



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

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE DISTINTOS ESCENARIOS  
DE REGISTRO HISTÓRICO EN LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES  
DE CRECIDA. APLICACIÓN A OBRAS HIDRÁULICAS DE LA  
CUENCA DEL RÍO MAULE.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**CLAUDIO SEBASTIÁN ARIAS REYES**

PROFESOR GUÍA:

XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

RICARDO GONZÁLEZ VALENZUELA

ARTURO JORQUERA ACUÑA

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2011

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: CLAUDIO ARIAS REYES  
FECHA: 11/05/2011  
PROF. GÚIA: XIMENA VARGAS MESA

“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE DISTINTOS ESCENARIOS DE REGISTRO HISTÓRICO EN LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA. APLICACIÓN A OBRAS HIDRÁULICAS DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE”

Para el diseño de sistemas de aprovechamiento del recurso hídrico se requiere contar con información de caudales, registrada en el punto de interés. La longitud del registro disponible es clave en el procedimiento de estimación del caudal de diseño de las obras de control y evacuación de estos sistemas.

La cuenca del río Maule, concentra un número importante de obras destinadas al aprovechamiento hidroeléctrico, cuyos diseños se basaron en antecedentes entre los años 1915 y 1991. Hoy en día, se dispone de un registro más extenso, por lo que se considera de interés analizar los efectos que tiene en la estimación de caudales de crecida, y en la seguridad hidrológica actual de dichas obras, la utilización de distintos escenarios temporales que contemplan variaciones de la longitud y el período del registro.

El objetivo de este trabajo consiste en detectar la variabilidad que puede llegar a existir en las estimaciones de caudales máximos instantáneos asociados a períodos de retorno preestablecidos, en función de la longitud de los registros. Para ello, se recopilaron antecedentes sobre el diseño de seis obras hidráulicas de la cuenca alta del río Maule, y se analizaron los efectos de estas variaciones en la seguridad hidrológica de las obras.

Los resultados del presente trabajo indican un comportamiento generalizado en las crecidas de origen pluvial, observándose para el mismo período de retorno, un aumento sistemático en la magnitud de los caudales estimados a medida que se utiliza un período del registro histórico actualizado más corto, llegando por ejemplo, a diferencias de hasta un 23,9% en la estimación del caudal milenario, utilizando 30 y 69 años de estadística, como ocurre en Melado en zona de presa.

Si bien en las crecidas de origen nival no se detectó el mismo comportamiento para todas las cuencas analizadas, los caudales máximos instantáneos de períodos de retorno altos tienden a disminuir a medida que se utilizan sólo los últimos años de la estadística hidrológica. El caso más

extremo para caudales de deshielo se presenta en los afluentes a la sección de Maule en bocatoma de central Pehuenche, donde existen diferencias de -8,9% en la estimación de caudales máximos instantáneos de período de retorno milenario, cuando se utilizan 50 y 30 años de estadística, respectivamente.

Finalmente, se analizaron los efectos que tienen los caudales estimados bajo distintos escenarios de registro histórico, en la seguridad hidrológica de las obras, resultando en la mayoría de los casos una disminución con respecto a las esperadas en el diseño original.

## **TABLA DE CONTENIDOS**

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME .....	3
<b>CAPÍTULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	4
2.2 DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS BAJO SEGURIDAD HIDROLÓGICA.....	4
2.3 IMPORTANCIA DE LA LONGITUD DEL REGISTRO HIDROLÓGICO EN LA ESTIMACIÓN DE LOS CAUDALES DE CRECIDA .....	5
2.4 ANTECEDENTES PREVIOS .....	6
<b>CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA .....</b>	<b>8</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA .....	8
3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HIDROELÉCTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE..	10
3.3 INFORMACIÓN FLUVIOMÉTRICA .....	12
3.4 LÍNEA DE NIEVE .....	13
3.5 EXISTENCIA DE CANALES DE USO EN RIEGO.....	14
<b>CAPÍTULO IV: PRESA LAGUNA DEL MAULE .....</b>	<b>16</b>
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRESA DE LAGUNA DEL MAULE.....	16
4.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE A LAGUNA DEL MAULE .....	17
4.3 REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDA DE LAGUNA DEL MAULE .....	19
4.3.1 Introducción.....	19
4.3.2 Registros utilizados.....	20
4.3.3 Metodología.....	20
4.3.4 Resultados.....	21
4.3.5 Otros antecedentes disponibles .....	22
4.4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES A LA PRESA DE LA LAGUNA DEL MAULE, PARA DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES .....	24

4.4.1	Introducción.....	24
4.4.2	Registros utilizados.....	25
4.4.3	Metodología.....	27
4.4.4	Resultados.....	31
4.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	32
<b>CAPÍTULO V: PRESA LAGUNA INVERNADA.....</b>		<b>34</b>
5.1	DESCRIPCIÓN DE LA PRESA DE LAGUNA INVERNADA.....	34
5.2	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE A LAGUNA INVERNADA.....	35
5.3	REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDA DE LAGUNA INVERNADA.....	37
5.3.1	Introducción.....	37
5.3.2	Registros utilizados.....	37
5.3.3	Metodología.....	38
5.3.4	Resultados.....	38
5.4	ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES A LAGUNA INVERNADA, PARA DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES.....	39
5.4.1	Introducción.....	39
5.4.2	Registros utilizados.....	40
5.4.3	Metodología.....	40
5.4.4	Resultados.....	40
5.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	41
<b>CAPÍTULO VI: BOCATOMA MAULE DE CENTRAL ISLA .....</b>		<b>44</b>
6.1	DESCRIPCIÓN DE BOCATOMA MAULE DE CENTRAL ISLA .....	44
6.2	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE A B.T. MAULE DE C. ISLA .....	45
6.3	REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDA DE CENTRAL ISLA.....	46
6.3.1	Introducción.....	46
6.3.2	Registros utilizados.....	47
6.3.3	Metodología.....	47
6.3.4	Resultados.....	48

6.4	ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES A B.T. MAULE DE C. ISLA, PARA DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES.....	50
6.4.1	Introducción.....	50
6.4.2	Registros utilizados.....	51
6.4.3	Metodología.....	52
6.4.4	Resultados.....	55
6.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	57
<b>CAPÍTULO VII: BOCATOMA MAULE DE CENTRAL PEHUENCHE .....</b>		<b>60</b>
7.1	DESCRIPCIÓN DE BOCATOMA MAULE DE CENTRAL PEHUENCHE.....	60
7.2	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE A B.T. MAULE DE C. PEHUENCHE...	61
7.3	REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDA DE CENTRAL PEHUENCHE .....	62
7.3.1	Introducción.....	62
7.3.2	Registros utilizados.....	62
7.3.3	Metodología.....	63
7.3.4	Resultados.....	63
7.4	ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES A B.T. MAULE DE CENTRAL PEHUENCHE, PARA DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES .....	65
7.4.1	Introducción.....	65
7.4.2	Registros utilizados.....	65
7.4.3	Metodología.....	67
7.4.4	Resultados.....	74
7.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	76
<b>CAPÍTULO VIII: PRESA EMBALSE MELADO.....</b>		<b>79</b>
8.1	DESCRIPCIÓN DE PRESA DE EMBALSE MELADO.....	79
8.2	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE AL EMBALSE MELADO .....	80
8.3	REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDAS DEL EMBALSE MELADO .....	82
8.3.1	Introducción.....	82
8.3.2	Registros utilizados.....	82

8.3.3	Metodología.....	84
8.3.4	Resultados.....	85
8.4	ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES AL EMBALSE MELADO, PARA DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES.....	86
8.4.1	Introducción.....	86
8.4.2	Registros utilizados.....	86
8.4.3	Metodología.....	87
8.4.4	Resultados.....	91
8.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	92
<b>CAPÍTULO IX: PRESA EMBALSE COLBÚN .....</b>		<b>96</b>
9.1	DESCRIPCIÓN DE PRESA DE EMBALSE COLBÚN.....	96
9.2	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE AL EMBALSE COLBÚN .....	97
9.3	REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDA DE EMBALSE COLBÚN .....	98
9.3.1	Introducción.....	98
9.3.2	Registros utilizados.....	99
9.3.3	Metodología.....	100
9.3.4	Resultados.....	102
9.4	ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES AL EMBALSE COLBÚN, BAJO DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES.....	103
9.4.1	Introducción.....	103
9.4.2	Registros utilizados.....	104
9.4.3	Metodología.....	105
9.4.4	Resultados.....	108
9.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	109
<b>CAPÍTULO X: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....</b>		<b>113</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Estaciones fluviométricas utilizadas en el estudio. ....	13
Tabla 3.2. Cota de la línea de nieve en zona de estudio. ....	14
Tabla 3.3. Asociaciones de Canalistas de la Región del Maule. ....	15
Tabla 4.1. Ubicación de la presa de laguna del Maule.....	18
Tabla 4.2. Parámetros de la cuenca definida por presa de laguna del Maule.....	19
Tabla 4.3. Resultados de estudios de crecidas en cuencas nivales, según (ENDESA, 1980). ....	20
Tabla 4.4. P.E. afluentes a la presa de la laguna del Maule, (ENDESA, 1980).....	21
Tabla 4.5. Qmi afluentes a laguna del Maule, (ENDESA, 1980). ....	21
Tabla 4.6. Escenarios definidos para la zona de presa de la laguna del Maule.....	25
Tabla 4.7. Estaciones fluviométricas utilizadas en análisis regional de crecidas nivales. ....	25
Tabla 4.8. Relaciones entre Qmd diarios utilizadas en análisis regional. ....	26
Tabla 4.9. Relaciones entre Qmi y Qmd utilizadas en análisis regional.....	26
Tabla 4.10. Análisis regional. Escenario U30.....	28
Tabla 4.11. Análisis regional. Escenario U40.....	28
Tabla 4.12. Análisis regional. Escenario U50.....	29
Tabla 4.13. Caudales de crecida en AFLM.....	31
Tabla 4.14. Qmi esperados (m <sup>3</sup> /s). Afluentes a presa de laguna del Maule (AFLM).....	31
Tabla 5.1. Ubicación de la presa de laguna Invernada.....	36
Tabla 5.2. Parámetros de la cuenca definida por la presa de la laguna Invernada.....	37
Tabla 5.3. Qmd y Qmi, afluentes a laguna Invernada, (ENDESA, 1982).....	38
Tabla 5.4. Escenarios definidos para la zona de presa de laguna Invernada. ....	40
Tabla 5.5. Qmi esperados. Afluentes a presa de laguna Invernada (AFLI).....	40
Tabla 5.6. Qmi esperados. Afluentes a presa de laguna Invernada (AFLI).....	41
Tabla 6.1. Ubicación de la bocatoma Maule de central Isla.....	46
Tabla 6.2. Parámetros de la cuenca definida por la bocatoma Maule de central Isla. ....	46
Tabla 6.3. Qmd y Qmi esperados, afluentes a Laguna del Maule (ENDESA, 1982).....	48
Tabla 6.4. Qmd y Qmi esperados, C.I. entre la laguna del Maule y bocatoma de central Isla. Período pluvial (ENDESA, 1982).....	48
Tabla 6.5. Qmd y Qmi esperados, C.I. entre la laguna del Maule y bocatoma de central Isla. Período deshielo (ENDESA, 1982). ....	48
Tabla 6.6. Escenarios definidos para bocatoma Maule de central Isla.....	50



Tabla 6.7. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (MLB). Período pluvial.....	53
Tabla 6.8. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (MLB). Período deshielo. ....	53
Tabla 6.9. Valores del coeficiente $R^2$ , según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MLB. Período pluvial. ....	54
Tabla 6.10. Valores del ECM, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MLB. Período pluvial. ....	54
Tabla 6.11. Valores del coeficiente $R^2$ , según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MLB. Período deshielo. ....	55
Tabla 6.12. Valores del ECM, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MLB. Período deshielo. ....	55
Tabla 6.13. Qmi esperados ( $m^3/s$ ), período pluvial. (BTMCI).....	56
Tabla 6.14. Qmi con nivel de confianza del 95% ( $m^3/s$ ), período pluvial. (BTMCI).....	56
Tabla 6.15. Qmi esperados ( $m^3/s$ ), período deshielo. (BTMCI). ....	56
Tabla 6.16. Qmi con nivel de confianza del 95% ( $m^3/s$ ), período deshielo. (BTMCI). ....	56
Tabla 7.1. Ubicación de la bocatoma Maule de central Pehuenche.....	62
Tabla 7.2. Parámetros de la cuenca definida por la bocatoma Maule de central Pehuenche....	62
Tabla 7.3. Qmi anuales en B.T. Maule de C. Pehuenche, (ENDESA, 1982). ....	64
Tabla 7.4. Qmi de deshielo en B.T. Maule de C. Pehuenche, (ENDESA, 1982).....	64
Tabla 7.5. Escenarios definidos para B.T. Maule de central Pehuenche.....	65
Tabla 7.6. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (MBTP) Período pluvial.....	72
Tabla 7.7. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (MBTP) Período deshielo. ....	72
Tabla 7.8. Valores del coeficiente $R^2$ , según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MBTP. Período pluvial. ....	73
Tabla 7.9. Valores del ECM, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MBTP. Período pluvial. ....	73
Tabla 7.10. Valores del coeficiente $R^2$ , según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MBTP. Período deshielo.....	74
Tabla 7.11. Valores del ECM, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MBTP. Período deshielo.....	74
Tabla 7.12. Qmi pluviales esperados (MBTP) ( $m^3/s$ ). ....	75

Tabla 7.13. Qmi deshielo esperados (MBTP) (m <sup>3</sup> /s).....	75
Tabla 7.14. Qmi pluviales con nivel de confianza 95% (MBTP) (m <sup>3</sup> /s).....	75
Tabla 7.15. Qmi deshielo con nivel de confianza 95% (MBTP) (m <sup>3</sup> /s).....	75
Tabla 8.1. Ubicación de la presa del embalse Melado.....	81
Tabla 8.2. Parámetros de la cuenca definida por la presa del embalse Melado.....	82
Tabla 8.3. Qmi anuales esperados en ML, (Harza y Nenadovich, 1981).....	84
Tabla 8.4. Qmi anuales con nivel de confianza 95% en ML. (Harza y Nenadovich, 1981).....	84
Tabla 8.5. Qmi anuales esperados en MZP. (Harza y Nenadovich, 1981).....	85
Tabla 8.6. Qmi anuales con nivel de confianza 95% en MZP. (Harza y Nenadovich, 1981).....	85
Tabla 8.7. Escenarios definidos para zona de presa de embalse Melado.....	86
Tabla 8.8. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (MZP).....	90
Tabla 8.9. Valores del coeficiente R <sup>2</sup> , según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MZP.....	91
Tabla 8.10. Qmi anuales esperados (MZP) (m <sup>3</sup> /s).....	92
Tabla 8.11. Qmi con nivel de confianza del 95% (MZP) (m <sup>3</sup> /s).....	92
Tabla 8.12. Seguridad hidrológica en (MZP).....	93
Tabla 9.1. Ubicación de la presa del embalse Colbún.....	98
Tabla 9.2. Parámetros de la cuenca definida por la presa del embalse Colbún.....	98
Tabla 9.3. Qmáx limnimétricos esperados en (ARM). Según (ENDESA, 1969).....	101
Tabla 9.4. Qmi esperados en (ARM). Según (ENDESA, 1969).....	102
Tabla 9.5. Qmi esperados en Presa Colbún (ENDESA, 1969).....	102
Tabla 9.6. Escenarios definidos para presa de embalse Colbún.....	103
Tabla 9.7. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (COL).....	106
Tabla 9.8. Valores del coeficiente R <sup>2</sup> , según distribución de probabilidad y escenarios temporales en COL.....	108
Tabla 9.9. Valores del ECM (m <sup>3</sup> /s), según distribución de probabilidad y escenarios temporales en COL.....	108
Tabla 9.10. Qmi esperados (COL), para distintos escenarios (m <sup>3</sup> /s).....	109
Tabla 9.11. Qmi con nivel de confianza del 95% (COL) (m <sup>3</sup> /s).....	109
Tabla 9.12. Seguridad hidrológica en (COL).....	110
Tabla 10.1. Cuadro resumen de Qmi afluentes a las obras hidráulicas analizadas (TR=1.000 años), utilizando registros fluviométricos del período pluvial (abril-septiembre) (m <sup>3</sup> /s).....	113
Tabla 10.2. Cuadro resumen de Qmi afluentes a las obras hidráulicas analizadas (TR=1.000 años), utilizando registros fluviométricos del período de deshielo (octubre-marzo) (m <sup>3</sup> /s).....	114

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 3.1. Zona de estudio y ubicación de obras hidráulicas. ....	8
Figura 3.2. Esquema del sistema hidroeléctrico de la cuenca Maule Alto. ....	11
Figura 3.3. Ubicación de las estaciones fluviométricas en zona de Maule Alto. ....	12
Figura 4.1. Fotografía de la laguna del Maule. Fuente: www.panoramio.com. ....	16
Figura 4.2. Cuenca afluente a la presa de Laguna del Maule. ....	18
Figura 4.3. Análisis Regional de Crecidas de Deshielo, (ENDESA, 1980). ....	22
Figura 4.4. Relación entre P.E. en crecidas de deshielo y Área de deshielo colaborante. Escenario U30. ....	29
Figura 4.5. Relación entre P.E. en crecidas de deshielo y Área de deshielo colaborante. Escenario U40. ....	30
Figura 4.6. Relación entre P.E. en crecidas de deshielo y Área de deshielo colaborante. Escenario U50. ....	30
Figura 4.7. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en AFLM. ....	33
Figura 5.1. Fotografía Laguna La Invernada. Fuente: www.panoramio.com. ....	34
Figura 5.2. Cuenca afluente a la presa de la Laguna Invernada. ....	36
Figura 5.3. Curva de probabilidad de excedencia de $Q_{md}$ y $Q_{mi}$ , afluentes a laguna Invernada, (ENDESA, 1982). ....	39
Figura 5.4. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en AFLI. ....	43
Figura 6.1. Cuenca afluente a bocatoma Maule de central Isla. ....	45
Figura 6.2. Cuenca intermedia entre laguna del Maule y bocatoma C. Isla. Probabilidad de las crecidas del período pluvial (abril – septiembre), período 1958 – 1981, (ENDESA, 1982). ....	49
Figura 6.3. Cuenca intermedia entre laguna del Maule y bocatoma C. Isla. Probabilidad de las crecidas del período de deshielo (octubre – marzo), período 1958 – 1981, (ENDESA, 1982). ....	49
Figura 6.4. Serie de $Q_{mi}$ pluviales. Período 1960/61 - 2009/10. Maule en Los Baños (MLB). ....	52
Figura 6.5. Serie de $Q_{mi}$ de deshielo. Período 1960/61 - 2009/10. Maule en Los Baños (MLB). .....	53
Figura 6.6. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en BTMCI. Período pluvial. ....	58
Figura 6.7. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en BTMCI. Período de deshielo. ....	59

Figura 7.1. Fotografía de la bocatoma Maule de Central Pehuenche. Fuente: Endesa Chile. ....	60
Figura 7.2. Cuenca afluyente a la bocatoma Maule de Central Pehuenche .....	61
Figura 7.3. Central Pehuenche. Río Maule en Bocatoma. Probabilidad de las crecidas Qmd y Qmi, (ENDESA, 1982).....	64
Figura 7.4. Serie de Qmi pluviales. Período 1960/61 – 2009/10. (MBTP).....	70
Figura 7.5. Serie de Qmi deshielo. Período 1960/61 – 2009/10. (MBTP).....	71
Figura 7.6. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en MBTP. Período pluvial. ....	77
Figura 7.7. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en MBTP. Período de deshielo. ....	78
Figura 8.1. Fotografía de la Presa del Embalse Melado. Fuente: <a href="http://www.endesa.cl">www.endesa.cl</a> .....	79
Figura 8.2. Cuenca afluyente al Embalse Melado. ....	81
Figura 8.3. Serie de Qmi anuales (MZP). Período 1941/42 – 2009/10. ....	89
Figura 8.4. Seguridad hidrológica en función de la longitud del registro (MZP).....	94
Figura 8.5. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en MZP.....	95
Figura 9.1. Vertedero embalse Colbún vertiendo. Fuente: <a href="http://Flickrriver.com">Flickrriver.com</a> .....	96
Figura 9.2. Cuenca afluyente al embalse Colbún. ....	97
Figura 9.3. Serie de Qmi en (COL). Período 1941/42 – 2009/10. ....	106
Figura 9.4. Seguridad hidrológica en función de la longitud del registro (COL).....	111
Figura 9.5. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en COL.....	112

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

En Chile, el sostenido crecimiento en la demanda de recursos hídricos para diversos usos, ha llevado a la explotación de grandes sistemas fluviales como la cuenca del río Maule.

Para utilizar los recursos hídricos, se han diseñado y construido una serie de obras hidráulicas como bocatomas y embalses, que permiten un mejor aprovechamiento de éstas, y que deben contar con estructuras que permitan evacuar los caudales ante eventos de crecida, con una seguridad adecuada al tipo y tamaño de las obras.

El diseño de las obras de seguridad de bocatomas y presas de embalses, se realiza típicamente a partir de las estimaciones de caudales de crecida asociados a diversos períodos de retorno, los que se obtienen mediante de un análisis de frecuencia utilizando registros hidrológicos.

Para estos análisis, se consideran usualmente rangos de registros históricos de 30 a 50 años, dependiendo de la disponibilidad de la información, y de los criterios muchas veces no escritos que aplica cada empresa de ingeniería a cargo de un proyecto.

Estos caudales de diseño al estar asociados a períodos de retorno específicos, están también asociados a seguridades hidrológicas específicas, en función de la vida útil u horizonte de evaluación previstos para las obras.

El supuesto implícito de este análisis, es que las variables hidrológicas quedarán representadas en forma adecuada, si se utiliza una serie histórica de longitud suficiente y que permita considerar que dicha serie será además extrapolable a las condiciones futuras esperadas durante la vida útil de la obra. Sin embargo, en muchos casos donde existen registros hidrológicos de gran extensión, se ha observado la existencia de tendencias que pueden modificar en forma importante, los principales parámetros estadísticos de una muestra.

Teniendo en cuenta que en la actualidad se dispone de un registro hidrológico más extenso, resulta interesante analizar cómo cambian las estimaciones de los caudales de diseño, para distintas obras hidráulicas ubicadas en la cuenca del río Maule, según el manejo de la información estadística.

Esto quiere decir, considerando el impacto que tiene la longitud y temporalidad de los registros hidrológicos.

De acuerdo a lo anterior, se establecerán escenarios donde se utilizan los últimos 30, 40, 50, 60 y hasta 70 años (según la información que pueda ser recopilada), que son períodos utilizados frecuentemente para la estimación de los caudales de crecida en obras de control de centrales hidroeléctricas (bocatomas y vertederos) de la cuenca del río Maule.

Las obras a analizar, de acuerdo a la información disponible, serán las siguientes:

- Presa de laguna del Maule.
- Presa de laguna Invernada.
- Bocatoma Maule de central hidroeléctrica Isla.
- Bocatoma Maule de central hidroeléctrica Pehuenche.
- Presa del embalse Melado.
- Presa de la presa del embalse Colbún.

La información referente al diseño de las obras hidráulicas mencionadas anteriormente, fue suministrada por la empresa de ingeniería INGENDESA S.A.

## 1.2 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo, consiste en analizar los efectos que se producen en la estimación de los caudales de crecida utilizando escenarios asociados a diferentes longitudes y períodos del registro hidrológico.

Para lograr el objetivo principal, se evaluará la información hidrológica de importantes obras hidráulicas de la cuenca del río Maule. De esta manera, se podrá conocer la incertidumbre que puede llegar a existir en la estimación de caudales de crecida, al utilizar distintos escenarios de registros históricos.

Otros objetivos específicos consisten en la actualización de los caudales de crecidas. Debido a que las obras hidráulicas ya fueron construidas con un caudal de diseño, los nuevos valores estimados en este trabajo tendrán asociado un nuevo período de retorno, lo que tendrá incidencias en la magnitud de la seguridad hidrológica real de estas construcciones.

### 1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El presente trabajo consiste en determinar la influencia que tiene la longitud de los registros históricos en la estimación de los caudales de crecida, utilizando herramientas de hidrología estadística. El Capítulo II consiste en la revisión bibliográfica, donde se hace referencia a aspectos como la aplicación de la estadística en hidrología, el diseño de obras hidráulicas bajo seguridad hidrológica, la importancia de la longitud de los registros en la estimación de crecidas, y finalmente una recopilación de antecedentes relativos al tema principal de este estudio.

La caracterización de la zona de estudio se describe en el capítulo III. Se entrega una descripción general de la cuenca del río Maule y del sistema de regadío e hidroeléctrico presente en ella. Se presentan también los antecedentes hidrológicos y climatológicos que son relevantes para la investigación.

Los Capítulos IV a IX corresponden a las obras hidráulicas analizadas en la presente memoria. En cada capítulo, se presenta una descripción general de la obra hidráulica y de la cuenca que ésta define. Posteriormente, se señalan los antecedentes recopilados, en particular, estudios de crecidas y/o antecedentes disponibles que entreguen información relativa al diseño hidrológico de las obras.

Los capítulos dedicados a analizar al análisis de las obras, son:

- Capítulo IV: Presa de laguna del Maule
- Capítulo V: Presa de laguna Invernada
- Capítulo VI: Bocatoma Maule de central Isla
- Capítulo VII: Bocatoma Maule de central Pehuenche
- Capítulo VIII: Presa de embalse Melado
- Capítulo IX: Presa de embalse Colbún

Finalmente, en el Capítulo X se señalan las conclusiones y comentarios generales del trabajo. En él se muestran algunos resultados relevantes, se analizan los efectos que tiene la utilización de distintas longitudes y períodos de registro en la estimación de los caudales de diseño y las seguridades hidrológicas asociadas a las obras en estudio, y se entregan algunas recomendaciones de trabajo a futuro.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Los procesos hidrológicos (Chow *et al.*, 1994) se componen de una parte que es parcialmente predecible, y otra parcialmente aleatoria, lo que se denomina proceso estocástico. Estas componentes evolucionan de forma compleja tanto en el espacio como en el tiempo y, en ocasiones, la variabilidad de la componente aleatoria es tan grande comparada con la variabilidad determinística, que el proceso se trata puramente como un proceso aleatorio.

Para eventos hidrológicos extremos, en donde no existe una correlación entre las observaciones realizadas en un mismo lugar en distintos tiempos, la salida del sistema hidrológico es tratada como un proceso estocástico.

De acuerdo a lo anterior, es posible describir el comportamiento que se desprende de la información hidrológica mediante la utilización de parámetros y funciones estadísticas para procesos enteramente aleatorios.

En el presente trabajo, se ha utilizado un fuerte tratamiento estadístico a los registros hidrológicos, en especial, a la información fluviométrica medida en distintas estaciones, y que permiten realizar estimaciones en los puntos de interés.

#### **2.2 DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS BAJO SEGURIDAD HIDROLÓGICA**

El diseño de obras de seguridad en bocatomas y presas de embalses insertas en cursos fluviales, está fuertemente relacionado a los resultados que se obtengan de la hidrología, en particular, en la estimación de caudales de crecida.

Tal como indica Seoane y Lopardo (2010), existe una constante evolución de los procedimientos que buscan un mejoramiento en la estimación de caudales de crecida, que se utilizan en el diseño de obras hidráulicas.



Una de las metodologías frecuentemente utilizadas, consiste en la relación entre el caudal máximo instantáneo y el período de retorno asociado. La estimación del caudal de diseño, se obtiene ajustando una cierta función de densidad de probabilidad a los datos fluviométricos registrados en una cierta sección. Este tipo de tratamiento probabilístico tiene su nacimiento en los primeros años del siglo XX, donde se desarrollan fórmulas empíricas para estimar los caudales máximos, dado un período de retorno (Pearson, 1902; Fuller, 1914; Foster, 1924 y Gumbel, 1941), las que se desarrollan principalmente en cuencas de los Estados Unidos.

Aún cuando se han desarrollado otras formas de estimación con un trasfondo más físico, como por ejemplo la introducción del concepto de precipitación máxima probable (PMP) y asociada a ella, la crecida máxima probable (CMP), la investigación para fortalecer el análisis estadístico y probabilístico dentro de la hidrología sigue creciendo, ya que es imposible o antieconómico diseñar las obras para la CMP.

Según Katz *et al.* (2002), los recientes avances en la estadística de eventos extremos no sólo permiten un mayor rigor en las aplicaciones hidrológicas, sino que pueden hacer un análisis físicamente más significativo. En efecto, el desarrollo futuro irá en la dirección de desarrollar metodologías que incluyan temas como tendencias de eventos hidrológicos extremos o intensificación prevista de un determinado ciclo hidrológico, como parte de un cambio climático global, o bien, desafíos como realizar aplicaciones de patrones físicos de gran escala (como por ejemplo, el fenómeno de El Niño) en variables hidrológicas de menor escala (*downscaling*).

### 2.3 IMPORTANCIA DE LA LONGITUD DEL REGISTRO HIDROLÓGICO EN LA ESTIMACIÓN DE LOS CAUDALES DE CRECIDA

Los registros hidrológicos constituyen la base principal de las estimaciones que permiten diseñar obras hidráulicas que logran aprovechar en forma eficiente y segura, los recursos hídricos de un determinado lugar.

Considerando lo anterior, una de las principales inquietudes que surge al utilizar métodos estadísticos, es determinar la longitud del registro hidrológico necesaria para caracterizar adecuadamente la variabilidad existente en la estimación de un caudal extremo. En algunas situaciones, la variabilidad de los caudales es tan grande, que es difícil detectar tendencias, aún cuando se tienen extensos períodos con registros hidrológicos. Por otro lado, en aquellos casos

donde se tienen estadísticas con pocos años de registro, pueden aparecer de forma artificial, tendencias que en realidad sólo representan una fracción de un ciclo hidrológico de gran escala.

Huh *et al.* (2005), aborda interrogantes como la cantidad mínima de años que permiten caracterizar la variabilidad de caudales extremos y la detección de cambios de tendencia; o bien, si esta cantidad de años de registros dependen de patrones a nivel regional, o patrones propios de la cuenca, como el área de drenaje y elevación. Tras el estudio, que analizó 50 estaciones fluviométricas de Estados Unidos, se llegó a la conclusión de que la cantidad mínima de años con registros hidrológicos que permiten caracterizar la variabilidad de los caudales extremos altos, es de aproximadamente 40 años. Otros resultados indicaron que no se detectó una relación entre el número de años con registros y patrones regionales. Tampoco se encontró relación entre el número de años de registro y la elevación o área de drenaje de las cuencas en estudio.

#### 2.4 ANTECEDENTES PREVIOS

Según Kundzewicz (2006), los daños económicos debido a eventos meteorológicos extremos a nivel mundial, se han multiplicado por diez entre las décadas de 1950 y 1990, donde los perjuicios atribuidos a crecidas siguen una variación similar. Tras esto, el interés científico se centra en la búsqueda de tendencias en las largas series de registro histórico, cuyos resultados poseen inmediata aplicabilidad en el diseño de obras hidráulicas, donde tradicionalmente se utiliza el supuesto de caudales estacionarios.

Sin embargo, experiencias en todo el mundo, muestran que es difícil establecer un comportamiento de aumento generalizado de los caudales. En esa misma línea, estudios realizados en Europa (Kundzewicz *et al.*, 2004; Svensson *et al.*, 2005; y Mudelsee *et al.*, 2003), señalan que si bien fue posible detectar aumentos importantes en la tendencia de los datos de algunas estaciones, en un número no menor la tendencia disminuyó, mientras que en la mayoría de los casos no se detectaron tendencias. Cabe destacar que en los análisis anteriores no se distinguieron, por ejemplo, el origen pluvial o nival de las crecidas. No obstante, un resultado importante de estos estudios constata que la magnitud de los valores máximos de caudales medios diarios, son mucho más frecuentes en las dos últimas décadas del rango de estudio (1981 – 2000), que en las dos anteriores (1961 -1980). Otros estudios (Arnell *et al.*, 2001) concluyen que el número de crecidas en Europa, de origen nival o deshielo, ha disminuido.

De acuerdo a las conclusiones de Kundzewicz (2006), aún cuando se han notificado aumentos generalizados en la intensidad de las tormentas, el análisis de registros de caudales máximos anuales no detectan un aumento generalizado como en el caso de las lluvias.

En nuestro país, el trabajo de González y Dussaubat (2009) concluye que las estimaciones de las precipitaciones máximas diarias para distintos períodos de retorno, muestran un aumento generalizado de las tendencias al utilizar registros de los últimos 30 a 40 años. En particular, el análisis de la estación Armerillo (ubicada en la zona de Maule Alto), y que cuenta con cerca de 100 años de registros hidrológicos, permite apreciar una tendencia decreciente entre las décadas de 1930 y 1970, y una tendencia creciente a partir de 1970 hasta la actualidad, obteniéndose órdenes de magnitud similares en los promedios móviles, tanto al inicio del siglo pasado, como al inicio de éste.

### CAPÍTULO III

## ZONA DEL ESTUDIO: CUENCA ALTA DEL RÍO MAULE

### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

En la Figura 3.1, se muestra un mapa de la Región del Maule que incluye la zona de estudio, cuya extensión representa casi un 30% de la superficie total de la Región del Maule. En él, se señalan las seis obras hidráulicas analizadas en el presente trabajo.

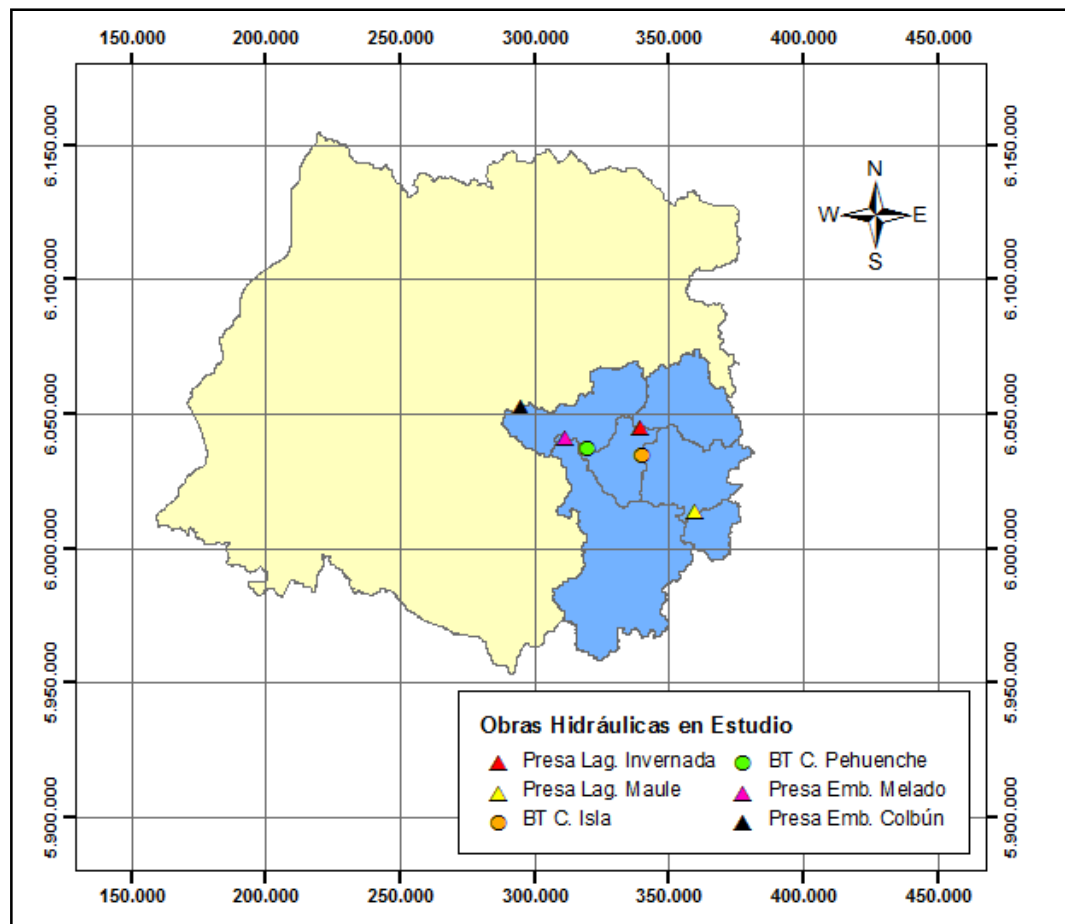


Figura 3.1. Zona de estudio y ubicación de obras hidráulicas.

La cuenca del río Maule se ubica en la VII Región del Maule, siendo la cuarta más grande de Chile, con una superficie aproximada de 20.300 km<sup>2</sup>, estimándose que cerca de un 30% de su área se encuentra por sobre la línea de nieves, lo que implica una fuerte componente nival.

El río Maule nace desde el desagüe de la laguna del Maule, a 2.180 msnm, embalse natural que ha sido peraltado artificialmente para aumentar su capacidad de almacenamiento. En su nacimiento, recorre unos 6 km al norte y luego hacia el noroeste a través de un lecho angosto y encajonado por las montañas de los Andes.

Los primeros afluentes de importancia que tributan al río Maule en el sector andino, son los ríos Puelche y Cipreses, este último efluente de la laguna Invernada.

El río Maule, a 75 km de su origen, aumenta considerablemente su caudal cuando se junta con el río Melado. El río Guaiquivilo-Melado nace de la confluencia de los ríos Cajón Troncoso y Palaleo, siendo éste último el que desagua la laguna Dial, situada a unos 70 km de esta unión. El Guaiquivilo-Melado mantiene un rumbo de sur a norte y constituye un típico valle interandino longitudinal caracterizado por el cordón Melado que se encuentra a su izquierda, y que presenta cumbres por sobre los 2.500 msnm, separándolo de las cuencas de los ríos Longaví, Achibueno y Ancoa, subtributarios del Maule.

Tras el Maule Alto, a unos 90 km de su origen, el río Maule expande su cauce para atravesar un recorrido de 80 km sobre la llanura aluvial del Valle Central, donde casi no recibe tributarios importantes hasta introducirse en la cordillera de la Costa. En efecto, los ríos generados en la cordillera de los Andes tienen un recorrido en forma paralela al Maule, y que son captados por el río Loncomilla, que drena la cuenca sur, y por el río Claro, que recibe los aportes del sector norte.

El río Loncomilla constituye el afluente más importante del Maule. Se forma tras la unión de los ríos Longaví y Perquilauquén, los que proceden desde el oriente y occidente, respectivamente. Sus principales tributarios penetran por su ribera oriental, como es el caso de los ríos Achibueno y Putagán. A su vez, el río Ancoa es un afluente del Achibueno.

Dentro del Valle Central, el Maule recibe también las aguas del río Claro, que proviene del norte. Un afluente al río Claro, es el río Lircay.

En el sector bajo del río Maule, éste sólo recibe escasos aportes del estero de los Puercos. Finalmente, tras recorrer una trayectoria de unos 250 km, el río Maule desemboca en el océano Pacífico, al norte de la ciudad de Constitución.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HIDROELÉCTRICO DE LA CUENCA DEL RÍO MAULE

El desarrollo económico que experimentó el país durante el siglo XX y que sigue manteniendo hasta la actualidad, requiere de una cantidad importante y siempre creciente de energía. De acuerdo a esto, la cuenca alta del río Maule se consideró como una de las zonas con mayor potencial hidroeléctrico, debido a varias de sus características: una hoya hidrográfica de gran extensión, un nivel importante de escorrentía, altas pendientes, y cercanía a los grandes centros de consumo en la zona centro-sur de Chile.

De esta manera, se ha logrado materializar gran parte del potencial de la cuenca alta del Maule, construyendo un número considerable de centrales hidroeléctricas, y que actualmente constituyen un sistema complejo, tanto en su construcción como en su operación.

En la Figura 3.2, se muestra un esquema con los elementos más importantes del sistema hidroeléctrico del río Maule Alto.

El río Maule nace del desagüe del embalse natural laguna del Maule, donde existe una central hidroeléctrica en proyecto (Los Cóndores).

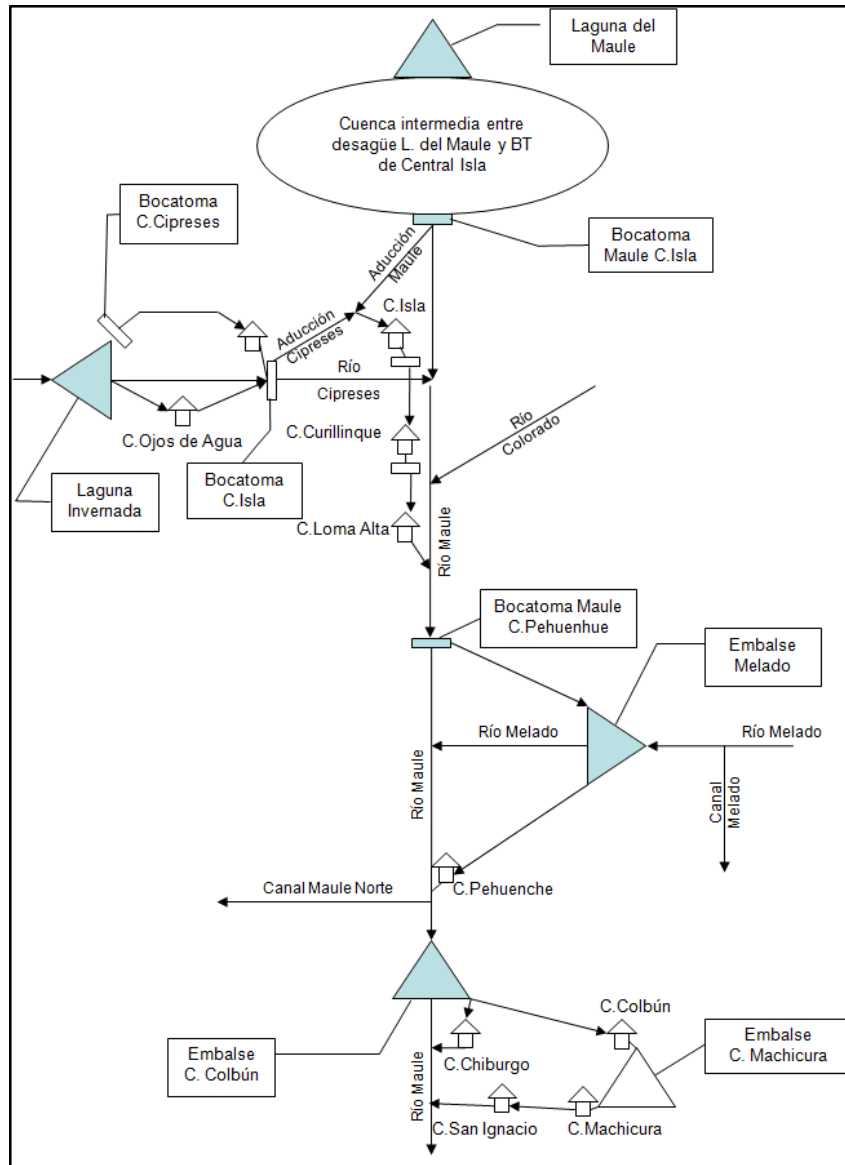
Por otro lado, la rama del río Cipreses alimenta la laguna Invernada, donde se ubica la bocatoma de la central Cipreses, mientras que la central Ojos de Agua aprovecha la caída y las filtraciones de la laguna Invernada.

La central Isla, genera a partir de las aguas captadas a partir de la bocatoma Maule, y una aducción que toma las aguas ya generadas por la central Cipreses.

Posteriormente, la central Curillinke capta las aguas mediante una obra de toma que se ubica en el canal de evacuación de la central Isla, y que conduce las aguas hasta la casa de máquinas a través de un canal paralelo al río Maule después de su confluencia con el río Cipreses.

De forma análoga, la descarga de la central Curillinke es aprovechada inmediatamente por la obra de toma de la central de pasada Loma Alta, las que posteriormente devuelve al río Maule.

La central Pehuenche genera a partir de las aguas del embalse Melado, lago creado artificialmente a partir de la construcción de una presa que almacena las aguas del río Melado, y las captadas por una bocatoma en el río Maule, inmediatamente aguas abajo de la descarga de la central Loma Alta.



**Figura 3.2. Esquema del sistema hidroeléctrico de la cuenca Maule Alto.**

El embalse Colbún almacena las aguas de la rama del río Maule, junto con las aguas generadas provenientes de la descarga de la central Pehuenhue. De esta forma, la central de pasada Chiburgo se ubica inmediatamente aguas abajo del vertedero de la presa del embalse Colbún que da al río Maule, mientras que las aguas generadas por la central Colbún son conducidas al embalse Machicura. Este último embalse, de menor capacidad de almacenamiento que Colbún, permite regular las aguas que son generadas por la central Machicura, las que luego de su descarga, vuelven a ser utilizadas por la mini central de pasada San Ignacio, antes de descargar las aguas al río Maule.

### 3.3 INFORMACIÓN FLUVIOMÉTRICA

La cuenca del Maule Alto, posee una de las redes de registros hidrográficos más completas del país, debido al temprano interés en el aprovechamiento de los recursos hídricos de esta zona, tanto para su uso en riego como para la generación de energía eléctrica.

Para este estudio en particular, se privilegió el uso de estaciones fluviométricas, las que en general superan los 50 años de registros, llegando incluso a los 95 años, como son los casos de las estaciones Melado en La Lancha y Maule en Armerillo.

En la Figura 3.3, se presenta un mapa de la zona en estudio, junto con la ubicación de las estaciones fluviométricas utilizadas en el presente trabajo.

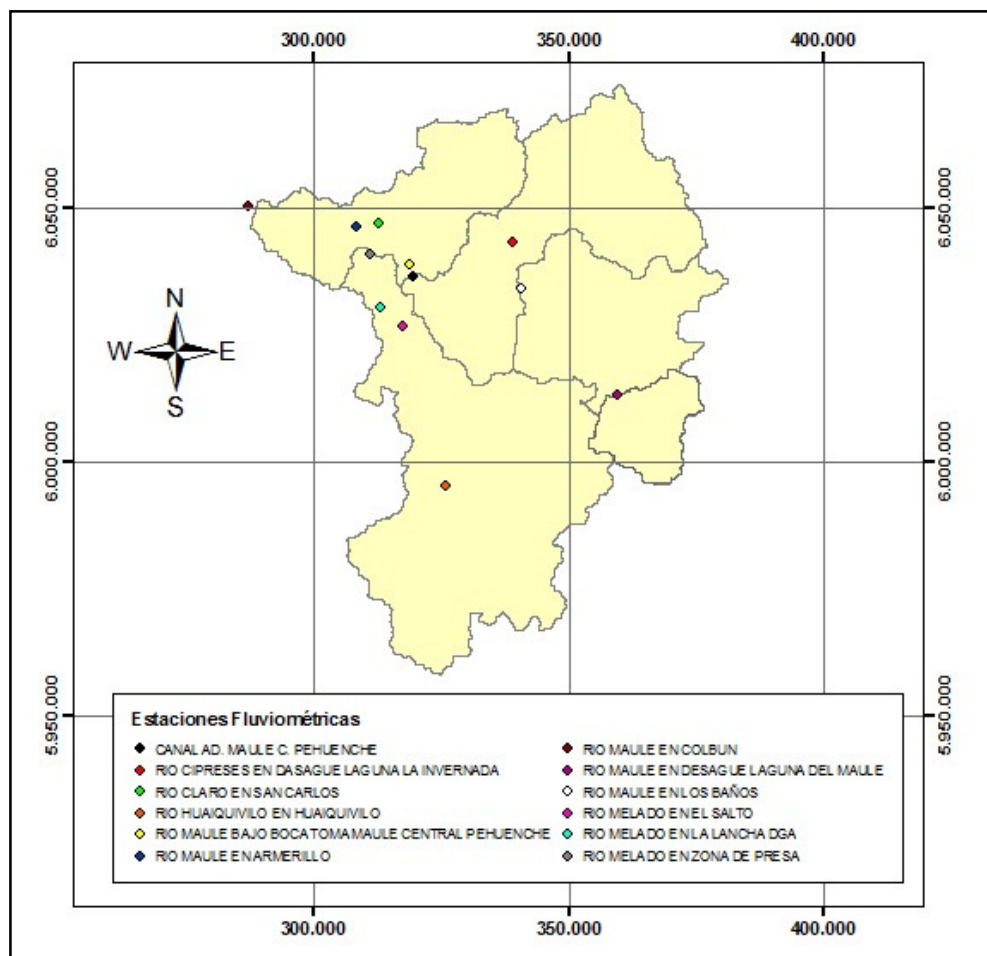


Figura 3.3. Ubicación de las estaciones fluviométricas en zona de Maule Alto.



En la Tabla 3.1, se muestra una lista con las estaciones fluviométricas utilizadas en el presente estudio. Se incluye además el código que las identifica en el Banco Nacional de Aguas (BNA) de la Dirección General de Aguas (DGA), junto con las coordenadas UTM de su ubicación.

Cabe señalar que gran parte de las estaciones de la Tabla 3.1, fueron controladas por ENDESA, y posteriormente pasaron a la DGA. Secciones como la de Maule en Armerillo, fueron controladas simultáneamente por ENDESA y la antigua Dirección de Riego.

**Tabla 3.1. Estaciones fluviométricas utilizadas en el estudio.**

Estación	Cód._BNA	Nombre	UTM Norte	UTM Este
1	07300001-7	Río Maule en desagüe laguna del Maule	6.013.297	359.684
2	07303000-5	Río Maule en Los Baños	6.034.242	340.750
3	07306001-K	Río Cipreses en desagüe laguna Invernada	6.043.273	339.030
4	07308002-9	Río Maule bajo bocatoma Maule C. Pehuenche	6.039.030	318.833
5	07308000-2	Canal aducción Maule C. Pehuenche	6.036.454	319.489
6	07317003-6	Río Melado en Zona de Presa	6.040.905	311.158
7	07317001-K	Río Melado en La Lancha	6.030.342	313.164
8	07317005-2	Río Melado en El Salto	6.026.641	317.531
9	07314001-3	Río Guaiquivilo en Guaiquivilo	5.995.460	325.902
10	07320003-2	Río Claro en San Carlos	6.047.103	312.659
11	07321002-K	Río Maule en Armerillo	6.046.394	308.400
12	07322004-1	Río Maule en Colbún	6.050.336	287.144

Las coordenadas se muestran en UTM (*Universal Transversal de Mercator*), Huso 19 (72°W-66°W Hemisferio Sur), Datum Sudamericano 1969.

### 3.4 LÍNEA DE NIEVE

La información sobre la línea de nieve constituye un elemento importante en la hidrología, permitiendo conocer las superficies aportantes en una cuenca, tanto para la estimación de crecidas de origen pluvial, como también para conocer las áreas colaborantes de nieve, que posteriormente se convierten en las crecidas de deshielo.

Uno de los estudios frecuentemente consultados para conocer la línea de nieve en la zona centro-sur de nuestro país durante una tormenta, es el de Peña y Vidal (1993). Este trabajo se basa en la relación existente, durante una tormenta, entre la temperatura del aire y la ocurrencia de

precipitación sólida o líquida. De acuerdo a esto, se estima la elevación de la línea de nieve a partir de un gradiente térmico de  $-0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m.}$  y una temperatura umbral de  $1^{\circ}\text{C.}$

Por otra parte, existen estudios como el de Escobar y Anabalón (1991), los que se basan en medidas de las Rutas de Nieve realizadas por ENDESA y la DGA. En el estudio mencionado se estimaron las cotas máximas, medias y mínimas, para cada ruta, en los meses de mayo a noviembre.

Finalmente, en el presente trabajo, se referenciará el estudio de Benítez y Vidal (1991), el cual complementa los resultados obtenidos por Escobar y Anabalón (1991).

Según MOP (1995), las áreas pluviales y nivales utilizadas en el diseño, deben estar asociadas a la situación más conservadora, es decir, la correspondiente a la máxima línea de nieve posible para el período pluvial, y la mínima posible para la temporada de deshielos.

Considerando lo anterior, y utilizando las relaciones de Benítez y Vidal (1997), la línea de nieve en el período pluvial se ha calculado promediando las máximas cotas de la línea de nieve, en el período mayo-septiembre, ubicándose a 2.100 msnm. En tanto, como las máximas crecidas de deshielo suelen producirse en el mes de noviembre, se ha considerado la línea de nieve de deshielo como la mínima posible para este mes, llegando a los 1.700 msnm.

Los valores para las cotas de la línea de nieve (L.N.) máxima, media y mínima para ambas temporadas, se muestran en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Cota de la línea de nieve en zona de estudio.**

Temporada	L.N. Máxima	L.N. Media	L.N. Mínima
Pluvial	2.100	1.550	1.180
Nival	2.500	2.000	1.700

### 3.5 EXISTENCIA DE CANALES DE USO EN RIEGO

De acuerdo a información de la Junta de Vigilancia<sup>1</sup> del río Maule, las Asociaciones de Canalistas asociadas a ella, son:

---

<sup>1</sup> Información disponible en la página web: <http://www.jvriomaule.cl/>

**Tabla 3.3. Asociaciones de Canalistas de la Región del Maule.**

Canal	N° de asociados	Superficie Regada (Has)
Maule (Norte)	2.700	70.000
Melado	2.330	33.600
SORPAM	3.000	27.336
Maule Sur	2.689	25.000

Si junto a las Asociaciones de Canalistas señaladas en la Tabla 3.3, se suman asociados particulares, la Junta de Vigilancia del río Maule llega a representar a cerca de 13.000 asociados con una superficie de riego de unas 200.000 hectáreas aproximadamente.

Los canales que se encuentran dentro de la zona de estudio del presente trabajo, son el Canal Melado, el que extrae aguas del río homónimo, antes del embalse Melado; y el canal Maule Norte Alto, el que extrae aguas desde la ribera norte del río Maule, aguas arriba del embalse Colbún.

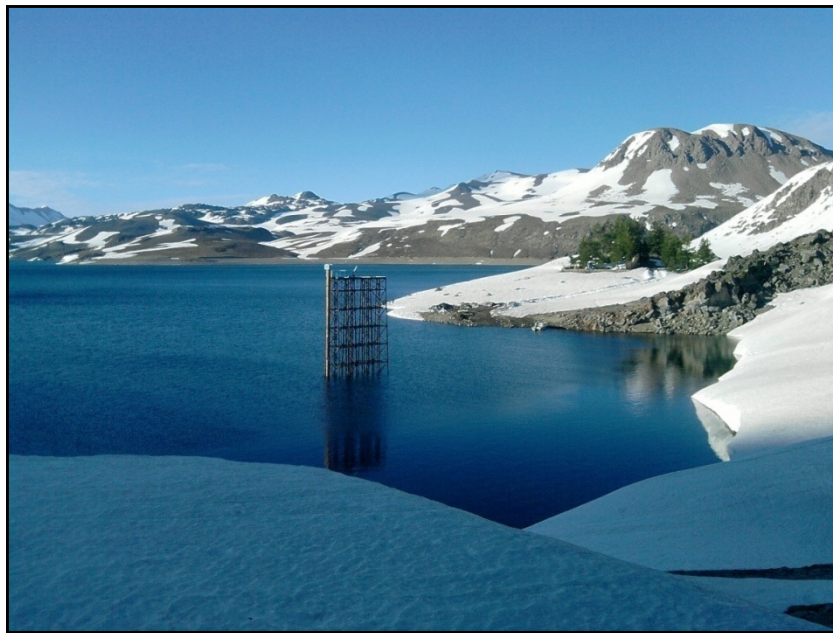
Considerando que las máximas crecidas afluentes a estos embalses son de origen pluvial (período abril - septiembre), y que no existe demanda de agua para riego durante eventos de caudales extremos altos, se ha supuesto que los canales no alteran en forma considerable los caudales registrados en las secciones de los ríos Melado y Maule, en la zona de estudio.

## CAPÍTULO IV

### PRESA DE LAGUNA DEL MAULE

#### 4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRESA DE LAGUNA DEL MAULE

El río Maule nace en la laguna del mismo nombre, la que está ubicada a unos 2.180 msnm. En la Figura 4.1 se presenta una fotografía donde se observa una importante componente nival en la zona de estudio.



**Figura 4.1.** Fotografía de la laguna del Maule. Fuente: [www.panoramio.com](http://www.panoramio.com)

La laguna del Maule es un embalse natural de origen volcánico, formado por sucesivas erupciones del grupo de volcanes que la rodean.

Entre los años 1954 y 1957 se construyó un muro en el desagüe, en el extremo noroeste de la laguna, que permitió aumentar su capacidad reguladora. El volumen de la laguna aumentó así de unos 600 millones de m<sup>3</sup> a más de 2.000 millones de m<sup>3</sup>, de los cuales 1.420 millones de m<sup>3</sup> son utilizables. La regulación permitió mejorar la seguridad de riego en el valle del Maule, y de generación en las centrales ubicadas hidroeléctricas ubicadas hacia aguas abajo, tanto existentes como futuras, como es el caso de la central Los Cóndores. En previsión de su futura materialización,

simultáneamente con las obras de la presa se construyó una bocatoma destinada a esta central y los primeros 130 m del túnel de aducción. Las obras civiles fueron construidas en un convenio entre la Dirección de Riego (actualmente Dirección de Obras Hidráulicas MOP) y ENDESA.

La presa principal tiene una longitud de coronamiento de 193 m y una altura máxima sobre el lecho del río Maule de unos 30 m; es de tierra, de tipo zonificado, con un núcleo central impermeable, espaldones permeables y enrocados de protección sobre ambos taludes.

Existe, además, una presa auxiliar o pretil de tierra que se ubica en la parte izquierda de la angostura, tiene una altura de 10 m y una longitud de 130 m y es de tipo homogéneo, con protección de enrocados en ambos taludes.

El vertedero es de tipo abanico y posee un umbral libre de compuertas, de unos 40 m de longitud, en desarrollo semicircular, que le permiten evacuar hasta 250 m<sup>3</sup>/s con una carga máxima de 2 m (INGENDESA, 2007). Las aguas vertidas se conducen por un rápido de descarga, de unos 150 m de longitud, hasta un colchón dissipador de energía, que reduce el impacto de las aguas descargadas tanto por el vertedero como por el conducto de desagüe, para entregarlas en forma tranquila al río Maule.

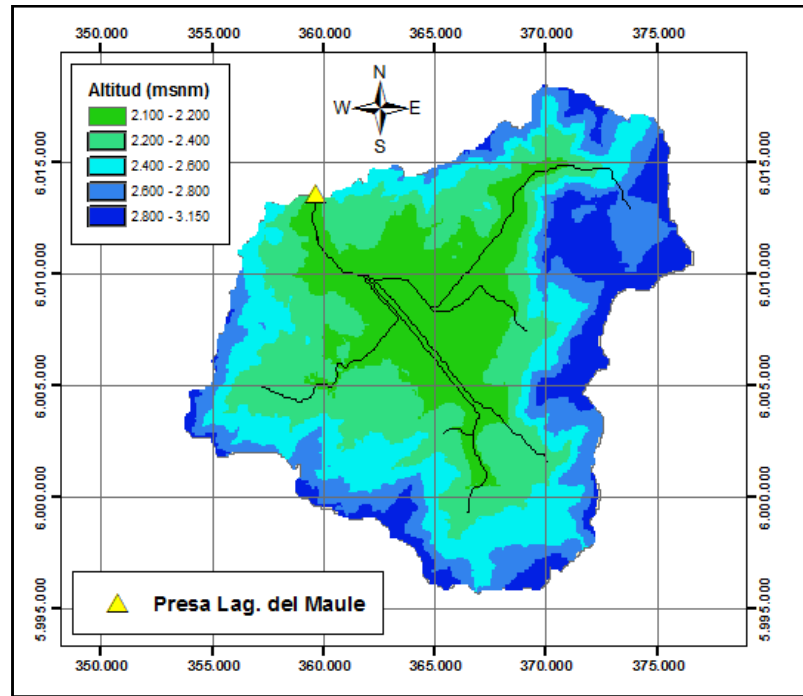
Una esquema en planta de la presa de Laguna del Maule se muestra en el plano A.1 (Anexo A). El perfil longitudinal de la presa de Laguna del Maule, junto con un esquema en planta y cortes del vertedero, se muestran en el plano A.2 (Anexo A).

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE A LAGUNA DEL MAULE

La Figura 4.2, muestra la cuenca afluyente a la presa ubicada en el desagüe de la laguna del Maule, y que da nacimiento al río del mismo nombre. La superficie total aportante, es de aproximadamente 307 km<sup>2</sup>, de los cuales alrededor de 45 km<sup>2</sup> corresponden al área de la laguna.

La zona es de gran aridez y presenta sólo vegetación de cordillera, compuesta por pequeños arbustos, musgos y líquenes. No existe agricultura y la ganadería es de carácter nómada, producto de arrieros que llevan sus animales a pastar a la alta cordillera.

El clima es templado cálido. En verano las condiciones de tiempo son estables, asoleadas y secas, con algunas precipitaciones ocasionales. En invierno el tiempo es variable y con frecuentes precipitaciones de tipo nival.



**Figura 4.2. Cuenca afluente a la presa de Laguna del Maule.**

La presa de la laguna del Maule constituye el punto de salida de la cuenca definida en la Figura 4.2, y cuyas coordenadas se presentan en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1. Ubicación de la presa de laguna del Maule.**

Obra	UTM		Coordenadas Geográficas	
	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Latitud Sur (°)	Longitud Oeste (°)
Presa Laguna del Maule	359.700	6.013.620	36° 00' 40"	70° 33' 24"

Los principales parámetros geomorfológicos de la cuenca afluente a la presa de la laguna del Maule se muestran en la Tabla 4.2

**Tabla 4.2. Parámetros de la cuenca definida por presa de laguna del Maule.**

Parámetro de la cuenca	Presa Laguna del Maule
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	307
Pendiente media de la cuenca (m/m)	0,207
Largo de la cuenca (km)	27,3
Pendiente media del cauce principal (m/m)	0,034
Longitud del cauce principal (km)	22,9
Altura media de la cuenca (msnm)	2.451

#### 4.3 REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDA DE LAGUNA DEL MAULE

##### 4.3.1 Introducción

La presa de la laguna del Maule es una de las primeras obras hidráulicas de gran importancia construidas dentro de la cuenca. Debido a esto, el diseño y la construcción de las obras civiles se enmarcan dentro de metodologías poco utilizadas en la actualidad, y escasa disponibilidad de información hidrológica.

En la búsqueda de información sobre el diseño original de la presa de la laguna del Maule, se observa una estimación de los caudales de crecida a partir de procedimientos poco respaldados, debido a la escasa información y baja confiabilidad de los registros hidrológicos.

En particular, se han encontrado dos referencias bibliográficas con data anterior a la fecha de término de la construcción de la presa de la laguna del Maule (MOP, 1945; Hidalgo, 1955).

Debido al interés por aprovechar los recursos hídricos provenientes de la laguna del Maule, se han realizado una serie de estudios hidrológicos, los que incluyen estudios de crecidas de los caudales afluentes a ésta.

En consecuencia, la información recopilada acerca del diseño original de la presa, (MOP, 1945), será entregada sólo como antecedentes generales. En tanto, se revisarán con mayor detalle los estudios realizados posteriormente a la construcción de la presa, que incluyen estimaciones de los caudales afluentes a la laguna del Maule, y por consiguiente, a la presa del embalse. En particular, el trabajo que se utilizará como referencia principal para comparar los resultados de la presente investigación, será ENDESA (1980).

La inexistencia de estaciones fluviométricas aguas arriba del punto donde se ubica la presa, imposibilita la estimación de un caudal de diseño para las obras que permiten la evacuación de crecidas utilizando registros hidrológicos históricos en la zona. Por lo tanto, se ha utilizado una metodología alternativa, que consigue estimar los caudales de crecida afluentes a la presa de la laguna del Maule en forma indirecta mediante un análisis regional que se detalla más adelante.

#### 4.3.2 Registros utilizados

De acuerdo a (ENDESA, 1980), la información disponible para el estudio, consiste en resultados de estudios de crecidas de varias cuencas de deshielo, de características semejantes a la cuenca afluente a la laguna del Maule, en cuanto a su ubicación en zonas altas y una precipitación anual similar.

Los antecedentes disponibles se resumen en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3. Resultados de estudios de crecidas en cuencas nivales, según (ENDESA, 1980).**

Estación	A (km <sup>2</sup> )	TR = 10 años		TR = 1.000 años	
		Q <sub>mi</sub> (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Q <sub>mi</sub> (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )
Puelche en junta con Maule	273	107	0,39	230	0,84
Melado en La Lancha	1.890	660	0,35	1.500	0,79
Guaiquivilo en Guaiquivilo	1.020	435	0,43	990	0,97
Cuenca intermedia entre desagüe de laguna del Maule y Maule en los Baños	650	286	0,44	575	0,88
Quebrada el Toro en junta con Laja	15	9,5	0,63	19	1,27

#### 4.3.3 Metodología

La metodología utilizada para estimar los caudales máximos instantáneos afluentes a la laguna del Maule, según ENDESA (1980), consiste en la determinación de la producción específica (m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>) de crecidas de diferentes cuencas para un mismo período de retorno, y definir una curva en función del área colaborante de deshielo.

De esta manera, conocida la producción específica para una cuenca de régimen hidrológico y superficie similar a la afluente a la laguna del Maule, el caudal de crecida se obtiene mediante la ecuación (4.1).



Esta metodología (Endesa, 1980) no considera el efecto regulador del embalse.

$$Q_{mi}^T(AFLM) = PE_{mi}^T(AFLM) \cdot A \quad (4.1)$$

Donde:

- $Q_{mi}^T(AFLM)$  : Caudal máximo instantáneo afluente a laguna del Maule, de período de retorno T ( $m^3/s$ )  
 $PE_{mi}^T(AFLM)$  : Producción específica del caudal máximo instantáneo, de período de retorno T y área colaborante de deshielo igual a A ( $m^3/s/km^2$ )  
A : Área de la cuenca de deshielo colaborante ( $km^2$ )

#### 4.3.4 Resultados

El análisis regional se efectuó para crecidas con períodos de retorno de 10 y 1.000 años. Sobre la base de estos puntos y las precipitaciones, se trazaron rectas de tendencia para cada período de retorno considerado. La relación gráfica obtenida se muestra en la Figura 4.3.

De esta forma, con un área de deshielo colaborante estimada en 284  $km^2$ , se obtienen los resultados de la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4. P.E. afluentes a la presa de la laguna del Maule, (ENDESA, 1980)**

Cuenca	Área ( $km^2$ )	Tr = 10 años		Tr = 1.000 años	
		P.E.	$Q_{mi}$	P.E.	$Q_{mi}$
		( $m^3/s/km^2$ )	( $m^3/s$ )	( $m^3/s/km^2$ )	( $m^3/s$ )
Desagüe laguna del Maule	284	0,48	135	1,11	315

Una vez que se tienen los valores de las crecidas para 10 y 1.000 años, y llevando estos puntos a un papel de probabilidad Gumbel, se obtienen los valores de los caudales máximos instantáneos para otros períodos de retorno, los que se señalan en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5.  $Q_{mi}$  afluentes a laguna del Maule, (ENDESA, 1980).**

Tr (años)	10	20	50	100	200	500	1.000
$Q_{mi}$ ( $m^3/s$ )	135	165	200	225	250	280	315

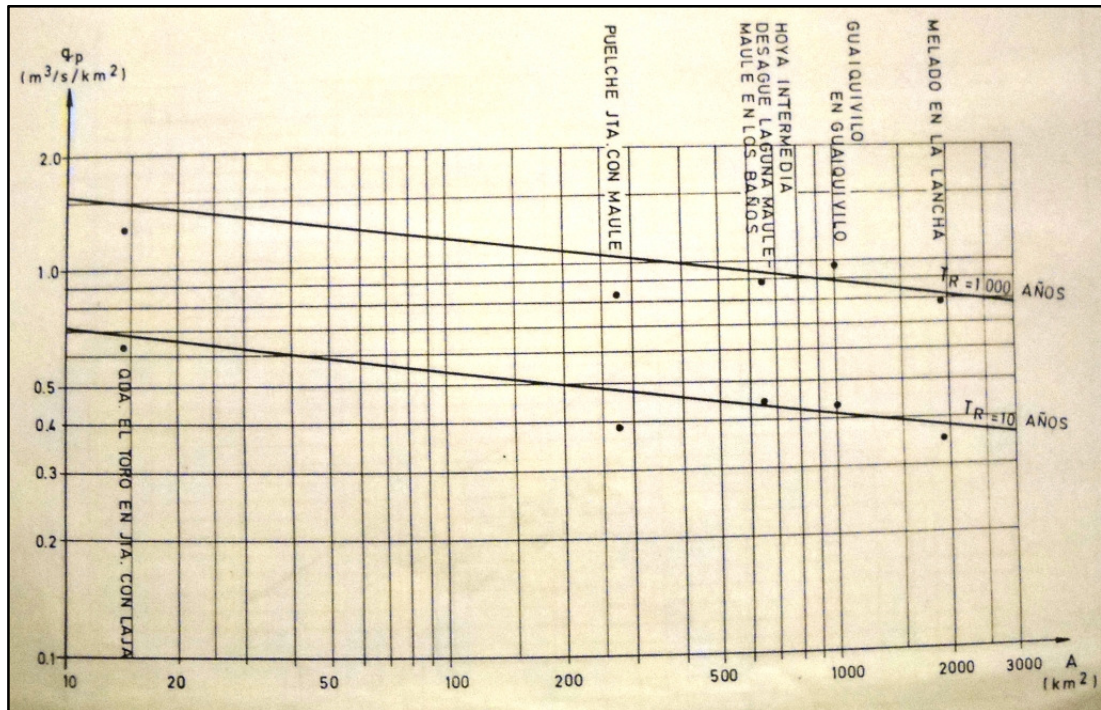


Figura 4.3. Análisis Regional de Crecidas de Deshielo, (ENDESA, 1980).

#### 4.3.5 Otros antecedentes disponibles

La información que acá se señala, sólo representa antecedentes históricos, previa construcción de la presa de la laguna del Maule.

De acuerdo a MOP (1945), considerado como la base del proyecto de ingeniería que busca la construcción de la presa de la laguna del Maule, se menciona que la información hidrológica utilizada, consiste en registros de altura limnimétricas entre los años 1915 y 1933 en Culenar, cuya sección está ubicada aguas abajo de la obra de toma del canal Maule. Sin embargo, se menciona la falta de confiabilidad de estos datos debido a la poca cantidad de aforos, y estadística basada en curvas de gasto poco seguras.

Además, desde 1942 hasta la fecha del informe en 1945, existe un registro bastante corto de alturas limnimétricas a cargo de ENDESA, medidas en Maule en La Barreta, (situado en el curso superior del Maule), en Culenar y en algunos afluentes.

La caracterización de las crecidas en la laguna del Maule, fue realizada comparando los caudales diarios en La Barreta y en Culenar, donde se ha deducido que las únicas crecidas de importancia en la Barreta, y por consiguiente en la Laguna, se deben a deshielos.

La relación entre los caudales medios mensuales medidos en Culenar y La Barreta, permite conocer el régimen hidrológico, el que consiste en un caudal medio mínimo en el mes de abril, el cual aumenta hasta septiembre debido a las precipitaciones en forma de nieve sobre la laguna; posteriormente baja hasta noviembre debido a que el gasto proviene de los incipientes deshielos; sube en el mes de diciembre para volver a disminuir hasta abril.

Para eventos de crecida de deshielo, posterior a un invierno de abundantes precipitaciones, la relación entre los gastos diarios medidos en Culenar y La Barreta toma un valor entre 5,5:1 y 6,5:1. Por otra parte, la relación entre los caudales de La Barreta y la Laguna es aproximadamente 1,3:1. De las relaciones anteriores, resulta una razón aproximada de 7,5:1 entre los caudales medidos en Culenar, y los que habría en la Laguna del Maule.

El máximo caudal observado en primavera en los registros de Culenar hasta la fecha del estudio al que se hace referencia (1945), es de 2.925 m<sup>3</sup>/s. Utilizando la relación 7,5:1, la crecida en la laguna correspondería a un caudal de 390 m<sup>3</sup>/s, la cual corresponde a un evento registrado en 1919, año excepcionalmente lluvioso. Por lo tanto, esta crecida fue considerarse con una baja probabilidad de excedencia.

Debido a que los máximos gastos de deshielo se producen luego de inviernos con abundantes precipitaciones, y el máximo valor del caudal se alcanza paulatinamente, este tipo de crecidas son previsibles y pueden ser amortiguadas en parte, bajando el nivel del embalse.

Como se menciona anteriormente, se descarta el hecho de que existan crecidas de importancia debido a chubascos de origen pluvial. No obstante, existe el peligro y la posibilidad de que existan avalanchas de nieve, como aquella correspondiente a octubre de 1938 y que generó una crecida registrada en Culenar con un caudal de 2.177 m<sup>3</sup>/s. Se alerta sobre la posibilidad de que si una avalancha de las características mencionadas sucediera en la Laguna del Maule, se produciría un caudal mucho mayor a la capacidad del vertedero.

En el informe MOP (1945), se estima una crecida máxima de 390 m<sup>3</sup>/s, proyectando un vertedero con un desarrollo de 40 m y la entrega de un caudal de 380 m<sup>3</sup>/s, sin verse influenciado desde aguas abajo. En tanto, el caudal máximo que admite descargar el conjunto del vertedero y los

tubos de la obra de entrega, es de 409 m<sup>3</sup>/s, para una carga de 3,30 m sobre el vertedero, incluyendo parte de la revancha calculada para el coronamiento de la presa.

Sin embargo, en la referencia Hidalgo (1955), acerca de los resultados de las experiencias de laboratorio para un modelo físico en escala 1:25 de la Laguna del Maule para el comportamiento del vertedero, se mencionan los antecedentes relacionados a un cambio en el diseño del vertedero, con respecto al informe MOP (1945), y que buscan un mejor diseño económico, tomando en cuenta las excavaciones, revestimiento y el puente carretero que lo cruza.

Las experiencias de laboratorio para este nuevo diseño del vertedero, verifican un gasto máximo de 300 m<sup>3</sup>/s, aún cuando se menciona que la regulación del embalse sólo hace esperar un caudal máximo de 200 m<sup>3</sup>/s. De esta forma, la solución recomendada permitía el escurrimiento de los 200 m<sup>3</sup>/s con 1,85 m de carga, y los 300 m<sup>3</sup>/s con 2,80 m de carga.

#### 4.4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES A LA PRESA DE LA LAGUNA DEL MAULE, PARA DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES

##### 4.4.1 Introducción

Tal como se mencionó anteriormente, debido a la inexistencia de estaciones fluviométricas en la parte alta de la cuenca del Maule, la estimación de los caudales de crecida afluentes a la presa de la Laguna del Maule, se estimó a partir de un análisis regional que relaciona la producción específica (Q/A) versus área aportante (A), para caudales de origen nival, considerando información de cuencas con características similares en cuanto a latitud y precipitaciones.

Finalmente, se han definido escenarios temporales que utilizan los últimos 30, 40 y 50 años de estadística, que corresponden a longitudes frecuentemente utilizadas en los estudios hidrológicos. En la Tabla 4.6, se muestra la nomenclatura utilizada para cada uno de los escenarios temporales definidos para este estudio, donde AFLM(Ux) corresponde a la estimación de los caudales máximos instantáneos afluentes a la presa ubicada en el desagüe de la laguna del Maule, utilizando los últimos “x” años de estadística.

**Tabla 4.6. Escenarios definidos para la zona de presa de la laguna del Maule.**

Escenarios	Descripción		
	Lugar	N° de datos	Período del registro
AFLM(U30)	Zona de Presa de Laguna del Maule	30	1980/81 - 2009/10
AFLM(U40)		40	1970/71 - 2009/10
AFLM(U50)		50	1960/61 - 2009/10

#### 4.4.2 Registros utilizados

Para la realización del análisis regional, se han utilizado nueve estaciones fluviométricas ubicadas principalmente en los sectores precordilleranos de la Región del Maule y complementadas con algunas estaciones de la Región del Biobío, las que cuentan con información de al menos 50 años de caudales máximos instantáneos, ya sean datos registrados, o estadística ampliada por correlación con otras estaciones. La lista con las estaciones se muestra en la Tabla 4.7.

**Tabla 4.7. Estaciones fluviométricas utilizadas en análisis regional de crecidas nivales.**

N°	Código	Cuenca
1	ML	Melado en La Lancha
2	CI(DLM-MLB)	Cuenca intermedia entre Des. de Lag. del Maule y Maule en Los Baños
3	GG	Guaiquivilo en Guaiquivilo
4	PJM	Puelche en Junta con Maule
5	CSC	Claro en San Carlos
6	CJM	Campanario en Junta con Maule
7	VEVL	Vallecito en Embalse Vega Larga (*)
8	QEC	Quemazones en Captación (*)
9	QTJL	Quebrada El Toro en Junta con Laja (*)

(\*) Pertenecientes a la cuenca del Alto Pocura, VIII Región del Biobío (ENDESA, 1989).

Para ampliar las estadísticas de aquellas estaciones con años o períodos incompletos, se han realizado correlaciones entre Qmd de dos estaciones, o bien, correlaciones entre Qmd y Qmi registrados en una misma estación.

De esta forma, para completar series de Qmd en una determinada estación (E) a partir de los datos de una estación base (E.B.) durante un período de registros común, se han utilizado las correlaciones señaladas en la Tabla 4.8, escribiendo la relación como:

$$Q_{md}^d(E) = a \cdot Q_{md}^d(E.B.) + b \quad (4.2)$$

Donde:

- $Q_{md}^d(E)$  : Caudal medio diario en estación E, en período de deshielo ( $m^3/s$ )  
 $Q_{md}^d(E.B.)$  : Caudal medio diario en estación base E.B., en período de deshielo ( $m^3/s$ )  
 $a, b$  : Coeficientes de la relación lineal

**Tabla 4.8. Relaciones entre Qmd diarios utilizadas en análisis regional.**

Estación	Estación Base (E.B.)	a	b	R <sup>2</sup>	Período
GG	ML	0,693	-39,18	0,952	1972/73 - 1996/97
PJM	CI(MLB-DLM)	0,546	-22,35	0,871	1957/58 - 1974/75
CJM (**)	CI(MLB-DLM)	0,218	0	-	1957/58 - 1965/66

(\*\*) INGENDESA (2010).

En forma análoga, para completar series de Qmi a partir de Qmd registrados en la misma estación, se han utilizado correlaciones cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.9, cuando la relación se escribe de la forma:

$$Q_{mi}^d(E) = m \cdot Q_{md}^d(E) \quad (4.3)$$

Donde:

- $Q_{mi}^d(E)$  : Caudal máximo instantáneo en estación E, en período de deshielo ( $m^3/s$ )  
 $Q_{md}^d(E)$  : Caudal medio diario en estación base E, en período de deshielo ( $m^3/s$ )  
 $m$  : Coeficiente de la relación lineal

**Tabla 4.9. Relaciones entre Qmi y Qmd utilizadas en análisis regional.**

Estación	m	R2	Período
ML	1,234	0,968	1955/56 - 2001/02
CI(MLB-DLM)	1,219	0,937	1958/59 - 2001/02
GG	1,261	0,953	1972/73 - 1996/97
PJM	1,587	0,946	1957/58 - 1974/75
CSC	1,236	0,894	1972/73 - 2009/10
CJM (**)	1,383	-	1957/58 - 1965/66

(\*\*) INGENDESA (2010a).

El detalle de las relaciones señaladas en la Tabla 4.9, se muestran en el Anexo B.

#### Cuencas del Alto Pocura

Junto con la recopilación de registros hidrológicos de las estaciones fluviométricas correspondientes a la cuenca del Maule Alto con datos hasta el año 2009/10, se han utilizado crecidas determinadas en un estudio anterior (ENDESA, 1989), y utilizadas en la actualización más reciente de aquel trabajo (INGENDESA, 2010a). Las estaciones utilizadas son: Vallecito en Embalse Vega Larga (VEVL), Quemazones en Captación (QEC), y Quebrada El Toro en Junta con Laja (QTJL), todas ellas pertenecientes a la cuenca del Alto Pocura.

#### 4.4.3 Metodología

La estimación de crecidas asociadas a períodos de deshielo en zonas sin información fluviométrica, consistió en utilizar las series de caudales máximos instantáneos de las estaciones mencionadas en el punto anterior (4.4.2), para realizar un análisis regional que relaciona las producciones específicas (Q/A), con las áreas de deshielo aportantes, en cuencas de similares características a la de este estudio, de acuerdo a la metodología empleada en (ENDESA, 1980).

De esta manera, se realizaron análisis de frecuencia considerando los tres escenarios temporales definidos, es decir, utilizando los registros de los últimos 30, 40 y 50 años de estadística para cada estación fluviométrica.

A partir de los análisis de frecuencia, se determinaron los caudales de crecida para períodos de retorno de 10 y 1.000 años (ENDESA, 1980). Luego, se determinó la producción específica asociada a un período de retorno T, de acuerdo al procedimiento descrito en el punto 4.3.3.

Los resultados de los análisis de frecuencia ( $Q_{mi}$ ), las áreas de deshielo aportantes (A), las producciones específicas (P.E.) y las precipitaciones medias anuales (Pp. Media) de cada estación fluviométrica incluida en el análisis regional, se muestran en la Tabla 4.10, Tabla 4.11 y Tabla 4.12, para los escenarios U30, U40 y U50, respectivamente.

**Tabla 4.10. Análisis regional. Escenario U30.**

N°	Cuenca	Área Deshielo (km <sup>2</sup> )	Tr = 10 años		Tr = 1.000 años		Pp. Media (mm)
			Qmi (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Qmi (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	
1	ML	1.567	794	0,51	1.756	1,12	2.000
2	CI(DLM-MLB)	774	260	0,34	507	0,66	1.850
3	GG	874	369	0,42	777	0,89	2.300
4	PJM	280	135	0,48	291	1,04	2.000
5	CSC	264	111	0,42	328	1,24	s/i
6	CJM	134	60	0,45	118	0,88	1.900
7	VEVL (*)	62	45	0,73	105	1,69	1.800
8	QEC (*)	52	27	0,52	63	1,21	1.700
9	QTJM (*)	15	9,8	0,65	19,3	1,29	1.800

**Tabla 4.11. Análisis regional. Escenario U40.**

N°	Cuenca	Área Deshielo (km <sup>2</sup> )	Tr = 10 años		Tr = 1.000 años		Pp. Media (mm)
			Qmi (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Qmi (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	
1	ML	1.567	800	0,51	1.743	1,11	2.000
2	CI(DLM-MLB)	774	263	0,34	504	0,65	1.850
3	GG	874	391	0,45	822	0,94	2.300
4	PJM	280	143	0,51	308	1,10	2.000
5	CSC	264	119	0,45	354	1,34	s/i
6	CJM	134	63	0,47	121	0,90	1.900
7	VEVL (*)	62	45	0,73	105	1,69	1.800
8	QEC (*)	52	27	0,52	63	1,21	1.700
9	TJM (*)	15	9,8	0,65	19,3	1,29	1.800

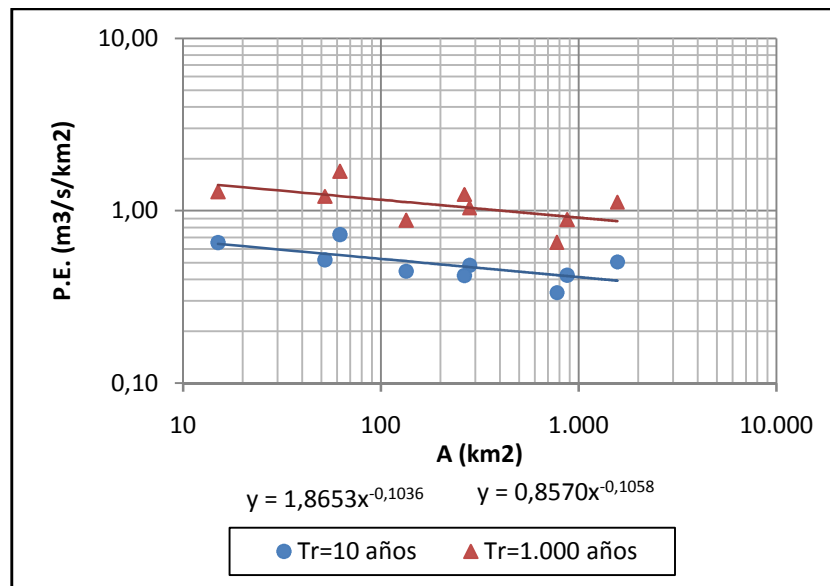


**Tabla 4.12. Análisis regional. Escenario U50.**

N°	Cuenca	Área Deshielo (km <sup>2</sup> )	Tr = 10 años		Tr = 1.000 años		Pp. Media (mm)
			Qmi (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Qmi (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	
1	ML	1.567	776	0,50	1.697	1,08	2.000
2	CI(DLM-MLB)	774	263	0,34	500	0,65	1.850
3	GG	874	402	0,46	868	0,99	2.300
4	P JM	280	149	0,53	327	1,17	2.000
5	CSC	264	129	0,49	350	1,33	
6	CJM	134	63	0,47	121	0,90	1.900
7	VEVL (*)	62	45	0,73	105	1,69	1.800
8	QEC (*)	52	27	0,52	63	1,21	1.700
9	TJM (*)	15	9,8	0,65	19,3	1,29	1.800

Luego, relacionando las áreas de deshielo con las producciones específicas de las nueve estaciones utilizadas en el análisis (Tabla 4.7), se han trazados líneas de tendencia para períodos de retorno de 10 y 1.000 años.

A continuación se muestran los gráficos Producción Específica (P.E.) versus Área de Deshielo (A), para los tres escenarios temporales definidos para el análisis regional.



**Figura 4.4. Relación entre P.E. en crecidas de deshielo y Área de deshielo colaborante. Escenario U30.**

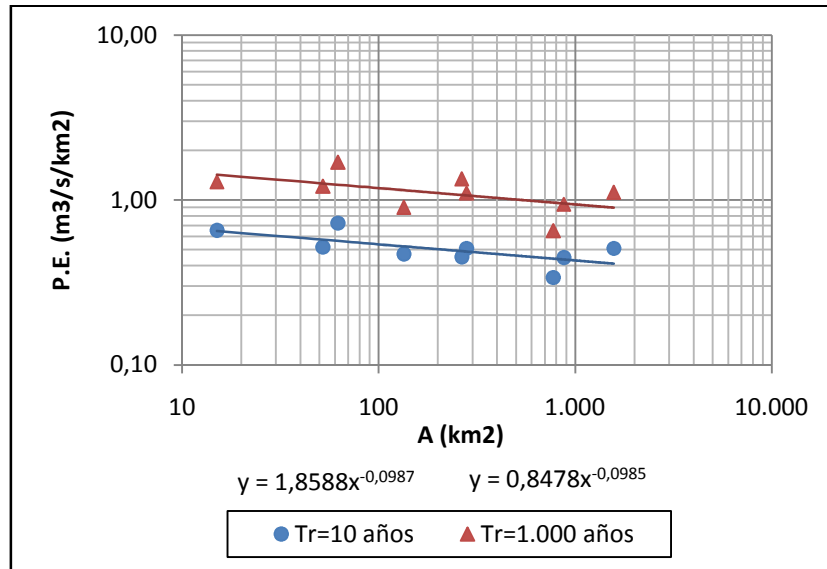


Figura 4.5. Relación entre P.E. en crecidas de deshielo y Área de deshielo colaborante. Escenario U40.

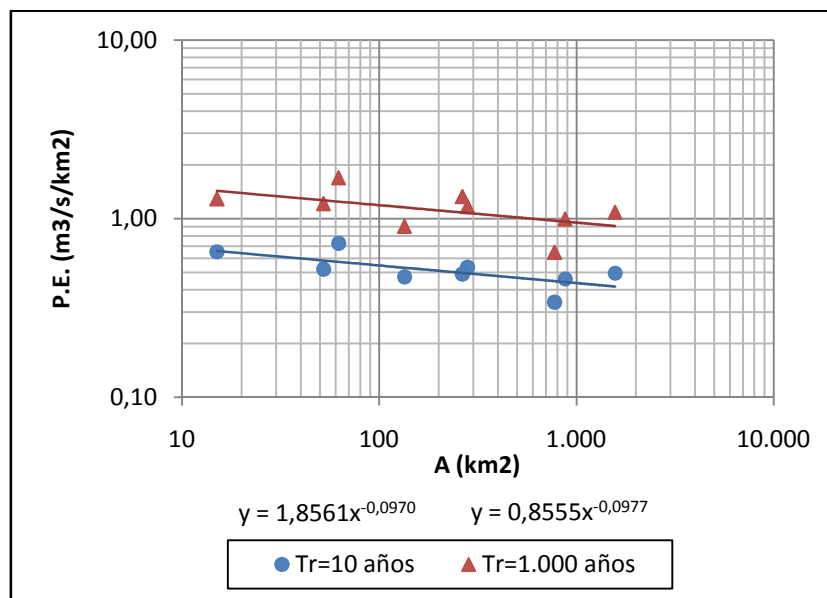


Figura 4.6. Relación entre P.E. en crecidas de deshielo y Área de deshielo colaborante. Escenario U50.

Finalmente, para obtener el caudal de crecida para una cuenca determinada, en particular para la afluyente a la presa de la Laguna del Maule, se obtiene la producción específica en función del área de deshielo aportante, y por lo tanto, el caudal de crecida mediante la ecuación (4.1).

#### 4.4.4 Resultados

La estimación del caudal de crecida afluyente a la presa de la laguna del Maule (AFLM) se realizó utilizando la metodología descrita en el punto anterior, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 4.13, para los tres escenarios temporales definidos.

**Tabla 4.13. Caudales de crecida en AFLM.**

Cuenca	Área Deshielo (km <sup>2</sup> )	Tr = 10 (años)		Tr = 1.000 (años)	
		Qmi (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Qmi (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )
AFLM (U30)	307 (*)	144	0,47	316	1,03
AFLM (U40)		148	0,48	324	1,06
AFLM (U50)		150	0,49	327	1,06

(\*) Área establecida en el presente estudio, y que será utilizada para corregir los datos de la Tabla 4.4 (ENDESA, 1980).

Utilizando los Qmi de la Tabla 4.13, con períodos de retorno de 10 y 1.000 años, se ha extendido la estimación para caudales con otras probabilidades de excedencia, graficando estos puntos y trazando una recta en un papel Gumbel. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.14.

**Tabla 4.14. Qmi esperados (m<sup>3</sup>/s). Afluentes a presa de laguna del Maule (AFLM).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
AFLM(OR)	108	135	165	200	225	250	280	315
AFLM(U30)	116	144	171	205	231	256	290	316
AFLM(U40)	120	148	175	210	237	263	298	324
AFLM(U50)	121	150	177	213	239	266	301	327

La Figura 4.7 muestra la curva de probabilidad de excedencia de los caudales máximos instantáneos de deshielo, afluentes a la presa de la Laguna del Maule, para todo el rango de períodos de retorno.

#### 4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Antecedentes como la altitud de la cuenca, precipitaciones en forma de nieve durante gran parte de la temporada invernal y registros aguas abajo del desagüe de la laguna del Maule, permiten concluir que las crecidas predominantes en este sector, son de origen glacial o deshielo.

Tras la actualización del análisis regional para la estimación de crecidas nivales, utilizando la metodología propuesta por ENDESA (1980), se observa una disminución de los caudales máximos instantáneos al utilizar sólo los registros más recientes. En efecto, pueden ordenarse en forma decreciente los tres escenarios temporales definidos:  $AFLM(U50) > AFLM(U40) > AFLM(U30)$ ; siendo esta última relación válida para  $Q_{mi}$  con altos y bajos períodos de retorno.

Al comparar los resultados del presente estudio con los de ENDESA (1980), se obtienen resultados que muestran caudales máximos instantáneos levemente mayores a los del estudio original, en los tres escenarios temporales definidos, tal como se observa en la Figura 4.7. Sin embargo, la principal razón de este resultado, corresponde a que en el estudio original se consideró un área de deshielo colaborante de un 7% menor a la calculada en el presente estudio, por lo que si se corrige esta área, los caudales estimados para los tres escenarios temporales quedarían bajo los valores corregidos de ENDESA (1980).

Basado en los resultados del análisis regional, donde se incluyen estaciones ubicadas en cuencas nivales con al menos 50 años de registro, se puede inferir que existe una ligera disminución en la magnitud de las crecidas de origen nival.

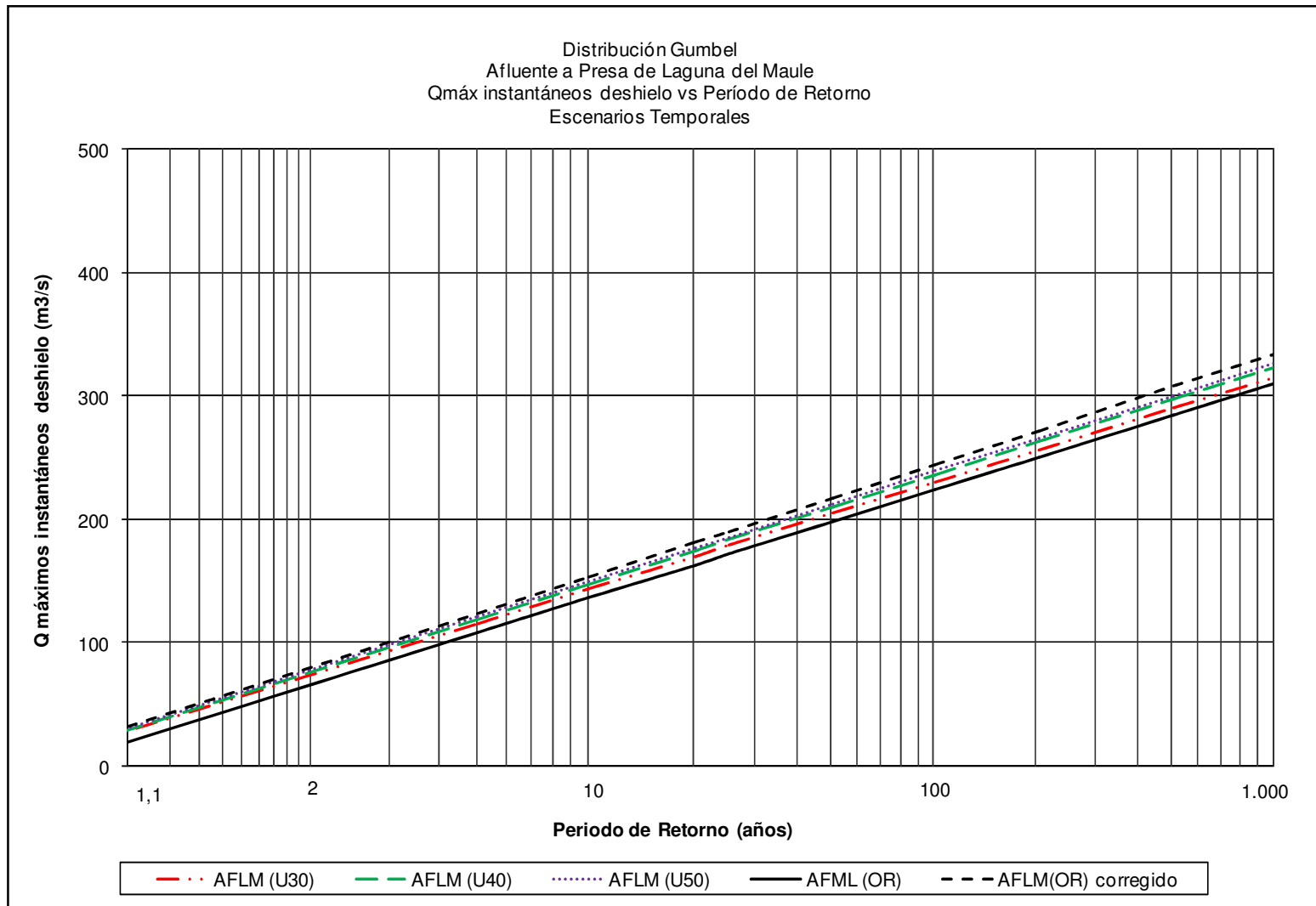


Figura 4.7. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en AFLM.

## CAPÍTULO V

### PRESA DE LAGUNA INVERNADA

#### 5.1 DESCRIPCIÓN DE LA PRESA DE LAGUNA INVERNADA

La Central Cipreses aprovecha las aguas del río del mismo nombre, afluente del Maule que nace de la laguna Invernada, la cual sirve como embalse de regulación. Una fotografía de la laguna se presenta en la Figura 5.1.



**Figura 5.1. Fotografía Laguna La Invernada. Fuente: [www.panoramio.com](http://www.panoramio.com)**

El material del tranque natural de lava que formó la laguna es permeable y, a pesar de estar parcialmente colmatado por la piedra pómez que arrastran los ríos, una parte importante del gasto afluente a la laguna se filtra a través de dicho tranque. En el sitio denominado Ojos de Agua, ubicado unos 6 km aguas debajo de la laguna, aparecen numerosas filtraciones, las que en su conjunto

ascienden a 11 m<sup>3</sup>/s, valor que permanece prácticamente constante a lo largo del año. Por otra parte, el resto del afluente a la laguna, que representa un caudal medio anual de 25,5 m<sup>3</sup>/s, que rebalsa sobre el tranque de lava, constituyendo la parte del caudal del río que es aprovechable actualmente por la Central Cipreses para la producción de energía eléctrica.

La capacidad de embalse de la laguna se ha aumentado con una presa de tierra ubicada en el desagüe de ésta, que está constituido por una garganta de poca profundidad labrada por el río Cipreses.

La longitud de esta presa es de 350 m, con una altura máxima sobre el fondo del río de 28 m. El ancho de coronamiento es de 10 m, con taludes 4/1 aguas arriba y 3/1 aguas abajo. La cota de coronamiento es la de 1.320,5 msnm.

La parte central del tranque está formada por un grueso núcleo de arena. Inmediatamente aguas arriba se ha ubicado la zona impermeable de arcilla, encima de la cual va una delgada capa de arena y finalmente una gruesa capa de enrocado. Aguas abajo del núcleo central se ha dispuesto también una capa de enrocado.

Para la evacuación de las crecidas afluentes a la laguna se tiene un dispositivo combinado de vertedero y compuerta, capaz de extraer un caudal de 400 m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>. Consta de un vertedero de 53 m de longitud a la cota 1.316 msnm y una compuerta de 3,5 m de ancho por 3 m de alto, cuyo radier coincide con el canal colector del vertedero. A continuación se desarrolla un rápido que conduce las aguas al lecho del río, donde se ha proyectado un dispositivo para evitar la socavación al pie de la obra.

Un esquema referencial del vertedero de rebalse de la laguna Invernada se presenta en la Figura A.3 (Anexo A).

## 5.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE A LAGUNA INVERNADA

El valle del río Cipreses tuvo en épocas pasadas una profundidad mucho mayor que la actual, siendo rellenado posteriormente por aluviones. En épocas recientes, la lava del volcán Los Hornos cerró el valle con un tranque natural de alrededor de 100 m de altura, detrás del cual se ha formado la laguna de La Invernada.

---

<sup>2</sup> ENDESA (1955) no indica el período de retorno asociado al caudal de diseño de la presa de laguna Invernada.

La laguna tenía una superficie de 3,4 km<sup>2</sup>, medida con el agua a la cota 1.300 m sobre el nivel del mar, que era el nivel normal antes de la construcción de la Central, y cuya hoya hidrográfica aproximada es de 860 km<sup>2</sup> (incluyendo la hoya de la propia laguna).

El régimen hidrológico de estos ríos es preponderantemente glacial, con crecidas de deshielo en primavera y verano, y con un pequeño aumento del caudal en invierno, provocado por las lluvias.

En la Figura 5.2, se muestra la delimitación de la cuenca afluyente a la laguna Invernada, en la zona de presa, cuyos datos de ubicación se muestran en la Tabla 5.1.

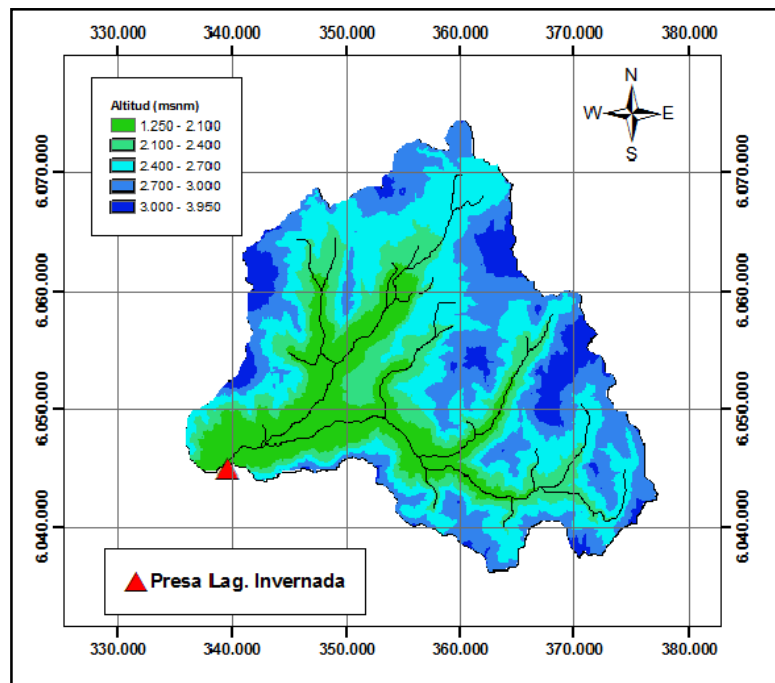


Figura 5.2. Cuenca afluyente a la presa de la Laguna Invernada.

Tabla 5.1. Ubicación de la presa de laguna Invernada.

Obra	UTM		Coordenadas Geográficas	
	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Latitud Sur (°)	Longitud Oeste (°)
Presía Lag. Invernada	339.520	6.045.070	35° 43' 29"	70° 46' 27"



Los principales parámetros geomorfológicos de la cuenca afluente a la presa de la Laguna Invernada, se muestran en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2. Parámetros de la cuenca definida por la presa de la laguna Invernada.**

Parámetro de la cuenca	Presa Laguna Invernada
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	862
Pendiente media de la cuenca (m/m)	0,334
Largo de la cuenca (km)	56,0
Pendiente media del cauce principal (m/m)	0,028
Longitud del cauce principal (km)	48,8
Altura media de la cuenca (m.s.n.m.)	2.469

### 5.3 REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDA DE LAGUNA INVERNADA

#### 5.3.1 Introducción

Una de las obras hidráulicas analizadas en el presente trabajo, que cuenta con la menor cantidad de información hidrológica disponible, es precisamente la presa de la laguna Invernada.

En efecto, luego de visitar distintas entidades (biblioteca de la Universidad de Chile, DGA, DOH, etc. ) sólo fue posible obtener antecedentes desde la referencia ENDESA (1982), donde es posible conocer una estimación de los caudales afluentes a la laguna Invernada basada en información posterior a la construcción de la presa, en el periodo 1959/60 – 1980/81.

Debido a su ubicación en la zona del Maule Alto, las principales crecidas ocurren debido al proceso de deshielo.

#### 5.3.2 Registros utilizados

En el Anexo B (Tabla B.2), se presentan los caudales máximos medios diarios afluentes a la laguna Invernada para el período comprendido entre los años 1959/60 – 1980/81 (ENDESA, 1982). Se observa que la totalidad de los caudales máximos se registran en los meses de noviembre y diciembre, es decir, corresponden a eventos asociados a deshielo.

### 5.3.3 Metodología

Luego de la construcción de la presa de la Laguna Invernada, se tuvo control limnimétrico de las aguas embalsadas. De esta manera, fue posible observar la variación diaria de la cota de agua, la que junto a la curva de embalse, permite estimar los caudales medios diarios afluentes a la laguna.

Utilizando la serie de caudales medios diarios máximos anuales (deshielo), correspondiente a una estadística de 22 años, se realizó un análisis de frecuencia, extrapolarlo gráficamente la tendencia para periodos de retorno más altos.

En forma teórica, se estableció que los caudales máximos instantáneos pueden ser estimados como un 20% mayor a los caudales medios diarios, es decir:

$$Q_{mi}(AFLI) = 1,20 \cdot Q_{md}(AFLI) \quad (5.1)$$

Donde:

$Q_{mi}(AFLI)$  : Caudal máximo instantáneo afluente a Laguna Invernada ( $m^3/s$ )

$Q_{md}(AFLI)$  : Caudal medio diario afluente a Laguna Invernada ( $m^3/s$ )

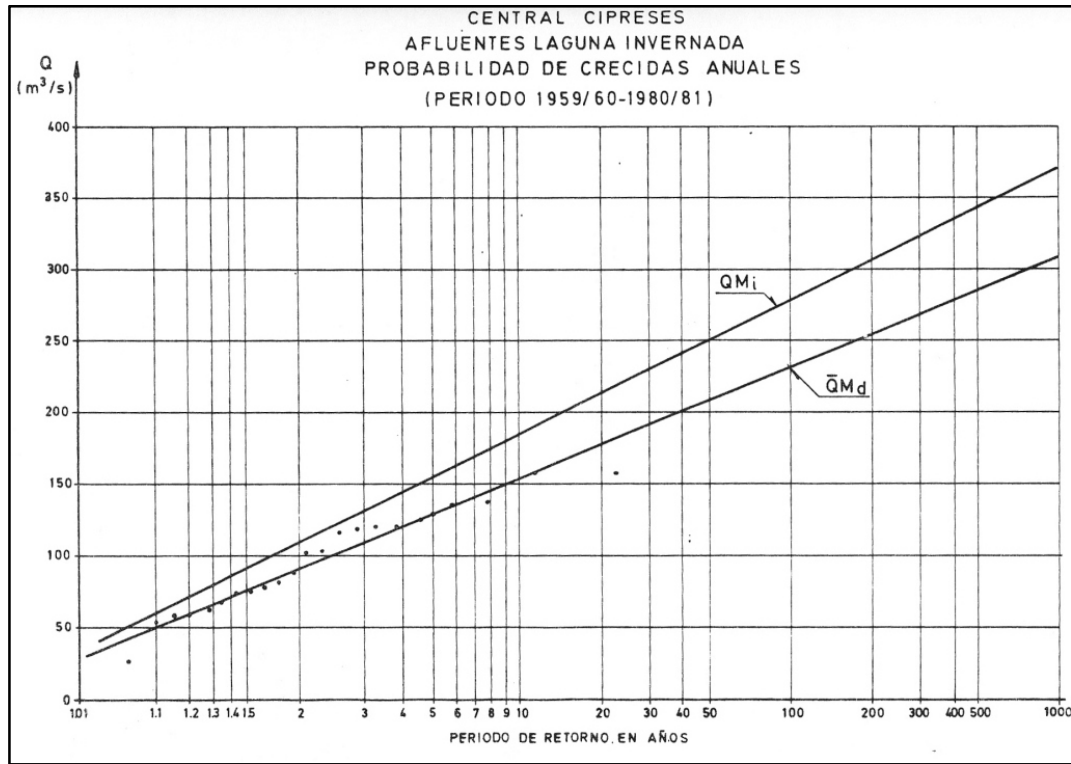
### 5.3.4 Resultados

Los valores de los caudales afluentes a la laguna Invernada, para distintos períodos de retorno, se muestran en la Tabla 5.3.

En el Anexo B, se muestran las curvas para todos los períodos de retorno.

**Tabla 5.3. Qmd y Qmi, afluentes a laguna Invernada, (ENDESA, 1982).**

TR (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
Qmd ( $m^3/s$ )	129	154	178	209	232	255	286	309
Qmi ( $m^3/s$ )	155	185	214	251	278	306	343	371



**Figura 5.3. Curva de probabilidad de excedencia de  $Q_{m_d}$  y  $Q_{m_i}$ , afluentes a laguna Invernada, (ENDESA, 1982).**

#### 5.4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES A LAGUNA INVERNADA, PARA DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES

##### 5.4.1 Introducción

Ante la falta de información fluviométrica que permitiese estimar las crecidas afluentes a la laguna Invernada en forma directa, se utilizaron los resultados del análisis regional del Capítulo IV, considerando la importante componente nival de la superficie colaborante hasta el punto de salida de la cuenca, donde se ubica la zona de presa.

Se han definido escenarios temporales que utilizan los últimos 30, 40 y 50 años de estadística. En la Tabla 5.4, se muestra la nomenclatura utilizada para cada uno de los escenarios temporales definidos para este estudio, donde AFLI( $U_x$ ) corresponde a la estimación de los caudales máximos instantáneos en afluentes a la presa ubicada en el desagüe de la laguna Invernada, utilizando los últimos “x” años de estadística.

**Tabla 5.4. Escenarios definidos para la zona de presa de laguna Invernada.**

Escenarios	Descripción		
	Lugar	N° de datos	Período del registro
AFLM(U30)	Zona de Presa de Laguna Invernada	30	1980/81 - 2009/10
AFLM(U40)		40	1970/71 - 2009/10
AFLM(U50)		50	1960/61 - 2009/10

#### 5.4.2 Registros utilizados

Los registros utilizados para la estimación de los caudales máximos instantáneos afluentes a la presa de la laguna Invernada, consisten en Qmi de origen nival de un conjunto de estaciones del Maule Alto, utilizados en el análisis regional que puede ser revisado en el punto 4.4.2 de este estudio.

#### 5.4.3 Metodología

La metodología utilizada corresponde a la estimación de los caudales máximos instantáneos debido a los deshielos, mediante el análisis regional que puede ser revisado en el punto 4.4.3 de este estudio.

#### 5.4.4 Resultados

En la Tabla 5.5, se señalan las estimaciones de Qmi afluentes a la laguna Invernada, para los períodos de retorno de 10 y 1.000 años, en los tres escenarios temporales definidos para esta obra.

**Tabla 5.5. Qmi esperados. Afluentes a presa de laguna Invernada (AFLI).**

Cuenca	Área Deshielo (km <sup>2</sup> )	Tr = 10 (años)		Tr = 1.000 (años)	
		Qmi (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Qmi (m <sup>3</sup> /s)	P.E. (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )
AFLI (U30)	796	336	0,42	743	0,93
AFLI (U40)		350	0,44	765	0,96
AFLI (U50)		355	0,45	773	0,97

Luego, utilizando los caudales de período de retorno 10 y 1.000 años, se ha extendidos la estimación para otras probabilidades de excedencia, graficando y trazando una recta en papel Gumbel. Estos resultados se muestran en la Tabla 5.6, mientras que en la Figura 5.4 se presenta la curva de caudal máximos instantáneo para distintos períodos de retorno.

**Tabla 5.6. Qmi esperados. Afluentes a presa de laguna Invernada (AFLI).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
AFLI(OR)	155	185	214	251	279	306	343	371
AFLI(U30)	270	336	399	480	541	602	682	743
AFLI(U40)	283	350	414	497	559	621	703	765
AFLI(U50)	288	355	420	503	566	628	711	773

## 5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las estimaciones realizadas a partir del análisis regional, entregan valores bastante más altos en comparación a aquellos que se tienen como antecedentes (ENDESA, 1982).

Estas diferencias pueden explicarse por la disimilitud de metodologías utilizadas para determinar los caudales máximos instantáneos afluentes a la presa de la laguna Invernada. Mientras en ENDESA (1982) las estimaciones se realizan a partir de un balance entre afluentes, efluentes y cambios de nivel de la laguna, en el presente trabajo se han utilizado los resultados del análisis regional utilizado para la estimación de caudales máximos instantáneos afluentes a la presa de la laguna del Maule (revisar numeral 4.4), para crecidas de origen nival.

El análisis regional aplicado a la estimación caudales afluentes a la laguna Invernada, cuyo parámetro de entrada es la superficie de deshielo aportante, entrega resultados en la misma dirección que los caudales afluentes a la laguna del Maule, donde se observa que los caudales máximos instantáneos de los tres escenarios temporales definidos para el estudio son prácticamente iguales, apreciándose una pequeña tendencia a la baja cuando se trata de escenarios que utilizan sólo los últimos años de la estadística disponible, es decir,  $AFLI(U50) > AFLI(U40) > AFLI(U30)$ .

Ante la apreciable diferencia entre los resultados obtenidos en el presente estudio en comparación a los de ENDESA (1982), se intentó estimar caudales afluentes a la laguna Invernada utilizando información sobre caudales en el desagüe de la laguna y la variación de los niveles, ambos a nivel horario, disponible a partir del año 2002 a través de datos del BNA de la DGA. Sin embargo,

no fue posible obtener resultados consistentes, debido a la poca cantidad de años con estadística y a la dificultad de realizar un balance en la laguna a nivel horario.

Distribución Gumbel  
 Afluente a Presa de Laguna Invernada  
 Q<sub>máx</sub> instantáneos deshielo vs Período de Retorno  
 Escenarios Temporales

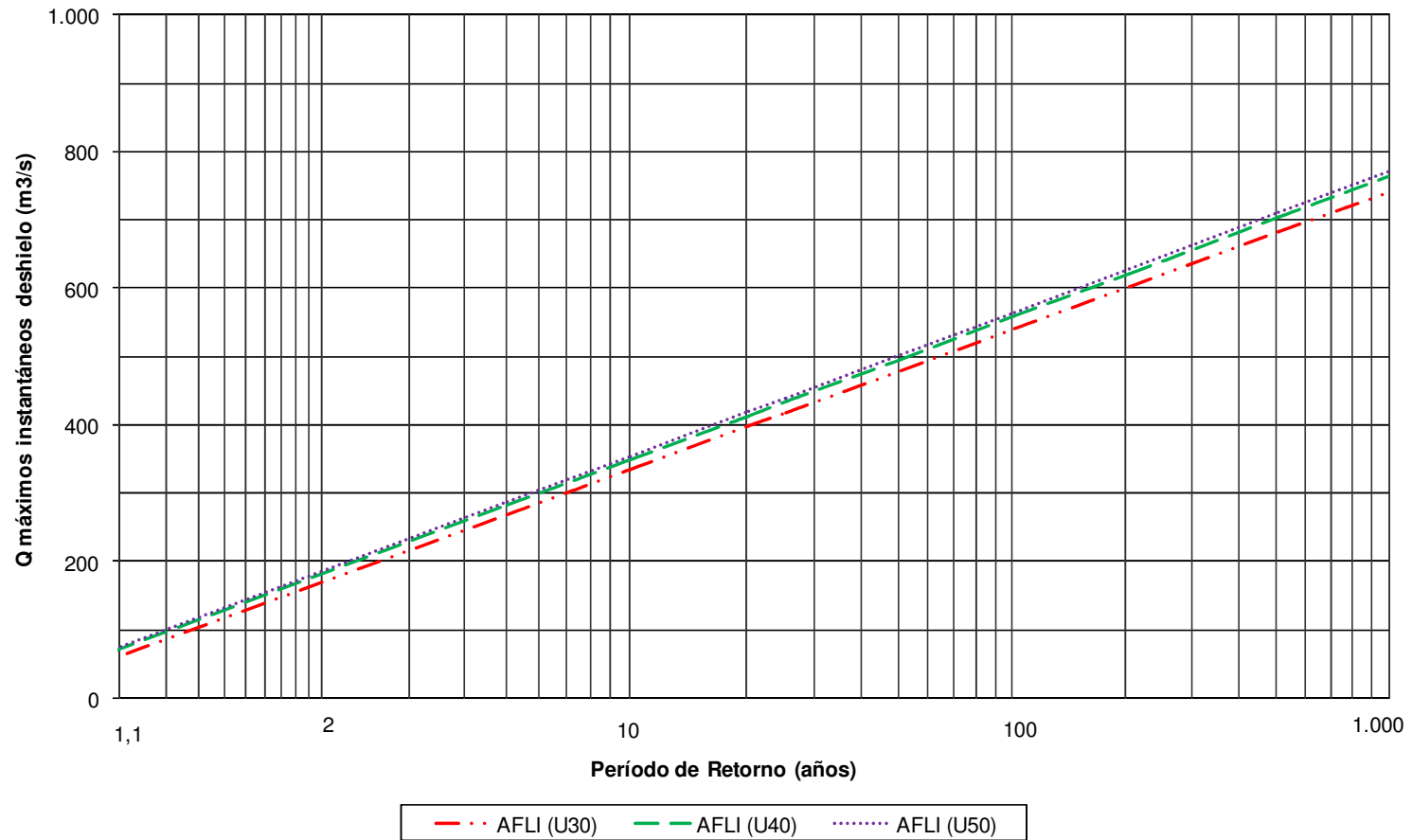


Figura 5.4. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en AFLI.

## **CAPÍTULO VI**

### **BOCATOMA MAULE DE CENTRAL ISLA**

#### **6.1 DESCRIPCIÓN DE BOCATOMA MAULE DE CENTRAL ISLA**

La central hidroeléctrica Isla utiliza los recursos hídricos de los ríos Cipreses y Maule, captando las aguas por medio de dos aducciones separadas, que convergen en un túnel y chimenea de equilibrio comunes.

Las aguas del río Cipreses, son captadas desde el desagüe de la central Cipreses, lugar en donde existe además una bocatoma adicional que permite hacer uso de las filtraciones de la laguna Invernada, que escurren por el lecho del río. Debido a que esta captación de la central Isla recibe principalmente las aguas ya generadas por la central Cipreses, las obras asociadas a este brazo de la aducción no se encuentran afectadas a crecidas importantes, y por tanto, no será analizada en este trabajo.

Por otra parte, se analizará la bocatoma Maule que capta las aguas del río Maule, las cuales provienen de la laguna del Maule junto con la producción que se genera en la cuenca intermedia entre el desagüe de la laguna y el punto de captación.

Esta bocatoma está ubicada en una angostura rocosa del río Maule, 5,5 km aguas arriba del punto de afluencia del río Cipreses y consiste en una barrera que peralta el río frente a la captación de la misma. Esta barrera de tipo móvil, formada por tres compuertas de segmento de 9,60 m de luz y 4,50 m de altura de remanso y una desripadora de 3,60 m de luz y 5,30 m de altura, que permite evacuar las crecidas y eliminar de la bocatoma el arrastre sólido que lleva el río.

El caudal de diseño de la bocatoma es de 1.500 m<sup>3</sup>/s, la cual se ha estimado durante los estudios de diseño de la central que comienzan en el año 1953. La central se pone en marcha a principios de 1963 (ENDESA, 1965)<sup>3</sup>.

Un esquema referencial de la bocatoma Maule de la central Isla (en planta) se presenta en la Figura A.4, mientras que en la Figura A.5 se muestra un corte transversal en la sección de compuertas (ver Anexo A).

---

<sup>3</sup> ENDESA (1965) no indica el período de retorno asociado al caudal de diseño.



## 6.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE A B.T. MAULE DE C. ISLA

La bocatoma Maule de la central Isla se ubica en la cuenca del río Maule, donde este último capta las aguas de numerosos ríos y quebradas cordilleranas de la parte alta.

La captación Maule de la Central Isla se encuentra a unos 5 km aguas abajo de la confluencia entre el río tributario Puelche y el río Maule, donde ya ha recibido los aportes del río Campanario y numerosos esteros y quebradas.

La estructura de la vegetación corresponde a matorrales que dan cuenta de una permanente perturbación en las laderas del río, debido a actividades antropogénicas como explotación de madera y carbón desde los bosques originales.

La Figura 6.1 muestra la cuenca definida por su punto de salida, correspondiente a la captación Maule de la Central Hidroeléctrica Isla.

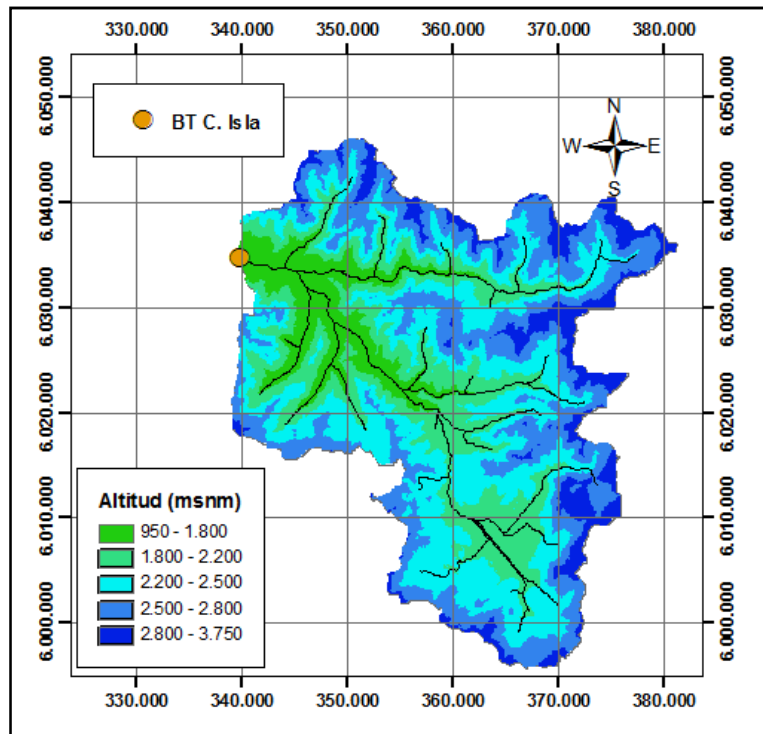


Figura 6.1. Cuenca afluyente a bocatoma Maule de central Isla.

Esta obra hidráulica se ubica en las coordenadas señaladas en la Tabla 6.1, mientras que los principales parámetros geomorfológicos de la cuenca se señalan en la Tabla 6.2.

**Tabla 6.1. Ubicación de la bocatoma Maule de central Isla**

Obra	UTM		Coordenadas Geográficas	
	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Latitud Sur (°)	Longitud Oeste (°)
Bocatoma Maule. Central Isla	339.810	6.034.780	35° 40' 03"	70° 46' 23"

**Tabla 6.2. Parámetros de la cuenca definida por la bocatoma Maule de central Isla.**

Parámetro de la cuenca	Bocatoma Central Isla
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	1.186
Pendiente media de la cuenca (m/m)	0,355
Largo de la cuenca (km)	62,3
Pendiente media del cauce principal (m/m)	0,035
Longitud del cauce principal (km)	57,6
Altura media de la cuenca (m.s.n.m.)	2.326

### 6.3 REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDA DE CENTRAL ISLA

#### 6.3.1 Introducción

Al igual que la central hidroeléctrica Cipreses, la central Isla es una de los proyectos hidroeléctricos más antiguos presentes en la cuenca alta del río Maule. Debido a esto, sólo existe información parcial, sobre el diseño de sus obras hidráulicas.

En particular, sólo fue posible encontrar información hidrológica asociada a la obra, en la referencia (ENDESA, 1982). En ella, es posible encontrar algunos resultados de los caudales afluentes a la bocatoma Maule de la central Isla, en base a registros posteriores a la construcción de esta captación, en un período que comienza en la temporada 1958/59 hasta la fecha del estudio mencionado anteriormente.

### 6.3.2 Registros utilizados

Se utiliza información perteneciente al informe (ENDESA, 1982), donde se muestra una estadística de caudales generados en la cuenca intermedia entre la Laguna del Maule y la bocatoma Maule de la Central Isla, de 24 años (1958/59-1980/81) para los periodos pluviales y de deshielo (Anexo, Tabla A.2).

Por otra parte, se menciona que los caudales afluentes a la laguna del Maule, fueron estimados en un informe técnico, (ENDESA, 1980), de acuerdo a una curva teórica obtenida mediante un análisis regional de crecidas de deshielo.

### 6.3.3 Metodología

De acuerdo a la revisión de antecedentes, el sector donde se ubica la bocatoma Maule de la central Isla, debido a su altitud, se ve afectada tanto por crecidas pluviales como de deshielo.

La laguna del Maule, que se encuentra aguas arriba de la captación, ejerce un efecto regulador sobre las crecidas. De acuerdo a esto, el caudal afluente a la bocatoma Maule de la central Isla, puede determinarse a partir de la ecuación (6.1), según ENDESA (1982).

$$Q_{mi}(BTMCI) = Q_{mi}(DLM) + Q_{mi} CI(DLM - BTMCI) \quad (6.1)$$

Donde:

- $Q_{mi}(BTMCI)$  : Caudal máximo instantáneo en Bocatoma Maule de central Isla ( $m^3/s$ )
- $Q_{mi}(DLM)$  : Caudal máximo instantáneo en desagüe de laguna del Maule ( $m^3/s$ )
- $Q_{mi} CI(MLB - DLM)$  : Caudal máximo instantáneo de la cuenca intermedia entre BTMCI y DLM ( $m^3/s$ )

A pesar del efecto regulador expresado en la ecuación (6.1), en el estudio (ENDESA, 1982), el término  $Q_{mi}(DLM)$  ha sido reemplazado por  $Q_{mi}(AFLM)$  que representa los caudales máximos instantáneos afluentes a la Laguna del Maule. De esta manera se obtiene un resultado que desprecia el efecto amortiguador, obteniéndose estimaciones más conservadoras para fines de diseño.

#### 6.3.4 Resultados

Los caudales de crecida afluentes a la Laguna del Maule, para distintos períodos de retorno, según ENDESA (1982), se muestran en la Tabla 6.3

**Tabla 6.3. Qmd y Qmi esperados, afluentes a Laguna del Maule (ENDESA, 1982)**

TR (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
Qmi (m <sup>3</sup> /s)	105	135	165	200	225	250	280	315

Por otra parte, el ajuste Gumbel de los caudales observados para la cuenca intermedia entre la Laguna del Maule y la bocatoma Maule de la central Isla, entrega los siguientes resultados:

**Tabla 6.4. Qmd y Qmi esperados, C.I. entre la laguna del Maule y bocatoma de central Isla. Período pluvial (ENDESA, 1982).**

TR (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
Qmd (m <sup>3</sup> /s)	126	159	190	231	261	291	331	361
Qmi (m <sup>3</sup> /s)	186	236	283	345	391	437	497	543

**Tabla 6.5. Qmd y Qmi esperados, C.I. entre la laguna del Maule y bocatoma de central Isla. Período deshielo (ENDESA, 1982).**

TR (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
Qmd (m <sup>3</sup> /s)	194	230	266	312	346	380	425	460
Qmi (m <sup>3</sup> /s)	234	275	315	367	406	445	496	534

Las curvas de probabilidad para todos los períodos de retorno, en las temporadas pluviales y de deshielo, se muestran en la Figura 6.2 y Figura 6.3, respectivamente.

Se desprende de los resultados anteriores, que un caudal milenario atribuido al sector de la bocatoma Maule de la central Isla, tendría un valor cercano a los 860 m<sup>3</sup>/s (despreciando el efecto regulador de la laguna del Maule y el efecto regulador del río).

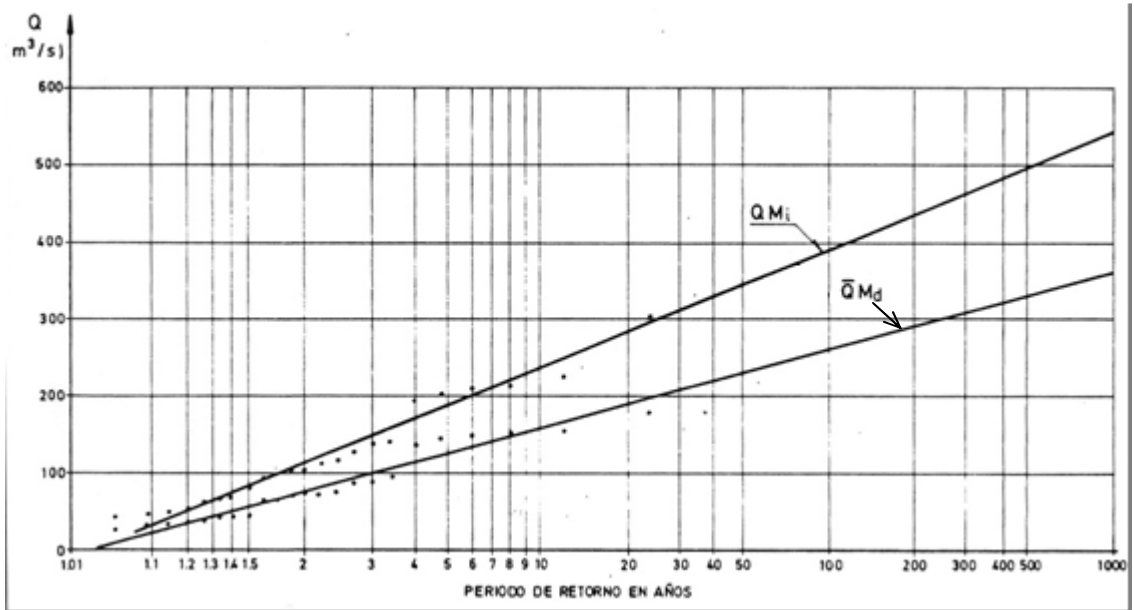


Figura 6.2. Cuenca intermedia entre laguna del Maule y bocatoma C. Isla. Probabilidad de las crecidas del período pluvial (abril - septiembre), período 1958 - 1981, (ENDESA, 1982).

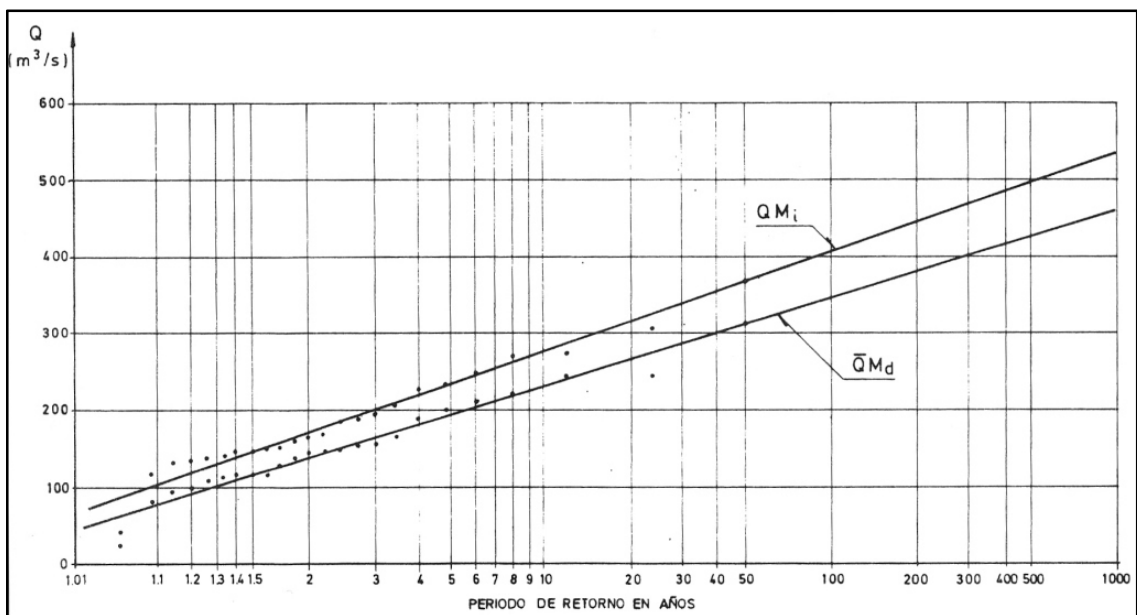


Figura 6.3. Cuenca intermedia entre laguna del Maule y bocatoma C. Isla. Probabilidad de las crecidas del período de deshielo (octubre - marzo), período 1958 - 1981, (ENDESA, 1982).

## 6.4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES A B.T. MAULE DE C. ISLA, PARA DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES

### 6.4.1 Introducción

De acuerdo a lo señalado en el punto 6.3.1, no existe suficiente confiabilidad en los datos recopilados sobre los registros hidrológicos y metodología utilizada para la estimación del caudal de diseño de la captación Maule de la Central Isla, debido principalmente a la antigüedad de su construcción.

Sin embargo, luego de la puesta en marcha de la central Isla, fue instalada una estación fluviométrica en el río Maule justo antes de la bocatoma que alimenta a la central desde este cauce. La estación señalada se denomina Maule en Los Baños, y ha registrado el caudal en ese punto desde el año 1958 a la fecha.

Por lo tanto, la estimación de los caudales de crecida, afluentes a la bocatoma Maule de la central Isla, hoy puede ser calculada en forma directa utilizando la estadística de la estación Maule en Los Baños.

Para el análisis, han sido definido escenarios que consideran los últimos 30, 40 y 50 últimos años de registro hidrológico. En la Tabla 6.6, se muestra la nomenclatura utilizada para cada uno de los escenarios temporales definidos para este estudio, donde BTMCI(Ux) corresponde a la estimación de caudales máximos instantáneos afluentes a la bocatoma Maule de la central Isla, utilizando los últimos “x” años de estadística.

**Tabla 6.6. Escenarios definidos para bocatoma Maule de central Isla.**

Escenarios	Descripción		
	Ubicación	Nº de datos	Período del registro
MLB(U30) / BTMCI(U30)	Maule en Los Baños / Bocatoma Maule de central Isla.	30	1980/81 - 2009/10
MLB(U40) / BTMCI(U40)		40	1970/71 - 2009/10
MLB(U50) / BTMCI(U50)		50	1960/61 - 2009/10

#### 6.4.2 Registros utilizados

Se han utilizado los registros de la estación fluviométrica Maule en Los Baños, los cuales son representativos de los afluentes a la captación Maule de la Central Isla.

La estación cuenta con la serie de Qmd a partir del año 1958 hasta la fecha de este estudio. En forma complementaria, se comenzó a registrar Qmi desde 1969 hasta la actualidad. La estación fue controlada por ENDESA hasta el 2002, año en que pasó a ser controlada por la DGA hasta la fecha del presente estudio.

De esta forma, es posible extender la serie de Qmi para un período comprendido entre los años 1958/59 – 2009/10, mediante la correlación con los Qmd de la misma estación, obteniendo las ecuaciones (6.2) y (6.3), para los períodos pluviales y de deshielo, respectivamente.

$$Q_{mi}^p (MLB) = 1,487 \cdot Q_{md}^p (MLB) \quad R^2 = 0,937 \quad (6.2)$$

Donde:

$Q_{mi}^p (MLB)$  : Caudal máximo instantáneo, en Maule en Los Baños, período pluvial ( $m^3/s$ )

$Q_{md}^p (MLB)$  : Caudal medio diario, en Maule en Los Baños, período pluvial ( $m^3/s$ )

$$Q_{mi}^d (MLB) = 1,258 \cdot Q_{md}^d (MLB) \quad R^2 = 0,873 \quad (6.3)$$

Donde:

$Q_{mi}^d (MLB)$  : Caudal máximo instantáneo, en Maule en Los Baños, período deshielo ( $m^3/s$ )

$Q_{md}^d (MLB)$  : Caudal medio diario, en Maule en Los Baños, período deshielo ( $m^3/s$ )

La información fluviométrica de la estación Maule en Los Baños ha sido analizada en detalle (revisar Anexo D), debido a datos anómalos registrados en dicha estación.

En el Anexo D se revisan registros, aforos y curvas de descargas asociados a la estación de Maule en Los Baños, corrigiendo en algunos casos, los datos entregados por la DGA a partir del año 2002, bajo los criterios que se analizan en el Anexo señalado.

### 6.4.3 Metodología

#### Análisis de datos

Las crecidas afluentes al punto de captación Maule de la central Isla, se alternan entre aquellas de origen pluvial y nival. En efecto, si se consideran los caudales máximos instantáneos anuales de los últimos 50 años de estadística, se observa que en el 56% de ellos corresponde a crecidas asociadas al deshielo entre los meses de octubre a marzo, mientras el 44% restante se debe a crecidas pluviales.

Considerando lo anterior, se ha graficado de la serie de Qmi de origen pluvial (Figura 6.4) y de deshielo (Figura 6.5), incluyendo los promedios móviles de período 10 y 30 años.

En la Figura 6.4, se observa la alta dispersión de los Qmi de origen pluvial, y un sostenido crecimiento de las magnitudes de éstos, donde destacan las crecidas en los inviernos de 1986 y 1991, donde los valores de caudales son consistentes con las mediciones realizadas en otras secciones del río Maule durante estas fechas. La gran variabilidad de los datos se refleja incluso en la media móvil de período 10 años. Sin embargo, es en la media móvil de 30 años, donde se aprecia claramente una tendencia al alza de los Qmi pluviales, promediando alrededor de 152 m<sup>3</sup>/s utilizando los primeros 30 años, y alrededor de 246 m<sup>3</sup>/s utilizando los últimos 30 años.

La Figura 6.5, muestra una serie con baja dispersión, muy uniforme a excepción de las crecidas de deshielo de los últimos años, ocurridas en 2005/2006 y 2009/2010. Se aprecia que tanto la media móvil de 10 años como la de 30 años, se presentan prácticamente inalteradas.

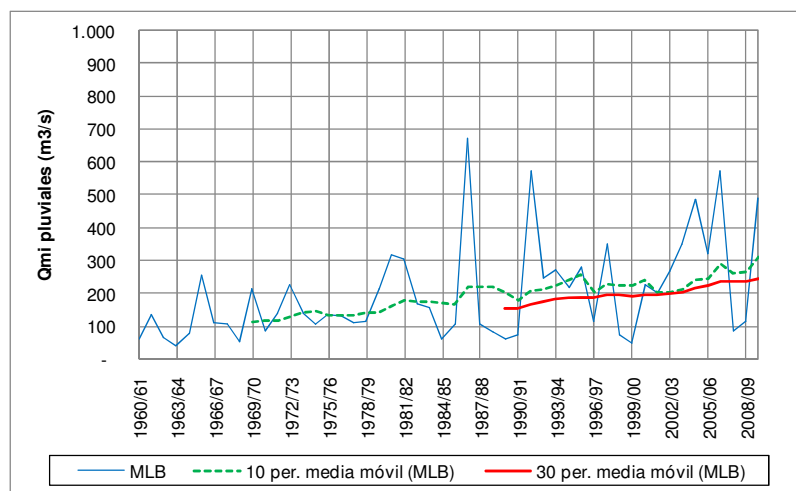
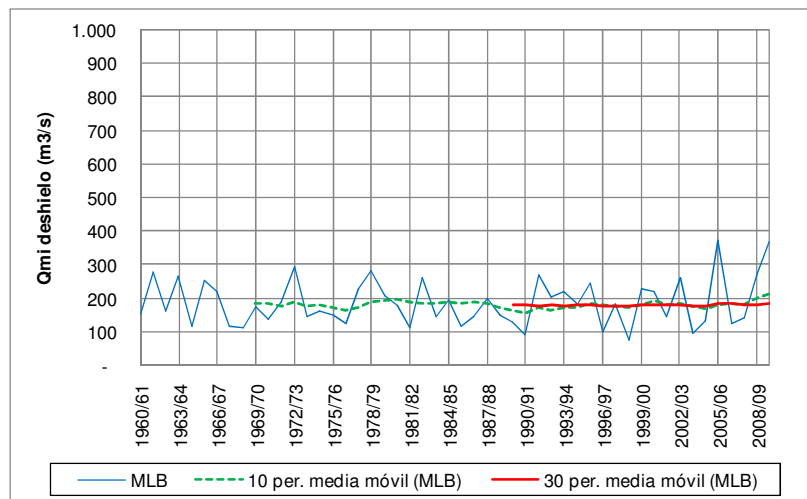


Figura 6.4. Serie de Qmi pluviales. Período 1960/61 - 2009/10. Maule en Los Baños (MLB).





**Figura 6.5. Serie de Qmi de deshielo. Período 1960/61 - 2009/10. Maule en Los Baños (MLB).**

En la Tabla 6.7 se señalan los principales parámetros estadísticos de la muestra de Q pluviales registrados en la estación MLB. En ella se observa que tanto la media aritmética como la desviación estándar aumentan al utilizar sólo la estadística con los años más recientes.

**Tabla 6.7. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (MLB). Período pluvial.**

Parámetro	MLB(U30)	MLB(U40)	MLB(U50)
Media	246	220	198
Desv. Estándar	172	157	150
Coef. de Asimetría	0,91	1,30	1,48

Por otra parte, se observa en la Tabla 6.8 que la media de la muestra es invariable en los tres escenarios temporales definidos, mientras que la desviación estándar decrece levemente al utilizar mayor cantidad de datos.

**Tabla 6.8. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (MLB). Período deshielo.**

Parámetro	MLB(U30)	MLB(U40)	MLB(U50)
Media	185	187	186
Desv. Estándar	76	72	69
Coef. de Asimetría	0,86	0,81	0,74

### Análisis de frecuencia

Se han realizado análisis de frecuencia considerando las muestras de datos correspondientes a los últimos 30, 40 y 50 años de estadística de la estación MLB, separando los eventos de crecidas, de acuerdo a su origen: pluvial o de deshielo.

### Ajuste de curvas

Los datos se han ajustado a distribuciones de probabilidad que han demostrado ajustarse bien a datos de variables extremas en hidrología: Normal, Log-Normal, Pearson tipo III, Log-Pearson y Gumbel.

Para seleccionar aquella distribución de probabilidad que logra un mejor grado de ajuste, se utilizó principalmente el método gráfico. En forma complementaria, se usó el *test chi cuadrado*, el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), y el cálculo del Error Cuadrático Medio (ECM).

Los valores del coeficiente  $R^2$  y del ECM, para los datos del período pluvial, se muestran en la Tabla 6.9 y Tabla 6.10, respectivamente.

**Tabla 6.9. Valores del coeficiente  $R^2$ , según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MLB. Período pluvial.**

Distribución	MLB(U30)	MLB(U40)	MLB(U50)
Normal	0,909	0,859	0,837
Log-Normal	0,959	0,979	0,981
Pearson III	0,969	0,969	0,971
Log-Pearson	0,968	0,975	0,976
Gumbel	0,971	0,955	0,946

**Tabla 6.10. Valores del ECM, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MLB. Período pluvial.**

Distribución	MLB(U30)	MLB(U40)	MLB(U50)
Normal	51,3	58,2	60,1
Log-Normal	35,2	27,7	26,0
Pearson III	33,3	30,4	28,0
Log-Pearson	31,4	27,2	24,8
Gumbel	29,2	33,3	34,8

Los valores del coeficiente  $R^2$  y del ECM, para los datos del período de deshielo, se muestran en la Tabla 6.11 y Tabla 6.12 respectivamente.

**Tabla 6.11. Valores del coeficiente R<sup>2</sup>, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MLB. Período deshielo.**

Distribución	MLB(U30)	MLB(U40)	MLB(U50)
Normal	0,934	0,944	0,947
Log-Normal	0,978	0,986	0,982
Pearson III	0,974	0,982	0,981
Log-Pearson	0,978	0,986	0,983
Gumbel	0,977	0,985	0,982

**Tabla 6.12. Valores del ECM, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MLB. Período deshielo.**

Distribución	MLB(U30)	MLB(U40)	MLB(U50)
Normal	19,6	17,0	15,9
Log-Normal	12,9	9,8	9,8
Pearson III	13,7	10,7	10,3
Log-Pearson	13,0	9,9	9,8
Gumbel	11,6	8,7	9,2

Para los datos de origen pluvial, de acuerdo a lo que se observa de los parámetros de ajuste (coeficiente R<sup>2</sup> y ECM), en el escenario MLB(U30) la función de distribución de probabilidad que logra un mejor ajuste es Gumbel. En tanto, en los escenarios MLB(U40) y MLB(U50) se logran mejores parámetros de ajuste para la función de distribución Log-Pearson. Ante esta situación, se ha considerado representar los caudales en función del período de retorno de los tres escenarios, a través de la función Gumbel, y así lograr datos comparativos. Se debe señalar que la función Log-Pearson sobrestima en forma considerable los valores más altos (de mayor período de retorno).

Para los datos de origen de deshielo, la función de distribución Gumbel es la que se mejor se ajusta en todos los escenarios definidos. Por lo tanto, la estimación de los caudales en función del período de retorno se estimará en base a dicha distribución.

#### 6.4.4 Resultados

Las estimaciones de los caudales máximos instantáneos afluentes a la captación Maule de la central Isla, se obtuvieron luego de ajustar los datos fluviométricos de la estación Maule en Los Baños (siendo ésta representativa de los caudales afluentes a la bocatoma Maule de la central Isla) a la distribución de probabilidad Gumbel. En consideración a que se estiman caudales de períodos de

retorno bastante más altos a la cantidad de años con registros hidrológicos, se ha incluido una estimación de los caudales, utilizando un intervalo de confianza al 95%.

La Figura 6.6 muestra la curva de probabilidad de los caudales afluentes a la bocatoma Maule de la central Isla, considerando los registros en el período pluvial.

La Figura 6.7 muestra la curva de probabilidad de los caudales afluentes a la bocatoma Maule de la central Isla, considerando los registros en el período de deshielo.

**Tabla 6.13. Qmi esperados (m<sup>3</sup>/s), período pluvial. (BTMCI).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
BTMCI(U30)	400	510	620	770	870	980	1.120	1.230
BTMCI(U40)	350	450	550	680	780	870	1.000	1.090
BTMCI(U50)	320	420	510	630	720	810	930	1.020

**Tabla 6.14. Qmi con nivel de confianza del 95% (m<sup>3</sup>/s), período pluvial. (BTMCI).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
BTMCI(U30)	480	630	770	960	1.100	1.240	1.430	1.570
BTMCI(U40)	420	550	670	830	950	1.080	1.240	1.360
BTMCI(U50)	380	500	610	760	870	980	1.130	1.240

**Tabla 6.15. Qmi esperados (m<sup>3</sup>/s), período deshielo. (BTMCI).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
BTMCI(U30)	250	300	350	410	460	510	570	620
BTMCI(U40)	250	290	340	400	440	480	540	590
BTMCI(U50)	240	290	330	390	430	470	520	570

**Tabla 6.16. Qmi con nivel de confianza del 95% (m<sup>3</sup>/s), período deshielo. (BTMCI).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
BTMCI(U30)	290	350	420	500	560	630	710	770
BTMCI(U40)	280	340	390	470	520	580	650	710
BTMCI(U50)	270	320	380	450	500	550	620	670

## 6.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los caudales máximos instantáneos anuales afluentes a la bocatoma Maule de la central Isla, se alternan entre aquellos de origen pluvial y de deshielo. Aun cuando el 56% de los  $Q_{mi}$  anuales registrados en la estación Maule en Los Baños fueron de origen nival (considerando los últimos 50 años de estadística), son las crecidas pluviales las que definen los eventos más extremos, con máximos instantáneos más altos. En efecto, los análisis de frecuencia muestran que las crecidas pluviales imponen la condición más crítica, para eventos cuyo período de retorno supera los 2 años.

En los análisis de frecuencia de las crecidas pluviales, se puede establecer un orden decreciente entre los escenarios temporales:  $BTMCI(U30) > BTMCI(U40) > BTMCI(U50)$ . Lo anterior indicaría un aumento en la cantidad de eventos extremos, o bien un incremento en la magnitud de las crecidas ocurridas en los últimos años, con respecto a la serie histórica.

Los análisis de frecuencia de las crecidas nivales, si bien también indican un aumento de sus magnitudes para períodos de retorno altos a medida que se utiliza sólo información más reciente,  $BTMCI(U30) > BTMCI(U40) > BTMCI(U50)$ , la diferencia de caudales extremos entre cada uno de los escenarios temporales definidos para el período de deshielo es muy pequeña (menor al 8%).

Cabe señalar que los resultados se ven altamente influenciados por los valores registrados durante los últimos seis años. Esta situación se produce aún cuando los caudales máximos instantáneos utilizados en el presente estudio corresponden a datos corregidos, según el procedimiento y los criterios que se detallan en el Anexo D (los caudales originales disponibles en el BNA de la DGA son aún mayores).

Finalmente, utilizando la serie histórica de caudales máximos pluviales y de deshielo, se obtiene que los máximos valores del caudal máximo instantáneo de período de retorno igual a 1.000 años cubren un rango entre los 1.020 y 1.230  $m^3/s$  para los escenarios de crecidas de origen pluvial (condición más exigente), y que han sido estimados a partir de la distribución Gumbel.

Si bien, en dos de los tres escenarios temporales definidos para las crecidas de origen pluvial la función de densidad de probabilidad que mejor se ajusta a los datos fue Log-Pearson, ésta tiende a sobrestimar en demasía los caudales de período de retorno altos. Por lo tanto, se decidió representar y estimar los caudales máximos instantáneos a partir de la distribución Gumbel.

Los resultados que se obtienen en el presente trabajo son consistentes a los obtenidos por otros estudios en la zona, por ejemplo, INGENDESA (2010b).

Distribución Gumbel  
Maule en B.T. Central Isla (BTMCI)  
Q<sub>máx</sub> instantáneos pluviales vs Período de Retorno  
Escenarios Temporales

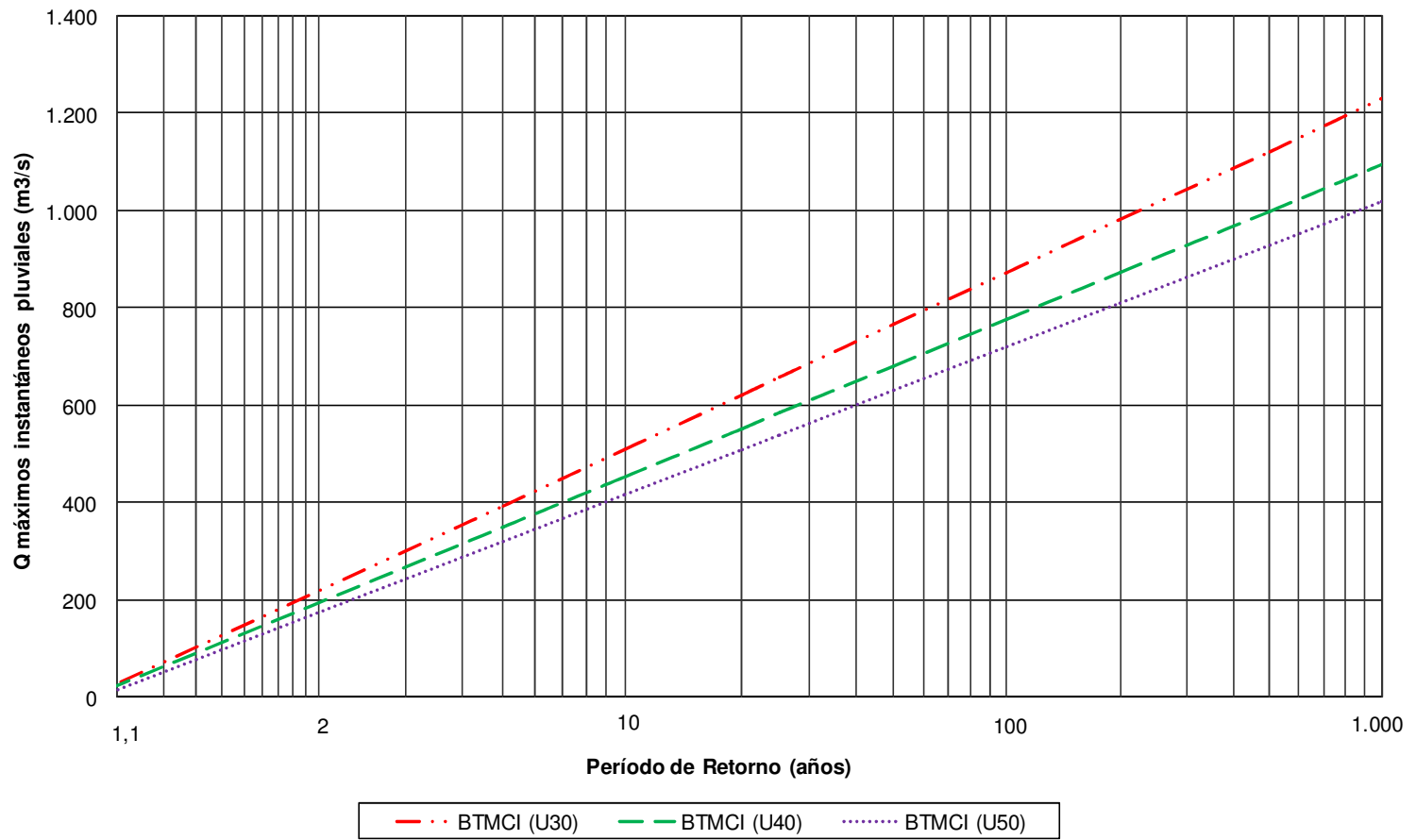


Figura 6.6. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en BTMCI. Período pluvial.

Distribución Gumbel  
Maule en B.T. Central Isla (BTMCI)  
Qmáx instantáneos deshielo vs Período de Retorno  
Escenarios Temporales

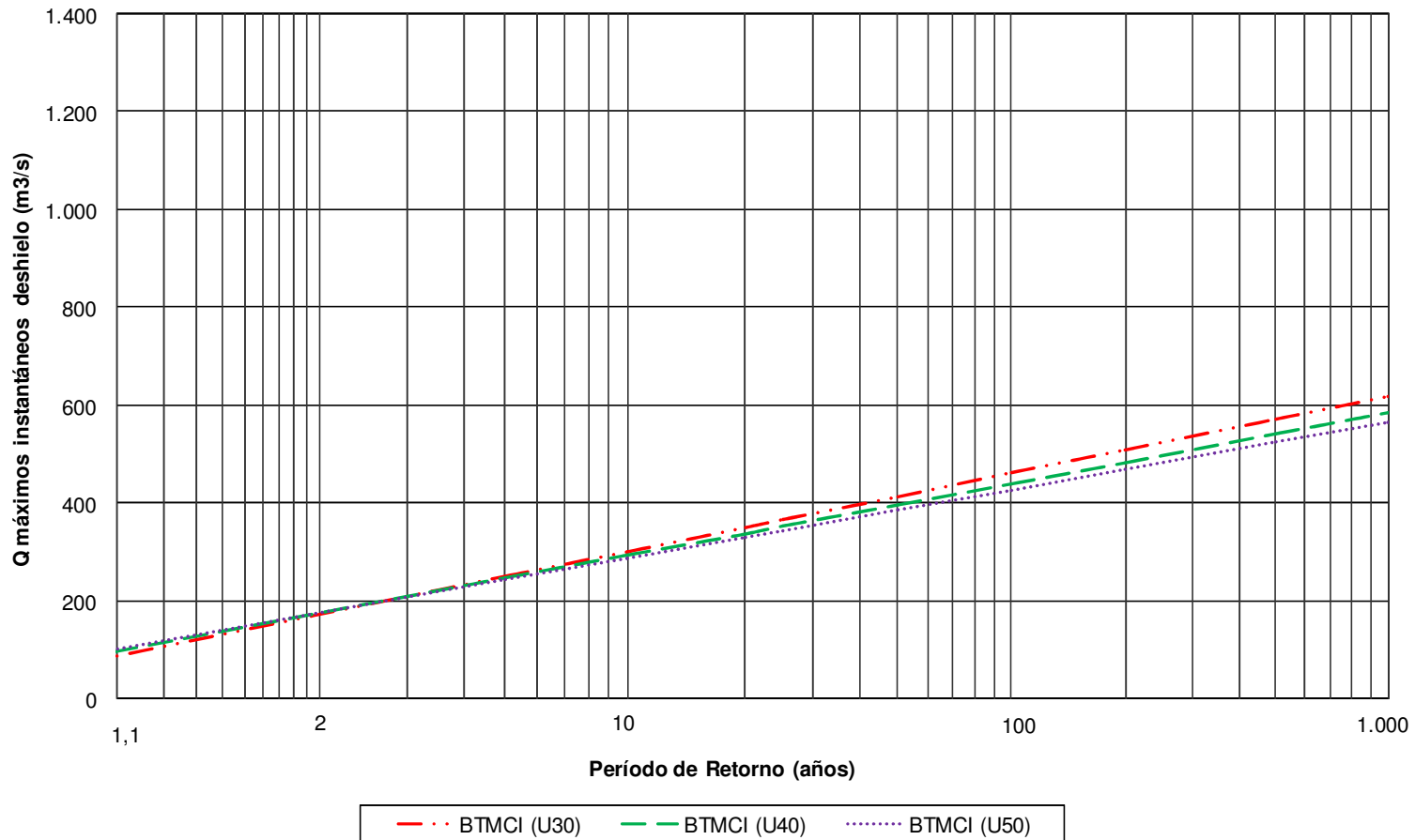


Figura 6.7. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en BTMCI. Período de deshielo.

## **CAPÍTULO VII**

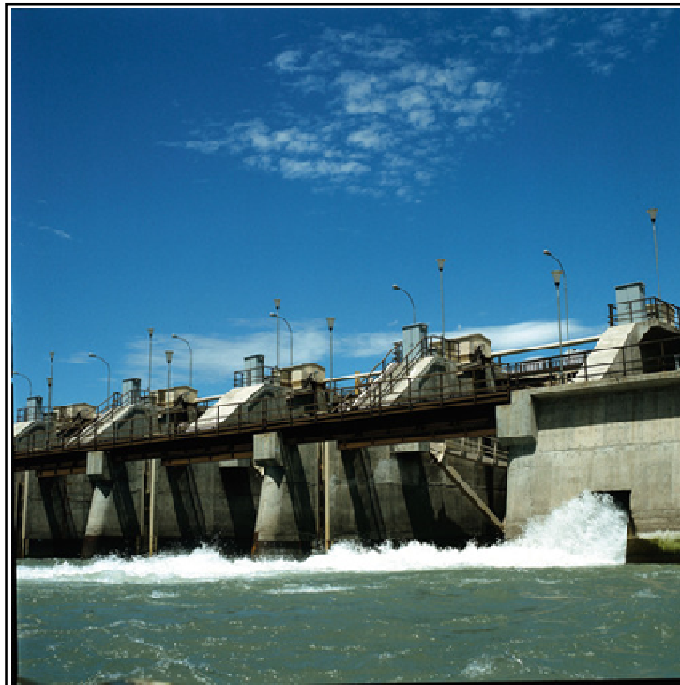
### **BOCATOMA MAULE DE CENTRAL PEHUENCHE**

#### 7.1 DESCRIPCIÓN DE BOCATOMA MAULE DE CENTRAL PEHUENCHE

La central Pehuenche aprovecha parte de los recursos hidroeléctricos económicamente explotables de los ríos Maule y Melado y cuya puesta en marcha se produce en el año 1991. La captación proveniente de la rama del río Maule, se realiza mediante una bocatoma ubicada a unos 5 km aguas abajo desde el punto donde confluye con el río Colorado, e inmediatamente aguas abajo de la confluencia con la quebrada Pinochet.

La barrera fija cierra el cauce del río Maule, uniendo su ribera norte con la barrera móvil (ver Figura 7.1). Posee una longitud de 310,0 m, y se constituye de un muro fluvial compactado, cuyo coronamiento tiene un ancho de 8,35 m y se encuentra a la cota 668,0 msnm.

La barrera móvil, se ubica al extremo izquierdo de la barrera fija, y consiste en una estructura de 80,0 m de largo, y 28,5 m de ancho, dividida en seis vanos, por machones de 3,0 m de ancho. En cada uno de los vanos está instalada una compuerta de sector de 10,20 m de ancho y 7,80 m de alto.



**Figura 7.1. Fotografía de la bocatoma Maule de Central Pehuenche. Fuente: Endesa Chile.**



Las compuertas de la barrera se utilizan para controlar el nivel de operación de la poza en la captación, entregar las aguas al canal Maule Norte Alto en época de regadío, y permitir la evacuación de crecidas. Las obras han sido dimensionadas, de tal manera que a un nivel de la poza a la cota 664,25 msnm, sean capaces de evacuar un caudal de 1.900 m<sup>3</sup>/s, correspondiente al caudal máximo de la crecida milenaria estimada alrededor de 1985 durante el proceso de diseño de la central. Todas las compuertas de la barrera fueron diseñadas para permitir el vertimiento por sobre su coronamiento.

La compuerta ubicada en el extremo izquierdo de la barrera móvil, adyacente a la obra de toma, sirve además como desripadora que permite mantener limpia la zona de rejas.

Un esquema en planta de la bocatoma Maule de la central Pehuenche se muestra en la Figura A.6, mientras que en la Figura A.7 se presenta un corte transversal en el sector de compuertas y un corte de la sección que compone la barrera fija.

## 7.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE A B.T. MAULE DE C. PEHUENCHE

La Figura 7.2 muestra la cuenca afluyente al punto donde se ubica la bocatoma Maule de la Central Pehuenche. El punto de salida de la cuenca, recibe las aguas del río Maule (incluye aportes del río Cipreses, y el río Colorado).

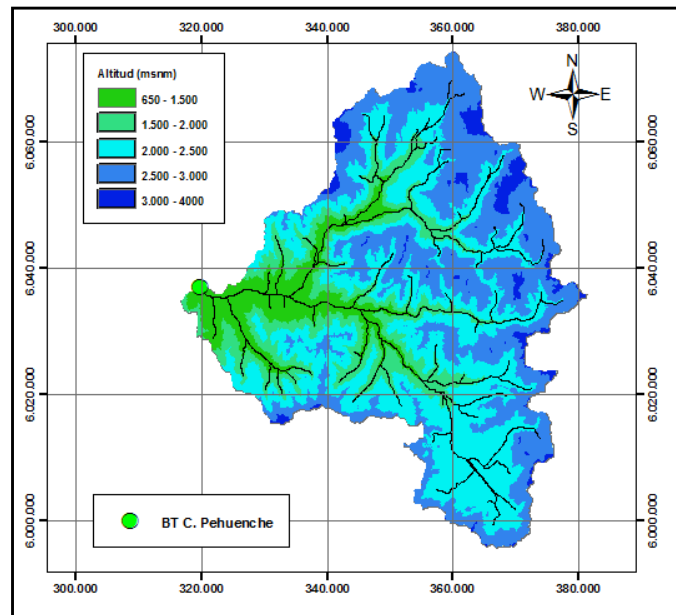


Figura 7.2. Cuenca afluyente a la bocatoma Maule de Central Pehuenche

La bocatoma Maule de la Central Pehuenche constituye el punto de salida de la cuenca definida en la Figura 7.2, y cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 7.1.

**Tabla 7.1. Ubicación de la bocatoma Maule de central Pehuenche.**

Obra	UTM		Coordenadas Geográficas	
	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Latitud Sur (°)	Longitud Oeste (°)
BT. Central Pehuenche	319.850	6.037.060	35° 47' 37"	70° 59' 36"

Los principales parámetros geomorfológicos de la cuenca afluente a la bocatoma Maule de C. Pehuenche, se muestran en la Tabla 7.2.

**Tabla 7.2. Parámetros de la cuenca definida por la bocatoma Maule de central Pehuenche.**

Parámetro de la cuenca	B.T. Maule C. Pehuenche
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	2.546
Pendiente media de la cuenca (m/m)	0,368
Largo de la cuenca (km)	86,1
Pendiente media del cauce principal (m/m)	0,028
Longitud del cauce principal (km)	81,7
Altura media de la cuenca (m.s.n.m.)	2.263

### 7.3 REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDA DE CENTRAL PEHUENCHE

#### 7.3.1 Introducción

ENDESA (1979a) y ENDESA (1982), constituyen las principales referencias que se tienen para analizar los aspectos hidrológicos relacionados a la bocatoma Maule de la Central Pehuenche.

#### 7.3.2 Registros utilizados

Considerando la cercanía existente entre la bocatoma Maule de la Central Pehuenche y la estación fluviométrica Maule en Curillinque, y que los valores medidos en esta sección registran los

principales aportes al punto de captación, se escogió a ésta, como la estación base para la estimación de los caudales de diseño de las obras de evacuación de crecidas.

La información fluviométrica en la estación Maule en Currillínque, disponible a la fecha del trabajo (ENDESA, 1979a), se compone de caudales máximos instantáneos entre los años 1961 y 1977. Es decir, se tiene una estadística de 17 años, lo que fue considerado aceptable, considerando la reciente etapa del estudio.

### 7.3.3 Metodología

Tal como se mencionó anteriormente, la cercanía de la estación fluviométrica Maule en Curillínque con el punto de captación, simplifican el cálculo de las crecidas con distinta probabilidad de excedencia, transponiendo los resultados obtenidos en la estación hacia la zona de interés donde se ubicaría esta obra hidráulica, mediante la relación de áreas aportantes, es decir:

$$Q_{mi}(BTMP) = \frac{A(BTMP)}{A(CUR)} \cdot Q_{mi}(CUR) \quad (7.1)$$

Donde:

- $Q_{mi}^T(BTMP)$  : Caudal máximo instantáneo en B.T. Maule de C. Pehuenche ( $m^3/s$ )
- $Q_{mi}^T(CUR)$  : Caudal máximo instantáneo en estación Maule en Curillínque, ( $m^3/s$ )
- $A(BTMP)$  : Área aportante a la B.T. Maule de C. Pehuenche ( $km^2$ )
- $A(CUR)$  : Área aportante a la estación Maule en Curillínque ( $km^2$ )

Según (ENDESA, 1979a), el área de la cuenca aportante a la estación Maule en Curillínque es de 2.303  $km^2$ , mientras que para la zona de captación de la B.T. Maule de C. Pehuenche es de 2.549  $km^2$ . De esta forma la relación de áreas aportantes arroja un factor de 1,107.

### 7.3.4 Resultados

Luego, utilizando la serie de caudales máximos instantáneos, tanto pluviales como de deshielo, y utilizando la ecuación (7.1), se estiman las máximas crecidas esperadas, las que se muestran en la Tabla 7.3 y Tabla 7.4, respectivamente.

El análisis probabilístico se realizó utilizando la distribución Gumbel, permitiendo estimar los caudales de crecida, para distintos períodos de retorno.

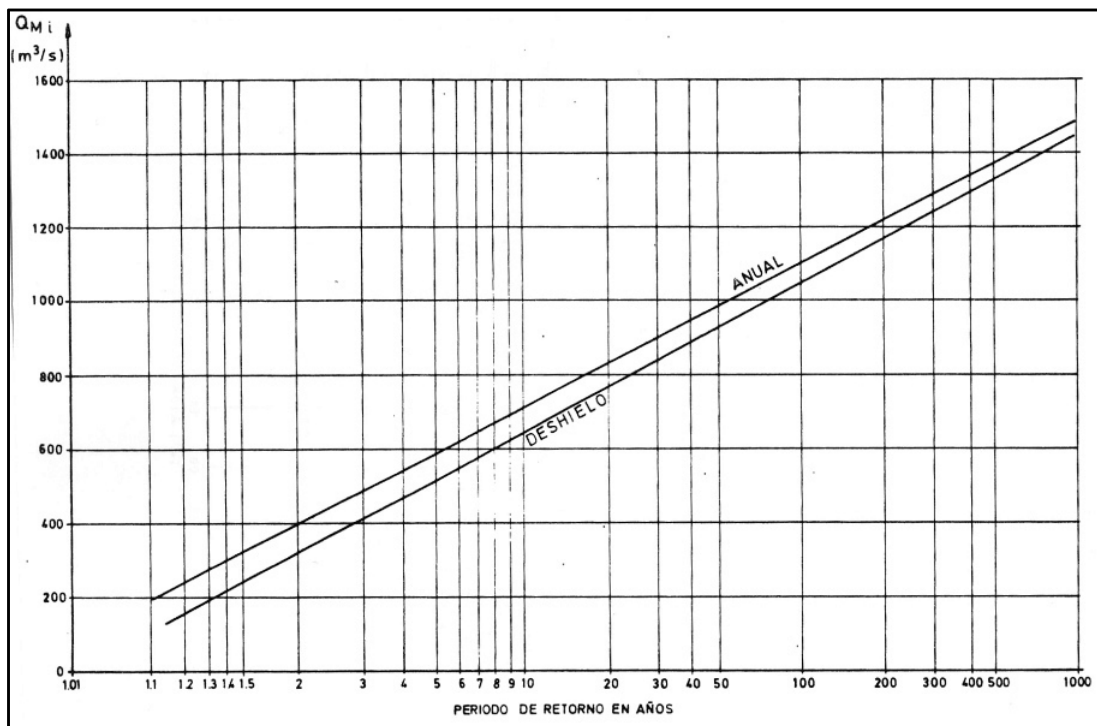
**Tabla 7.3. Qmi anuales en B.T. Maule de C. Pehuenche, (ENDESA, 1982).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	500	1.000
Qmi (m <sup>3</sup> /s)	590	710	830	990	1.100	1.370	1.490

**Tabla 7.4. Qmi de deshielo en B.T. Maule de C. Pehuenche, (ENDESA, 1982).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	500	1.000
Qmi (m <sup>3</sup> /s)	519	648	772	993	1.053	1.331	1.451

La curva de probabilidad para los caudales con otros períodos de retorno, se muestra en la Figura 7.3.



**Figura 7.3. Central Pehuenche. Río Maule en Bocatoma. Probabilidad de las crecidas Qmd y Qmi, (ENDESA, 1982).**

## 7.4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES A B.T. MAULE DE CENTRAL PEHUENCHE, PARA DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES

### 7.4.1 Introducción

En esta parte del estudio, se realizó una estimación de los caudales afluentes a la bocatoma Maule de la Central Pehuenche, para escenarios temporales que abarcan los últimos 30, 40 y 50 años de estadística hidrológica, en particular, de registros fluviométricos.

Ha sido posible construir la serie de caudales máximos instantáneos (tanto pluviales, como de deshielo) afluentes al punto de captación, para el período comprendido entre los años 1960/61 a 2009/10, relacionando los caudales registrados en la estación Maule en Curillínque con los registrados en el punto de captación, luego de su construcción.

En la Tabla 7.5, se muestra la nomenclatura utilizada para cada uno de los escenarios temporales definidos para este estudio, donde CUR(Ux)/MBTP(Ux) corresponde a la estimación de los caudales máximos instantáneos en la estación Maule en Curillínque (CUR) y/o Maule en B.T. Maule de central Pehuenche (MBTP), utilizando los últimos “x” años de estadística. Se incluye además en forma referencial, el valor de CUR(OR) / MBTP(OR), correspondiente a las estimaciones realizadas en el estudio (ENDESA, 1982).

**Tabla 7.5. Escenarios definidos para B.T. Maule de central Pehuenche**

Escenarios	Descripción		
	Estación	Nº de datos	Período del registro
CUR(U30) / MBTP(U30)	Maule en Curillínque, Maule en B.T. de C. Pehuenche	30	1980/81 - 2009/10
CUR(U40) / MBTP(U40)		40	1970/71 - 2009/10
CUR(U50) / MBTP(U50)		50	1960/61 - 2009/10
MBTP(OR)		17	1961 -1977

### 7.4.2 Registros utilizados

Para la estimación de los caudales de crecida, afluentes a la bocatoma Maule de la Central Pehuenche, se han considerado los caudales registrados en las estaciones: Maule en Curillínque (CUR), Aducción Maule de Central Pehuenche (AMCP), y Maule bajo Bocatoma de Central Pehuenche (MBBTCP), disponiendo de la siguiente información.

### Maule en Curillínque (CUR)

La estación Maule en Curillínque, controlado por ENDESA, posee registros de caudales medios diarios entre los años 1941/42 – 19443/44 y 1991/92 - 1996/97, además de caudales máximos instantáneos desde 1970 a 1997, año en que la estación es suprimida.

Los registros entre los años 1941/42 – 1943/44 no han sido considerados, pues se trata de mediciones poco fiables, y que carecieron de continuidad.

Se debe señalar que el 24 de junio de 1994, comienza a operar la central de pasada Curillínque, que realiza su captación algunos metros aguas arriba de la estación del mismo nombre. Por tal motivo, y para fines de plantear correlaciones, a la estadística registrada desde el año 2004, se le ha sumado un caudal de 70 m<sup>3</sup>/s lo que mejora bastante las relaciones entre las mediciones de Maule en Curillínque y los afluentes a la bocatoma Maule de Central Pehuenche. Se debe aclarar que el caudal de diseño de la central es de 84 m<sup>3</sup>/s, por lo que para eventos de crecida el error que pudiese producirse es bajo en comparación a la magnitud de los caudales en el río Maule.

### Maule en Bocatoma Maule de Central Pehuenche (MBTP)

Tras la construcción, y posterior puesta en marcha de la central Pehuenche en 1991, se instalaron dos estaciones fluviométricas en la zona de la bocatoma Maule: Estación Canal de Aducción Maule de Central Pehuenche (AMCP), y la Estación Maule bajo Bocatoma Maule de Central Pehuenche (MBBTCP). Por lo tanto, desde 1991 hasta la fecha (2010), se ha registrado el caudal afluente a Maule en Bocatoma Maule de Central Pehuenche (MBTP), consistente en la suma de los registros de las estaciones mencionadas, es decir:

$$Q(MBTP) = Q(AMCP) + Q(MBBTCP) \quad (7.2)$$

Donde:

- $Q(MBTP)$  : Caudal afluente a Maule en B.T. de Central Pehuenche (m<sup>3</sup>/s)
- $Q(AMCP)$  : Caudal de aducción Maule de Central Pehuenche(m<sup>3</sup>/s)
- $Q(MBBTCP)$  : Caudal en Maule bajo B.T. de Central Pehuenche (m<sup>3</sup>/s)
- $Q(MBTP)$  : Caudal afluente a Maule en B.T. de Central Pehuenche (m<sup>3</sup>/s)

### 7.4.3 Metodología

#### Caudales registrados en la estación Maule en Curillinque

Se desea establecer una correlación entre los valores máximos de caudales medios diarios y máximos instantáneos, para los períodos pluviales y de deshielo, entre los años 1970 y 1997, obteniendo como resultado, las ecuaciones (7.3) y (7.4):

$$Q_{mi}^p(CUR) = 1,409 \cdot Q_{md}^p(CUR) \quad R^2 = 0,917 \quad (7.3)$$

Donde:

$Q_{mi}^p(CUR)$  : Caudal máximo instantáneo, en CUR, período pluvial ( $m^3/s$ )

$Q_{md}^p(CUR)$  : Caudal medio diario, en CUR, período pluvial ( $m^3/s$ )

$$Q_{mi}^d(CUR) = 1,191 \cdot Q_{md}^d(CUR) \quad R^2 = 0,920 \quad (7.4)$$

Donde:

$Q_{mi}^d(CUR)$  : Caudal máximo instantáneo, en CUR, período deshielo ( $m^3/s$ )

$Q_{md}^d(CUR)$  : Caudal medio diario, en CUR, período deshielo ( $m^3/s$ )

Es posible completar la serie de caudales máximos instantáneos, pluviales y de deshielo, utilizando las ecuaciones (7.3) y (7.4), respectivamente, para rellenar el período comprendido entre los años 1961/62 a 1969/70.

Por otra parte, es posible estimar los caudales máximos instantáneos (pluvial y deshielo) de la temporada 1960/61, correlacionándolos con los caudales máximos instantáneos de la estación fluviométrica Maule en Los Baños (MLB), de acuerdo a las ecuaciones (7.5) y (7.6).

$$Q_{mi}^p(CUR) = 1,470 \cdot Q_{mi}^p(MLB) \quad R^2 = 0,758 \quad (7.5)$$

Donde:

$Q_{mi}^p(CUR)$  : Caudal máximo instantáneo, en CUR, período pluvial ( $m^3/s$ )

$Q_{mi}^p(MLB)$  : Caudal máximo instantáneo, en MLB, período pluvial ( $m^3/s$ )

$$Q_{mi}^d (CUR) = 1,565 \cdot Q_{mi}^d (MLB) \quad R^2 = 0,732 \quad (7.6)$$

Donde:

$Q_{mi}^d (CUR)$  : Caudal máximo instantáneo, en CUR, período deshielo ( $m^3/s$ )

$Q_{mi}^d (MLB)$  : Caudal máximo instantáneo, en MLB, período deshielo ( $m^3/s$ )

Finalmente, se tiene la serie de caudales máximos instantáneos, para el período pluvial y de deshielo, entre los años 1960/61 a 1996/97, de Maule en Curillinque (CUR). Esta serie se muestra en la Tabla A.3. de Anexos.

Extensión de la serie de caudales afluentes a Maule en Bocatoma de C. Pehuenche (MBTP), a partir de registrados medidos en estación Maule en Curillinque

El período común entre los registros de CUR y MBTP consiste en apenas 6 años (1991/92 – 1996/97). Por lo tanto, para extender la serie de caudales máximos instantáneos (pluviales y deshielo) en MBTP, se ha procedido de la siguiente manera:

Primero, se han correlacionado los máximos caudales medios diarios de cada mes, medidos en la estación Maule en Curillinque (CUR), con los afluentes a Maule en la Bocatoma de C. Pehuenche (MBTP), separándolos en períodos pluviales (marzo a septiembre), y de deshielo (octubre a marzo). Las ecuaciones (7.7) y (7.8), incluyen los 70  $m^3/s$  que dejó de captar la estación de Maule en Curillinque, cuando la central del mismo nombre entra en operación el año 2004.

$$Q_{md}^p (MBTP) = 1,439 \cdot Q_{md}^p (CUR) \quad R^2 = 0,867 \quad (7.7)$$

Donde:

$Q_{md}^p (MBTP)$  : Caudal medio diario, en MBTP, período pluvial ( $m^3/s$ )

$Q_{md}^p (CUR)$  : Caudal medio diario, en CUR, período pluvial ( $m^3/s$ )



$$Q_{md}^d (MBTP) = 1,173 \cdot Q_{md}^d (CUR) \quad R^2 = 0,841 \quad (7.8)$$

Donde:

$Q_{md}^d (MBTP)$  : Caudal medio diario, en MBTP, período deshielo ( $m^3/s$ )

$Q_{md}^d (CUR)$  : Caudal medio diario, en CUR, período deshielo ( $m^3/s$ )

A partir de las ecuaciones (7.7) y (7.8), es posible extender la serie de caudales máximos medios diarios pluviales y de deshielo, para el período comprendido entre los años 1960/61 – 2009/10.

Luego, utilizando la correlación entre los caudales medios diarios y máximos instantáneos de Maule en B.T. de C. Pehuenche, de acuerdo a los datos registrados entre 1991/92 a 2009/10, es posible extender la serie de caudales máximos instantáneos (pluviales y deshielo), para el período 1960/61 – 2009/10, en ese lugar. La relación entre caudales medios diarios y máximos instantáneos viene dada por las ecuaciones (7.9) y (7.10), para períodos pluviales y deshielo, respectivamente.

$$Q_{mi}^p (MBTP) = 1,733 \cdot Q_{md}^p (MBTP) \quad R^2 = 0,897 \quad (7.9)$$

Donde:

$Q_{mi}^p (MBTP)$  : Caudal máximo instantáneo, en MBTP, período pluvial ( $m^3/s$ )

$Q_{md}^p (MBTP)$  : Caudal medio diario, en MBTP, período pluvial ( $m^3/s$ )

$$Q_{mi}^d (MBTP) = 1,656 \cdot Q_{md}^d (MBTP) \quad R^2 = 0,901 \quad (7.10)$$

Donde:

$Q_{mi}^d (MBTP)$  : Caudal máximo instantáneo, en MBTP, período deshielo ( $m^3/s$ )

$Q_{md}^d (MBTP)$  : Caudal medio diario, en MBTP, período deshielo ( $m^3/s$ )

Finalmente, se tiene una estadística ampliada de los caudales máximos instantáneos (pluviales y de deshielo) afluentes a la bocatoma Maule de Central Pehuenche, para el período 1960/61 – 2009/10, con una longitud del registro de 50 años.

### Análisis de los datos

Considerando que las principales crecidas afluentes a la bocatoma Maule de la Central Pehuenche se alternan entre las originadas por tormentas pluviales y las producidas por deshielo, se analizaron las series de datos en forma separada, por tratarse de fenómenos con características distintas.

Para analizar el comportamiento de los datos, se ha graficado la serie de caudales máximos instantáneos de origen pluvial (Figura 7.4) y de deshielo (Figura 7.5), incluyendo los promedios móviles de período 10 y 30 años.

De la Figura 7.4, es fácil comprobar que la serie de caudales de origen pluvial ha tenido una tendencia al alza, influenciada en gran medida por las crecidas de los años 1986 y 1991, y a la disminución de caudales *peak* máximos instantáneos pluviales de poca magnitud, en gran parte de la década de los 90. Siguiendo la tendencia de promedio móvil de período 30 años, es posible apreciar que a partir del año 2000, la media de caudales máximos instantáneos pluviales se mantiene prácticamente constante.

Por otra parte, la Figura 7.5 que muestra la serie de caudales máximos instantáneos de origen nival o deshielo, permite verificar que los promedios móviles no sufren grandes variaciones, permaneciendo casi constantes a lo largo del registro completo. Sin embargo, la magnitud de los máximos instantáneos de deshielo ha sido amortiguada en los últimos años.

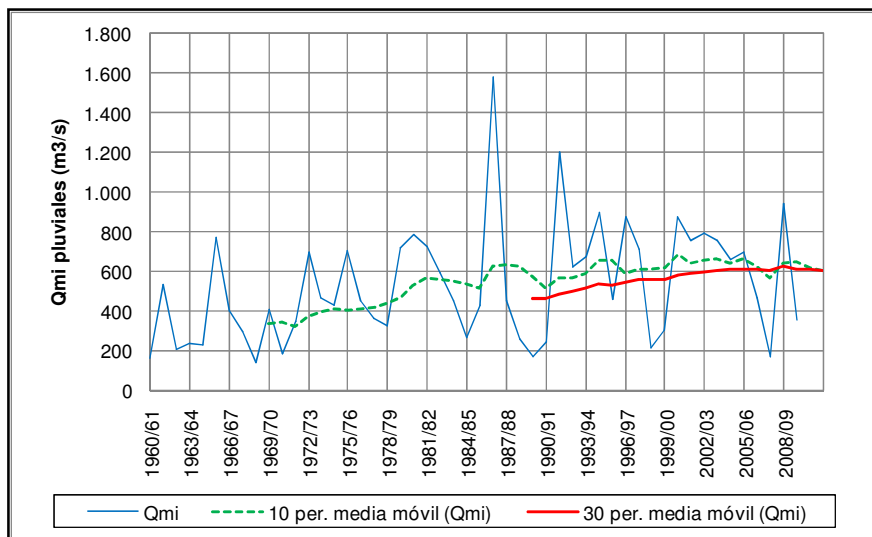


Figura 7.4. Serie de Qmi pluviales. Período 1960/61 – 2009/10. (MBTP).

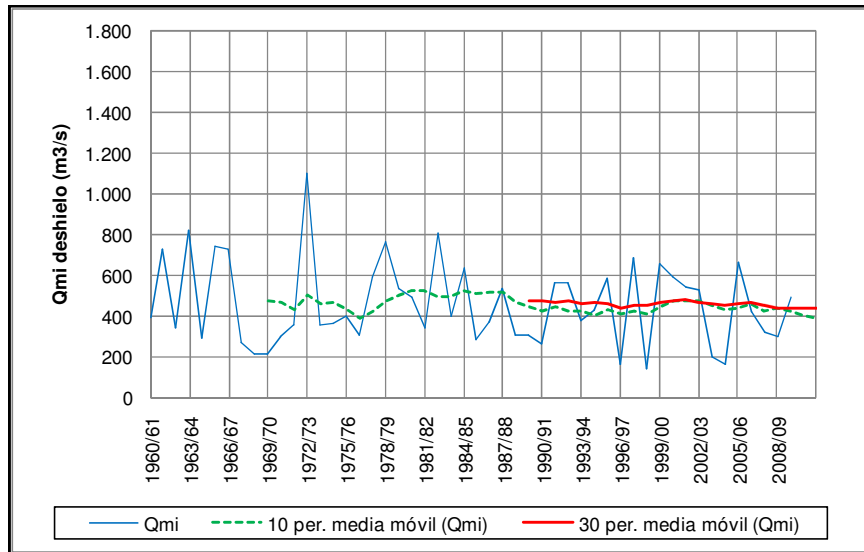


Figura 7.5. Serie de Qmi deshielo. Período 1960/61 - 2009/10. (MBTP).

Se observa un dispar comportamiento entre las crecidas originadas por tormentas pluviales, y las de deshielo.

En la Tabla 7.6, se presentan los principales parámetros estadísticos de las muestras que definen los distintos escenarios temporales, considerando las crecidas de origen pluvial. Es posible apreciar que tanto la media como la desviación estándar crecen a medida que se utilizan los escenarios temporales que consideran sólo los últimos años de registro. Esto refleja crecidas de mayor magnitud, y mayor dispersión.

Por otra parte, en la Tabla 7.7, se presentan los parámetros estadísticos, para los mismos escenarios temporales de registro hidrológico de la sección MBTP, pero considerando las máximas crecidas de deshielo. Se observa que tanto la media aritmética, como la desviación estándar de los caudales máximos instantáneos anuales de origen nival, van disminuyendo a medida que se utilizan los últimos años de estadística, caso opuesto a las crecidas de origen pluvial. La variación entre los parámetros estadísticos en cada escenario, también es más amortiguada cuando se trata de crecidas de deshielo.

**Tabla 7.6. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (MBTP) Período pluvial.**

Parámetro	MBTP(U30)	MBTP(U40)	MBTP(U50)
Media	612	576	528
Desv. Estándar	321	297	294
Coef. de Asimetría	0,88	1,05	1,10

**Tabla 7.7. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (MBTP) Período deshielo.**

Parámetro	MBTP(U30)	MBTP(U40)	MBTP(U50)
Media	437	454	458
Desv. Estándar	175	196	205
Coef. de Asimetría	0,06	0,89	0,74

#### Análisis de frecuencia

Para la estimación de los caudales máximos instantáneos de distintos períodos de retorno, se han realizado análisis de frecuencia ajustando los datos registrados de las máximas crecidas anuales, de origen pluvial y de deshielo, a distribuciones de probabilidad usadas típicamente en hidrología: Normal, Log-Normal, Pearson tipo III, Log-Pearson y Gumbel.

La serie de caudales máximos instantáneos anuales de origen pluvial (período abril – septiembre), posee sus valores más altos, en la crecidas más importantes y estudiadas en la región del Maule, ocurridas en el 16 de junio de 1986 y el 28 de mayo de 1991. A pesar de que estas dos crecidas son las de mayor magnitud, éstas no constituyen puntos dudosos altos (*outliers*), de acuerdo a la prueba del U.S. Water Resources Council (1981).

La serie de caudales máximos instantáneos anuales de origen nival (período octubre – marzo), puede definirse como uniforme, donde sus magnitudes se mantienen dentro de un rango bien definido, y el máximo valor registrado para una crecida de deshielo en MBTP, se produjo el 3 de enero de 1973.

#### Ajuste de curvas

Según ENDESA (1979a), el ajuste de los datos hasta la fecha de aquel estudio, se realizó utilizando la distribución Gumbel.

A continuación se entregan los principales índices que permiten conocer la bondad del ajuste de los datos, a las distribuciones señaladas anteriormente.

En la Tabla 7.8 y Tabla 7.9, se presentan los valores del coeficiente  $R^2$  y ECM, para el grado de ajuste de las crecidas de origen pluvial. En general se observa que el mejor ajuste se logra con la función Gumbel para los escenarios temporales de las crecidas asociadas a tormentas pluviales, exceptuando el escenario MBTP(U30), donde el mejor ajuste se obtiene con la distribución Log-Pearson.

**Tabla 7.8. Valores del coeficiente  $R^2$ , según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MBTP. Período pluvial.**

Distribución	MBTP(U30)	MBTP(U40)	MBTP(U50)
Normal	0,926	0,914	0,909
Log-Normal	0,953	0,958	0,962
Pearson III	0,958	0,958	0,964
Log-Pearson	0,958	0,959	0,965
Gumbel	0,961	0,960	0,964

**Tabla 7.9. Valores del ECM, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MBTP. Período pluvial.**

Distribución	MBTP(U30)	MBTP(U40)	MBTP(U50)
Normal	87,2	86,3	87,9
Log-Normal	69,7	60,5	57,0
Pearson III	69,8	63,7	58,2
Log-Pearson	66,5	61,2	55,0
Gumbel	63,5	59,5	55,8

En la Tabla 7.10 y Tabla 7.11 se presentan los valores del coeficiente  $R^2$  y ECM para el ajuste de los datos a las distintas funciones de distribución de probabilidad, en el período de deshielo. Los valores del ECM son consecuentes a los valores del coeficiente  $R^2$ , y muestran que la distribución Gumbel es la que mejor se ajusta a los datos de los escenarios MBTP(U40) y MBTP(U50), mientras que para el escenario MBTP(U30) la distribución que mejor se ajusta es Pearson III.

**Tabla 7.10. Valores del coeficiente R<sup>2</sup>, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MBTP. Período deshielo.**

Distribución	MBTP(U30)	MBTP(U40)	MBTP(U50)
Normal	0,983	0,937	0,949
Log-Normal	0,933	0,973	0,976
Pearson III	0,983	0,972	0,981
Log-Pearson	0,978	0,970	0,982
Gumbel	0,954	0,975	0,982

**Tabla 7.11. Valores del ECM, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MBTP. Período deshielo.**

Distribución	MBTP(U30)	MBTP(U40)	MBTP(U50)
Normal	25,9	48,9	46,3
Log-Normal	47,7	32,2	31,5
Pearson III	25,7	35,5	30,6
Log-Pearson	25,7	35,2	28,5
Gumbel	37,6	31,3	27,8

#### 7.4.4 Resultados

Dado que en casi la totalidad de los escenarios temporales, para los períodos pluviales y de deshielo, la función que mejor se ajusta es Gumbel, los resultados y estimaciones se realizarán a partir de esta distribución.

Considerando que de la serie de caudales máximos instantáneos anuales estaba conformada casi equitativamente por crecidas de origen pluvial y nival, se realizó una estimación considerando ambos tipos de crecidas.

Por lo tanto, en la Figura 7.6 se muestra la curva de probabilidad de excedencia de los caudales máximos instantáneos registrados durante los meses de abril a septiembre (período pluvial). La Tabla 7.12 muestra el caudal máximo instantáneo de origen pluvial para algunos períodos de retorno.

De la misma manera, en la Figura 7.7 se muestra la curva de probabilidad de excedencia de los caudales máximos instantáneos registrados durante los meses de octubre a marzo (período de deshielo), y en la Tabla 7.12 se presenta el caudal máximo instantáneo de origen nival en función del período de retorno.

**Tabla 7.12. Qmi pluviales esperados (MBTP) (m<sup>3</sup>/s).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
MBTP(U30)	890	1.110	1.310	1.580	1.780	1.980	2.250	2.450
MBTP(U40)	820	1.020	1.210	1.450	1.630	1.810	2.050	2.230
MBTP(U50)	770	960	1.140	1.380	1.550	1.730	1.960	2.140

**Tabla 7.13. Qmi deshielo esperados (MBTP) (m<sup>3</sup>/s).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
MBTP (U30)	590	710	820	960	1.070	1.180	1.330	1.440
MBTP (U40)	620	750	870	1.030	1.150	1.270	1.430	1.550
MBTP (U50)	630	760	880	1.050	1.170	1.300	1.460	1.580

Los caudales máximos instantáneos de origen pluvial, considerando el caso más conservador del intervalo de confianza del 95%, se presentan en la Tabla 7.14, mientras que los de origen nival o deshielo en la Tabla 7.15.

**Tabla 7.14. Qmi pluviales con nivel de confianza 95% (MBTP) (m<sup>3</sup>/s).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
MBTP(U30)	1.050	1.330	1.600	1.950	2.210	2.480	2.820	3.080
MBTP(U40)	950	1.190	1.430	1.740	1.970	2.200	2.500	2.730
MBTP(U50)	880	1.110	1.340	1.630	1.850	2.070	2.350	2.570

**Tabla 7.15. Qmi deshielo con nivel de confianza 95% (MBTP) (m<sup>3</sup>/s).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	200	500	1.000
MBTP (U30)	680	830	970	1.160	1.310	1.450	1.640	1.780
MBTP(U40)	700	860	1.020	1.220	1.370	1.520	1.720	1.880
MBTP(U50)	700	860	1.020	1.220	1.380	1.530	1.730	1.880

Finalmente, se observa que las crecidas de origen pluvial son las que definen la condición más exigente en cuanto al caudal de diseño para la evacuación de crecidas, en la zona de Maule en Bocatoma de Central Pehuenche (MBTP). Esto, a pesar dentro de los 50 años de registros históricos, las crecidas máximas anuales se alternan entre las que se originan por las tormentas de invierno, y aquellas que se producen por el deshielo durante los meses de octubre-diciembre.

## 7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se analizaron separadamente las series de  $Q_{mi}$  afluentes a la bocatoma Maule de la central Pehuenche, de origen pluvial y nival, verificándose que son las crecidas ocurridas por las precipitaciones de invierno (abril-septiembre), aquellas que producen los eventos más extremos, constituyendo la condición más crítica para el diseño de la captación.

Se puede establecer un orden decreciente de los caudales pluviales correspondientes a los escenarios temporales definidos para el análisis:  $MBTP(U30) > MBTP(U40) > MBTP(U50)$ , obteniéndose caudales milenarios de 2.450, 2.330 y 2.140  $m^3/s$ , respectivamente. Estos caudales son comparables con el caudal de diseño de la obra, cifrada en 1.900  $m^3/s$ .

Los resultados anteriores, son consecuentes con la información que se aprecia en la serie de  $Q_{mi}$  pluviales. Se destacan los caudales históricos registrados en 1986 y 1991, cuyos efectos están bien documentados. Si bien, después de 1991 no han existido caudales que superen este registro, se ha observado un mayor número de crecidas. En efecto, desde principios de la década de 1990, sólo se observan  $Q_{mi}$  bajos, durante los años de sequía en la zona central del país, ocurridas en 1998 y 2007.

En contraposición a lo que sucede con las crecidas pluviales, cuando se analizan las crecidas de origen nival, se observa que la serie de  $Q_{mi}$  a partir de 1985 posee caudales extremos (altos y bajos) dentro de una amplitud bien definida. Por lo tanto, se puede establecer un orden decreciente de los escenarios:  $MBTP(U30) < MBTP(U40) < MBTP(U50)$ . Es decir, cuando se utiliza sólo la última información de registros fluviométricos, se obtienen estimaciones con valores más bajos para los  $Q_{mi}$ , que si se utilizara una serie más larga (incluyendo más años de registro hacia atrás). En efecto, los caudales del escenario  $MBTP(U30)$  son mayores a los otros dos, los que a su vez son prácticamente iguales.



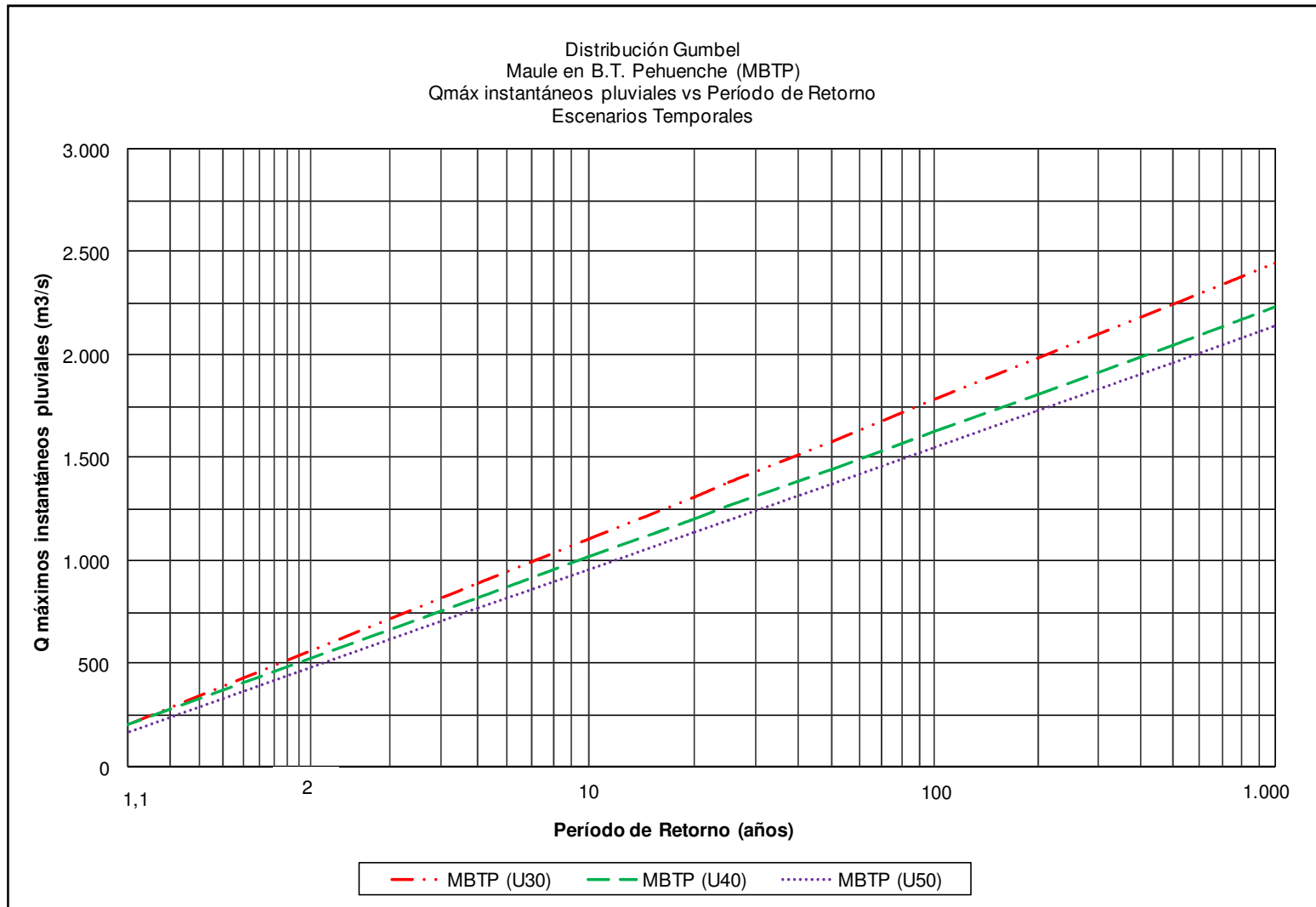


Figura 7.6. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en MBTP. Período pluvial.

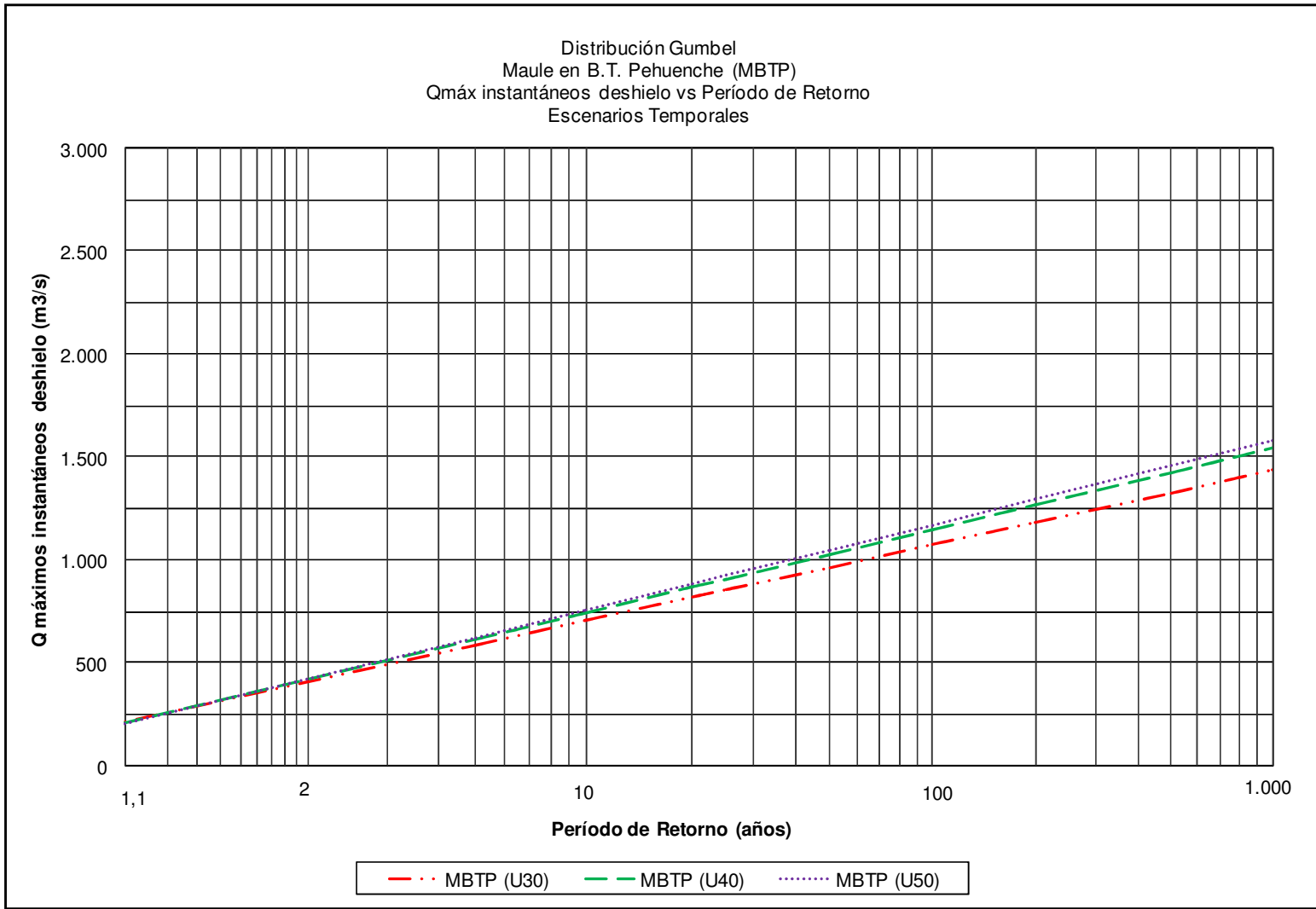


Figura 7.7. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en MBTP. Período de deshielo.

## CAPÍTULO VIII

### PRESA EMBALSE MELADO

#### 8.1 DESCRIPCIÓN DE PRESA DE EMBALSE MELADO<sup>4</sup>

El embalse Melado se ubica en el río del mismo nombre, a aproximadamente unos 5 km aguas arriba de su confluencia con el río Maule, y fue concebida como parte de las obras de la CH Pehuenche, que aprovecha los recursos hídricos de parte del río Maule, además de las aguas propias de la hoya hidrográfica del río Melado hasta el punto de la instalación de la presa.

En los estudios realizados para su dimensionamiento, se adoptó una vida útil del embalse de 100 años, determinando los niveles óptimos de operación entre las cotas 648,0 msnm (nivel máximo), y 640,5 msnm (nivel mínimo). Se ubica a la cota 647,5 msnm, el nivel medio normal de operación.

La presa del embalse Melado es de tierra y su diseño corresponde al tipo zonificado, con un núcleo central de materiales impermeables, protegido por filtros y espaldones de materiales permeables. La altura del muro es de 90 m (coronamiento a la cota 654,0 msnm), con un coronamiento de 310 m de longitud y 14 m de ancho y está apoyado en roca en ambos estribos. Los taludes de aguas arriba y de aguas abajo serán 1,5:1 (H:V) en su parte superior y 2:1 (H:V) en el resto. En el nivel máximo normal del embalse, la revancha es de 6,0 m (ver Figura 8.1).



Figura 8.1. Fotografía de la Presa del Embalse Melado. Fuente: [www.endesa.cl](http://www.endesa.cl)

<sup>4</sup> INGENDESA. Proyecto Pehuenche. Descripción General. Estado Final de las Obras.

Las obras de evacuación de crecidas fueron diseñadas para evacuar, en condiciones normales, un caudal de 3.620 m<sup>3</sup>/s, que corresponde a la crecida milenaria (Harza y Nenadovich, 1981).

Las obras están constituidas por un vertedero frontal seguido de un rápido de descarga, el que en su extremo final tiene un dissipador de energía tipo salto de ski, entregando las aguas al cauce del río Melado lo suficientemente alejadas del pie de la presa.

El evacuador de crecidas está dotado de tres compuertas de sector de 10,20 m de ancho por 15,30 m de alto, además de las correspondientes guías para la colocación de compuertas de emergencia de aguas arriba.

En el Anexo A, se pueden observar las siguientes figuras esquemáticas:

- Figura A.8: Presa de embalse melado. Planta.
- Figura A.9: Presa de embalse melado. Sección típica.
- Figura A.10: Presa embalse melado. Vertedero evacuador de crecidas. Planta y cortes.
- Figura A.11: Presa embalse melado. Vertedero evacuador de crecidas. Corte de vano y geometría del umbral.

## 8.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE AL EMBALSE MELADO

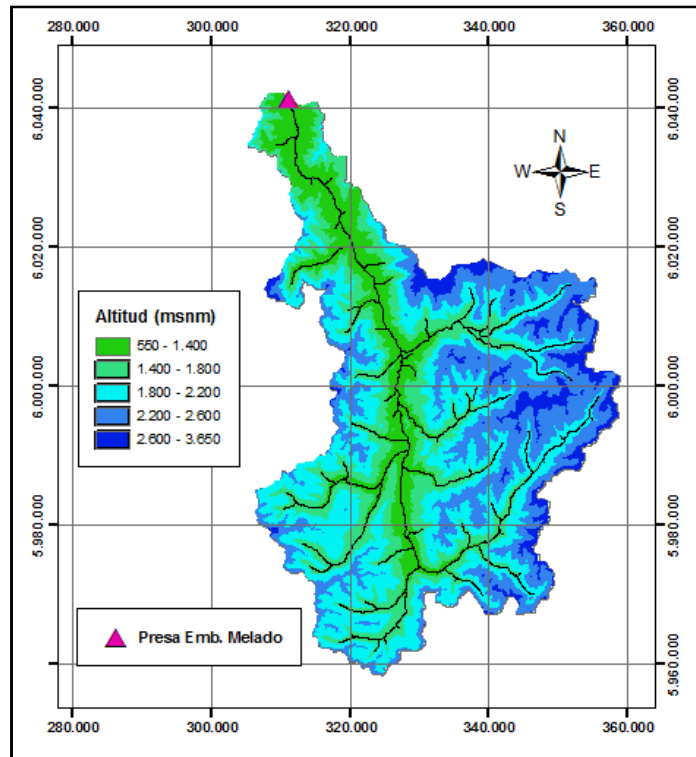
En la Figura 8.2. Cuenca afluyente al Embalse Melado. Figura 8.2, se muestra la delimitación de la cuenca afluyente al embalse Melado. El cauce principal de esta cuenca corresponde al río Melado, el que recibe en el punto donde se ubica la presa, los aportes de unos 2.300 km<sup>2</sup> de superficie.

Las aguas del río Melado descienden en cota, hacia el nor-poniente. En general, la cuenca asociada al río Melado posee una cota media más baja que la rama del río Maule, donde los puntos más altos corresponden a las montañas de la Cordillera de los Andes en el límite oriente de la cuenca.

La presa del Embalse Melado constituye el punto de salida de la cuenca definida en la Figura 8.2, y cuyas coordenadas se muestran en la Tabla 8.1.

**Tabla 8.1. Ubicación de la presa del embalse Melado.**

Obra	UTM		Coordenadas Geográficas	
	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Latitud Sur (°)	Longitud Oeste (°)
Presa Embalse Melado	311.290	6.041.360	35° 45' 11"	71° 05' 14"



**Figura 8.2. Cuenca afluyente al Embalse Melado.**

Los principales parámetros geomorfológicos de la cuenca afluyente a la presa del Embalse Melado se muestran en la Tabla 8.2.

**Tabla 8.2. Parámetros de la cuenca definida por la presa del embalse Melado.**

Parámetro de la cuenca	Presa Embalse Melado
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	2.272
Pendiente media de la cuenca (m/m)	0,411
Largo de la cuenca (km)	128,6
Pendiente media del cauce principal (m/m)	0,018
Longitud del cauce principal (km)	123,2
Altura media de la cuenca (msnm)	1.928

### 8.3 REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDAS DEL EMBALSE MELADO

#### 8.3.1 Introducción

Dentro de los antecedentes revisados para el presente trabajo, el estudio de crecidas del Embalse Melado, Harza y Nenadovich (1981), es el informe con mayor información hidrológica entre las obras en estudio.

El alcance del estudio hidrológico mencionado, comprende la determinación de las crecidas que permitieron evaluar los caudales de diseño, tanto de las obras de desviación durante el período de construcción, como del vertedero de la presa.

Para la evaluación de las crecidas que permitieron dimensionar las obras de seguridad de la presa, en particular el vertedero, se determinaron las crecidas de período de retorno de 1.000 y 10.000 años en base a análisis de frecuencia.

Cabe señalar que todos los antecedentes mencionados en el punto “8.3 Revisión de Estudios de Crecida de Embalse Melado”, han sido recopilados del informe Harza y Nenadovich (1981).

#### 8.3.2 Registros utilizados

De acuerdo al estudio original, (HARZA y NENADOVICH Ing., 1981), la estación fluviométrica seleccionada para el análisis de crecidas, fue la de Melado en La Lancha, ubicada a unos 12 km aguas arriba de la ubicación de la presa del embalse Melado.

La estación antes mencionada, drena un área aproximada de 2.200 km<sup>2</sup>. Fue controlada en sus inicios por la Dirección de Riego, y posteriormente por ENDESA. Se dispone de registros limnimétricos que cubren los períodos 1916/17-1929/30, 1931/32-1933/34, 1942/43-1949/50 y 1963/64-1980/81, con ciertos vacíos en los registros.

De esta manera, el período entre 1916-1921 fue descartado por tratarse de estadística incompleta, pues se tiene lecturas cada dos o más días.

Los registros entre 1922/23-1929/30 y 1931/32-1933/34 no están documentados, por lo que es difícil establecer su confiabilidad. Sólo se decidió su inclusión, luego de comprobar que no afectaban significativamente el resultado del análisis de frecuencia con la ventaja de disminuir la incertidumbre estadística al aumentar el tamaño de la muestra.

Basado en una correlación entre los caudales máximos medios diarios de las estaciones Melado en Junta Maule y Melado en La Lancha, fue posible estimar los caudales máximos medios diarios para el período 1955-1962, completando así una serie con 42 años de estadística.

A partir de 1967 y hasta la fecha del estudio (1981), la estación de Melado en La Lancha dispone de información de caudales máximos instantáneos. Por lo tanto, basado en correlaciones entre los caudales máximos instantáneos y caudales máximos medios diarios, fue posible completar la serie de caudales máximos instantáneos anuales de invierno y del período de deshielo, para los 42 años de estadística (1922/23-1927/28, 1931/32-1933/34, 1942/43-1949/50, 1955/56-1980/81).

Un análisis de las series, permite conocer que las mayores crecidas registradas en el período designado como de deshielo (octubre - marzo), corresponden en realidad a tormentas que ocurren fuera del período pluvial comprendido entre abril-septiembre, con hidrogramas que siguen la forma típica de las crecidas cortas y concentradas de invierno.

De acuerdo a esto último, la estadística de crecidas se reordenó definiendo series de caudales máximos anuales producidas por tormenta, independientemente de la temporada en que ocurren.

Por lo tanto, la serie de caudales máximos instantáneos producidos por tormentas coincide con la serie de valores máximos instantáneos anuales, excepto para años muy secos.

### 8.3.3 Metodología

Utilizando los datos registrados en la estación fluviométrica base de Melado en La Lancha, se realizó un análisis de frecuencia para estimar los caudales máximos instantáneos versus período de retorno.

Toda la estadística de crecidas generadas por tormentas, fue sometida a análisis de frecuencia analítico, ajustando las distribuciones de probabilidad Gumbel y Log-Pearson Tipo III. Para la serie de  $Q_{mi}$  se probaron además, las distribuciones Gamma y Log-Normal.

Tal como se mostrará más adelante, en la mayoría de los casos, el mejor ajuste se logró con Gumbel, por lo que en definitiva se adoptó un criterio uniforme en el estudio Harza y Nenadovich (1981), utilizando esta distribución para representar todas las series de datos analizadas.

De esta forma, se estimaron los  $Q_{mi}$  esperados en la sección de Melado en La Lancha para distintos períodos de retorno.

Para el caso de caudales con altos períodos de retorno (1.000 y 10.000 años), en lugar de considerar el valor esperado, se tomó el valor más conservador del rango definido por un intervalo de confianza de 95%. Todo esto, considerando una alta incertidumbre en la extrapolación de curvas de frecuencia, a períodos de retorno bastante más altos que la longitud del registro estadístico disponible.

En la Tabla 8.3, se muestran los caudales máximos instantáneos esperados para la estación fluviométrica Melado en La Lancha.

**Tabla 8.3.  $Q_{mi}$  anuales esperados en ML, (Harza y Nenadovich, 1981).**

Tr (años)	5	10	25	50	500	1.000	10.000
$Q_{mi}$ (m <sup>3</sup> /s)	1.050	1.300	1.630	1.880	2.540	2.910	3.720

En la Tabla 8.4, se muestran los caudales máximos instantáneos para la estación fluviométrica Melado en La Lancha, considerando un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 8.4.  $Q_{mi}$  anuales con nivel de confianza 95% en ML. (Harza y Nenadovich, 1981)**

Tr (años)	1.000	10.000
$Q_{mi}$ (m <sup>3</sup> /s)	3.450	4.650



### 8.3.4 Resultados

Para caudales de períodos de retorno bajos (5, 10, 25 y 50 años), la relación entre áreas aportantes a Melado en zona de presa y Melado en La Lancha es de 1,15 (para crecidas pluviales), correspondiente a la razón de áreas bajo la cota 1.800 msnm aproximadamente. Luego, la transposición de caudales máximos instantáneos se efectuó en base a la fórmula de Creager<sup>5</sup> para las crecidas pluviales, obteniéndose un factor de transposición de 1,08.

Considerando la línea de nieves a una cota de 1.850 msnm, correspondiente al valor más alto estimado para las tormentas de invierno, la razón de las áreas aportantes de las secciones definidas por la zona de la presa Melado y la estación Melado en La Lancha, determina un factor de 1,10 aproximadamente. En el caso de los caudales máximos instantáneos, se amplifica por un factor 1,05, de acuerdo a la fórmula de Creager.

En la Tabla 8.5, se muestran los Q<sub>mi</sub> esperados afluentes al embalse Melado en la zona de presa.

**Tabla 8.5. Q<sub>mi</sub> anuales esperados en MZP. (Harza y Nenadovich, 1981).**

Tr (años)	5	10	25	50	500	1.000	10.000
Q <sub>mi</sub> (m <sup>3</sup> /s)	1.134	1.404	1.760	2.030	2.670	3.060	3.910

En la Tabla 8.6, se muestran los caudales máximos instantáneos afluentes al Embalse Melado en la Zona de Presa, considerando un nivel de confianza del 95%.

**Tabla 8.6. Q<sub>mi</sub> anuales con nivel de confianza 95% en MZP. (Harza y Nenadovich, 1981)..**

Tr (años)	1.000	10.000
Q <sub>mi</sub> (m <sup>3</sup> /s)	3.620	4.880

<sup>5</sup> (Creager et al., 1945). Fórmula empírica que permite estimar un caudal *peak* a través de un análisis regional. Creager recopiló información de cientos de casos en todo el mundo, y desarrolló esta fórmula que permite estimar un caudal *peak* por unidad de área, mediante la expresión  $q_p = 46CA^{0,894A^{-0,048}}$ , donde A es el área colaborante.

## 8.4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES AL EMBALSE MELADO, PARA DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES

### 8.4.1 Introducción

Tal como se realizó en el estudio (HARZA y NENADOVICH Ing., 1981), se definió a Melado en La Lancha como estación fluviométrica base, ampliando su estadística al período comprendido entre los años 1941/42 a 2009/10, abarcando un total de 69 años de datos de Qmi. Aún cuando se dispone de registros fluviométricos anteriores a 1941/42, esta información se encuentra interrumpida y ha sido considerada de menor confiabilidad, debido a la forma de medición y antigüedad de estos.

Para el análisis, se han definido escenarios que contemplan los últimos 30, 40, 50, 60 y 69 últimos años de registro hidrológico. En la Tabla 8.7, se muestra la nomenclatura utilizada para cada uno de los escenarios temporales definidos para este estudio, donde ML(Ux)/MZP(Ux) corresponde a la estimación de los caudales máximos instantáneos en Melado en La Lancha (ML) y/o Melado en Zona de Presa (MZP), utilizando los últimos “x” años de estadística. Se incluye además, el valor de ML(OR)/MZP(OR), correspondiente a las estimaciones realizadas en el estudio Harza y Nenadovich (1981).

**Tabla 8.7. Escenarios definidos para zona de presa de embalse Melado.**

Escenarios	Descripción		
	Estación	Nº de datos	Período del registro
ML(U30) / MZP(U30)	Melado en La Lancha	30	1980/81 - 2009/10
ML(U40) / MZP(U40)		40	1970/71 - 2009/10
ML(U50) / MZP(U50)		50	1960/61 - 2009/10
ML(U60) / MZP(U60)		60	1950/51 - 2009/10
ML(U69) / MZP(U69)		69	1941/42 - 2009/10
ML(OR) / MZP(OR)		42	(*)

(\*) 1922/23 -1927/28; 1931/32 - 1933/34; 1942/43 - 1949/50; 1955/56 - 1980/81.

### 8.4.2 Registros utilizados

Se tiene una estadística ampliada de los Qmi en la estación fluviométrica Melado en La Lancha con 69 años de estadística, para el período 1941/42 - 2009/10. La extensión de la

estadística de  $Q_{mi}$  de la estación para el período 1941/42 - 1991/92, se obtuvo de la referencia (INGENDESA, 1991a).

Para aquellos años en que sólo se tenía registro de  $Q_{md}$ , se utilizó la relación encontrada por (HARZA y NENADOVICH Ing., 1981), para encontrar los  $Q_{mi}$  a través de la siguiente relación lineal:

$$Q_{mi} (ML) = 1,40 \cdot Q_{md}(ML) + 56,6 \quad R^2 = 0,98 \quad (8.1)$$

Donde:

$Q_{mi} (ML)$  : Caudal máximo instantáneo, registrado en Melado en La Lancha ( $m^3/s$ )

$Q_{md} (ML)$  : Caudal medio diario, registrado en Melado en La Lancha ( $m^3/s$ )

La estadística para el período 1992/1993 - 2002/03 fue ampliada utilizando datos de pertenecientes al banco de datos de ENDESA, y de la DGA.

Para el período 2003/04 - 2009/10 se utilizaron los registros de la estación fluviométrica de Melado en El Salto, la cual reemplazó a la estación Melado en La Lancha, ubicándose a unos 5 km aguas arriba de esta. De esta forma, se ha corregido la estadística de este período, considerando la cuenca intermedia entre la ubicación de ambas estaciones.

La serie completa de caudales máximos instantáneos para el período 1941/42 - 2009/10 en la estación Melado en La Lancha se muestra en Anexos.

En la tabla recién mencionada, se observa que la serie de caudales máximos instantáneos anuales se compone en su gran mayoría de crecidas ocurridas en el período pluvial (abril - septiembre). Excepcionalmente, existen crecidas ocurridas en el mes de octubre para años particularmente secos, o bien, corresponden a precipitaciones pluviales tardías.

#### 8.4.3 Metodología

##### Estimación de caudales en MZP a partir de registros medidos en ML

Para estimar los caudales máximos instantáneos afluente a la zona de presa del Embalse Melado, en base a la estadística ampliada de datos registrados en Melado en La Lancha, se recurrió al método propuesto por (VERNI y KING, 1977), el que plantea que el caudal máximo instantáneo, asociado a un cierto período de retorno  $T$ , puede estimarse como:

$$Q = 0,00615 P_{24}^{1,24} A^{0,88} \quad (8.2)$$

Donde:

- $Q$  : Caudal máximo instantáneo ( $m^3/s$ )  
 $P_{24}$  : Precipitación máxima en 24 horas, con período de retorno T ( $mm$ )  
 $A$  : Área aportante de la cuenca ( $km^2$ )

Considerando que la estación fluviométrica de Melado en La Lancha (ML) se encuentra a unos 12 km aguas arriba de Melado en Zona de Presa (MZP), es posible trasponer los caudales registrados a la zona de interés.

Teniendo en cuenta la cercanía entre ambas secciones, se verifica que la precipitación que cae en las cuencas que delimitan los puntos señalados, no presentan diferencias importantes. Luego, el caudal máximo instantáneo en MZP puede estimarse simplificando la ecuación (8.2), reducida a:

$$Q_{mi}(MZP) = Q_{mi}(ML) \cdot \left[ \frac{A(MZP)}{A(ML)} \right]^{0,88} \quad (8.3)$$

Donde:

- $Q_{mi}(MZP)_T$  : Caudal máximo instantáneo, en MZP ( $m^3/s$ )  
 $Q_{mi}(ML)_T$  : Caudal máximo instantáneo, en ML ( $m^3/s$ )  
 $A(MZP)$  : Área aportante de la cuenca definida por sección MZP ( $km^2$ )  
 $A(ML)$  : Área aportante de la cuenca definida por sección ML ( $km^2$ )

La relación de áreas pluviales se estimó considerando una línea de nieve de diseño, situada a 2.100 m.s.n.m., correspondiente al máximo valor para el período pluvial (revisar punto 3.5 Línea de Nieve).

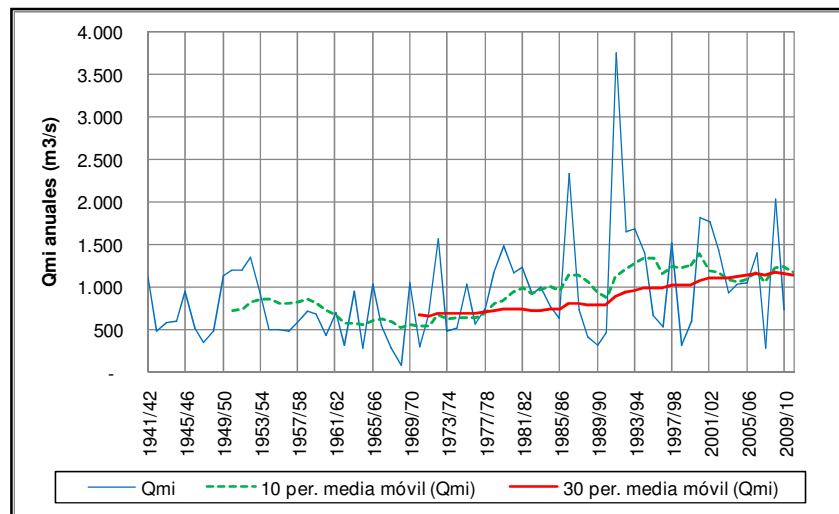
De esta manera, si la relación entre las áreas pluviales de MZP y ML, es 1,07, entonces utilizando la ecuación (8.3), se obtiene que para trasponer los caudales registrados en ML hacia MZP, se amplifica por un factor de 1,06, valor que es coincidente con el del estudio de Harza y Nenadovich (1991).

En forma previa, se relacionaron los  $Q_{mi}$  de la estación Melado en El Salto (MS) hacia Melado en La Lancha (ML), para el período 2003/04 - 2009/10. Análogamente al caso anterior, si la relación entre las áreas de ML y MS es de 1,04, entonces la relación de caudales máximos instantáneos de ambas secciones es de 1,04.

### Análisis de datos

Para observar el comportamiento que han tenido los valores, se ha trazado la serie de Qmi anuales afluentes a la sección de MZP, tal como se muestra en la Figura 8.3. Por otra parte, se han estimado curvas con el promedio móvil de período 10 y 30 años, con tal de verificar alguna tendencia que puedan tener los datos.

En la Figura 8.3, la curva de media móvil de 10 años, que comienza promediando los Qmi anuales del período 1941/42 - 1950/51, muestra una tendencia a la baja al incluir los datos de la década de los 60, y comienza a crecer sostenidamente a partir de los años 70 hasta finales de los años 90, para descender un poco hasta completar el período de registro en la actualidad. Al realizar el mismo ejercicio, pero con una media móvil que abarca un período 30 años, lo cual disminuye la dispersión de los valores, se observa una tendencia clara al alza de los Qmi anuales, en donde el promedio de los 30 valores iniciales del período (1941/42 - 1970/71) es de 672 m<sup>3</sup>/s, mientras que promediando los últimos 30 años (1980/81 - 2009/10) se llega a un valor de 1.149 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 8.3. Serie de Qmi anuales (MZP). Período 1941/42 - 2009/10.**

De la Tabla 8.8, es posible apreciar que en los escenarios temporales donde se utiliza sólo la información más reciente, tanto la media aritmética como la desviación estándar son mayores. Es decir, en los últimos años se han producido eventos de caudales máximos instantáneos de mayor magnitud, y de mayor dispersión.

**Tabla 8.8. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (MZP).**

Parámetro	MZP(U30)	MZP(U40)	MZP(U50)	MZP(U60)	MZP(U69)
Media (m <sup>3</sup> /s)	1.059	1.004	932	911	880
Desv. Estándar (m <sup>3</sup> /s)	555	530	518	490	474

Considerando la información anterior, se espera que las magnitudes de los caudales de crecida asociados a un cierto período de retorno, sean mayores cuando se estiman a partir de escenarios que contemplan la utilización de los datos más recientes.

#### Análisis de frecuencia

De acuerdo a la información recopilada desde el estudio de crecidas para la presa del embalse Melado (HARZA y NENADOVICH Ing., 1981), los valores de  $Q_{mi}$  anuales en la sección de MZP, se ajustan a la función de distribución Gumbel.

Tal como se observa en la Figura 8.3, existe un valor singularmente alto de 3.750 m<sup>3</sup>/s, con fecha 28 de Mayo de 1991 en MZP. Luego de verificar la veracidad de este dato (INGENDESA, 1991a), el cual se estima utilizando información del manejo de compuertas durante la crecida, se ha llegado a la conclusión de que el caudal máximo de esta crecida es un punto extremadamente alejado de la tendencia, y que el período de retorno asociado a este punto es mucho mayor al que se le podría asignar mediante la ecuación de Weibull. En la referencia antes citada, se menciona que esta crecida podría estar vinculada a un período cercano a los 450 años. De acuerdo al (U.S. Water Resources Council, 1981), si existe información disponible que indique que el *outlier* es el máximo valor sobre un período extendido, entonces el dato es tratado como información histórica de crecidas, y es excluido del análisis.

Por otra parte, existe un punto extremadamente bajo, correspondiente al caudal máximo instantáneo anual, ocurrido el 30 de septiembre de la temporada 1968/69, correspondiente al año más seco desde que se tiene registro en la zona central de Chile. De acuerdo a la prueba de *outliers* del (U.S. Water Resources Council, 1981), este valor debe ser también excluido del análisis.

#### Ajuste de curvas

Para seleccionar aquella distribución de probabilidad que logra un mejor grado de ajuste, se utilizó principalmente el método gráfico. En forma complementaria, se usó el *test chi cuadrado*, el

coeficiente de correlación ( $R^2$ ), y el cálculo del Error Cuadrático Medio (ECM), para respaldar la elección de la distribución escogida.

En general, el *test chi cuadrado* resulta ser aceptado para todas las distribuciones en cada uno de los escenarios. En la Tabla 8.9 se muestran los valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ), y en Tabla el valor del error cuadrático medio (ECM), para cada uno de los escenarios temporales con los que se trabajó.

**Tabla 8.9. Valores del coeficiente  $R^2$ , según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MZP.**

Distribución	MZP(U30)	MZP(U40)	MZP(U50)	MZP(U60)	MZP(U69)
Normal	0,970	0,959	0,946	0,942	0,932
Log-Normal	0,959	0,961	0,967	0,977	0,982
Pearson III	0,987	0,983	0,984	0,987	0,986
Log-Pearson	0,985	0,981	0,981	0,986	0,986
Gumbel	0,986	0,984	0,986	0,989	0,988

**Tabla . Valores del ECM, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en MZP.**

Distribución	MZP(U30)	MZP(U40)	MZP(U50)	MZP(U60)	MZP(U69)
Normal	101,7	109,0	120,0	117,2	123,0
Log-Normal	116,2	108,1	96,5	75,9	63,3
Pearson III	77,5	76,3	72,6	62,5	60,2
Log-Pearson	69,8	74,1	71,1	58,6	56,5
Gumbel	66,1	67,5	61,1	51,8	51,8

Los mínimos valores del coeficiente  $R^2$  y el ECM se obtienen en general para las funciones Log-Pearson y Gumbel. Aún cuando ambas distribuciones poseen buenos índices de correlación, se ha escogido la distribución de probabilidad Gumbel debido al análisis gráfico en donde se observa que la bondad de ajuste es mejor en los caudales de períodos de retorno alto, situándose la curva por sobre los datos observados (más seguro).

#### 8.4.4 Resultados

Realizando los análisis de frecuencia para todos los demás escenarios, es posible obtener los resultados representados en la Figura 8.5 donde además se grafica en forma referencial, la recta de

ajuste del estudio original, MZP(OR). Se debe resaltar que en esta figura, se grafican las rectas con los valores esperados de los caudales máximos instantáneos de la serie anual.

Un cuadro resumen con la estimación de los caudales máximos instantáneos asociados a la distribución Gumbel, afluentes al Embalse Melado en la Zona de Presa, se presenta en la Tabla 8.10.

**Tabla 8.10. Qmi anuales esperados (MZP) (m<sup>3</sup>/s).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	500	1.000	5.000	10.000
MZP(OR)	1.130	1.400	1.650	2.030	2.230	2.670	3.060	3.610	3.860
MZP(U30)	1.540	1.920	2.280	2.740	3.090	3.900	4.250	5.050	5.400
MZP(U40)	1.450	1.800	2.130	2.570	2.890	3.650	3.970	4.720	5.040
MZP(U50)	1.360	1.690	2.020	2.430	2.750	3.470	3.780	4.500	4.810
MZP(U60)	1.310	1.620	1.920	2.310	2.610	3.280	3.570	4.240	4.530
MZP(U69)	1.260	1.560	1.850	2.220	2.500	3.150	3.430	4.070	4.350

Sin embargo, ante la gran incertidumbre en este tipo de estimaciones, especialmente en los caudales de períodos de retorno altos, es conveniente utilizar un intervalo de confianza. De esta forma, utilizando un nivel del 95% de confianza, y tomando el valor más conservador, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 8.11.

**Tabla 8.11. Qmi con nivel de confianza del 95% (MZP) (m<sup>3</sup>/s).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	500	1.000	5.000	10.000
MZP(OR)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	3.620	s/i	4.880
MZP(U30)	1.830	2.310	2.780	3.390	3.850	4.910	5.370	6.430	6.890
MZP(U40)	1.680	2.120	2.540	3.090	3.500	4.460	4.870	5.830	6.240
MZP(U50)	1.560	1.970	2.370	2.890	3.270	4.170	4.560	5.460	5.850
MZP(U60)	1.480	1.860	2.220	2.700	3.060	3.880	4.240	5.060	5.420
MZP(U69)	1.410	1.770	2.120	2.570	2.900	3.680	4.020	4.800	5.130

## 8.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las máximas crecidas anuales afluentes al embalse Melado en la zona de presa, son de origen pluvial. En efecto, la serie de Qmi anuales coincide con la serie de Qmi pluviales, salvo en años con inviernos particularmente secos.



En la serie de Qmi se observa un caudal extremadamente alto en comparación al resto de la serie, registrado el 28 de mayo de 1991. Este punto fue considerado como una crecida histórica, y por lo tanto, se excluyó del análisis estadístico de acuerdo a las recomendaciones del U.S. Water Resources Council (1981).

Las estimaciones de los Qmi afluentes a MZP, crecen sistemáticamente al utilizar escenarios con una menor longitud del registro (años más recientes), pudiendo ordenarse de la siguiente manera: MZP(U30) > MZP(U40) > MZP(U50) > MZP(U60) > MZP(U69).

En la Figura 8.5, se comparan los Qmi esperados para distintos escenarios. Por lo tanto, la línea que representa la estimación por parte del estudio original, MZP(OR), también representa el valor esperado. Sin embargo, (Harza y Nenadovich, 1981) estimó una crecida milenaria y decamilenaria utilizando un nivel de confianza del 95%, llegando a valores de 3.620 y 4.880 m<sup>3</sup>/s, respectivamente; siendo 3.620 m<sup>3</sup>/s el caudal de diseño con que se construyeron finalmente las obras de evacuación de la presa Melado.

Considerando que se tienen antecedentes suficientes de la estimación del caudal de diseño del vertedero de la presa en el embalse Melado, se ha realizado una comparación entre las seguridades hidrológicas para los distintos escenarios de longitud y período de los registros hidrológicos y la seguridad hidrológica establecida en el diseño original, la que se presenta en la Tabla 8.12. Para el caudal de diseño de la presa (3.620 m<sup>3</sup>/s), se estimó el período de retorno (Tr) al que correspondería en cada escenario, y luego se calculó la seguridad hidrológica considerando una vida útil (n) de 50 y 100 años. Estos valores se grafican en la Figura 8.4..

**Tabla 8.12 Seguridad hidrológica en (MZP).**

	MZP(OR)	MZP(U30)	MZP(U40)	MZP(U50)	MZP(U60)	MZP(U69)
Tr (años)	1000	285	475	705	1125	1625
S (%) (n=50)	95,1	83,9	90,0	93,1	95,7	97,0
S (%) (n=100)	90,5	70,4	81,0	86,8	91,5	94,0

Por lo tanto, al comparar las estimaciones las crecidas milenarias obtenidas en este estudio (esperadas), con el caudal de diseño del evacuador de crecidas de la presa Melado, se tiene que sólo las crecidas milenarias de los escenarios MZP(U60) y MZP(U69) se encuentra bajo los 3.620 m<sup>3</sup>/s.

Cabe destacar que en el análisis anterior, se comparan los caudales esperados para los escenarios definidos en este estudio con el caudal de diseño del evacuador de crecidas de la presa, el

que a su vez se estimó utilizando un nivel de confianza del 95%. Este aspecto es de real importancia, considerando que si se hubieran comparado con el caudal esperado del estudio original, resultarían valores extremadamente bajos de la seguridad hidrológica de la obra.

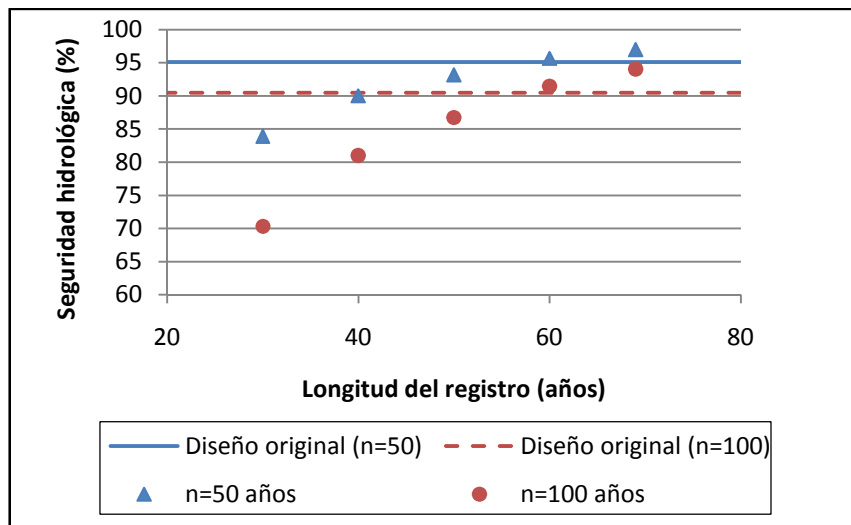


Figura 8.4. Seguridad hidrológica en función de la longitud del registro (MZP).

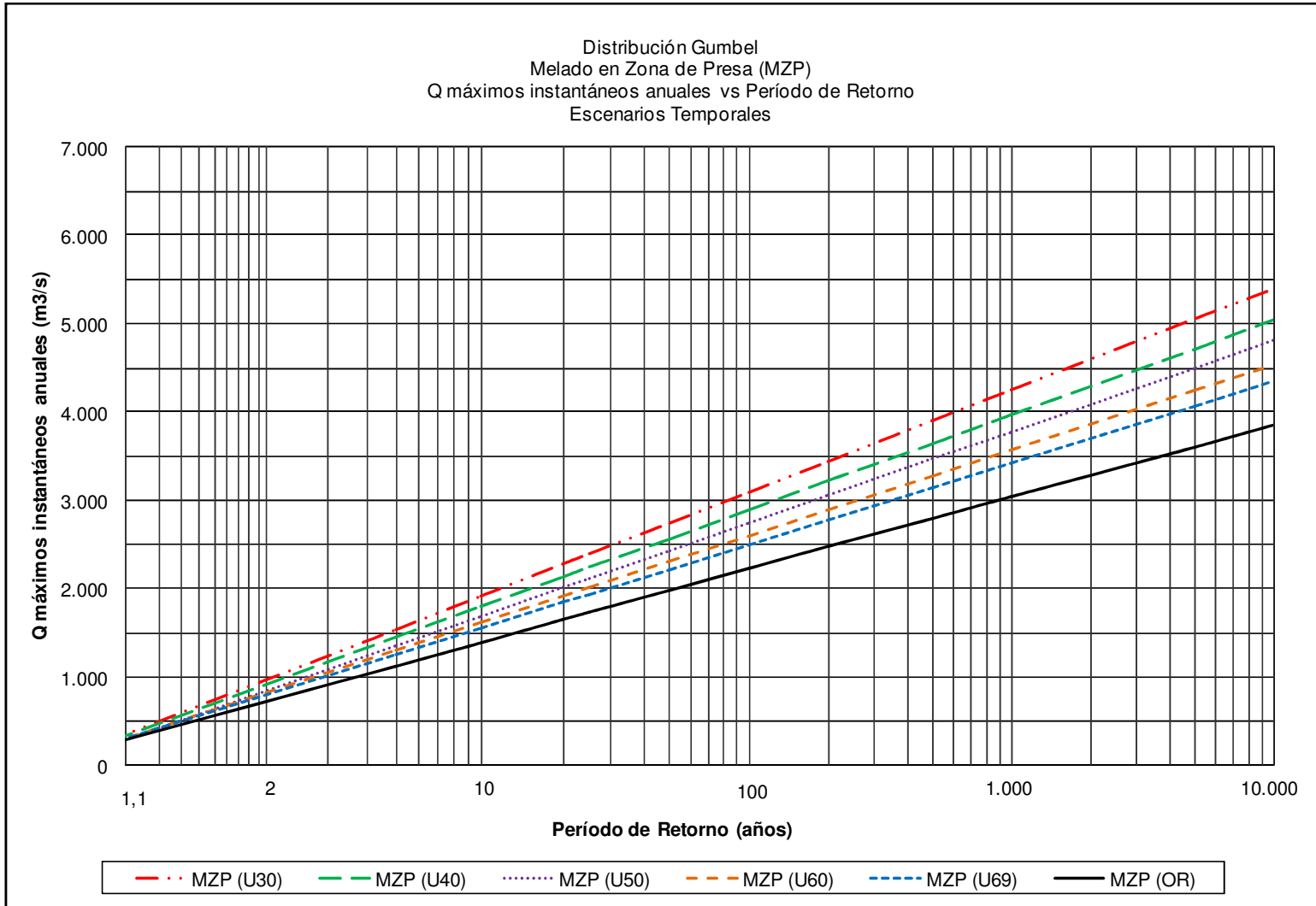


Figura 8.5. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en MZP.

## **CAPÍTULO IX**

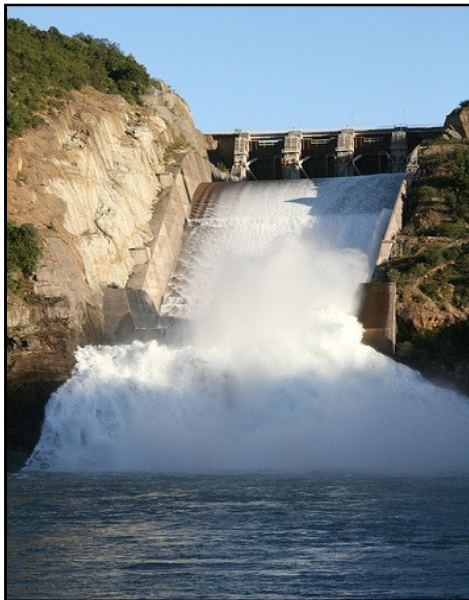
### **PRESA EMBALSE COLBÚN**

#### **9.1 DESCRIPCIÓN DE PRESA DE EMBALSE COLBÚN**

El Proyecto Colbún aprovecha los recursos de la hoya andina del río Maule regulados mediante el embalse artificial de Colbún que es su obra fundamental. Este embalse tiene una capacidad de 1.500 millones de m<sup>3</sup>. Para formar la cubeta del embalse fue necesario construir la presa principal y tres presas menores, los pretils Colorado, Cantinela y Sur.

La presa principal, de 116 m de altura, cierra una angostura del río Maule de 350 m en la base y 550 m a la cota de coronamiento. Esta presa de tierra está constituida por un núcleo central impermeable, dos zonas de transición, y dos espaldones de gravas que los confinan por aguas arriba y aguas abajo.

El vertedero, situado junto a la presa principal en su empotramiento norte, permite evacuar la crecida milenaria en condiciones normales y la decamilenaria peraltando el nivel del embalse dentro de los límites de la revancha. Su caudal de diseño es de 8.500 m<sup>3</sup>/s correspondiente a un período de retorno de 1.000 años estimado hacia el año 1985, fecha en que se pone en marcha la CH Colbún. Posee cuatro compuertas de segmento, cada una con un ancho de 14, 4m, y una altura de 16,0 m. Una fotografía del vertedero se presenta en la Figura 9.1.



**Figura 9.1. Vertedero embalse Colbún vertiendo. Fuente: Flickrriver.com**

En la Figura A.12 se presenta una planta general de la presa del embalse Colbún, y del vertedero evacuador de crecidas. En la Figura A.13 se muestra una planta y un perfil longitudinal del evacuador de crecidas (ver Anexo A).

## 9.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE AL EMBALSE COLBÚN

La cuenca afluyente al embalse Colbún se muestra en la Figura 9.2, cuyo punto de salida, constituye la zona donde se ubica la presa del embalse, ubicada en una estrecha sección del río Maule, aguas abajo de uno de sus más importantes afluentes, el río Melado.

Aún cuando el régimen hidrológico de la cuenca es nivo-pluvial, y la hoya pluvial es relativamente pequeña, las crecidas más importantes se registran en invierno y se generan por las intensas precipitaciones que caen sobre ella. En efecto, se menciona la existencia de un microclima, principalmente en la cuenca intermedia entre Armerillo y Colbún, que se caracteriza por precipitaciones muy superiores al resto de la zona (ENDESA, 1969).

El punto de desagüe de la cuenca está definido por la presa del Embalse Colbún. Las coordenadas de su ubicación se muestran en la Tabla 9.1.

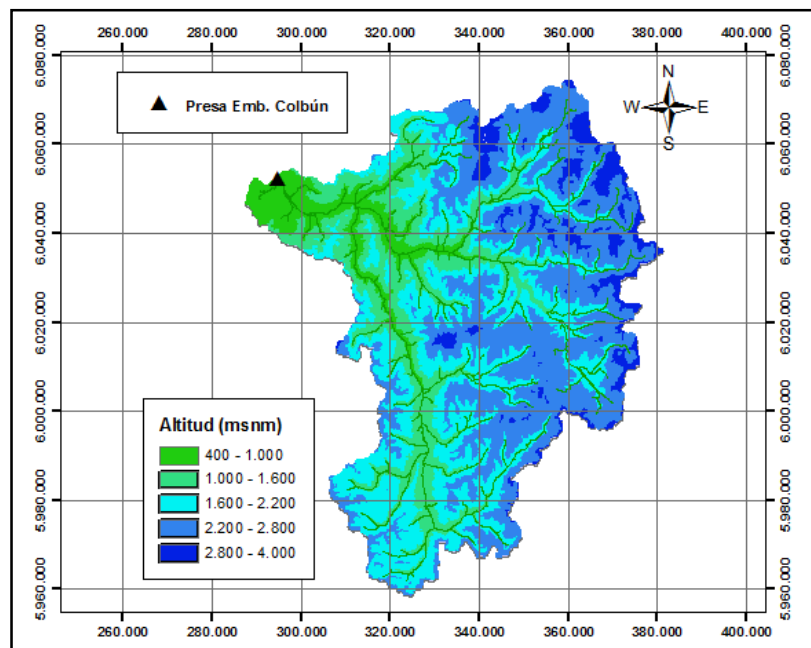


Figura 9.2. Cuenca afluyente al embalse Colbún.

**Tabla 9.1. Ubicación de la presa del embalse Colbún.**

Obra	UTM		Coordenadas Geográficas	
	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Latitud Sur (°)	Longitud Oeste (°)
Presa Emb. Colbún	294.970	6.052.430	35° 39' 01"	71° 15' 53"

Los principales parámetros geomorfológicos de la cuenca afluyente a la presa del embalse Colbún se muestran en la Tabla 9.2.

**Tabla 9.2. Parámetros de la cuenca definida por la presa del embalse Colbún.**

Parámetro de la cuenca	Presa Embalse Colbún
Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )	5.747
Pendiente media de la cuenca (m/m)	0,386
Largo de la cuenca (km)	159,0
Pendiente media del cauce principal (m/m)	0,016
Longitud del cauce principal (km)	153,5
Altura media de la cuenca (msnm)	1.995

### 9.3 REVISIÓN DE ESTUDIOS DE CRECIDA DE EMBALSE COLBÚN

#### 9.3.1 Introducción

El informe sobre la Hidrología de la CH Colbún, (ENDESA, 1969), contiene valiosa información referente al Estudio de Crecidas afluyente a la zona destinada a la presa del embalse artificial.

Otros trabajos relacionados a esta obra, (ENDESA,1979b e INGENDESA, 1990), replican la metodología del informe realizado en el año 1969, y actualizan los antecedentes hasta la fecha de su publicación.

Tal como se menciona en el estudio original, el río Maule, en la sección aguas arriba de la angostura de Colbún, posee una hoya tributaria total de unos 5.700 km<sup>2</sup>. De dicha superficie, si se considera la línea de nieves 1.200 a 1.500 msnm, el área nival corresponde a aproximadamente un 80% del total.

### 9.3.2 Registros utilizados

El estudio de crecidas original, (ENDESA, 1969), se realizó básicamente con los datos registrados en las estaciones fluviométricas de Maule en Armerillo, y Maule en Colbún.

#### Maule en Armerillo

Esta sección se ubica a 22 km aguas arriba de la sección de Maule en Colbún, e inmediatamente aguas abajo de la bocatoma del Canal Maule Norte.

La estación fluviométrica fue instalada por la Dirección de Riego en el año 1915, con el nombre de Maule en Culenar. En el año 1940, en forma paralela a la Dirección de Riego, ENDESA comenzó a controlar limnimétricamente la sección, y a partir de 1943 inició el control por medio de aforos. En el año 1947, se trasladó la sección de Maule en Culenar a Armerillo, a algunos metros aguas abajo de la original.

Desde su instalación en 1915, la estación ha llevado un registro continuo de lecturas limnimétricas, con dos lecturas diarias.

En 1953, la Dirección de Riego instaló un limnígrafo que permite calcular fácilmente los caudales máximos instantáneos.

#### Maule en Colbún

En 1951, la Dirección de Riego instaló una estación de control fluviométrico en la angostura de Maule en Colbún. Sin embargo, esta información no puede utilizarse de buena forma, debido a que sólo se realizaban lecturas cada 2 días.

En 1959, se instaló un limnígrafo. A partir de 1965, la acción conjunta de ENDESA con la Dirección de Riego, controla en forma periódica y continua esta sección, efectuando inspecciones y aforos.

#### Canales de Riego

Los canales destinados a riego, son utilizados únicamente en el periodo Octubre-Mayo. Es decir, no ejercen ninguna influencia en el periodo de invierno, cuando se producen las crecidas más importantes.

### Síntesis de registros utilizados

En resumen, el estudio del que se ha obtenido la información mencionada, “Hidrología Central Colbún-Informe N°2” (ENDESA, 1969), considera como información base, los 53 años de estadística de la estación Maule en Armerillo (periodo 1915-1967).

Posteriormente, el informe “Proyecto Colbún, Antecedentes Hidrológicos y Meteorológicos” (ENDESA, 1979b), incorpora aquellos antecedentes de crecidas controladas hasta la fecha de su publicación. Se menciona que con la información agregada, los resultados originales continúan vigentes. En forma complementaria, se incluyen los registros de caudales máximos instantáneos de cada mes en la sección de Maule en Colbún, para el periodo 1941-1978.

Finalmente, el informe “Complejo Hidroeléctrico Colbún-Machicura, Antecedentes Hidrológico y Meteorológicos” (INGENDESA, 1990), incorpora información hasta el año 1989, incluyendo los registros de caudales máximos instantáneos de cada mes en la sección de Colbún, para el periodo 1941-1989.

### 9.3.3 Metodología

ENDESA (1969), plantea varias etapas para realizar las estimaciones de los caudales afluentes a la angostura de Colbún, durante eventos de crecida.

Debido a que Maule en Colbún poseía una estadística de corta longitud (hacia el año 1980), fue necesario calcular la curva de probabilidad de crecidas anuales en forma indirecta, basándose en la relación que existe entre los caudales máximos instantáneos de esta sección con los de Maule en Armerillo (ENDESA, 1969).

Conocida la relación de caudales y la curva de probabilidad de crecidas de Maule en Armerillo, se calculará la de Maule en Colbún, amplificando los valores de la curva de Maule en Armerillo por los coeficientes de regresión de la relación.

#### Maule en Armerillo

En primer lugar, se requiere calcular la probabilidad anual de los caudales máximos limnimétricos, la que se basa en los registros de máximas lecturas limnimétricas anuales, las que fueron medidas diariamente, a las 8 ó 18 horas.



Tal como se mencionó anteriormente, y debido al origen de los datos, en el trabajo realizado por ENDESA (1969), se calcularon dos curvas de probabilidades, una para el periodo 1915-1967, y otra para el periodo 1943-1967. La curva obtenida tomando como base el periodo 1915-1967 proporciona caudales superiores en un 10% aproximadamente, a los que se obtuvieron en el periodo más corto.

En el mismo informe se indica que los caudales máximos calculados para el periodo 1915-1942, están afectos a errores poco importantes, y representan mejor el régimen por tener una mayor longitud del registro, se ha elegido la curva de probabilidad resultante del periodo 1915-1967.

Luego, utilizando el método de Gumbel, se obtuvo:

**Tabla 9.3. Q<sub>máx</sub> limnimétricos esperados en (ARM). Según (ENDESA, 1969)**

Tr (años)	10	20	50	100	200	500	1.000
Q <sub>mi</sub> (m <sup>3</sup> /s)	2.500	2.950	3.575	4.025	4.450	5.050	5.500

Anteriormente se describió que sólo a partir de 1953 se comenzó a tener un registro limnigráfico. De esta forma, relacionando los caudales máximos anuales limnimétricos con los caudales máximos instantáneos, en el periodo común 1953-1967, se obtuvo la siguiente relación:

$$Q_{mi}(ARM) = 1,17 Q_{máx\ limn}(ARM) \quad (9.1)$$

Donde:

$Q_{mi}(ARM)$  : Caudal máximo instantáneo, registrado en estación Maule en Armerillo (m<sup>3</sup>/s)

$Q_{máx\ limn}(ARM)$  : Caudal máximo limnimétrico, registrado en Maule en Armerillo (m<sup>3</sup>/s)

La ecuación (9.1) sigue siendo válida para los trabajos realizados posteriormente, (ENDESA, 1979b e INGENDESA, 1990), basándose en los resultados que obtienen de incluir la información hidrológica disponible a la fecha de los estudios señalados anteriormente.

Los caudales máximos instantáneos para distintos periodos de retorno, en la estación Maule en Armerillo, se muestran en la Tabla 9.4.

**Tabla 9.4. Qmi esperados en (ARM). Según (ENDESA, 1969).**

Tr (años)	10	20	50	100	200	500	1.000
Qmi (m <sup>3</sup> /s)	2.900	3.450	4.175	4.700	5.200	5.900	6.450

Maule en Colbún

Debido a la que la estación Maule en Colbún registra una menor cantidad de datos registrados, se busca una relación entre los caudales máximos instantáneos de Maule en Colbún y Maule en Armerillo, las que han registrado simultáneamente a partir de 1959. De esta manera, serán consideradas todas aquellas crecidas que superen un valor arbitrario de 450 m<sup>3</sup>/s, a no ser que sea la crecida máxima del año.

De acuerdo a (ENDESA, 1969), se obtuvo la siguiente relación:

$$Q_{mi}(COL) = 1,33 Q_{mi}(ARM) \quad (9.2)$$

Donde:

$Q_{mi}(COL)$  : Caudal máximo instantáneo, registrado en estación Maule en Colbún (m<sup>3</sup>/s)

$Q_{mi}(ARM)$  : Caudal máximo instantáneo, registrado en estación Maule en Armerillo (m<sup>3</sup>/s)

La ecuación (9.2), sigue siendo válida, de acuerdo a estudios realizados posteriormente, (ENDESA, 1979b e INGENDESA, 1990).

9.3.4 Resultados

Los caudales afluentes a la sección de Maule en Colbún, se obtienen aplicando la relación descrita por la ecuación (9.2) a los caudales registrados en Maule en Armerillo.

Los caudales máximos instantáneos para distintos períodos de retorno, en la estación Maule en Colbún, se muestran en la Tabla 9.5.

**Tabla 9.5. Qmi esperados en Presa Colbún (ENDESA, 1969).**

Tr (años)	10	20	50	100	200	500	1.000
Qmi (m <sup>3</sup> /s)	3.810	4.550	5.500	6.180	6.840	7.800	8.500

## 9.4 ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA AFLUENTES AL EMBALSE COLBÚN, BAJO DISTINTOS ESCENARIOS TEMPORALES

### 9.4.1 Introducción

De acuerdo a la revisión de estudios disponibles acerca de la hidrología del proyecto Colbún (ENDESA, 1969; ENDESA, 1979b e INGENDESA, 1990), se ha completado la estadística de la estación fluviométrica de Maule en Armerillo (ARM), para el período 1941/41 a 2009/10. Además, se ha utilizado la relación existente entre los caudales máximos instantáneos de la estación Maule en Armerillo con los registrados en la estación Maule en Colbún (COL) (ecuación (9.2)), ubicada en la sección donde hoy se ubica la presa del Embalse.

Se han establecido escenarios temporales que incluyen una estadística de caudales máximos instantáneos en la zona de estudio, con los últimos 30, 40, 50, 60 y 69 últimos años de registro hidrológico, considerando sólo los registros medidos desde 1940/41 en adelante, por considerarse de poca confiabilidad los datos anteriores a la fecha indicada.

En la Tabla 9.6, se muestra la nomenclatura utilizada para cada uno de los escenarios temporales definidos para este estudio, donde ARM(Ux)/COL(Ux) corresponde a la estimación de los caudales máximos instantáneos en Maule en Armerillo (ARM) y/o Maule en Colbún (COL), utilizando los últimos “x” años de estadística. Se incluye además, el valor de ARM(OR)/COL(OR), correspondiente a las estimaciones realizadas en el estudio (ENDESA, 1969), y equivalente en las actualizaciones posteriores (ENDESA, 1979b) e (INGENDESA, 1990).

**Tabla 9.6. Escenarios definidos para presa de embalse Colbún.**

Escenarios	Descripción		
	Estación	N° de datos	Período del registro
ARM(U30) / COL(U30)	Maule en Armerillo / Colbún en Zona de Presa	30	1980/81 - 2009/10
ARM(U40) / COL(U40)		40	1970/71 - 2009/10
ARM(U50) / COL(U50)		50	1960/61 - 2009/10
ARM(U60) / COL(U60)		60	1950/51 - 2009/10
ARM(U69) / COL(U69)		69	1941/42 - 2009/10
ARM(OR) / COL(OR)		53, 49	(*), (**)

(\*) En (ENDESA, 1969), se utilizó el período 1915-1967.

(\*\*) En (INGENDESA, 1990), se utilizó el período 1941-1989.

#### 9.4.2 Registros utilizados

##### Maule en Armerillo.

Se tiene una estadística ampliada de caudales máximos instantáneos anuales en la estación fluviométrica Maule en Armerillo (ARM) con 69 años de estadística, para el período 1941/42 - 2009/10.

La extensión de la estadística de  $Q_{mi}$  de la estación (ARM) para el período 1941/42 - 1952/53, se realizó utilizando una correlación entre los caudales máximos limnimétricos y máximos instantáneos utilizando el período común 1953/54 - 1967/68.

$$Q_{mi}(ARM) = 1,18 \cdot Q_{m\acute{a}x\ limn}(ARM) \quad R^2 = 0,98 \quad (9.3)$$

Donde:

$Q_{mi}(ARM)$  : Caudal máximo instantáneo registrado en estación Maule en Armerillo ( $m^3/s$ )

$Q_{m\acute{a}x\ limn}(ARM)$  : Caudal máximo limnimétrico registrado en estación Maule en Armerillo ( $m^3/s$ )

Los  $Q_{mi}$  de la estación (ARM) para los años 1970/71 - 2001/02, corresponden a valores registrados en la estación controlada por ENDESA. En tanto, los datos para el período 2002/03 - 2009/10, son registrados por la estación Maule en Armerillo, controlada por la DGA.

La serie completa de caudales máximos instantáneos anuales en estación Maule en Armerillo, período 1941/42 - 2009/10, se muestra en Anexo B.

##### Maule en Colbún

En el trabajo de INGENDESA (1990), se presenta la estadística ampliada de los caudales máximos instantáneos para cada mes, afluentes a la zona de la presa del Embalse Colbún (COL), para el período 1941/42 - 1989/90.

### 9.4.3 Metodología

#### Estimación de caudales en COL a partir de registros medidos en ARM.

Realizando una correlación entre los caudales máximos instantáneos anuales de las estaciones Maule en Armerillo, y Maule en Colbún (zona de presa), para el período comprendido entre los años 1941/42 -2009/10, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_{mi} (COL) = 1,23 \cdot Q_{mi}(ARM) \quad R^2 = 0,94 \quad (9.4)$$

Donde:

$Q_{mi}(COL)$  : Caudal máximo instantáneo en estación Maule en Colbún ( $m^3/s$ )

$Q_{mi}(ARM)$  : Caudal máximo instantáneo estación Maule en Armerillo ( $m^3/s$ )

De esta forma, es posible estimar la serie de caudales máximos instantáneos anuales en la zona de presa del Embalse Colbún (1941/42 – 2009/10), conociendo la serie de caudales máximos instantáneos de Maule en Armerillo, y utilizando la ecuación (9.4).

#### Análisis de datos

En la Figura 9.3, se muestra la serie de caudales máximos instantáneos anuales para la sección de Maule en Colbún (COL), en la zona de presa. Se han trazado curvas de promedio móvil de períodos 10 y 30 años.

La media móvil de periodo 10 años, muestra que entre los años 1941/42 a 1973/74 no existe cambio de tendencia importante, donde se alternan valores altos y bajos de los  $Q_{mi}$ , cuyos máximos registros en las temporadas 1961/62 y 1963/64 se contraponen a la sequía de los años 1967/68 y 1968/69. Posteriormente, a partir de 1974/75 y hasta 1981/82, se produce el mayor cambio en la tendencia, explicado principalmente por la ausencia de  $Q_{mi}$  que sean inferiores a los  $2.000 m^3/s$ . Posteriormente se producen grandes *peaks* como las crecidas de 1986/87 y 1991/92, pero que se alternan puntos bajos como 1984/85 y 1990/91. A partir de 1994/95 y hasta la fecha, se observa un leve cambio de tendencia a la baja.

Al realizar el promedio móvil con un período de 30 años, se observa una menor dispersión que en el caso anterior, se aprecia una tendencia al alza hasta el año 1986/87. Posterior a 1986/87 y hasta la fecha, se observa una leve tendencia a la baja. Sin embargo, al considerar toda la serie, se observa que al promediar los primeros 30 años de datos se tiene un caudal de 1.800 m<sup>3</sup>/s, mientras que al promediar los últimos 30 años se alcanza un valor de 2.300 m<sup>3</sup>/s, es decir, cerca de un 28% superior.

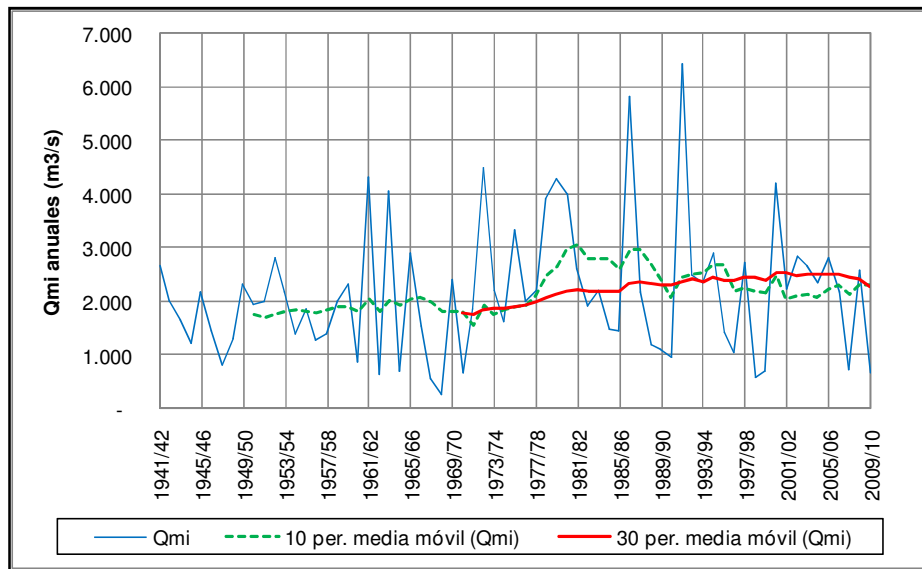


Figura 9.3. Serie de Qmi en (COL). Período 1941/42 - 2009/10.

En la Tabla 9.7 se muestran los principales parámetros estadísticos, para los escenarios temporales definidos para el estudio. Se observa que en general existe una pequeña tendencia en el aumento de la media, excepto para el escenario U(30). En tanto, se observa un aumento importante en la dispersión de los datos para los escenarios COL(U30), COL(U40) y COL(U50).

Tabla 9.7. Principales parámetros estadísticos de los escenarios temporales (COL).

Parámetro	COL(U30)	COL(U40)	COL(U50)	COL(U60)	COL(U69)
Media	2.295	2.387	2.276	2.251	2.184
Desv. Estándar	1.391	1.355	1.388	1.271	1.213
Coef. de Asimetría	1,37	1,08	0,90	1,10	1,21

### Análisis de frecuencia

De acuerdo a ENDESA (1969), cuyos resultados se han aceptado como válidos en las actualizaciones posteriores, se indica que los valores de la serie de caudales máximos instantáneos anuales en la zona de presa de Maule en Colbún (COL), se ajustó una función de distribución Gumbel. De esta manera se estimó el  $Q_{mi}$  hasta un período de retorno de 1.000 años.

En el presente trabajo se utilizó la serie de caudales máximos instantáneos anuales para la sección de Maule en Colbún (COL), con una estadística de 69 años, que comprende el período 1941/42 – 2009/10.

De acuerdo a la prueba de datos dudosos (*outliers*) (U.S. Water Resources Council, 1981), se detectó un punto extremadamente bajo, correspondiente al caudal máximo instantáneo ocurrido en el mes de Junio de la temporada 1968/69, y que se estima en apenas 280 m<sup>3</sup>/s. Este valor ha sido excluido del análisis.

### Ajuste de curvas

Se ha probado el ajuste de la serie de caudales máximos instantáneos anuales de la sección Maule en Colbún (COL), a las funciones de probabilidad de distribución Normal, Log-Normal, Pearson III, Log-Pearson III; y Gumbel.

Para seleccionar aquella distribución de probabilidad que logra un mejor grado de ajuste, se utilizó el método gráfico. Además, se usó la prueba chi cuadrado, el coeficiente de correlación ( $R^2$ ), y el cálculo del Error Cuadrático Medio (ECM).

En la Tabla 9.8, se muestran los valores del coeficiente de correlación  $R^2$  para las distintas distribuciones de probabilidad, y cada escenario temporal definido para el presente estudio. Se observa que los mejores coeficientes se dan para las distribuciones Log-Normal, Log-Pearson III y Gumbel.

En forma análoga, en la Tabla 9.9 se muestran los valores del Error Cuadrático Medio (ECM), observándose en general, un mejor ajuste estadístico con las distribuciones Log-Normal, Log Pearson III y Gumbel.

**Tabla 9.8. Valores del coeficiente R<sup>2</sup>, según distribución de probabilidad y escenarios temporales en COL.**

Distribución	COL(U30)	COL(U40)	COL(U50)	COL(U60)	COL(U69)
Normal	0,864	0,914	0,931	0,914	0,904
Log-Normal	0,957	0,979	0,960	0,978	0,980
Pearson III	0,945	0,975	0,979	0,977	0,976
Log-Pearson	0,951	0,979	0,981	0,980	0,979
Gumbel	0,938	0,976	0,981	0,978	0,975

**Tabla 9.9. Valores del ECM (m<sup>3</sup>/s), según distribución de probabilidad y escenarios temporales en COL.**

Distribución	COL(U30)	COL(U40)	COL(U50)	COL(U60)	COL(U69)
Normal	504,0	394,6	363,1	369,7	372,6
Log-Normal	295,7	197,5	333,8	196,5	172,4
Pearson III	347,7	238,6	217,4	205,0	197,9
Log-Pearson	324,8	209,8	189,0	182,6	181,8
Gumbel	345,9	211,2	188,9	189,8	192,3

Considerando lo anterior, en el presente análisis se ha adoptado, al igual que en el estudio original, la distribución Gumbel para normalizar los resultados de todos los escenarios temporales, aún cuando en algunos casos, exista otra distribución con mejor ajuste estadístico.

#### 9.4.4 Resultados

De acuerdo a lo anterior, en la Figura 9.5, se muestran las rectas de ajuste de la distribución de probabilidad Gumbel, que permiten estimar los caudales máximos instantáneos para distintos períodos de retorno, utilizando la serie de caudales máximos instantáneos anuales en la zona de Maule en Colbún (COL), en la zona de presa. En forma referencial, se ha incluido la recta estimada en (ENDESA, 1969), denominada COL(OR).

La Tabla 9.10, muestra los valores esperados de los caudales máximos instantáneos, para distintos períodos de retorno en la zona de presa de Maule en Colbún (COL), en cada uno de los escenarios temporales estudiados.



**Tabla 9.10. Qmi esperados (COL), para distintos escenarios (m<sup>3</sup>/s).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	500	1.000	5.000	10.000
COL(OR)	3.070	3.810	4.550	5.500	6.180	7.800	8.500	10.100	10.800
COL(U30)	3.500	4.440	5.340	6.500	7.380	9.390	10.260	12.280	13.140
COL(U40)	3.520	4.410	5.270	6.370	7.200	9.120	9.940	11.850	12.680
COL(U50)	3.410	4.310	5.170	6.290	7.120	9.050	9.880	11.810	12.640
COL(U60)	3.280	4.090	4.870	5.880	6.640	8.380	9.130	10.880	11.630
COL(U69)	3.150	3.920	4.660	5.610	6.330	7.980	8.690	10.340	11.050

Ante la gran incertidumbre en la estimación de caudales máximos, especialmente en aquellos que están asociados a períodos de retorno altos, se ha estimado el valor más conservador, utilizando un nivel de confianza del 95%. Estos resultados se muestran en la Tabla 9.11.

**Tabla 9.11. Qmi con nivel de confianza del 95% (COL) (m<sup>3</sup>/s).**

Tr (años)	5	10	20	50	100	500	1.000	5.000	10.000
COL(U30)	4.200	5.410	6.580	8.100	9.240	11.880	13.020	15.660	16.800
COL(U40)	4.100	5.210	6.290	7.690	8.740	11.170	12.210	14.640	15.690
COL(U50)	3.940	5.040	6.100	7.470	8.510	10.900	11.930	14.320	15.350
COL(U60)	3.720	4.700	5.640	6.870	7.790	9.930	10.840	12.980	13.890
COL(U69)	3.540	4.460	5.340	6.490	7.350	9.340	10.200	12.190	13.050

## 9.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las máximas crecidas anuales afluentes al embalse Colbún en la zona de presa, son de origen pluvial. En efecto, la serie de Qmi anuales coincide con la serie de Qmi pluviales, salvo en años con inviernos particularmente secos.

La serie de Qmi anuales afluentes a la presa del embalse Colbún incluye dos valores altos, correspondientes a las crecidas ocurridas el 16 de junio de 1986 y el 28 de mayo de 1991. Sin embargo, a diferencia del efecto producido en la serie de Qmi afluentes al embalse Melado, estos dos valores máximos no constituyen datos anómalos (*outliers*), según las recomendaciones del U.S. Water Resources Council (1981).

Se observa un patrón común entre las crecidas afluentes a los embalses Melado y Colbún, en las zonas de presa. En efecto, las estimaciones de los  $Q_{mi}$  afluentes a COL, crecen al utilizar escenarios con menor longitud de registro, de acuerdo al siguiente orden: COL(U30) > COL(U40) > COL(U50) > COL(U60) > COL(U69).

Sin embargo, aún cuando las magnitudes de las estimaciones de los  $Q_{mi}$  tiene directa relación con la longitud del registro, este efecto es más notorio, por ejemplo, al pasar del escenario COL(U50) a COL(U60). Esto se debe principalmente a que los registros de la serie de  $Q_{mi}$  anuales, anteriores a 1960, tienen máximos instantáneos significativamente más bajos que el resto de la serie.

El caudal de diseño adoptado para la construcción de las obras de evacuación de la presa del embalse Colbún, consiste en la crecida milenaria estimada en los estudios realizados, equivalente a 8.500 m<sup>3</sup>/s. De acuerdo a las estimaciones realizadas en esta investigación, para todos los escenarios definidos, se obtiene un caudal de período de retorno de 1.000 años superior al caudal de diseño de la obra. De esta manera, el rango de las estimaciones del caudal milenario esperado va desde 8.690 a 10.260 m<sup>3</sup>/s, para los escenarios extremos de COL(69) y COL(U30), respectivamente.

En la Tabla 9.12, se señala la seguridad hidrológica de la obra, asociada a los escenarios temporales definidos. De esta manera, considerando que el caudal de diseño de la presa fue de 8.500 m<sup>3</sup>/s (crecida milenaria), se estimó el período de retorno (Tr) correspondiente a este caudal, en cada escenario. Para el análisis, se consideraron los casos en que la vida útil de la obra (n) corresponde a 50 y 100 años.

**Tabla 9.12. Seguridad hidrológica en (COL).**

	COL(OR)	COL(U30)	COL(U40)	COL(U50)	COL(U60)	COL(U69)
TR (años)	1000	245	300	315	555	830
S (%) (n=50)	95,1	81,5	84,6	85,3	91,4	94,2
S (%) (n=100)	90,5	66,4	71,6	72,8	83,5	88,6

Los valores de la Tabla 9.12, se han graficado en la Figura 9.4, donde se observa que en todos los casos se obtiene una seguridad menor a la original, debido a que los caudales milenarios de cada escenario, son mayores al caudal de diseño de las obras de evacuación de la presa del embalse Colbún.

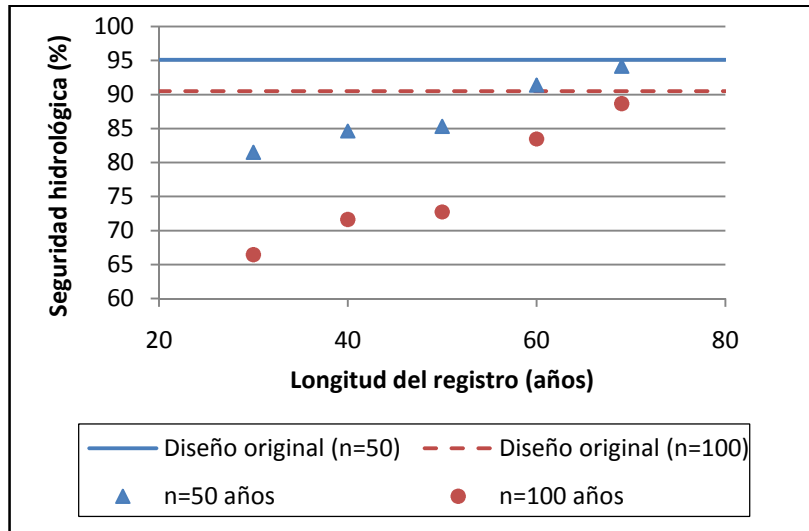


Figura 9.4. Seguridad hidrológica en función de la longitud del registro (COL).

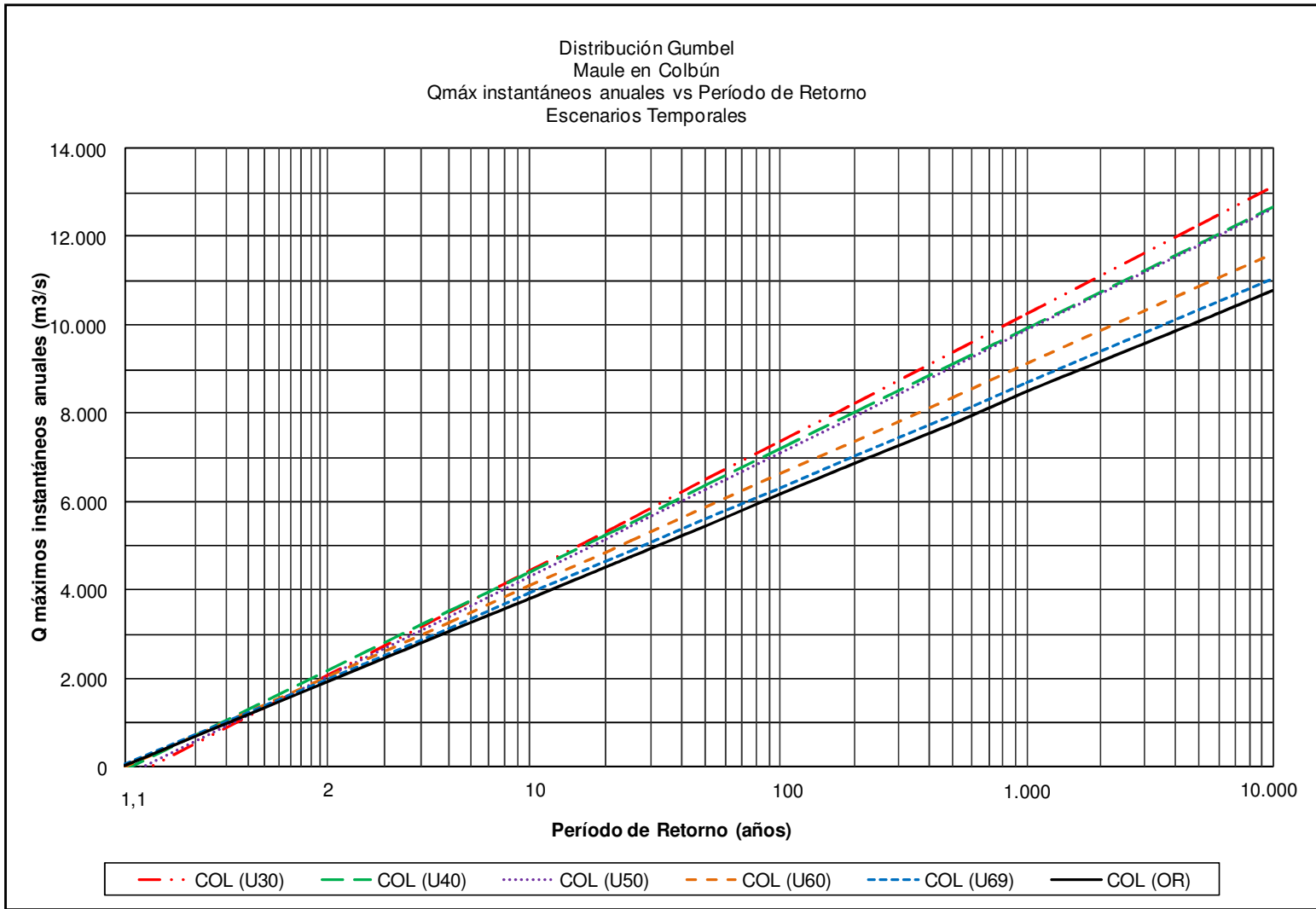


Figura 9.5. Curva de probabilidad de excedencia para los distintos escenarios temporales definidos en COL.

## CAPÍTULO X

### CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

En el presente trabajo se han analizado los efectos de distintos escenarios de longitud y período del registro fluviométrico, con el objetivo de conocer la variabilidad que puede existir en la estimación de caudales de crecida de diseño y la seguridad hidrológica de obras hidráulicas. Para ello, se han incluido las siguientes obras hidráulicas ubicadas en la cuenca del río Maule:

- Presa de laguna del Maule (AFLM)
- Presa de laguna Invernada (AFLI)
- Bocatoma Maule de Central Isla (BTMCI)
- Bocatoma Maule de Central Pehuenche (MBTP)
- Presa de embalse Melado (MZP)
- Presa de embalse Colbún (COL)

En los cuadros resúmenes presentados en las Tablas 10.1 y 10.2, se muestran los resultados obtenidos para los caudales máximos instantáneos de período de retorno de 1.000 años, utilizando los distintos escenarios de longitud del registro hidrológico, diferenciando los casos en que los datos corresponden al período pluvial (abril-septiembre) o de deshielo (octubre-marzo). Además, se muestra sólo como referencia, el caudal de diseño con el que fue construida la obra, sin que éste sea necesariamente el caudal de período de retorno milenario.

**Tabla 10.1. Cuadro resumen de  $Q_{mi}$  afluentes a las obras hidráulicas analizadas (TR=1.000 años), utilizando registros fluviométricos del período pluvial (abril-septiembre) ( $m^3/s$ ).**

LUGAR	Q diseño	U30	U40	U50	U60	U69
AFLM	250	-	-	-	-	-
AFLI	400	-	-	-	-	-
BTMCI	1.500	1.230	1.090	1.020	-	-
MBTP	1.900	2.450	2.230	2.140	-	-
MZP	3.620	4.250	3.979	3.780	3.570	3.430
COL	8.500	10.260	9.940	9.880	9.130	8.690

**Tabla 10.2. Cuadro resumen de Qmi afluentes a las obras hidráulicas analizadas (TR=1.000 años), utilizando registros fluviométricos del período de deshielo (octubre-marzo) (m<sup>3</sup>/s).**

LUGAR	Q diseño	U30	U40	U50	U60	U69
AFLM	250	316	324	327	-	-
AFLI	400	743	654	773	-	-
BTCI	1.500	620	590	570	-	-
MBTP	1.900	1.440	1.550	1.580	-	-
MZP	-	-	-	-	-	-
COL	-	-	-	-	-	-

A continuación se mencionan algunas conclusiones y comentarios acerca de los resultados obtenidos en el presente estudio:

Los caudales afluentes a las presas de la laguna Maule e Invernada, se estimaron en forma indirecta, a partir de un análisis regional para crecidas de deshielo, debido a la falta de información fluviométrica aguas arriba de estas obras. El análisis regional se realizó utilizando la información de nueve estaciones fluviométricas ubicadas en cuencas de características similares a las definidas por las presas de las lagunas del Maule e Invernada, y que poseen estadística de al menos 50 años. Este análisis detectó una disminución de las magnitudes de las crecidas con alto período de retorno, al disminuir la longitud del registro. En consecuencia, estos resultados se vieron reflejados en la aplicación a las cuencas antes señaladas.

La estimación de Qmi realizada para los distintos escenarios de registro histórico en la cuenca afluente a la laguna del Maule, resultaron ser levemente superiores a los obtenidos en la referencia ENDESA (1980). No obstante, al corregir estos resultados por la diferencia de áreas entre ambos trabajos, las estimaciones del presente estudio quedan bajo los de la referencia citada.

Las estimaciones realizadas para la cuenca afluente a la laguna Invernada, fueron muy superiores a los antecedentes previos existentes (cercano a un 108% superior). Esta diferencia para la estimación de caudales de crecida de distintos períodos de retorno, podría deberse en gran medida a las metodologías utilizadas en cada caso. En efecto, los antecedentes previos consistían en estimaciones de los caudales afluentes, realizando un balance en la laguna Invernada, y utilizando las mediciones del caudal de desagüe de la laguna y los desniveles a nivel diario que allí se producen; mientras que en el presente estudio, debido a la falta de disponibilidad de datos en la zona de estudio, se optó por aplicar los resultados del análisis regional para crecidas de origen nival o deshielo.

Las series de Qmi anuales afluentes a las bocatomas ubicadas en el río Maule, de las centrales Isla y Pehuenche, se alternan entre aquellas generadas por origen pluvial y nival. Sin embargo, son las de origen pluvial las que definen la condición crítica para el caudal de diseño, por tratarse de eventos considerablemente más extremos.

Los resultados del presente trabajo, indican que los caudales pluviales afluentes a las bocatomas de las centrales Isla y Pehuenche son mayores a medida que la longitud del registro es menor. En tanto, los caudales nivales muestran dispar comportamiento en las cuencas afluentes a estas obras. Mientras en la bocatoma Maule de la CH Isla se obtienen caudales de deshielo mayores, a medida que disminuye la longitud del registro, en la captación Maule de la CH Pehuenche sucede lo contrario.

En el caso de las presas de los embalses Melado y Colbún, se analizaron las series de Qmi anuales, las que coinciden con la serie de Qmi anuales de origen pluvial, salvo en años extremadamente secos. En ambas secciones se obtuvieron resultados concordantes a los encontrados anteriormente, es decir, las estimaciones de las crecidas pluviales afluentes a las bocatomas de las centrales Isla y Pehuenche, junto con las presas de los embalses Melado y Colbún, son sistemáticamente mayores al utilizar longitudes de registros hidrológicos más cortos.

Los antecedentes relativos al diseño de las presas Melado y Colbún, constituyen estudios de crecida formales, a diferencia de las otras obras, donde sólo se recopilieron antecedentes y resultados a nivel parcial.

Por lo tanto, sólo para las presas de Melado y Colbún, se realizó una comparación entre los caudales de diseño y los caudales que se obtendrían para el mismo período de retorno del estudio original, utilizando los distintos escenarios de información histórica. Cabe señalar que estos resultados se obtienen al comparar el caudal original del diseño, con el caudal esperado obtenido en la presente investigación.

Para calcular la seguridad hidrológica de las obras anteriormente mencionadas, se consideró incorporar la variable de la vida útil de la obra, como si ésta se fuese a construir en la fecha actual.

Las seguridades hidrológicas de la presa del embalse Melado son mayores a la del diseño original, sólo en los escenarios donde se utilizan los últimos 60 y 69 años de estadística. Para longitudes menores del registro hidrológico, la seguridad disminuye a medida que se utilizan menos años en la estimación. En efecto, la seguridad hidrológica original con que fue diseñada la presa del embalse Melado era de 95,1%, mientras que el caso más desfavorable (utilizando una vida útil de 50

años) resultó en una seguridad del 83,9%, cuando las estimaciones se realizaron utilizando los últimos 30 años de estadística.

En tanto, las seguridades hidrológicas de la presa del embalse Colbún son menores a la estimada al momento de su diseño para todos los escenarios de longitudes del registro histórico definidos en este estudio. La seguridad hidrológica original era de 95,1%, mientras que el caso más desfavorable ocurre cuando se realizaron estimaciones en base a los últimos 30 años de registros hidrológicos, obteniéndose un 81,5%, utilizando en ambos casos una vida útil de 50 años.

Finalmente, los resultados obtenidos en el presente estudio indican un comportamiento generalizado en los caudales de origen pluvial asociados a períodos de retorno altos, observándose un aumento en la magnitud de las crecidas estimadas a partir de longitudes más cortas del registro histórico.

Por otra parte, los caudales de origen nival no evidencian un patrón común. Mientras el análisis regional de crecidas de deshielo y la estimación de caudales nivales afluentes a la bocatoma Maule de la central Pehuenche, muestran una pequeña disminución en la estimación de las crecidas al utilizar una longitud de registro más corta, sucede lo contrario en la bocatoma Maule de la central Isla. Claramente estos efectos son menos marcados que en los caudales de origen pluvial.

En términos generales se tiene que las series de caudales máximos instantáneos de origen pluvial muestran valores más extremos, en particular durante los últimos 25 años, donde destacan las crecidas ocurridas en los años 1986 y 1991 en la cuenca del río Maule. Por otra parte, si bien las series de caudales máximos instantáneos de origen nival casi no muestran un cambio en su tendencia, se obtuvieron leves disminuciones en los caudales de período de retorno alto, al utilizar sólo los últimos años de la estadística.

Como una forma de verificar el origen de los cambios o tendencias que provocan la variabilidad en las estimaciones de caudales de crecida para períodos de retorno altos que se obtuvieron en el presente trabajo, se plantea como propuesta de trabajo a futuro, realizar estudios que contemplen mediciones y análisis de variables físicas y sus derivados, como por ejemplo, las precipitaciones y temperatura, las que podrían estar definiendo nuevas condiciones de línea de nieves, cantidad total anual del recurso hídrico en la zona de estudio, etc.



## REFERENCIAS

**AGUILERA M.** Estimación de Funciones de Distribución de Probabilidad, para caudales Máximos, en la Región del Maule - 2007.

**APARICIO F.** Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa S.A., 1989.

**ARNELL N. y CHUNZHEN L.** Hydrology and water resources. Capítulo 4 de Climate Change 2001: Impacts, Adaption and Vulnerability.. - 2001.

**BENÍTEZ A. y VIDAL F.** Estimación de la línea de nieve entre las latitudes 28°S y 36°S. Informe Técnico Biblioteca hidrología de INGENDESA. - 1997.

**CADE-IDEPE** Consultores en Ingeniería Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Maule / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. - 2004.

**CÁRDENAS J.** Importancia de los registros hidrológicos en el diseño y proyección de estructuras hidráulicas // Revista de Ingeniería Civil. - págs. 50-54.

**CHOW Ven Te, MAIDMENT David R. y MAYS W.** Hidrología Aplicada. McGraw Hill Interamericana S.A., 1994.

**EDIC Ing. Ltda.** Estudio del Comportamiento Geotécnico del Muro del Embalse Laguna del Maule. Modificación del Coronamiento para Uso Vial. Archivo Técnico DGA - 2004.

**ENDESA** Central hidroeléctrica Isla // Catálogos de Endesa. - 1965. - págs. 13, 17, 18, 28.

**ENDESA** Hidrología Central Colbún, Informe N°2, Desarrollo Hidroeléctrico Hoya Río Maule / Grupo de Estudios Hidrológicos. - 1969.

**ENDESA** Caudales Medios Mensuales Retrospectivos, Resumen Actualizado hasta Diciembre de 1970 / División de Estudios Hidrológicos. - 1972.

**ENDESA** Estudio de los Recursos Hídricos de Maule Alto, Desarrollo Hidroeléctrico Hoya Río Maule Alto / Grupo de Estudios Hidrológicos. - 1973.

**ENDESA** Hidrología de la Central Maule-Melado / División de Estudios Hidrológicos. - 1979a.

**ENDESA** Proyecto Colbún, Antecedentes Hidrológicos y Meteorológicos. Informe OICOI N°7/79 / División de Estudios Hidrológicos. - 1979b.

**ENDESA** Estimación de las Crecidas Máximas Instantáneas Anuales Afluentes a Laguna del Maule, División Estudios Hidrológicos. - 1980.

**ENDESA** Recursos Hídricos de las Centrales Hidroeléctricas de Chile, Volumen I, Capítulo II Cuenca del Río Maule. División Estudios Hidrológicos, 1982.

**ENDESA** Central Los Cóndores, Estudio de los Recursos Hídricos: Informe OICOI N°1/89 / División Estudios Hidrológicos. - 1989.

**ENDESA** Proyecto Curillín, Antecedentes Hidrometeorológicos. Informe OICOI N°8/90 / División de Estudios Hidrológicos. - 1990.

**ESCOBAR F. y ANABALÓN R.** Análisis de las rutas de nieve del país / DGA. - 1991.

**FOSTER H.** Theoretical frequency curves and their application to engineering problems // Trans. Am. Soc. Civ. Eng. - 1924. - Vol. 87. - págs. 142-173.

**FULLER W. E.** Flood flow // Trans. Am. Soc. Civ. Eng. - 1914. - págs. 564-617.

**GONZÁLEZ R. y DUSSAUBAT S.** Variabilidad de las precipitaciones máximas diarias en función de la longitud del registro // XIX Congreso Chileno de Hidráulica. - Viña del Mar, 2009.

**GUMBEL E. J.** The return period of flood flows // The Annals of Mathematical Statistics. - 1941. - Vol. 12.

**GUMBEL E.** Statistics of Extremes. Columbia Univ., 1958.

**HARZA y NENADOVICH Ing.** Estudio Hidrológico Presa Melado, Desarrollo Hidroeléctrico del Maule Alto, Central Pehuenche. Estudios para ENDESA - 1981.

**HIDALGO P.** Informe Vertedero Embalse Laguna del Maule, Archivo Técnico DGA - 1955.

**HUH, S.; DICKEY, D.; MEADOR, M.; RUHL, K.** Temporal analysis of the frequency and duration of low and high streamflow: years of record needed to characterize streamflow variability // Journal of Hydrology. - 2005. - 310. - págs. 78-94.

**INGENDESA** Complejo Hidroeléctrico Colbún-Machicura, Antecedentes Hidrológicos y Meteorológicos: Informe IICOI N°15/90. - 1990.

**INGENDESA** Análisis de la Crecida del 28-05-1991: Minuta IICOI N°6/91 / Empresa Eléctrica Pehuenche S.A.. - 1991a.

**INGENDESA** Evacuador de crecidas y desagüe de medio fondo. Normas de operación para evacuar crecidas. // Informe Técnico Área de Obras Hidráulicas. - 1991b.

**INGENDESA** Cálculo de Crecidas Milenaria y Decamilenaria Afluentes al Embalse Melado. - 2006a.

**INGENDESA** Cálculo de Crecidas Milenaria y Decamilenaria Afluentes al Embalse Rapel. - 2006b.

**INGENDESA** Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Los Cóndores. - 2007.

**INGENDESA** Actualización Estudio Hidrológico Central Los Cóndores. - 2010a.

**JENKINSON A.** The frequency distribution of annual maximum (or minimum) values of meteorological elements // Q.J.R. Met. Soc. . - 1955. - págs. 81, 158-171.

**KATZ R., PARLANGE M. y NAVEAU P.** Statitics of extreme in hydrology // Advances in Water Resources. - 2002. - 25. - págs. 1287-1304.

**KROLL C. y VOGEL R.** Probability Distribution of low Streamflow Series in the United States // Journal of Hidrology Engineering. - March/April de 2002. - págs. 137 - 146.

**KUNDZEWICZ, Z.; GRACZYK, D.; MAURER, T.; PRZYMUSINSKA, I.; RADZIEJEWSKI, M.; SVENSSON, C.; SZWED, M.** Detection of change in worl-wide hydrological times series of maximum annual flow // WMO. - Ginebra : [s.n.], 2004.

**KUNDZEWICZ, Z.; GRACZYK, D.; MAURER, T.; PRZYMUSINSKA, I.; RADZIEJEWSKI, M.; SVENSSON, C.; SZWED, M.** Trend detection in river flow time-series: 1.Annual maximum flow // Hidrol. Sci. J. - 2005. - págs. 797-810.

**KUNDZEWICZ Z.** El cambio climático y las crecidas // Boletín de la OMM. - Julio de 2006. - 55. - págs. 170-173.

**LANDWEHR J., MATALAS J. y WALLIS J.** Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles // Water Resources Res. - 1979. - 15. - págs. 5, 1055, 1064.

**LANGBEIN W. B.** Annual flood and the partial duration flood // Serie EOS. Trans. AGU. - 1949. - págs. 879-881.

**LINSLEY R., KOHLER M. y PAULUS J.** Hidrología para Ingenieros - 2 ed. México. McGraw-Hill Interamericana S.A., 1988.

**MAGGIO G.** Análisis estadístico de valores extremos. Aplicaciones en hidrología. - 2000.

**MOP** Embalse Laguna del Maule, Archivo Técnico DGA - 1945.

**MOP** Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica / DGA. - 1995.

**MUDELSEE M. [y otros]** No upward trend in the occurrence of extreme floods in central Europe // Nature. - 2003. - 421. - págs. 166-169.

**PEARSON K.** On the systematic fitting of curves to observations and measurements // Biometrika. - 1902. - Vol. 1.

**PEÑA H. y VIDAL F.** Estimación de la línea de nieves durante los eventos de precipitación entre las latitudes 28° y 38° sur // XI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. - 1993.

**SEOANE R. y LOPARDO R.** Evolución en los criterios hidrológicos e hidráulicos de aliviaderos para el control de crecidas // VI Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos. - 2010.

**SHERMAN R.** Streamflow from rainfall by the Unit-graph Method // Eng. News Records. - 1932. - 108. - págs. 501-505.

**SMITH R.** Maximum likelihood estimation in a class of nonregular cases // Biometrika. - 1985. - 72. - págs. 67-90.

**SVENSSON C., KUNDZEWICZ Z. y MAURER T.** Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series. - Hydrol. Sci. J., 2005. - 811-824.

**U.S. WATER RESOURCES COUNCIL** Guidelines for determining flood flow frequency, 17B. -  
1981.