 5.5 muestran el ajuste de la distribución Gumbel a los datos modelados para la línea base y el escenario A2. Se escoge esta distribución a pesar de no presentar un menor error cuadrático medio, ni un mayor R^2 , puesto que se ajusta mejor a los caudales altos en comparación a las demás distribuciones analizadas.

En la Tabla 5.7 se muestran los períodos de retorno para la línea base del modelo PRECIS y el escenario A2, en ellos se aprecia una enorme disminución de los caudales de crecidas en el escenario futuro. Por esta razón resulta lógico que se produzca un incremento importante en los períodos de retorno, que se intensifica a medida que el caudal aumenta.

Tabla 5.5: Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Andalién Camino a Penco

Distribución	Test Chi Cuadrado				
	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	47,83	16,92	Rechazado	0,740	41,9
Log-Normal	11,48	16,92	Aprobado	0,913	31,2
Pearson III	8,27	15,51	Aprobado	0,945	22,8
Log-Pearson	6,68	15,51	Aprobado	0,964	23,0
Gumbel	16,49	16,92	Aprobado	0,869	30,4

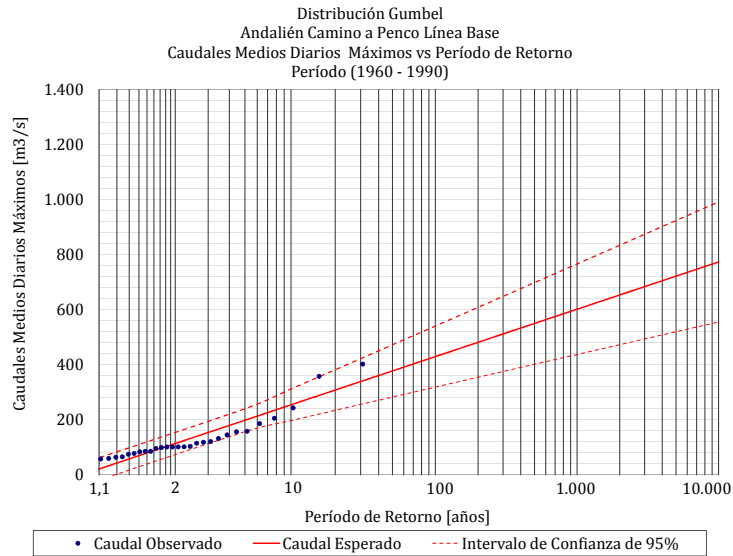


Figura 5.4: Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Andalién camino a Penco

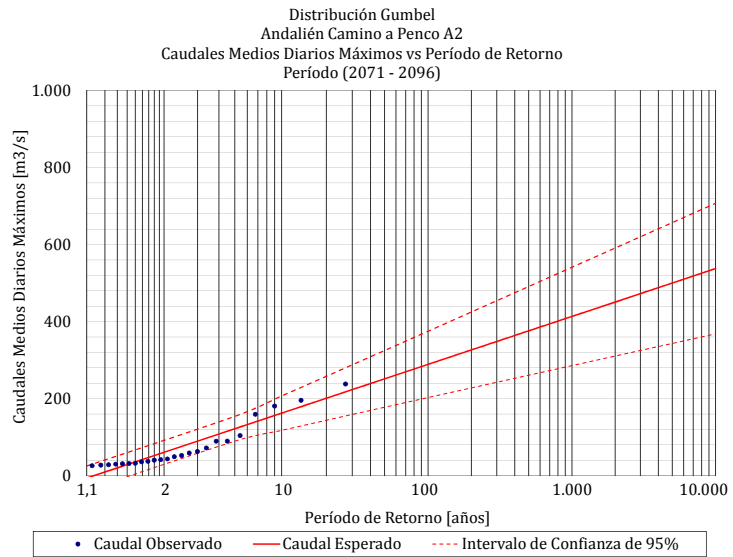


Figura 5.5: Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Andalién camino a Penco

Los intervalos de confianza determinados para ambos períodos se intersectan a partir de un período de retorno de 10 años. Sin embargo, Q_{MaxA2} es siempre inferior al valor esperado en la línea base (Q_{LB}).

Tabla 5.6: Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Andalién Camino a Penco

Test Chi Cuadrado					
Distribución	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	15,16	16,92	Aprobado	0,737	29,9
Log-Normal	9,13	16,92	Aprobado	0,943	21,7
Pearson III	5,57	15,51	Aprobado	0,928	17,2
Log-Pearson	5,05	15,51	Aprobado	0,955	17,2
Gumbel	5,88	16,92	Aprobado	0,869	21,6

Tabla 5.7: Períodos de Retorno y caudales asociados Río Andalién

T_{Actual} [años]	Q_{MinLB} [m^3/s]	Q_{LB} [m^3/s]	Q_{MaxLB} [m^3/s]	Q_{MinA2} [m^3/s]	Q_{A2} [m^3/s]	Q_{MaxA2} [m^3/s]	T_{Futuro} [años]
5	156,7	198,5	240,3	89,3	121,6	153,9	19
10	196,8	254,5	312,3	117,4	162,1	206,8	53
50	282,8	377,8	472,7	177,5	251,2	324,8	519
100	318,8	429,8	540,9	202,7	288,8	394,9	1.360
500	401,8	550,2	698,7	260,7	375,8	491,0	12.670
1000	437,4	602,0	766,6	285,5	413,2	540,9	33.100

5.1.3. Estación Río Laraquete en el Cajón

En las Tablas 5.8 y 5.9 se presentan los resultados del test Chi Cuadrado aplicado en el análisis de frecuencia para la línea base y el escenario A2, respectivamente. Utilizando estos resultados y los gráficos de las distintas distribuciones, se determina que la que presenta un mejor ajuste a los caudales modelados para la línea base y el escenario A2, corresponde a la distribución Log-Pearson. En la Figura 5.6 se aprecia que los caudales más altos son levemente subestimados, mientras que para el escenario A2 (ver Figura 5.7) se produce una sobrestimación del caudal más alto, el que es muy similar a los dos inmediatamente anteriores.

Tabla 5.8: Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Laraquete en el Cajón

Test Chi Cuadrado					
Distribución	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	11,63	16,92	Aprobado	0,978	0,4
Log-Normal	9,14	16,92	Aprobado	0,992	0,3
Pearson III	9,32	15,51	Aprobado	0,991	0,3
Log-Pearson	13,84	15,51	Aprobado	0,992	0,3
Gumbel	9,08	16,92	Aprobado	0,990	0,2

Tabla 5.9: Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Laraquete en el Cajón

Test Chi Cuadrado					
Distribución	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	24,00	16,92	Rechazado	0,889	0,4
Log-Normal	16,90	16,92	Aprobado	0,937	0,3
Pearson III	17,63	15,51	Rechazado	0,935	0,3
Log-Pearson	10,13	15,51	Aprobado	0,936	0,3
Gumbel	17,7	16,92	Rechazado	0,936	0,3

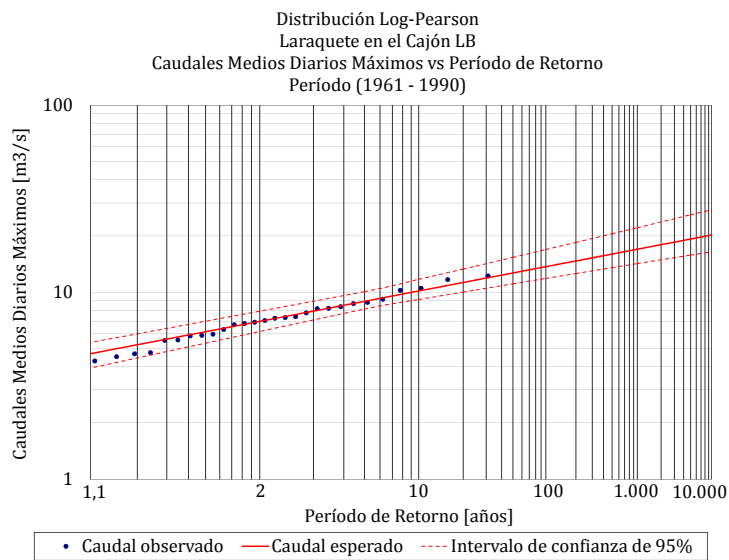


Figura 5.6: Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Laraquete en el Cajón

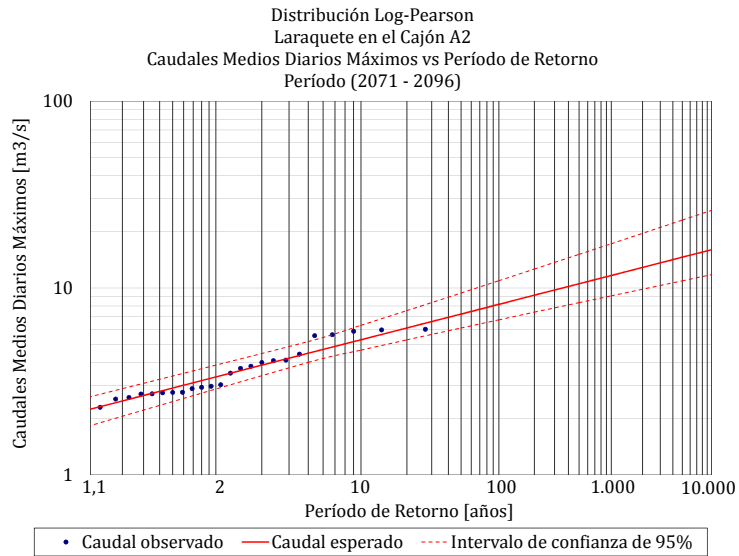


Figura 5.7: Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Laraquete en el Cajón

En la Tabla 5.10 se muestran los caudales y los intervalos de confianza determinados para la línea base del modelo PRECIS y el escenario A2, además de los futuros períodos de retorno de los caudales determinados para la línea base. Los períodos de retorno futuros presentan un gran incremento incluso en los asociados a caudales más bajos, los que son más de 30 veces superiores en el futuro. Los intervalos de confianza determinados para el escenario A2 y la línea base, se intersectan desde un período de retorno 50 años y su diferencia disminuye al aumentar el período de retorno.

Tabla 5.10: Períodos de Retorno y caudales asociados Río Laraquete

T_{Actual} [años]	Q_{MinLB} [m^3/s]	Q_{LB} [m^3/s]	Q_{MaxLB} [m^3/s]	Q_{MinA2} [m^3/s]	Q_{A2} [m^3/s]	Q_{MaxA2} [m^3/s]	T_{Futuro} [años]
5	8,1	8,9	10,1	4,0	4,4	5,2	170
10	9,1	10,2	11,7	4,6	5,3	6,3	400
50	11,1	12,7	15,4	6,1	7,3	9,4	1.800
100	11,8	13,7	16,9	6,8	8,2	10,9	3.000
500	13,5	16,0	20,6	8,3	10,5	15,1	10.000
1000	14,2	17,0	22,2	9,1	11,7	17,3	15.500

5.1.4. Estación Río Carampangue en Carampangue

El ajuste de la distribución Gumbel fue el mejor entre los analizados, ya que en promedio presenta los mejores R^2 y EMC. Las Figuras 5.8 y 5.9 muestran gráficamente este ajuste, donde se observan deficiencias en los caudales medios y bajos para la línea base. En el escenario A2, el caudal máximo modelado queda bastante alejado de la curva, por lo que los caudales asociados a períodos de retorno altos podrían ser subestimados.

Tabla 5.11: Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Carampangue en Carampangue

Test Chi Cuadrado					
Distribución	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	9,77	16,92	Aprobado	0,949	29,1
Log-Normal	11,59	16,92	Aprobado	0,956	26,5
Pearson III	9,56	15,51	Aprobado	0,964	25,5
Log-Pearson	9,81	15,51	Aprobado	0,964	24,5
Gumbel	10,22	16,92	Aprobado	0,961	24,9

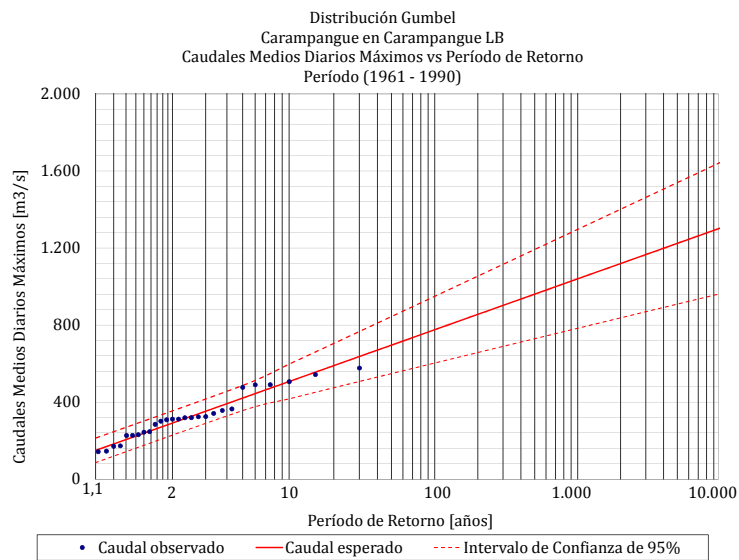


Figura 5.8: Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Carampangue en Carampangue

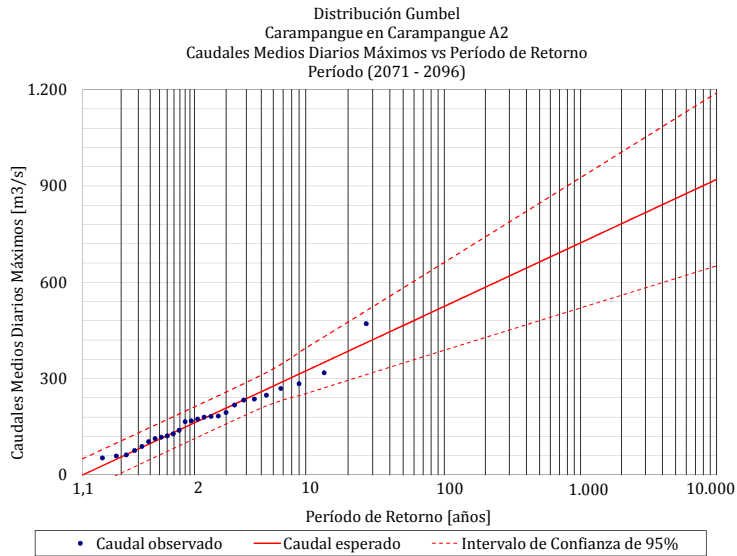


Figura 5.9: Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Carampangue en Carampangue

Tabla 5.12: Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Carampangue en Carampangue

Distribución	Test Chi Cuadrado				
	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	17,10	16,92	Rechazado	0,906	28,6
Log-Normal	5,58	16,92	Aprobado	0,973	16,4
Pearson III	5,64	15,51	Aprobado	0,966	19,9
Log-Pearson	51,68	15,51	Rechazado	0,969	18,6
Gumbel	5,87	16,92	Aprobado	0,965	17,6

Los caudales actuales y futuros, además de los futuros períodos de retorno asociados a los caudales determinados para la línea base, se exponen en la Tabla 5.13. Donde sucede algo similar a lo ocurrido en las demás cuencas, es decir, se produce una disminución de los caudales futuros, lo que a su vez conlleva un incremento en los períodos de retorno en el escenario A2. Los intervalos de confianza de los caudales determinados para la línea base y el escenario A2, se intersectan a partir de un período de retorno de 50 años. Sin embargo Q_{MaxA2} es siempre inferior al valor esperado en la línea base (Q_{LB}).

Tabla 5.13: Períodos de Retorno y caudales asociados Río Carampangue

T_{Actual} [años]	Q_{MinLB} [m ³ /s]	Q_{LB} [m ³ /s]	Q_{MaxLB} [m ³ /s]	Q_{MinA2} [m ³ /s]	Q_{A2} [m ³ /s]	Q_{MaxA2} [m ³ /s]	T_{Futuro} [años]
5	356	421	486	208	259	311	37
10	417	507	597	253	324	395	94
50	548	696	844	348	465	582	640
100	603	776	949	388	525	662	1.360
500	720	961	1192	480	663	847	7.200
1000	783	1040	1297	520	723	926	14.000

5.1.5. Estación Río Lebu en Las Corrientes

En las Tablas 5.14 y 5.15 se presentan los resultados del test Chi Cuadrado aplicado en el análisis de frecuencia para la línea base y el escenario A2 respectivamente. La distribución que presenta un mejor ajuste a los caudales modelados para la línea base y el escenario A2 es la distribución Gumbel (ver Figuras 5.10 y 5.11): en el escenario A2 el máximo caudal modelado se aleja de la curva por lo que los caudales de períodos de retorno altos podrían ser sobrestimados.

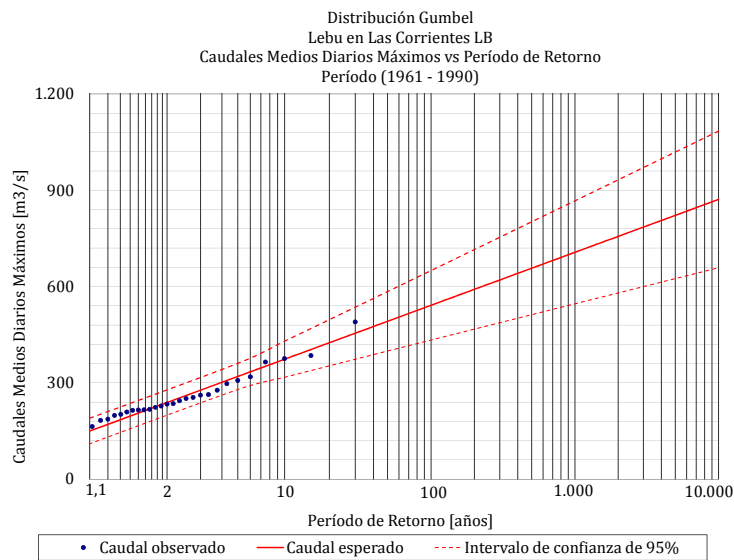


Figura 5.10: Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Lebu en Las Corrientes

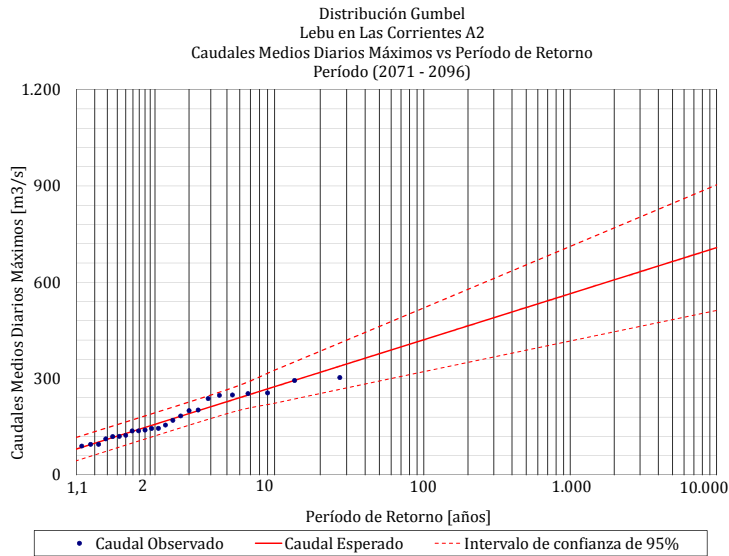


Figura 5.11: Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Lebu en Las Corrientes

Tabla 5.14: Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Lebu en las Corrientes

Test Chi Cuadrado					
Distribución	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	19,35	16,92	Rechazado	0,908	23,8
Log-Normal	12,45	16,92	Aprobado	0,960	17,3
Pearson III	13,38	15,51	Aprobado	0,963	16,8
Log-Pearson	34,71	15,51	Rechazado	0,960	17,4
Gumbel	12,60	16,92	Aprobado	0,966	14,6

Tabla 5.15: Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Lebu en las Corrientes

Test Chi Cuadrado					
Distribución	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	14,63	16,92	Aprobado	0,944	16,4
Log-Normal	17,68	16,92	Rechazado	0,963	13,8
Pearson III	15,06	15,51	Aprobado	0,965	13,7
Log-Pearson	18,51	15,51	Rechazado	0,963	13,8
Gumbel	15,49	16,92	Aprobado	0,965	12,8

En la Tabla 5.16 se muestran los períodos de retorno para la línea base del modelo PRECIS y el escenario A2, además de los caudales asociados a éstos, donde nuevamente se produce una reducción importante de los caudales, existe un claro incremento en los períodos de retorno futuros y los intervalos de confianza se intersectan para todos los períodos de retorno analizados.

Tabla 5.16: Períodos de Retorno y caudales asociados Río Lebu

T_{Actual} [años]	Q_{MinLB} [m^3/s]	Q_{LB} [m^3/s]	Q_{MaxLB} [m^3/s]	Q_{MinA2} [m^3/s]	Q_{A2} [m^3/s]	Q_{MaxA2} [m^3/s]	T_{Futuro} [años]
5	279	320	360	191	228	285	20
10	317	373	430	223	275	326	47
50	399	491	584	293	377	462	310
100	433	541	650	322	421	520	685
500	512	657	802	388	521	654	4.400
1000	546	706	867	417	564	712	9.800

5.1.6. Estación Río Caramávida en Caramávida

El ajuste de los caudales modelados a la distribución Pearson III es bastante buena, tal como se observa en las Figuras 5.12 y 5.13. De todos modos se puede apreciar que en los caudales máximos se produce una leve subestimación en la línea base y una pequeña sobrestimación en el escenario A2. Esta distribución presenta altos R^2 y bajos errores cuadráticos medios (ECM) en los dos períodos analizados (ver Tablas 5.17 y 5.18).

Tabla 5.17: Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Caramávida en Caramávida

Distribución	Test Chi Cuadrado				
	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	9,93	16,92	Aprobado	0,966	1,9
Log-Normal	8,82	16,92	Aprobado	0,978	1,5
Pearson III	8,62	15,51	Aprobado	0,977	1,6
Log-Pearson	15,76	15,51	Rechazado	0,977	1,6
Gumbel	9,14	16,92	Aprobado	0,975	1,6

Tabla 5.18: Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Caramávida en Caramávida

Test Chi Cuadrado					
Distribución	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	5,25	16,92	Aprobado	0,982	1,0
Log-Normal	8,52	16,92	Aprobado	0,940	1,6
Pearson III	4,79	15,51	Aprobado	0,985	1,0
Log-Pearson	11,66	15,51	Aprobado	0,981	0,9
Gumbel	9,66	16,92	Aprobado	0,926	1,8

En este caso, no se determinan los futuros períodos de retorno de los caudales calculados para el período de línea base, pues el caudal de T=1000 años en el Escenario A2 es inferior al caudal de T=5 años de la línea base, por lo que los períodos de retorno que se obtendrían serían muy superiores a los 1000 años.

Lógicamente para esta cuenca los intervalos de confianza asociados a los caudales de los dos períodos analizados no se intersectan y la diferencia entre Q_{MinLB} y Q_{MaxA2} varía entre un 20 % y un 27 %.

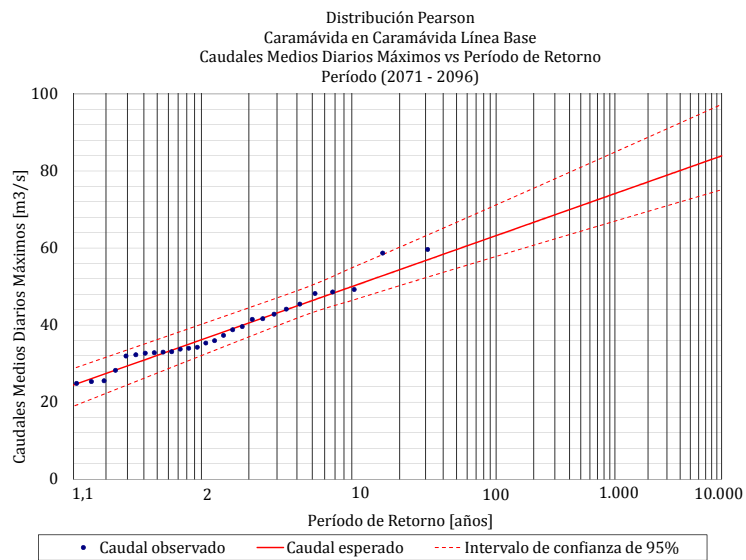


Figura 5.12: Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Caramávida en Caramávida

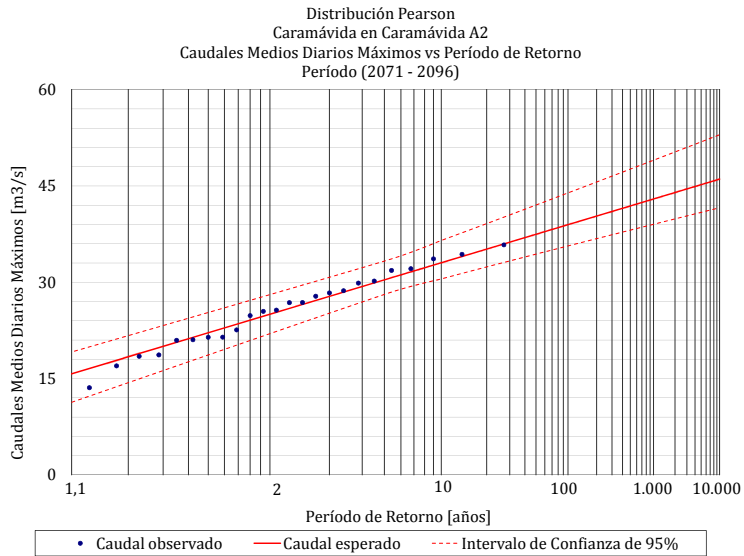


Figura 5.13: Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Caramávida en Caramávida

Tabla 5.19: Períodos de Retorno y caudales asociados Río Caramávida

T_{Actual} [años]	Q_{MinLB} [m^3/s]	Q_{LB} [m^3/s]	Q_{MaxLB} [m^3/s]	Q_{MinA2} [m^3/s]	Q_{A2} [m^3/s]	Q_{MaxA2} [m^3/s]
5	41,8	44,9	48,9	28,1	30,4	33,3
10	46,4	50,0	54,9	30,5	33,0	36,5
50	54,7	59,6	66,7	34,4	37,5	42,0
100	57,8	63,2	71,2	35,7	39,0	43,9
500	64,4	71,0	81,0	38,1	41,9	47,6
1000	67,0	74,1	84,9	39,0	43,0	49,0

5.1.7. Estación Río Butamalal en Butamalal

La distribución Gumbel fue aquella que presentó un mejor ajuste para los caudales modelados en el Río Butamalal para la línea base y el escenario A2, los que se exponen en las Figuras 5.14 y 5.15. Los resultados de los test Chi cuadrado realizado para los períodos de línea base y escenario A2 se presentan en las Tablas 5.20 y 5.21.

Tabla 5.20: Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Butamalal en Butamalal

Test Chi Cuadrado					
Distribución	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	11,68	16,92	Aprobado	0,954	0,8
Log-Normal	9,38	16,92	Aprobado	0,981	0,6
Pearson III	9,32	15,51	Aprobado	0,979	0,6
Log-Pearson	9,48	15,51	Aprobado	0,981	0,6
Gumbel	9,60	16,92	Aprobado	0,984	0,5

Tabla 5.21: Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Butamalal en Butamalal

Test Chi Cuadrado					
Distribución	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	5,73	16,92	Aprobado	0,973	0,5
Log-Normal	8,48	16,92	Aprobado	0,958	0,5
Pearson III	5,78	15,51	Aprobado	0,973	0,5
Log-Pearson	39,56	15,51	Rechazado	0,971	0,4
Gumbel	9,62	16,92	Aprobado	0,946	0,6

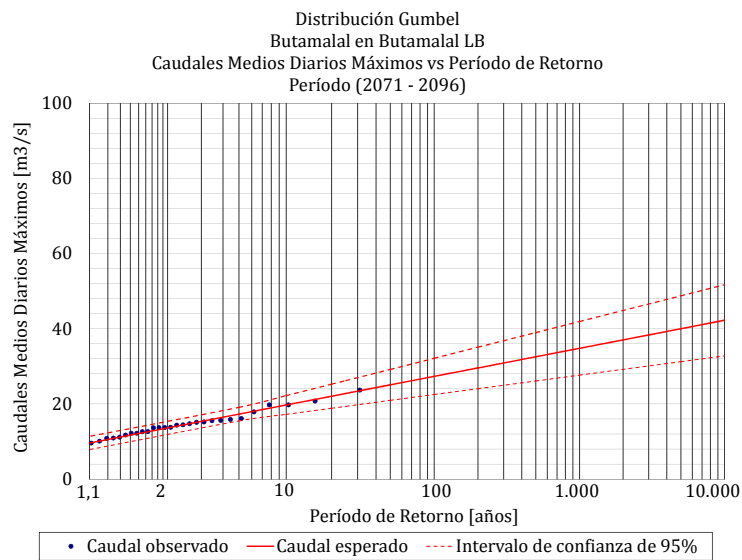


Figura 5.14: Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Butamalal en Butamalal

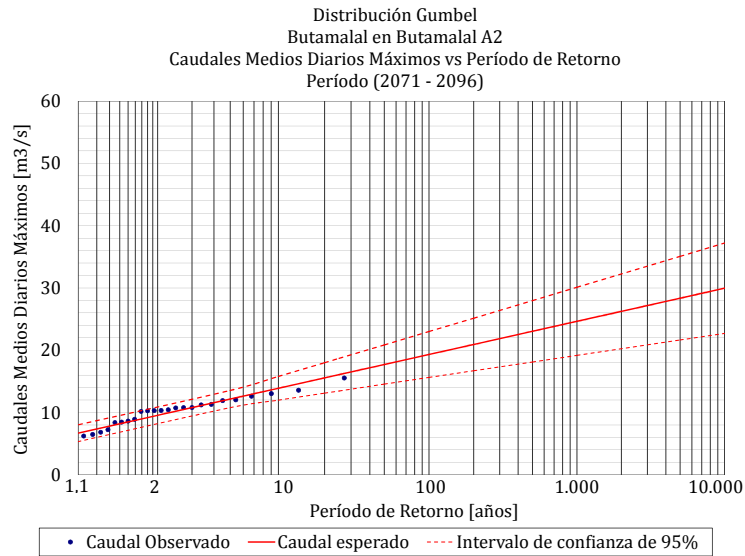


Figura 5.15: Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Butamalal en Butamalal

Del análisis de frecuencia realizado se obtienen como resultado los caudales para la línea base y el escenario A2, los cuales presentan una reducción importante entre un período y otro. Se aprecia también, un gran aumento en los períodos de retorno futuros, especialmente en el caso de un caudal de $35 \text{ [m}^3/\text{s]}$, cuyo período de retorno futuro corresponde a 100 veces el período de retorno determinado para la línea base. Los intervalos de confianza se intersectan a partir de un período de retorno de 50 años. Sin embargo, para los períodos de retorno analizados, Q_{MaxA2} es siempre menor al caudal esperado para la línea base.

Tabla 5.22: Períodos de Retorno y caudales asociados Río Butamalal

T_{Actual} [años]	Q_{MinLB} [m^3/s]	Q_{LB} [m^3/s]	Q_{MaxLB} [m^3/s]	Q_{MinA2} [m^3/s]	Q_{A2} [m^3/s]	Q_{MaxA2} [m^3/s]	T_{Futuro} [años]
5	15,5	17,3	19,1	10,8	12,2	13,5	37
10	17,2	19,7	22,2	12,0	13,9	15,8	135
50	20,9	25,1	29,2	14,6	17,7	20,9	1.150
100	22,5	27,3	32,1	15,6	19,3	23,0	2.800
500	26,1	32,5	39,0	18,1	23,0	28,0	37.000
1000	27,6	34,8	41,9	19,2	24,6	30,1	100.000

5.1.8. Estación Río Cayucupil en Cayucupil

Considerando los resultados del test Chi cuadrado contenidos en las Tablas 5.23 y 5.24 y lo observado en los gráficos de las distintas distribuciones, se determinó que la mejor distribución para este caso corresponde a la distribución Gumbel. El ajuste obtenido para los períodos de línea base y el escenario A2 se presentan en las Figuras 5.16 y 5.17.

Tabla 5.23: Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Cayucupil en Cayucupil

Distribución	Test Chi Cuadrado				
	$\chi^2_{Calculado}$	χ^2_{Limite}	Resultado	R^2	ECM
Normal	24,47	40,11	Aprobado	0,94	1,5
Log-Normal	22,21	40,11	Aprobado	0,96	1,3
Pearson III	22,49	38,89	Aprobado	0,96	1,3
Log-Pearson	10,65	38,89	Aprobado	0,96	1,3
Gumbel	22,79	40,11	Aprobado	0,97	1,2

Tabla 5.24: Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Cayucupil en Cayucupil

Distribución	Test Chi Cuadrado				
	$\chi^2_{Calculado}$	χ^2_{Limite}	Resultado	R^2	ECM
Normal	26,85	40,11	Aprobado	0,98	0,8
Log-Normal	24,67	40,11	Aprobado	0,95	1,0
Pearson III	27,72	38,89	Aprobado	0,98	0,7
Log-Pearson	18,03	38,89	Rechazado	0,98	0,8
Gumbel	27,6	40,11	Aprobado	0,93	1,2

En los caudales determinados para la línea base y el escenario A2 contenidos en la Tabla 5.25 se observa una disminución que, en porcentaje, decrece a medida que aumentan los períodos de retorno actuales. Respecto a los períodos de retorno futuros, estos registran un gran aumento para los caudales más altos, lo que indica que a pesar de que la disminución en magnitud no parezca tan importante, el aumento de la seguridad hidrológica de una obra construida con los períodos de retorno actuales se incrementaría bastante en el futuro. Los intervalos de confianza determinados se intersectan a partir de un período de retorno de 100 años y el valor de Q_{MaxA2} se encuentra para todos los períodos de retorno analizados entre Q_{MinLB} y Q_{LB} .

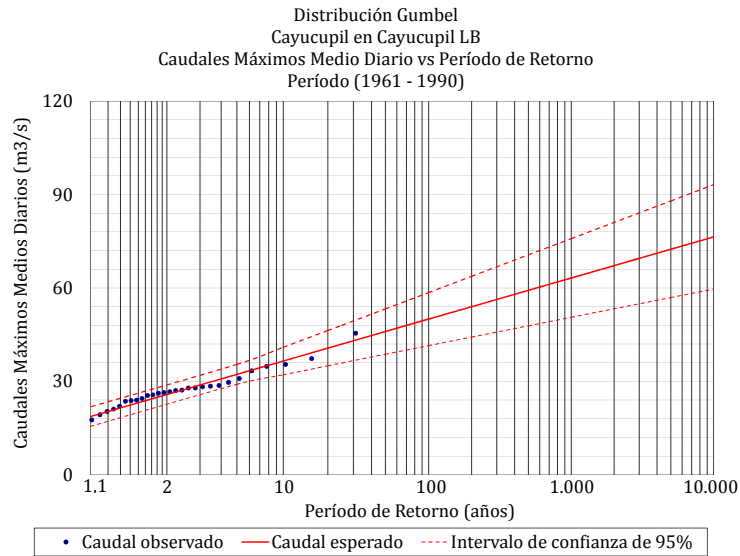


Figura 5.16: Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Cayucupil en Cayucupil

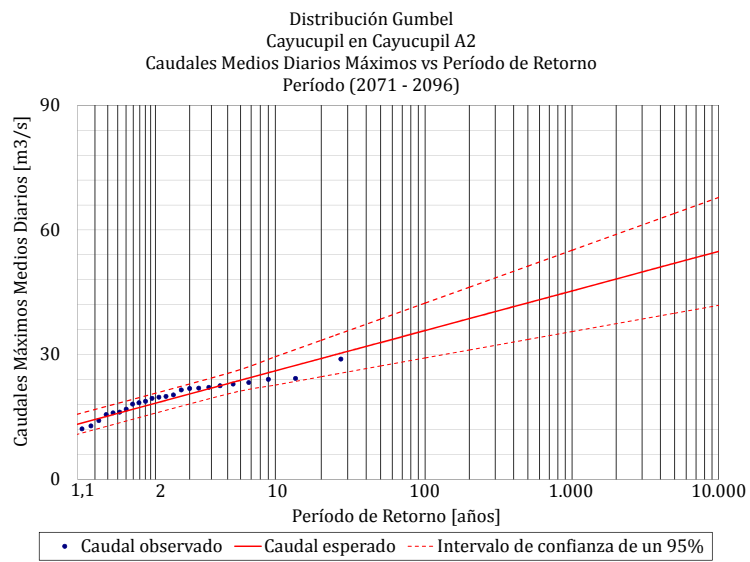


Figura 5.17: Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Cayucupil en Cayucupil

Tabla 5.25: Períodos de Retorno y caudales asociados Río Cayucupil

T_{Actual} [años]	Q_{MinLB} [m^3/s]	Q_{LB} [m^3/s]	Q_{MaxLB} [m^3/s]	Q_{MinA2} [m^3/s]	Q_{A2} [m^3/s]	Q_{MaxA2} [m^3/s]	T_{Futuro} [años]
5	29,0	32,3	35,5	20,5	23,0	25,4	37
10	32,1	36,6	41,0	22,6	26,1	29,5	120
50	38,7	46,0	53,3	27,2	32,9	38,5	1.200
100	41,5	50,0	58,5	29,2	35,8	42,4	3.000
500	47,9	59,2	70,6	33,6	42,4	51,3	27.000
1000	50,6	63,2	75,8	35,5	45,3	55,1	75.000

5.1.9. Estación Río Reputo en Reputo

Los resultados obtenidos en el análisis de frecuencia se presentan gráficamente en las Figuras 5.18 y 5.19, las que muestran el ajuste a la distribución Gumbel para los períodos de línea Base y Escenario A2 respectivamente. Los resultados del test Chi Cuadrado aplicado a las distintas distribuciones analizadas se presenta en las Tablas 5.26 y 5.27.

La Tabla 5.28 contiene los caudales y períodos de retorno actuales y futuros determinados para la cuenca del Río Reputo, donde se aprecia prácticamente lo mismo que en las demás cuencas analizadas, es decir, los caudales disminuyen y los períodos de retorno aumentan considerablemente entre un período y otro. Los intervalos de confianza presentados se intersectan para un período de retorno de 50 años, pero Q_{MaxA2} es siempre menor al caudal esperado para la línea base.

Tabla 5.26: Test Chi-Cuadrado Línea Base, Estación Río Reputo en Reputo

Distribución	Test Chi Cuadrado				
	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	10,15	16,92	Aprobado	0,94	0,1
Log-Normal	6,39	16,92	Aprobado	0,97	0,1
Pearson III	6,56	15,51	Aprobado	0,98	0,1
Log-Pearson	6,20	15,51	Aprobado	0,98	0,1
Gumbel	6,57	16,92	Aprobado	0,98	0,1

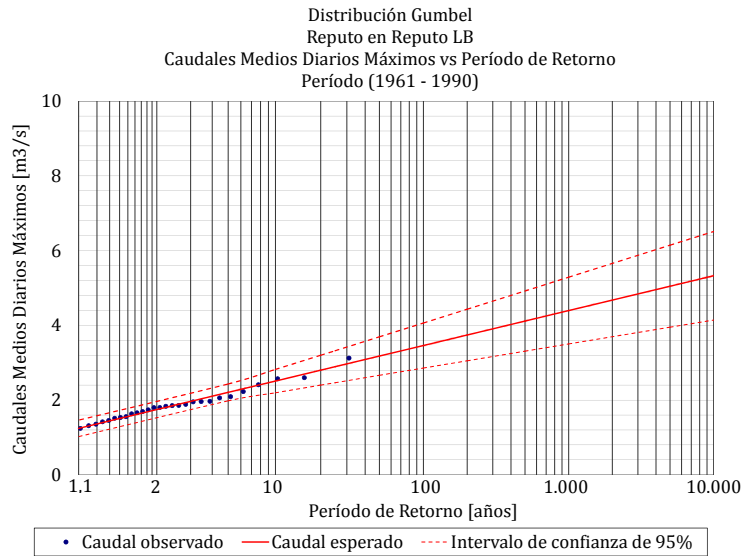


Figura 5.18: Análisis de Frecuencia período línea base. Estación Río Reputo en Reputo

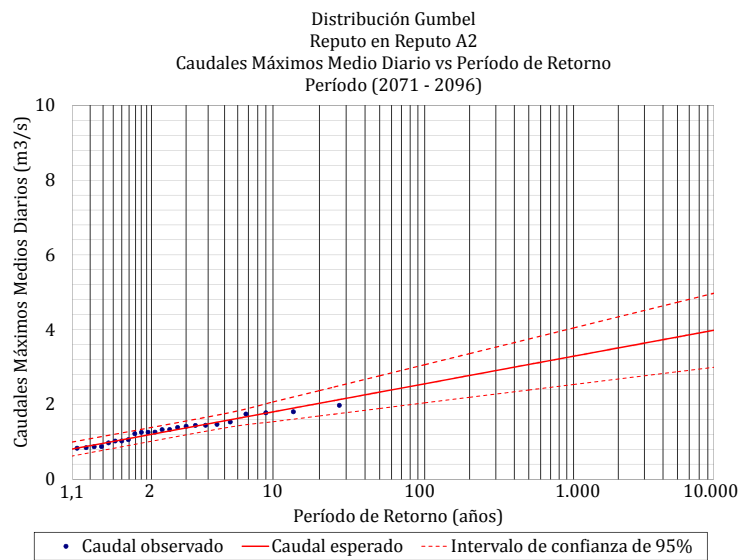


Figura 5.19: Análisis de Frecuencia escenario A2. Estación Río Reputo en Reputo

Tabla 5.27: Test Chi-Cuadrado Escenario A2, Estación Río Reputo en Reputo

Test Chi Cuadrado					
Distribución	$\chi^2_{Calculado}$	$\chi^2_{Límite}$	Resultado	R^2	ECM
Normal	12,26	16,92	Aprobado	0,978	0,1
Log-Normal	13,17	16,92	Aprobado	0,975	0,1
Pearson III	12,18	15,51	Aprobado	0,982	0,1
Log-Pearson	53,26	15,51	Rechazado	0,981	0,1
Gumbel	13,78	16,92	Aprobado	0,968	0,1

Tabla 5.28: Períodos de Retorno y caudales asociados Río Reputo

T_{Actual} [años]	Q_{MinLB} [m^3/s]	Q_{LB} [m^3/s]	Q_{MaxLB} [m^3/s]	Q_{MinA2} [m^3/s]	Q_{A2} [m^3/s]	Q_{MaxA2} [m^3/s]	T_{Futuro} [años]
5	2,0	2,2	2,4	1,4	1,6	1,7	35
10	2,2	2,5	2,8	1,5	1,8	2,1	350
50	2,7	3,2	3,7	1,9	2,3	2,8	750
100	2,9	3,5	4,1	2,0	2,5	3,1	1.950
500	3,3	4,1	4,9	2,4	3,1	3,7	12.800
1000	3,5	4,4	5,3	2,5	3,3	4,0	32.000

5.2. Cuencas sin información fluviométrica

Para la determinación de las series de caudal de las cuencas sin información fluviométrica se realiza un análisis, similar al realizado por Salvatierra (2008), en el que se busca encontrar una relación entre los parámetros del modelo y algunos índices geomorfológicos, determinados a partir de la combinación de los parámetros geomorfológicos base presentados en la Tabla 5.29. Las relaciones obtenidas por Salvatierra (2008) no son utilizadas debido a que la definición de los cauces existentes no se realizó del mismo modo. Por lo tanto, sus resultados no son coherentes con lo planteado en este trabajo.

Tabla 5.29: Parámetros geomorfológicos base

Parámetro	Unidad	Representa
A	[km^2]	Área de la cuenca
E	[m]	Elevación media de la cuenca
i	-	Pendiente media de la cuenca
Per	[m]	Perímetro de la cuenca
L_p	[m]	Largo del cauce principal
L_{cg}	[m]	Largo del cauce principal al punto más cercano al centro de gravedad de la cuenca
S_L	[m]	Suma de los largos de los cauces presentes en la cuenca
Shape	-	Largo de la cuenca dividida por su ancho
Sin	-	Sinuosidad del cauce principal de la cuenca
A_{ac}	[km^2]	Porción de acuífero en superficie localizado dentro de la cuenca
e_{ac}	[m]	Espesor del acuífero localizado dentro de la cuenca
A_{Bosque}	[km^2]	Superficie de la cuenca cubierta por bosques

Los parámetros geomorfológicos base se determinan utilizando los softwares WMS y ArcGIS, además de la información contenida en el sistema de información geográfica de la comisión Nacional de Riego que proporciona información respecto a la presencia de acuíferos y al uso de suelo.

Para la determinación de las correlaciones geomorfológicas que permitirán estimar el valor de los parámetros operacionales del modelo GR4J en las cuencas sin información fluviométrica, se realiza el siguiente procedimiento: en primer lugar, se determinan los parámetros geomorfológicos de las distintas cuencas calibradas; posterior a esto se reali-

za un análisis adimensional para generar un índice que, al graficarse versus los parámetros operacionales calibrados, entregue una correlación adecuada. Los resultados de este procedimiento para cada uno de los parámetros a determinar se presentan en las Figuras 5.20, 5.21, 5.22 y 5.23.

Respecto a lo obtenido para el parámetro X_1 es importante destacar que en algunas de las cuencas de estudio se obtenían mejores resultados en los coeficientes de Nash con valores negativos de este parámetro. Sin embargo esto no es posible, pues no tiene sentido físico que el estanque de producción tenga una capacidad negativa o nula, por lo que en tales situaciones se impone que el valor de éste sea mayor estricto que cero. El índice y la correlación obtenidos para éste parámetro se presentan en las ecuaciones 5.1 y 5.2.

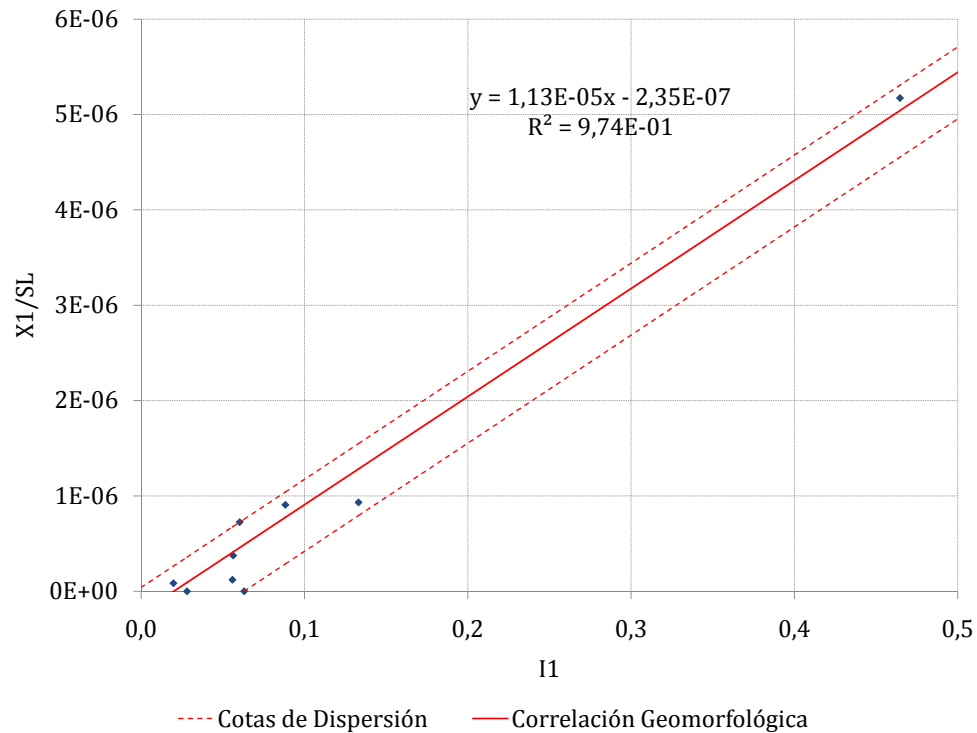


Figura 5.20: Relación Geomorfológica parámetro X_1

$$I_1 = \frac{A_{Bosque} \cdot i}{A \cdot Shape \cdot Sin} \quad (5.1)$$

$$X_1 = S_L \cdot (1,17 \cdot 10^{-5} \cdot I_1 - 3,41 \cdot 10^{-7}) \quad (5.2)$$

Para el parámetro X_2 , el índice y la correlación sólo son válidas siempre que exista presencia de acuífero en la cuenca, pues si no es así el parámetro debe ser nulo. Además es importante mencionar que en este caso sí es posible que existan valores negativos del parámetro, pues depende de si el acuífero gana o pierde agua.

Las ecuaciones 5.3 y 5.4 corresponden al índice determinado y la correlación que este presenta con el parámetro X_2 .

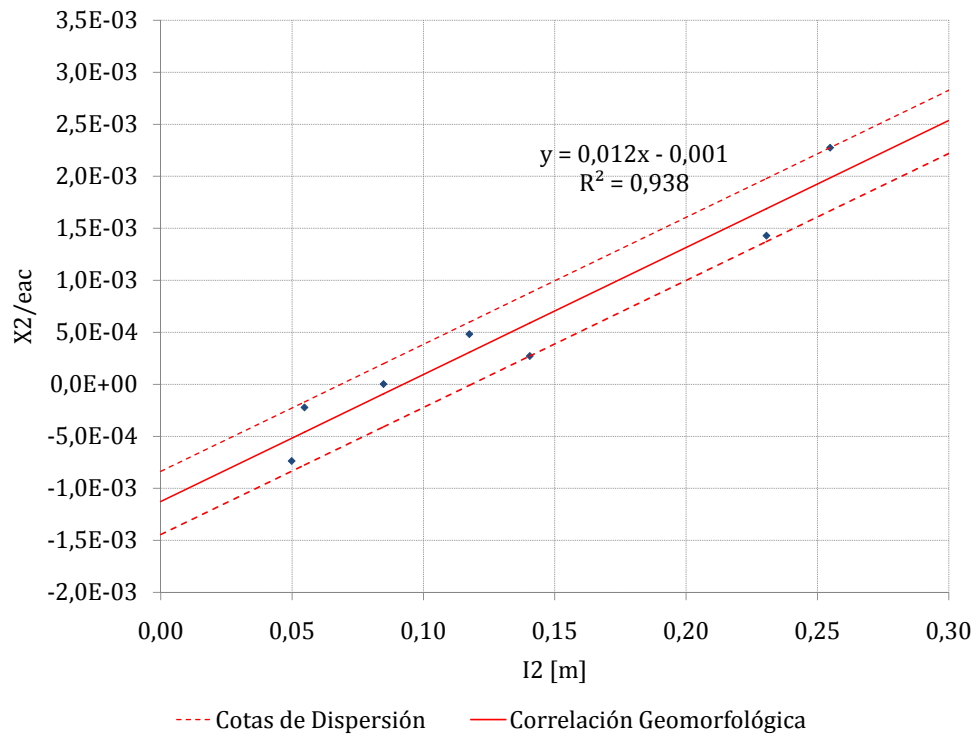


Figura 5.21: Relación Geomorfológica parámetro X_2

$$I_2 = \frac{A_{ac} \cdot i \cdot E \cdot L_{cg}}{A \cdot Shape \cdot Per} \tag{5.3}$$

$$X_2 = e_{ac} \cdot (1,22 \cdot 10^{-2} \cdot I_2 - 1,13 \cdot 10^{-3}) \tag{5.4}$$

El índice y la correlación obtenida para la determinación del parámetro X_3 en cuencas sin información fluviométrica corresponde a las ecuaciones 5.5 y 5.6.

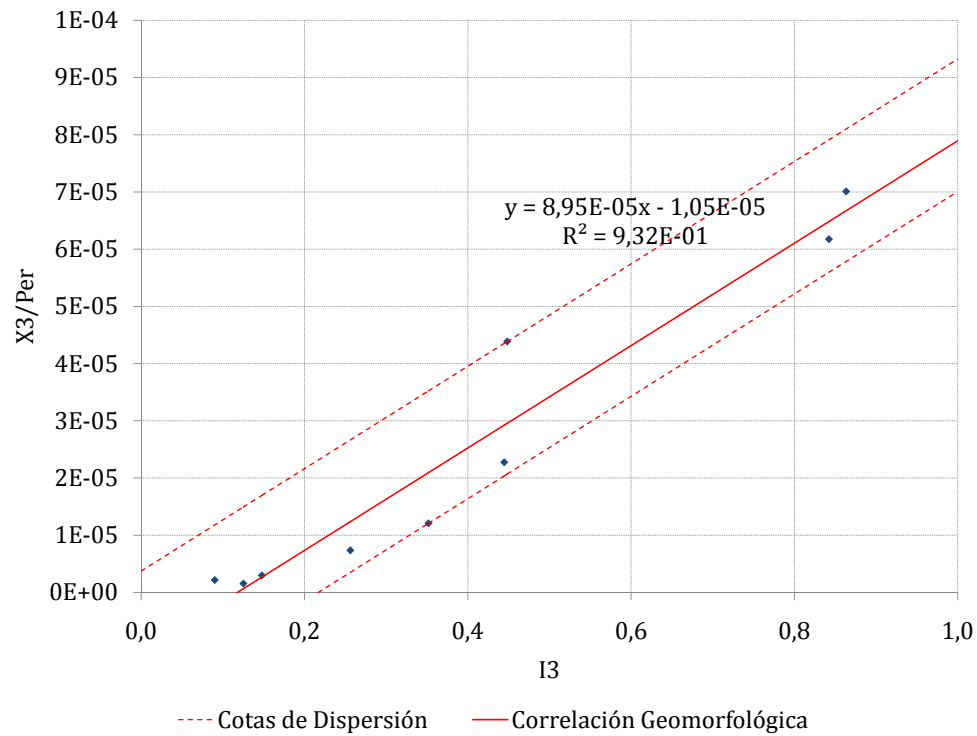


Figura 5.22: Relación Geomorfológica parámetro X_3

$$I_3 = \frac{A_{Bosque} \cdot L_{cg}}{A \cdot S_L} \quad (5.5)$$

$$X_3 = Per \cdot (8,95 \cdot 10^{-5} \cdot I_3 - 1,05 \cdot 10^{-5}) \quad (5.6)$$

La relación obtenida para el parámetro X_4 corresponde a una estimación potencial, se utiliza esta función pues no se logró dettr un índice que permita obtener una relación lineal que presente un buen ajuste. Las expresiones que permiten calcular este índice son las ecuaciones 5.7 y 5.8.

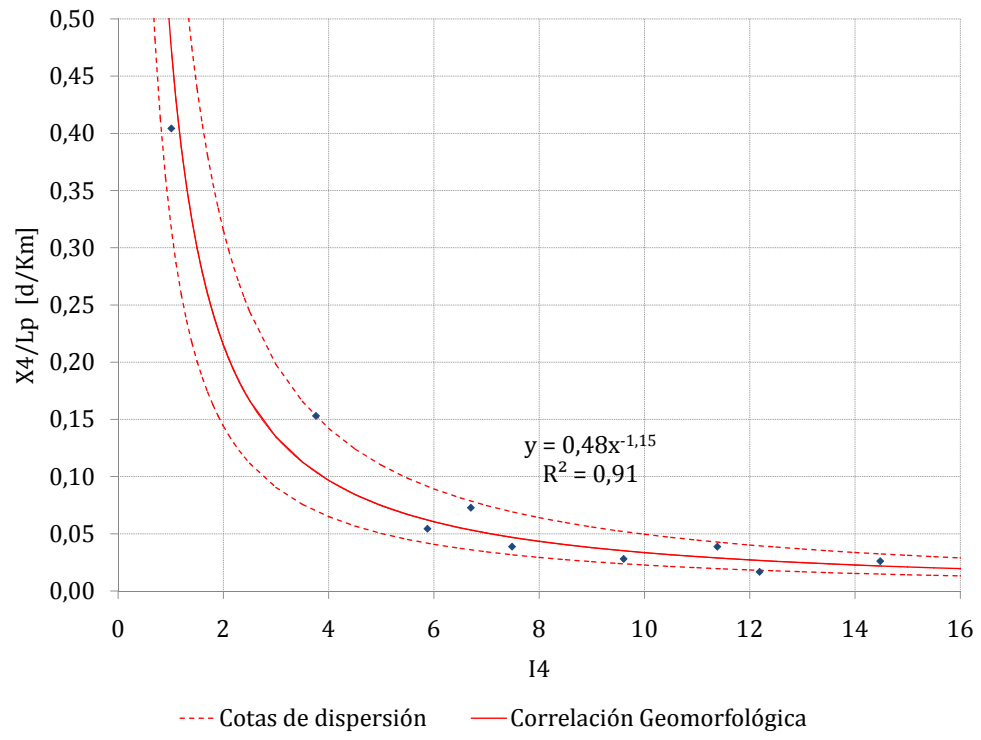


Figura 5.23: Relación Geomorfológica parámetro X_4

$$I_4 = \frac{A_{Bosque} \cdot Sin \cdot L_P}{A \cdot i \cdot L_{cg}} \tag{5.7}$$

$$X_4 = 0,48 \cdot L_P \cdot I_4^{-1,16} \tag{5.8}$$

Es importante destacar que el parámetro geomorfológico A_{Bosque} , se utiliza en la determinación de 3 de los 4 parámetros operacionales del modelo, y que en el caso que ésta sea nula el parámetro operacional también lo es, por lo que las correlaciones calculadas en este trabajo no son válidas en tales situaciones.

Estas correlaciones fueron aplicadas a todas las cuencas sin información fluviométrica analizadas, obteniéndose los parámetros operacionales del modelo. Con esto más la información de entrada del modelo PRECIS, tal cual se aplicó a las cuencas con información, se determinó las series de caudales actuales y futuras. Posteriormente se realizó el análisis de frecuencia con lo que se obtuvo los caudales y períodos de retorno actuales y futuros.

Los resultados obtenidos en las distintas cuencas se presentan gráficamente en las Fi-

guras 5.24, 5.25 y 5.26, las que muestran la disminución porcentual que se produce en los caudales asociados a períodos de retorno de 10, 100 y 1000 años respectivamente. En estos gráficos se incluyen tanto las cuencas con información como aquellas sin información fluviométrica.

Las disminuciones de caudal producidas entre la línea base y el escenario A2 para un período de retorno de 10 años son bastante altas, registrándose reducciones de hasta un 56%. Las cuencas que presentan una mayor disminución corresponden a todas aquellas asociadas al Río Andalién, la del Río Laraquete y la del Río Carampangue. Las de menor variación corresponden a las asociadas al Río Pingual.

Para un período de retorno de 100 años la disminución de los caudales es menos notoria en comparación a lo sucedido para los caudales asociados a 10 años de período de retorno, salvo en casos puntuales como lo son las cuencas asociadas al río Caramávida.

Finalmente para un período de retorno de 1000 años, las disminuciones de los caudales son aún menores que para el período de retorno de 100 años, exceptuando las cuencas asociadas al río Caramávida, cuya disminución aumenta. En este caso, hay varias cuencas que presentan una disminución inferior al 15%, y la mayoría se encuentra en un rango de disminución inferior al 30%.

Una vez calculados los caudales y períodos de retorno actuales y futuros es posible determinar la variación de la seguridad hidrológica de obras hidráulicas. Definida según la expresión 5.9.

$$Seg = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (5.9)$$

Donde T corresponde al período de retorno utilizado, y n es la vida útil de la obra analizada.

En la Tabla 5.30 se presenta la vida útil considerada para la determinación de la seguridad hidrológica, según el período de retorno usado en el diseño de la obra.

En las Figuras 5.27, 5.28 y 5.29 se presenta el aumento de la seguridad hidrológica registrado para obras diseñadas con períodos de retorno de 10, 100 y 1000 años. Es posible observar que el aumento de la seguridad hidrológica disminuye con el aumento del período de retorno. Alcanzando en promedio un 92,9% para T=10 años, un 33,7% para T=100 años y un 4,2% para T=1000 años. Como es de esperar, dado lo descrito anteriormente, el

mayor y el menor aumento de la seguridad hidrológica registrado corresponden a la cuenca del Río Caramávida y a la cuenca del Río Pingueral respectivamente. El detalle del cálculo de la seguridad hidrológica en cada cuenca analizada se encuentra en el Anexo Digital.

Tabla 5.30: Vida Útil según Período de Retorno utilizado

T [años]	n [años]
5-10	30
50-100	50
500-1000	50

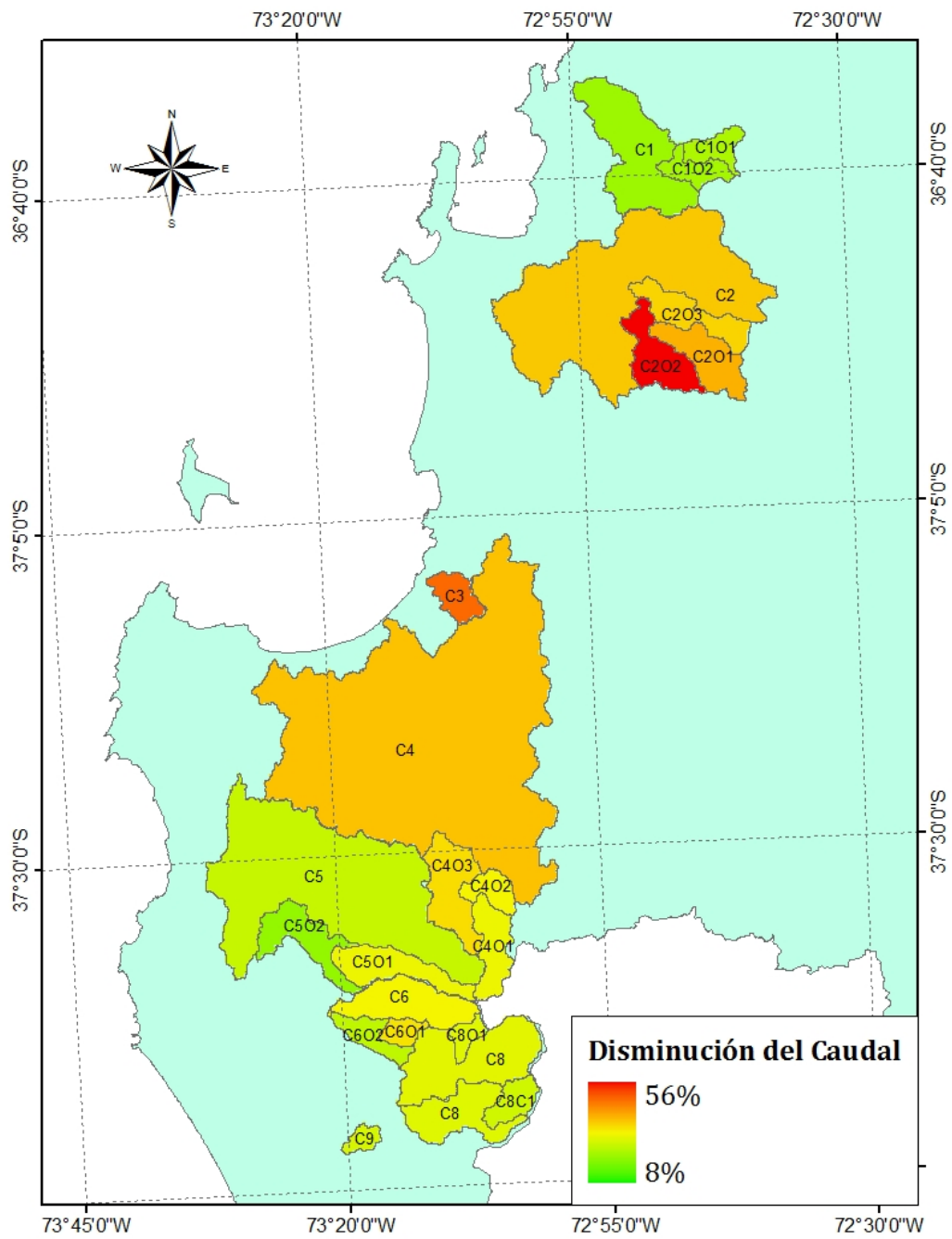


Figura 5.24: Variación de los caudales de 10 años de período de retorno

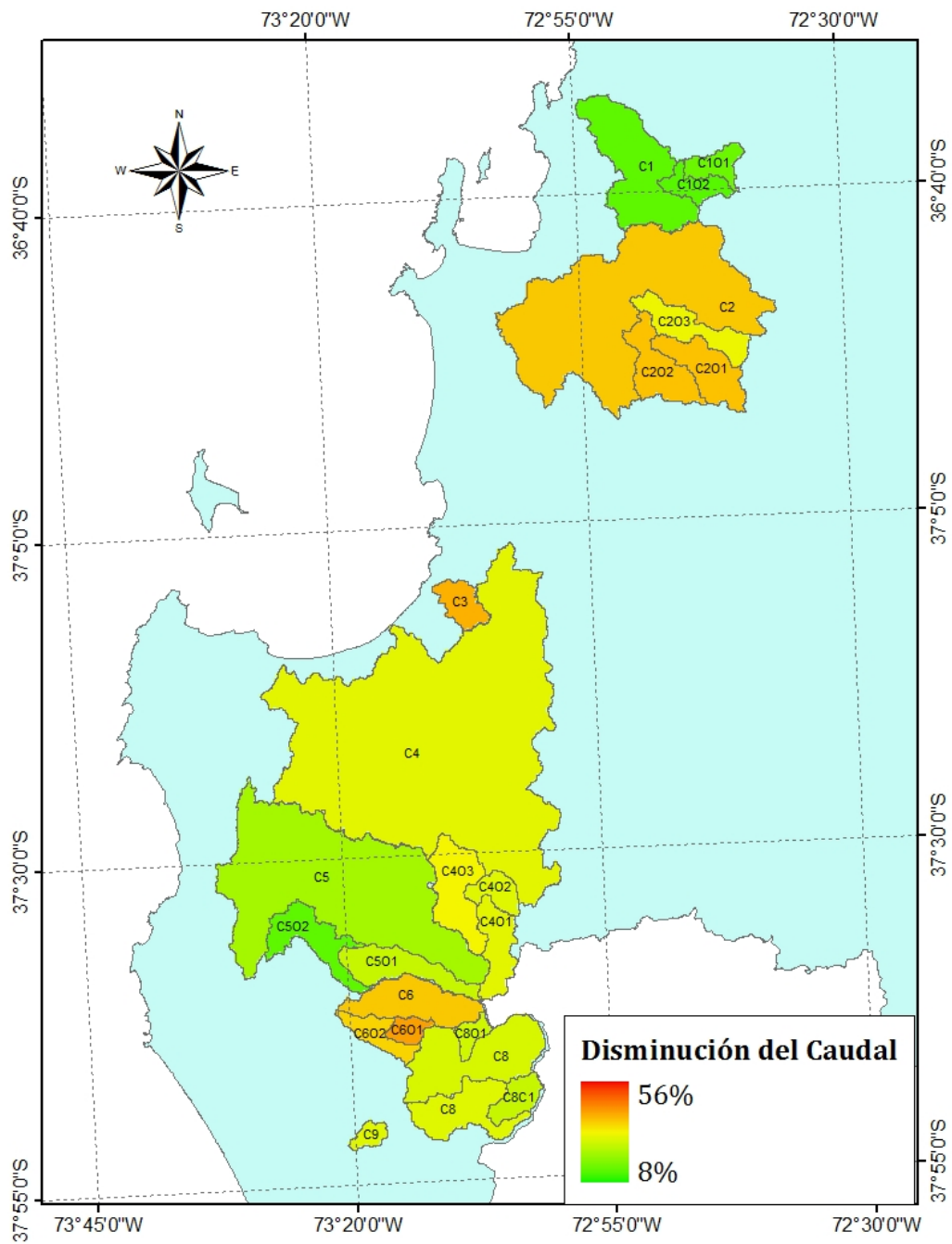


Figura 5.25: Variación de los caudales de 100 años de período de retorno

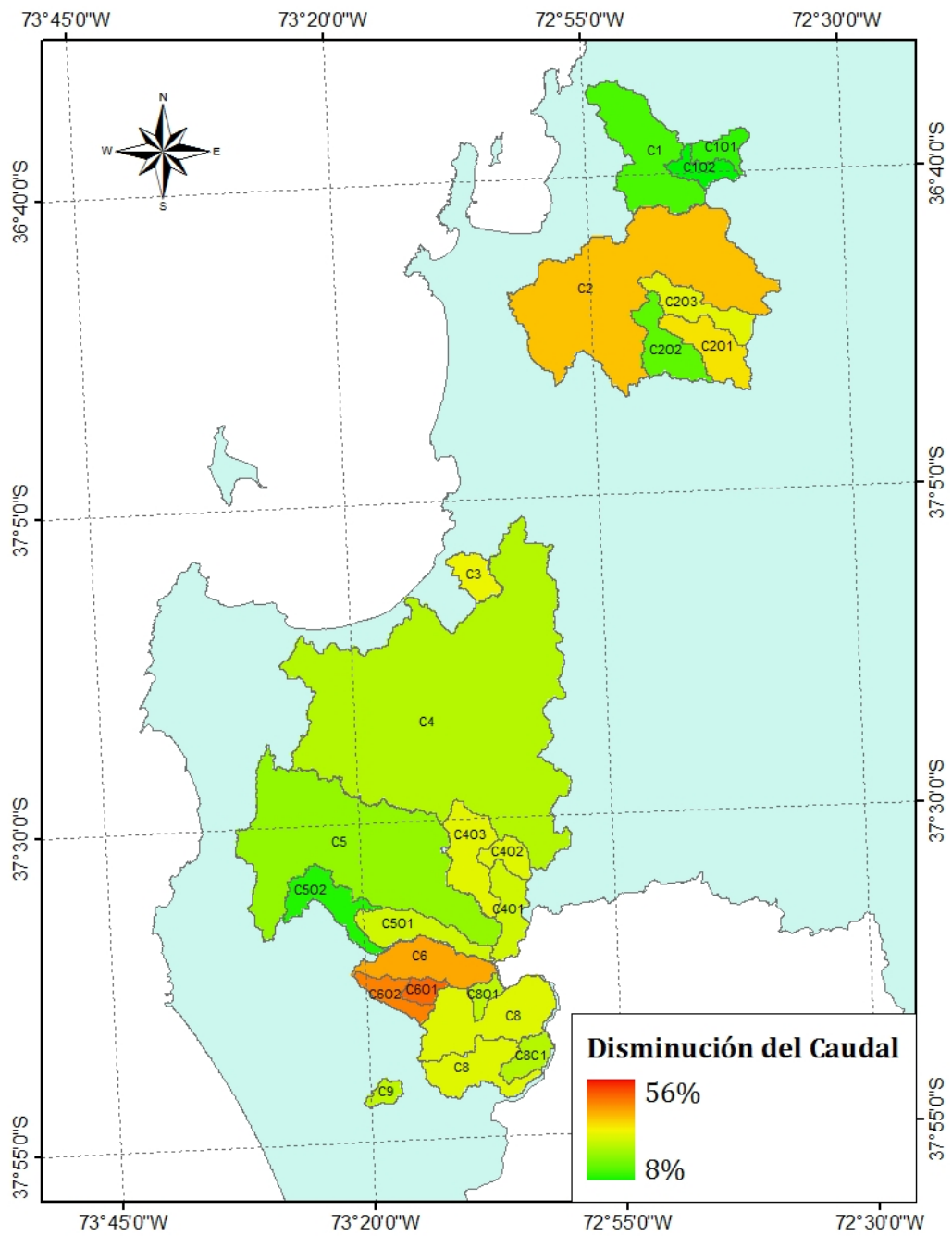


Figura 5.26: Variación de los caudales de 1000 años de período de retorno

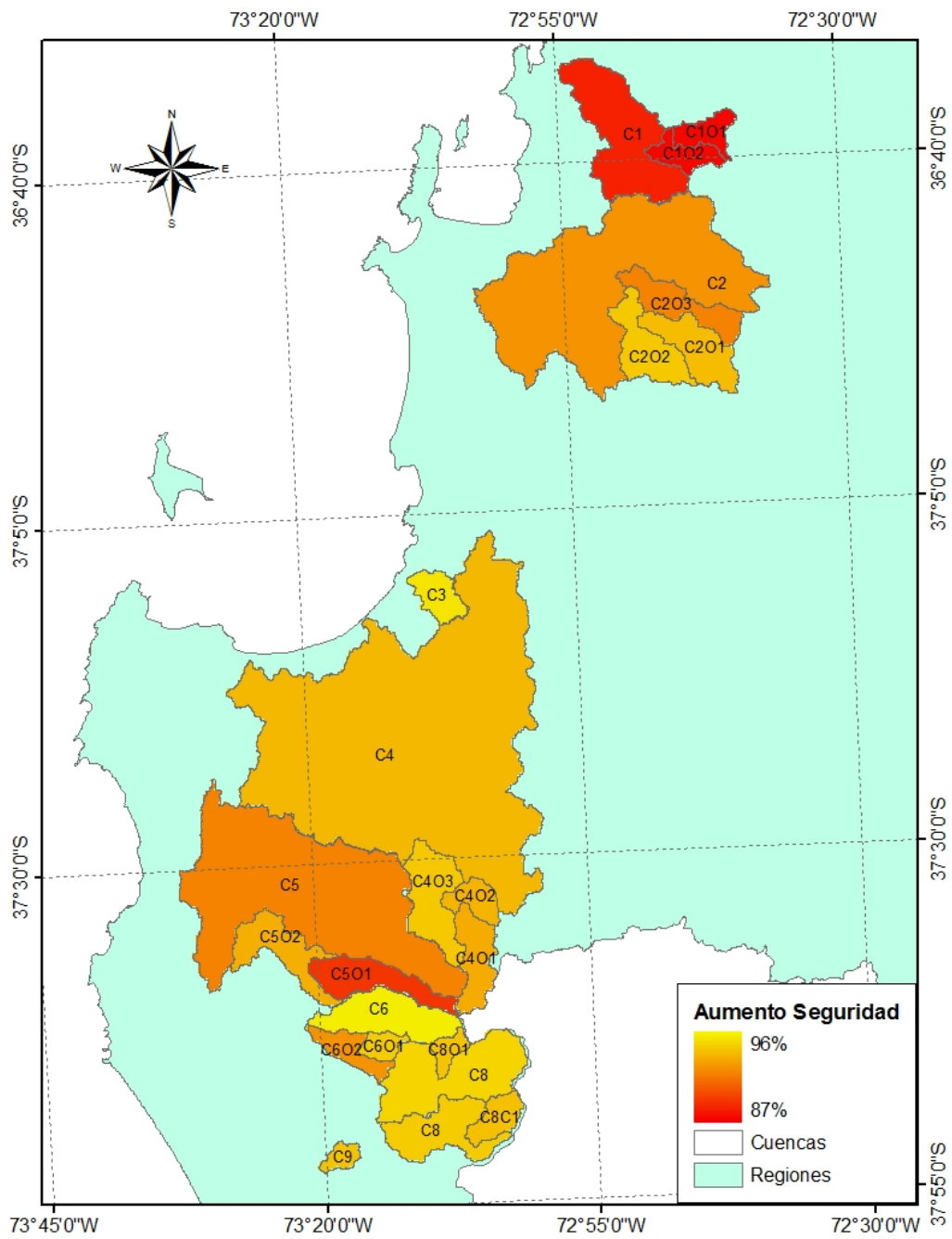


Figura 5.27: Variación de la Seguridad hidrológica de obras diseñadas con 10 años de período de retorno

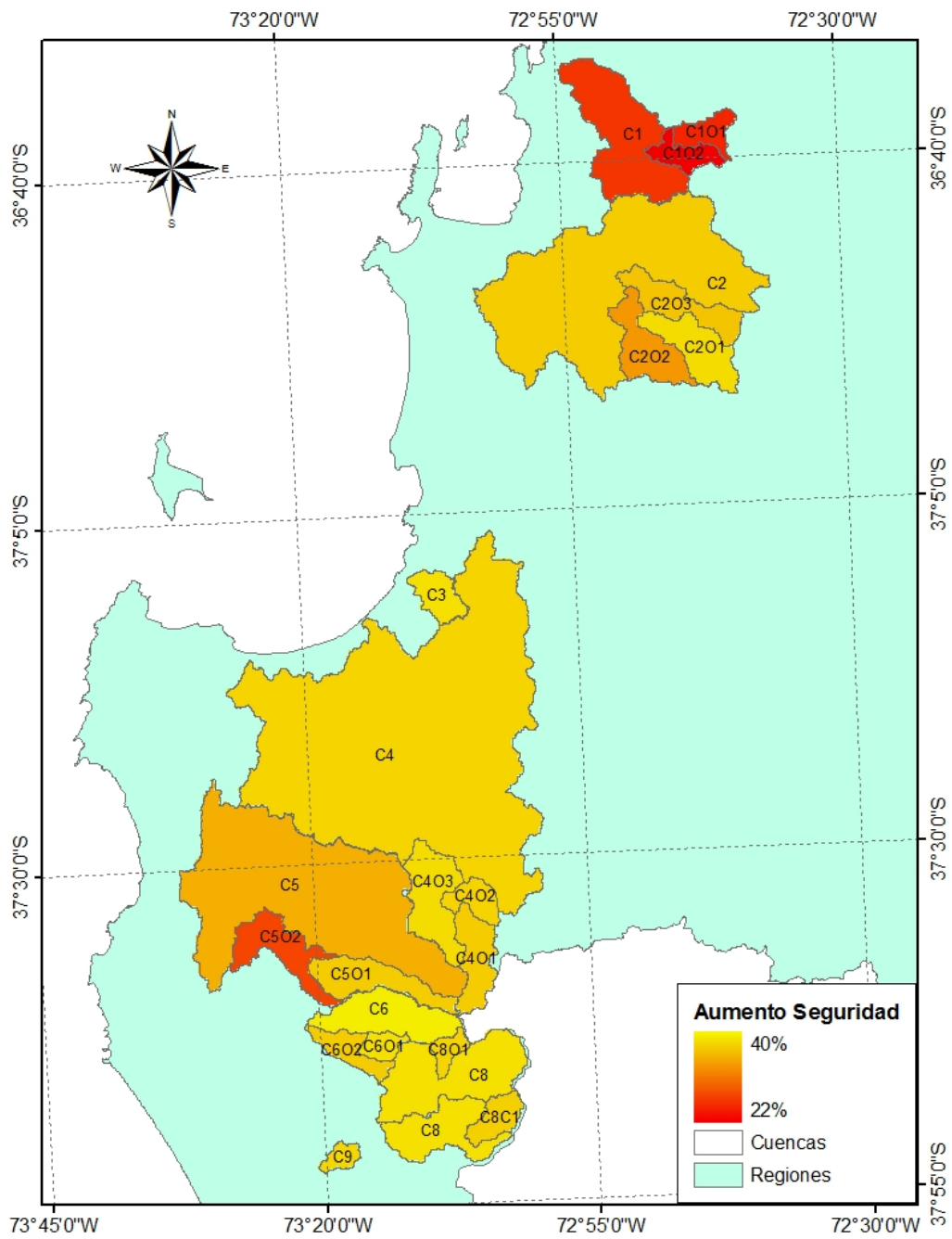


Figura 5.28: Variación de la Seguridad hidrológica de obras diseñadas con 100 años de período de retorno

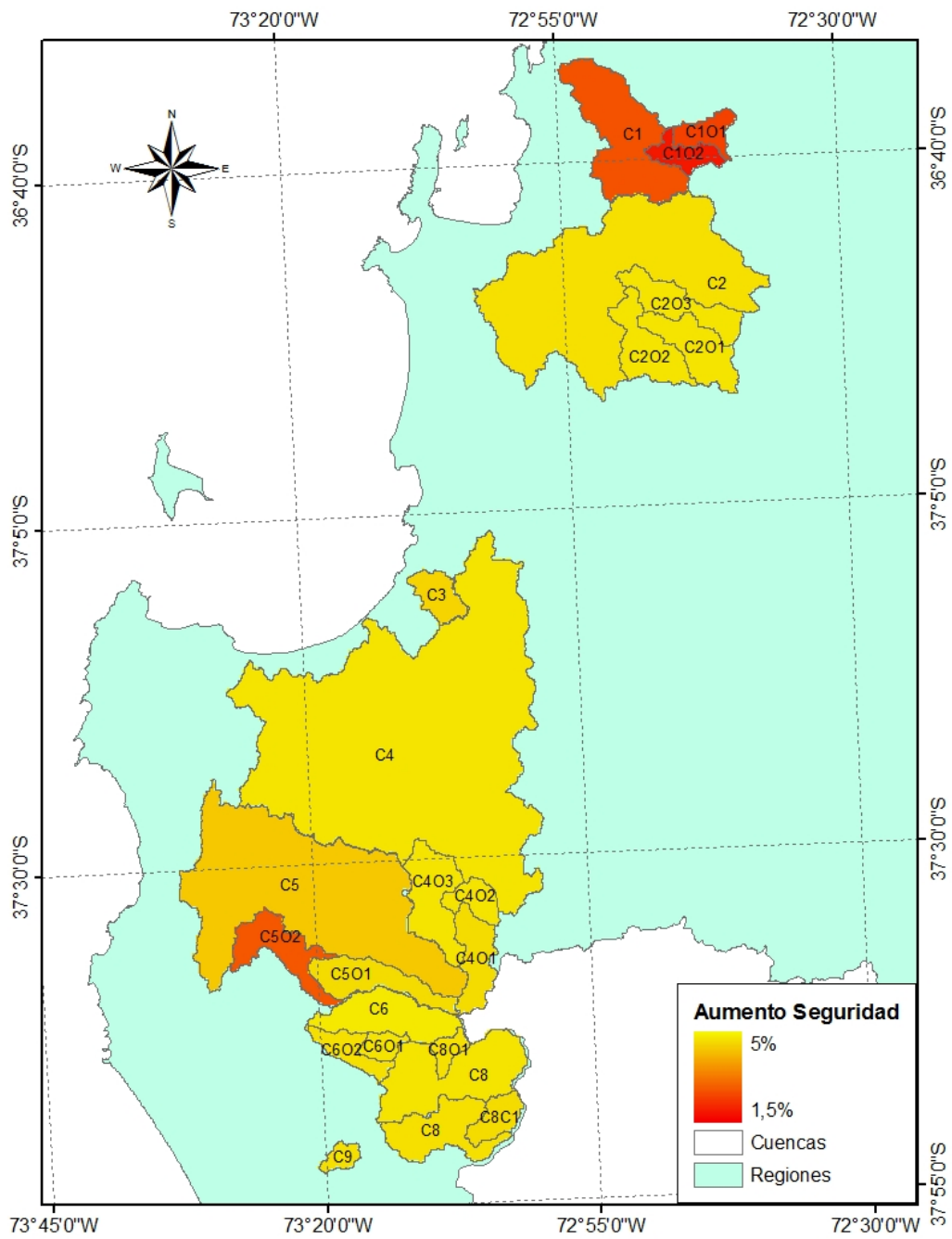


Figura 5.29: Variación de la Seguridad hidrológica de obras diseñadas con 1000 años de período de retorno

Capítulo 6

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir lo siguiente:

El modelo GR4J es un modelo sencillo y parsimonioso que sólo requiere información de precipitación y evaporación en la zona de estudio. Además, el proceso de calibración resulta ser bastante simple a pesar de ser realizado manualmente.

Los coeficientes de Nash-Sutcliffe calculados en las etapas de calibración y validación son un buen apoyo en estos procesos. Sin embargo, si se utilizan sin un análisis gráfico, pueden no entregar los mejores ajustes, sobre todo para los caudales de crecidas.

Los resultados de calibración arrojan buenos coeficientes de Nash-Sutcliffe, lo que indica un buen ajuste general. Sin embargo, los caudales altos presentan un menor ajuste en comparación a los caudales medios y bajos, lo que puede deberse a que, en su mayoría, corresponden a extrapolaciones de la curva de descarga. Respecto a la validación, en general se produce una disminución de los valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe, pero continúan siendo aceptables. Estos resultados confirman la aplicabilidad del modelo a las cuencas estudiadas.

Los resultados de las etapas de calibración y validación pueden verse influenciados por la falta de información representativa de las cuencas estudiadas. Dado que la mayoría de las estaciones pluviométricas y evaporimétricas se encuentran al Este de la cordillera de la costa y la corrección realizada permite ajustar las precipitaciones sólo en magnitud, por lo que las diferencias existentes en los patrones de precipitación se mantienen.

El modelo GR4J supone intercepción nula; sin embargo, no existe restricción alguna para la aplicación de este modelo en las cuencas estudiadas, donde la intercepción es importante debido al alto porcentaje de cobertura boscosa que presentan. En el modelo, el efecto de la intercepción se incluye en la calibración de sus parámetros, en especial en el parámetro X_3 que representa la capacidad del estanque de distribución. Los valores de este parámetro son más altos en aquellas cuencas de mayor cobertura boscosa. Al comparar con los resultados obtenidos por López (2007), quien desarrolló su trabajo en cuencas de la región Metropolitana donde la cobertura boscosa es prácticamente nula, las diferencias son importantes. Los valores de X_3 obtenidos en dicho trabajo fluctúan entre 100 y 300 mm dependiendo de la cuenca y la función objetivo utilizada. En este caso, los valores varían entre 317 en la cuenca del Río Andalién y 3319 en la cuenca del río Butamalal. Los valores de X_3 determinados por Salvatierra (2008) son muy similares a los obtenidos en este trabajo puesto que algunas de las cuencas de estudio son coincidentes.

En el análisis de frecuencia, la elección de la distribución que mejor represente las series de caudales es un punto muy relevante, pues la elección de una u otra distribución, genera en algunos casos, enormes diferencias en los caudales esperados. Por consiguiente, las variaciones entre los períodos actual y futuro podrían mostrar tendencias que no son correctas.

No se pudo comprobar la validez de las relaciones geomorfológicas propuestas por Salvatierra (2008), puesto que la definición de los cauces presentes en las cuencas se realizó de distinto modo, y los valores de algunos parámetros geomorfológicos difieren. Por este motivo resulta imposible la aplicación de las relaciones determinadas por Salvatierra (2008) y es necesario realizar un análisis para determinar nuevas correlaciones que permitan estimar los caudales en las cuencas sin información fluviométrica.

Los índices geomorfológicos determinados no son aplicables en sectores donde no exista cobertura boscosa, pues los valores de los parámetros X_1 , X_3 y X_4 resultarían nulos. Las cuencas sin información analizadas en este trabajo corresponden a subcuencas de las cuencas utilizadas en la determinación de estos índices, por lo que las correlaciones encontradas son claramente aplicables.

Los caudales asociados a los períodos de retorno de 5, 10, 50, 100, 500 y 1000 años disminuyen en el escenario A2. Ésto se debe principalmente a la disminución de las precipitaciones medias y altas que son las que generan los mayores caudales en las cuencas

estudiadas.

La disminución de los caudales de crecida en las subcuencas son similares a las de las cuencas con información fluviométrica y siguen en general la misma tendencia, es decir, si la variación en una cuenca disminuye, en las subcuencas también lo hace. Esto podría explicarse por el uso de la misma serie de precipitación. Sin embargo en la estación Caramávida sucede un efecto contrario al de las cuencas de los ríos Butamalal, Cayucupil y Reputo, a pesar de que en todas se utilizó la misma estación de precipitación, por lo que la explicación de este fenómeno puede encontrarse en la morfología de la cuenca y la definición de los parámetros del modelo.

Los intervalos de confianza determinados para la situación actual y el escenario A2 se intersectan para casi todas las cuencas analizadas, exceptuando la cuenca del Río Caramávida. Esto indica que la disminución de los caudales futuros podría ser mucho menor e incluso nula.

La seguridad hidrológica aumenta considerablemente para obras diseñadas con un período de retorno de 10 años, siendo en promedio un 92,9 % mayor para el escenario A2. A medida que aumenta el período de retorno, el incremento de la seguridad hidrológica disminuye, alcanzando un 33,7 % para $T=100$ años y un 4,2 % para $T=1000$ años. La cuenca que registra un menor aumento de la seguridad corresponde a la delimitada por la estación Río Pingüeral en Dichato; a su vez la que registra un mayor aumento corresponde a la cuenca del Río Caramávida.

La cuenca del Río Pingüeral presenta las menores disminuciones de caudal; por consiguiente, los menores aumentos en la seguridad hidrológica. Esto a pesar de que la estación pluviométrica (Coelemu) usada en la calibración es aquella que presenta la mayor disminución en las precipitaciones futuras. Esto puede explicarse por la baja pendiente y elevación que presenta esta cuenca. Además del valor del parámetro X_2 que resulta prácticamente nulo, a diferencia de lo que sucede en la cuenca del Río Andalién que presenta elevaciones y pendientes similares, pero cuyo valor de X_2 es negativo, lo que indica que el Río cede agua al acuífero.

La cuenca del Río Caramávida es aquella que presenta las mayores variaciones en los períodos de retorno futuros. Para la calibración de esta cuenca se utiliza la precipitación de la estación pluviométrica Caete, al igual que en las cuencas de los ríos Cayucupil,

Butamalal y Reputo. Las principales diferencias entre estas cuencas y la del río Caramávida se presentan en los valores de los parámetros X_2 y X_3 : en la cuenca del río Caramávida no existe acuífero, por lo tanto $X_2 = 0$; en cambio, en las cuencas de los ríos Cayucupil y Reputo, el parámetro X_2 es mayor que cero, lo que indica que el río recibe agua del acuífero, con lo que podría disminuir la variación del caudal en el futuro. Respecto a la cuenca del Río Butamalal, ésta presenta un valor de X_2 negativo; sin embargo, el valor del parámetro X_3 es 3,5 veces el valor del mismo parámetro en la cuenca del Río Caramávida.

Como es sabido, se espera que a futuro se produzca una disminución de las precipitaciones y caudales en gran parte del mundo, así como también se espera que en algunas zonas los eventos extremos de precipitación y las crecidas se incrementen en magnitud, no así en frecuencia. La zona analizada en este trabajo corresponde al primer caso, ya que las reducciones de los caudales de crecidas son significativas. Respecto a esto, es importante decir que los resultados están condicionados por los modelos utilizados, por lo que no son absolutos, y tal vez la utilización de otros modelos arrojaría resultados diferentes.

Finalmente, se puede decir que en la zona costera de la región del Bio Bio, específicamente en las cuencas analizadas, se espera una disminución en la magnitud de los caudales de crecida, con un consiguiente aumento en los períodos de retorno asociados a éstos para el escenario A2.

Bibliografía

V. Chow, D. Maidment, y L. Mays. *Hidrología Aplicada*. McGRAW-HILL, 1994.

CONAMA, Ministerio de Educación, y Centro EULA-Universidad de Concepción. *CD Educación Ambiental Región del Bio Bio*. <http://www.conama.cl/educacionambiental/1142/article-29100.html>. Consultado en Enero 2011.

Dirección Meteorológica de Chile. *Descripción Climatológica, Región del Bío-Bío*. http://meteochile.cl/climas/climas_octava_region.html.

Comisión Nacional de Riego. *Sistema de Información Geográfica e-SIIR*. <http://esiir.cnr.cl/>. Consultado en Enero 2011.

DGA. *Balance Hídrico de Chile*. Dirección General de Aguas, 1987.

Edijatno y C. Michel. Un modele pluie-debit journalier a trois parameters. *La Houille Blanche*, 2:113–121, 1989.

Edijatno, N.O. Nascimiento, X. Yang, Z. Makhlouf, y C. Michel. Gr3j: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 44(2):263–277, 1999.

EducarChile. *Nuestro Chile. 8va Región Geografía y Clima*. <http://www.educarchile.cl/Portal.Base/Web/verContenido.aspx?ID=130236>. Consultado en Enero 2011.

IPCC. *Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Resinger, A]*. IPCC, 2007.

-
- M. López. *Análisis y aplicación del modelo GR4J para estimación de caudales medios diarios en cuencas pluviales de Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, 2007.
- C. Perrin, C. Michel, y V. Andreassian. Improvement of a parsimonious model for stream-flow simulation. *Journal of Hydrology*, 279:275–289, 2003.
- RODHOS. *Levantamiento de parámetros para la modelación de cuencas pluviales no controladas en la VII y VIII Región*. Dirección General de Aguas, 2008.
- C. Salvatierra. *Determinación de la incertidumbre en la aplicación del modelo de simulación hidrológica GR4J, en cuencas pluviales no controladas en Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, 2008.