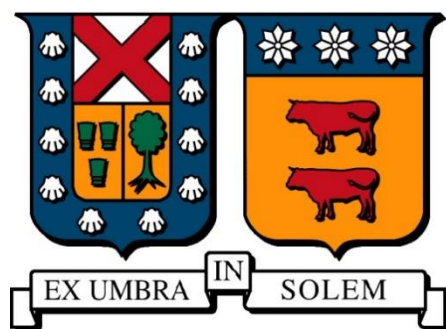


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE



“PROPUESTA DE MODIFICACIÓN
CONVENIO DE OPERACIÓN EMBALSE
LAGUNA DEL MAULE Y SUS EFECTOS
SOBRE LOS RECURSOS DISPONIBLES PARA
RIEGO Y GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA”

Memoria de Título presentada por
MARTÍN PALMA ESPINA

Como requisito parcial para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía
FELIPE OLIVARES THIELE

Profesor Correferente
PEDRO KAMANN CHACANA

Diciembre 2018

I. RESUMEN EJECUTIVO

El río Maule, nace en el extremo norponiente de la cuenca que lleva el mismo nombre, en el embalse natural Laguna del Maule, a 2.175 [msnm], el cual fue intervenido artificialmente para aumentar su capacidad de almacenamiento durante la década del 50. Desde el inicio del uso de sus aguas hasta la actualidad, el embalse ha ido tomando cada vez más importancia. El intenso uso agrícola e hidroeléctrico de la cuenca hacen imprescindibles las aguas del embalse, el cual regula de manera interanual los recursos hídricos.

El objetivo del presente estudio es plantear la necesidad de actualizar el convenio Riego-Enel de 1947 el cual regula las extracciones de riego y generación en el embalse. Este convenio tiene ya 70 años y fue desarrollado a partir de la hidrología disponible en esa fecha. La actualización de criterios acorde a la hidrología actual, la cual considera la disminución de recursos hídricos (Atribuible al calentamiento global), permitirá una optimización en la utilización de los recursos a largo plazo. Para plantear esta necesidad, primero se debe demostrar la obsolescencia de los criterios legalmente vigentes. Se realizó un modelo de simulación operacional a partir de los criterios de extracción fijados por el Convenio Riego-Endesa de 1947 y se observó el comportamiento del embalse, considerando el escenario en el cual ambos sectores extraen todos sus derechos, dentro de las restricciones que impone el convenio y dentro de la disponibilidad de recursos de acuerdo con la hidrología ocurrida. Adicionalmente al comportamiento del embalse en el tiempo, se estimaron los caudales medios mensuales distribuidos para riego en los meses de verano, volúmenes entregados para generación en invierno y la seguridad de riego de acuerdo con un criterio de falla basado en opinión de expertos.

Los resultados obtenidos del modelo evidencian como el consumo hídrico supera los recursos afluentes al embalse, generando una caída permanente del volumen embalsado en el tiempo. Por otra parte, el modelo muestra como en períodos extensos de años secos, el embalse entrega gran parte de sus recursos durante el primer año, perdiendo la escala interanual con el que fue diseñado el embalse, la cual consiste en acumular reservas durante los años húmedos para entregarlos durante los períodos secos. Finalmente, estos resultados se traducen en una baja de seguridad de riego, la cual borde el 65%.

Actualizando los criterios de extracción basada en opinión de expertos, considerando los valores mínimos requeridos para una temporada de riego ajustada, pero sin pérdidas agrícolas se permite garantizar condiciones de riego y generación muy estables en el tiempo. El modelo muestra al embalse la mayor parte del tiempo con recursos suficientes para suplir los déficits de los períodos secos y además los nuevos criterios evidencian una mejora en la distribución de los recursos en estos mismos períodos, priorizando la estabilidad a largo plazo de los caudales.

II. INDICE DE CONTENIDOS

I.	RESUMEN EJECUTIVO.....	I
II.	INDICE DE CONTENIDOS.....	II
III.	ÍNDICE FIGURAS.....	IV
IV.	ÍNDICE TABLAS.....	V
1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS.....	2
2.1.	OBJETIVOS GENERALES.....	2
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
3.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1.	LA ECUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO.....	3
3.1.1.	Confiability y Precisión de la Información Hidrometeorológica.....	4
3.2.	ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL BALANCE HÍDRICO.....	5
3.2.1.	Precipitación.....	5
3.2.2.	Evaporación.....	6
3.3.	EMBALSE PARA USO DE AGUAS.....	6
3.3.1.	Caudal Firme.....	7
4.	CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA.....	9
4.1.	DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA.....	9
4.2.	LÍNEA DE NIEVE.....	10
4.3.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HIDROELÉCTRICO DE LA CUENCA.....	10
4.4.	INFORMACIÓN FLUVIOMÉTRICA, NIVELES DE LAGOS Y EMBALSES.....	14
4.5.	SECTOR DE RIEGO.....	15
5.	CARACTERÍSTICAS LAGUNA DEL MAULE.....	17
5.1.	CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA DE LA LAGUNA DEL MAULE.....	17
5.2.	CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE A LA LAGUNA DEL MAULE.....	18
5.3.	CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LA LAGUNA DEL MAULE.....	19
5.3.1.	Curvas características de la Laguna del Maule.....	19
5.3.2.	Precipitación en la Laguna del Maule.....	21
5.3.3.	Evaporación de la Laguna del Maule.....	23
6.	ACTUAL MANEJO OPERACIONAL DE LA CUENCA.....	24
6.1.	CAUDAL EN ARMERILLO.....	24

6.2.	CONVENIO FISCO – ENDESA DE 1947.....	28
6.2.1.	Artículo Primero	28
6.2.2.	Artículo Segundo	29
6.2.3.	Artículo Tercero.....	30
6.2.4.	Artículo Cuarto	32
6.2.5.	Artículo Quinto.....	32
6.2.6.	Artículo Sexto	34
6.3.	RESOLUCIÓN DGA N°105 DE 1983	34
6.4.	MODELO OPERACIÓN LAGUNA DEL MAULE	36
6.4.1.	Criterio de Falla	39
7.	OPERACIÓN ACTUAL	41
7.1.	SUSTENTABILIDAD DE LA CUENCA	41
7.3.	CAUDAL MEDIO MENSUAL PARA RIEGO	49
7.4.	SEGURIDAD DE RIEGO	51
8.	SOLUCIONES ESTUDIADAS	52
8.1.	ALTERNATIVAS 1, 2 y 3	52
8.1.1.	VOLUMEN EMBALSADO Y VOLUMENES EXTRAÍDOS	53
8.1.2.	CAUDAL MEDIO MENSUAL PARA RIEGO	58
8.1.3.	SEGURIDAD DE RIEGO	61
8.2.	COMPARACIÓN CON LA OPERACIÓN REAL.....	63
9.	CONCLUSIONES	65
10.	REFERENCIAS	68
11.	ANEXOS	70

III. ÍNDICE FIGURAS

Figura 3.1: Zonas de almacenamientos en un embalse multipropósito (Chow, Maiment, & Mays, 1988)	7
Figura 4.1: Esquema de la cuenca alta del río Maule (Elaboración Propia)	13
Figura 4.2: Mapa estaciones fluviométricas y niveles de lago utilizadas en el estudio (Elaboración Propia)	15
Figura 5.1: Fotografía de la Laguna Maule (Elaboración Propia)	17
Figura 5.2: Cuenca afluente a la Laguna del Maule (Elaboración Propia)	18
Figura 5.3: Curva Volumen de Agua vs Altura, Laguna del Maule (Elaboración Propia)	20
Figura 5.4: Curva Espejo de Agua vs Altura, Laguna del Maule (Elaboración Propia)	20
Figura 5.5: Mapa de Isoyetas (Dirección General de Aguas, 1988)	22
Figura 5.6: Evaporación media mensual entregados por la Comisión Nacional de Riego y la Dirección General de Aguas (Elaboración Propia)	23
Figura 6.1: Ubicación estación Maule en Armerillo (JVRM)	24
Figura 6.2: Esquema simplificado, cuenca Maule alto (Sitio web JVRM)	25
Figura 6.3: Ubicación Reservas de Agua en la cuenca alta del río Maule (JVRM)	27
Figura 6.4: División Laguna Maule con volúmenes y artículos por porción (Elaboración Propia)	29
Figura 6.5: Curva variación estacional, convenio FISCO-ENDESA 1947 (Elaboración Propia)	29
Figura 6.6: Volúmenes disponibles para riego (Elaboración Propia)	31
Figura 6.7: Volúmenes disponibles para generación (Elaboración Propia)	33
Figura 6.8: Curva variación estacional Resolución N°105, (Elaboración Propia)	35
Figura 6.9: Orden para satisfacer la necesidad de riego por el río Maule y sus embalses (Elaboración Propia)	37
Figura 6.10: Curva variación estacional mínima para satisfacer el riego (Curva de Falla) comparada con curva variación estacional Convenio 1947 (Elaboración Propia)	40
Figura 7.1: Comparación entre Volúmenes Deficitarios y Volúmenes Afluentes (Elaboración Propia)	42
Figura 7.2: Volumen Embalsado Período 1992-1996 (Elaboración Propia)	45
Figura 7.3: Volumen Embalsado Período 1997-2001 (Elaboración Propia)	45
Figura 7.4: Volumen Embalsado Período 2002-2006 (Elaboración Propia)	46
Figura 7.5: Volumen Embalsado Período 2007-2011 (Elaboración Propia)	46
Figura 7.6: Volumen Embalsado Período 2012-2016 (Elaboración Propia)	46
Figura 7.7: Comparación Extracciones Realizadas vs Máxima Permitida por Generación - 1992-2016 (Elaboración Propia)	48

Figura 7.8: Comparación Extracciones Realizadas vs Máxima Permitida por Riego - 1992-2016 (Elaboración Propia).....	48
Figura 7.9: Caudal Medio Mensual Para Riego - Diciembre 1992 a 2016 (Elaboración Propia)	49
Figura 7.10: Caudal Medio Mensual Para Riego – Enero 1992 a 2016 (Elaboración Propia).....	50
Figura 7.11: Caudal Medio Mensual Para Riego – Febrero 1992 a 2016 (Elaboración Propia)	50
Figura 7.12: Caudal Medio Mensual Para Riego – Marzo 1992 a 2016 (Elaboración Propia).....	50
Figura 8.1: Curva Variación Estacional Alternativa 1, 2, 3 y Curva Variación Estacional Convenio 1947 (Elaboración Propia).....	53
Figura 8.2: Comparación Volumen Embalsado Período 1992-1996 (Elaboración Propia).....	53
Figura 8.3: Comparación Volumen Embalsado Período 1997-2001 (Elaboración Propia).....	54
Figura 8.4: Comparación Volumen Embalsado Período 2002-2006 (Elaboración Propia).....	54
Figura 8.5: Comparación Volumen Embalsado Período 2007-2011 (Elaboración Propia).....	54
Figura 8.6: Comparación Volumen Embalsado Período 2012-2016 (Elaboración Propia).....	55
Figura 8.7: Comparación Volúmenes Extraído Para Riego - Operación Actual, Alternativa 1, 2 y 3 (Elaboración Propia).....	56
Figura 8.8: Comparación Volúmenes Extraídos Para Generación - Operación Actual, Alternativa 1, 2 y 3 (Elaboración Propia)	56
Figura 8.9: Caudal Medio Mensual Para Riego, Operación Actual, Alt 1, 2 y 3 – Diciembre 1992 a 2016 (Elaboración Propia).....	58
Figura 8.10: Caudal Medio Mensual Para Riego, Operación Actual, Alt 1, 2 y 3 – Enero 1992 a 2016 (Elaboración Propia).....	59
Figura 8.11: Caudal Medio Mensual Para Riego, Operación Actual, Alt 1, 2 y 3 – Febrero 1992 a 2016 (Elaboración Propia).....	59
Figura 8.12: Caudal Medio Mensual Para Riego, Operación Actual, Alt 1, 2 y 3 – Marzo 1992 a 2016 (Elaboración Propia).....	59
Figura 8.13: Comparación Volumen Embalsado – Operación Actual, Propuesta y Valores Reales (Elaboración Propia).....	63

IV. ÍNDICE TABLAS

Tabla 4.1: Cota de línea de nieve en zona de estudio (Benítez & Vial, 1997).....	10
Tabla 4.2: Resumen Centrales Cuenca Alta Río Maule	12
Tabla 4.3: Estaciones fluviométricas y niveles de lago utilizadas en el estudio (Red Hidrométrica DGA)	14
Tabla 4.4: Asociaciones de canalistas del río Maule. Incluye superficies de riego y acciones (Elaboración Propia).....	16

Tabla 5.1: Parámetros morfológicos de la cuenca afluyente a la laguna del Maule (Elaboración Propia)	19
Tabla 5.2: Estaciones meteorológica Lo Aguirre (Red Hidrométrica DGA)	21
Tabla 6.1: Ejemplo – Caudales Naturales Río Maule Año 1998 (Elaboración Propia)	30
Tabla 6.2: Ejemplo – Caudales Naturales Río Maule, Curva de Variación Estacional y Aportes Laguna del Maule, Año 1998 (Elaboración Propia)	30
Tabla 6.3: Ejemplo independencia Convenio 1947 y Resolución N°105	35
Tabla 7.1: Comparación entre Volúmenes Deficitarios y Volúmenes Afluentes, en [Hm ³]	42
Tabla 7.2: Estatus de la Laguna el Primer día de año	47
Tabla 7.3: Volúmenes Entregados En Todo el Período – Operación Actual En [Hm ³] (Elaboración Propia)	49
Tabla 7.4: Fallos en las temporadas de riego – Operación Actual (Elaboración Propia)	51
Tabla 8.1: Curva Variación Estacional Asesor Técnico (Asero Técnico)	52
Tabla 8.2: Estadísticas Total Volumen Extraídos Período 1992-2016, Operación Actual, Alternativas 1, 2 y 3 en [Hm ³] (Elaboración Propia)	57
Tabla 8.3: Estadísticas Caudales Diciembre y Enero – Caso Base, Alt 1, 2 y 3 en [m ³ /s] (Elaboración Propia)	60
Tabla 8.4: Estadísticas Caudales Febrero y Marzo – Caso Base, Alt 1, 2 y 3 en [m ³ /s] (Elaboración Propia)	60
Tabla 8.5: Fallos en las temporadas de riego – Alternativa 1 (Elaboración Propia)	61
Tabla 8.6: Fallos en las temporadas de riego – Alternativa 2 (Elaboración Propia)	62
Tabla 8.7: Fallos en las temporadas de riego – Alternativa 3 (Elaboración Propia)	62

1. INTRODUCCIÓN

El constante desarrollo del país ha exigido un sostenido crecimiento de los recursos hídricos para diversos usos como la implementación de nuevas tecnologías que generan un aumento en la demanda energética, el aumento de las exportaciones de materias primas o simplemente su uso cotidiano. En ese sentido los lagos y embalses cumplen una función de gran importancia en la regulación de este recurso.

Para contar con recursos hídricos durante todo el año y mejorar la eficiencia en su disponibilidad, se han construidos desde los años 50 hasta la actualidad una serie de embalses y represas en los ríos más caudalosos del país, siendo el río Maule uno de los más grande de la zona central de Chile.

Con el paso de los años se han habilitado nuevos suelos agrícolas en la zona incrementando la demanda de agua para riego. Por esta razón y dado lo esencial que es mantener todos los años una cantidad de agua disponible para asegurar una buena producción agrícola, la Laguna del Maule se ha transformado en una de las piezas fundamentales en el sistema hídrico del Maule.

Adicionalmente, la cuenca de este río se ha convertido en quizás una de las más intervenidas a nivel nacional. Solo en el sector alto de la cuenca y sin considerar sus afluentes, el río Maule alimenta tres centrales hidroeléctricas de pasada, más dos proyectadas, una de paso y otra de embalse a los pies de la misma Laguna del Maule. Sus afluentes el río Cipreses y Melado alimentan dos y una central respectivamente dejando al embalse en una posición aún más importante dentro de la cuenca.

Por otro lado, el diseño de estas obras se realiza típicamente a partir de estimaciones de caudales asociados a diversos períodos de retorno, los que se obtienen mediante un análisis de frecuencia utilizando registros hidrológicos históricos, usualmente utilizando rangos de 25 a 50 años, dependiendo de la disponibilidad de la información.

La elección del registro hidrológico es quizás, la elección más importante en el diseño de estas obras. Se debe ser capaz de interpolar, y aún más difícil, extrapolar las variables hidrológicas con el fin de predecir los comportamientos futuros durante la vida útil de la obra. Sin embargo, en los casos en que los registros existentes son de gran extensión se han observado cambios o tendencias en los últimos años, dejando a las obras construidas y los recursos esperados en ocasiones subdimensionadas o sobredimensionadas.

Teniendo en cuenta este cambio, resulta de interés general y en particular de los accionistas de la Junta de Vigilancia del Río Maule (JVRM), cuantificar los recursos hídricos disponibles en la Laguna de Maule, los cuales pueden haber variado a más de 60 años desde el inicio de su construcción.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GENERALES

- Proponer una modificación al convenio que controla la operación de Laguna del Maule.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar la disponibilidad media de recursos hídricos con los derechos otorgados en el embalse Laguna del Maule.
- Generar un modelo que permita ajustar el actual funcionamiento de la Laguna del Maule.
- Proponer modificaciones y seleccionar la mejor solución al convenio que controla el funcionamiento actual del embalse.
- Obtener la seguridad de riego de la situación actual, alternativas propuestas y mejor solución.
- Analizar los caudales medios mensuales para riego obtenidos de la operación actual, modelos propuestos y solución preferente.
- Analizar la regulación de la Laguna de Maule.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. LA ECUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO

Los procesos hidrológicos transforman la distribución espacial y temporal del agua a través del ciclo hidrológico. El movimiento del agua es un sistema hidrológico que es influido por las propiedades físicas del sistema, tales como la interacción del agua con otros medios como el aire y el calor. Los cambios de fase del agua entre fases líquida, sólida y de vapor son importantes en algunos casos (Chow, Maiment, & Mays, 1988). Un mecanismo necesario para desarrollar modelos hidrológicos es la ecuación de continuidad, la cual se requiere en casi todos los problemas aplicados a los procesos hidrológicos.

La conservación de la masa es el principio físico más útil en el análisis hidrológico. Expresada en su forma más básica y general la ecuación de continuidad puede representarse por la relación:

$$I(t) - Q(t) = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1)$$

Dónde:

$I(t)$: Flujo de entrada, en un determinado volumen de control, [m³/s]

$Q(t)$: Flujo de salida, en un determinado volumen de control, [m³/s]

$\frac{\partial V}{\partial t}$: Variación del volumen de agua almacenado en el tiempo, en un determinado volumen de control, [m³/s]

La Ecuación (1), expresada en su forma integral y aplicada a una cuenca hidrográfica como volumen de control, se conoce con el nombre de ecuación de balance de masa o ecuación general de balance hidrológico (Stowhas B., 2016). Para un intervalo entre dos instantes t_1 y t_2 el balance de masas en una cuenca se representa por la Ecuación (2).

$$P + Q_a - R - E - T - Q_e = \partial V_{sup} + \partial V_{sub} + \partial V_h + \partial H \quad (2)$$

Dónde:

P : Precipitación total ocurrida en el período de tiempo, [m³]

Q_a : Volumen de agua afluente a la cuenca como caudales superficiales o subterráneos, [m³]

R : Precipitación retenida por la vegetación, [m³]

E : Evaporación desde la superficie del suelo húmedo o desde espejos de agua, [m³]

T : Transpiración vegetal ocurrida en el período de tiempo, [m³]

Q_e : Escorrentía total efluente en la sección de salida de la cuenca, [m³]

∂V_{sup} : Variación del volumen de agua almacenado de manera superficial (Lagos o Embalses), [m³]

∂V_{sub} : Variación del volumen de agua almacenado de manera subterránea (Napas, Acuíferos), [m³]

∂V_h : Variación del volumen de agua almacenada en forma de hielo, glaciar o nieve, [m³]

∂H : Variación del volumen de agua almacenado en forma de humedad contenida en los suelos, [m³]

Es posible considerar todas las variaciones de volúmenes en un solo término y agrupar los valores de Evaporación, Transpiración y Retención en solo un término denominado Evapotranspiración.

Siendo conceptualmente exacta, para la aplicación práctica de la ecuación de balance hidrológico, todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación y la ecuación del balance deberá incluir, por lo tanto, un término residual o de diferencia (UNESCO, 1981). De esta manera la Ecuación (2) es posible reescribirla de manera siguiente:

$$P + Q_a - ET - Q_e - \partial V - \eta = 0 \quad (3)$$

Dónde:

ET : Evapotranspiración, [m³]

η : Término residual o de diferencia, [m³]

∂V : Variación del volumen de agua total, [m³]

Considerando los errores que se cometen en la medición o estimación de cada uno de los términos de la ecuación, la sumatoria de ellos, que pasa a ser el valor estimado de la variable de la incógnita, puede alcanzar magnitudes de error inadmisibles, dando resultados, en consecuencia, absurdos (Stowhas B., 2016).

3.1.1. Confiabilidad y Precisión de la Información Hidrometeorológica

Como se mencionó anteriormente, cualquier error que se cometa en las mediciones, repercutirá en el dato a estimar y muchas veces éstos, para ser detectados, requieren de un cuidadoso análisis, por lo general de tipo estadístico. En ese sentido, es necesario tener en cuenta la interdependencia que existe entre los elementos principales que se consideran para la estimación de una componente y aquellos empleados en forma indirecta para estimar los primeros.

Proceder a la definición de confiabilidad y precisión de las componentes del balance hídrico lleva consigo frecuentemente cierto grado de incertidumbre, por cuanto cada una de ellas está sujeta en mayor o menor proporción, a errores no fáciles de detectar, ya que la información relacionada con los registros hidrometeorológicos de la red operacional es la base para la evaluación del balance hídrico. Esta información no siempre es totalmente satisfactoria en virtud de una serie de circunstancias, tales como: tipos de instrumentos, periodicidad con la que personas que efectúan su recopilación y procesamiento (UNESCO, 1982).

El termino de precisión puede ser definido como “el grado en que una medición específica concuerda con los valores verdaderos”. Esto lleva a pensar en la necesidad de establecer tratamientos con igual grado de precisión para la estimación de cada uno de los componentes. Por ello, además de requerirse precisión en los instrumentos de medición, se necesita que las condiciones locales permitan que puedan efectuarse otras mediciones complementarias, por ejemplo: tener gran precisión en la medida de los niveles de un río es de poca ayuda, si no se tiene ninguna en la realización de aforos simultáneos (UNESCO, 1982).

En general, la calidad de la información está suspendida a las previsiones tomadas para definir la localización de las estaciones hidrometeorológicas, así como a los lapsos de registros disponibles y las condiciones que prevalezcan respecto a la operación, mantenimiento y procesamiento de la información.

3.2. ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN EL BALANCE HÍDRICO

3.2.1. Precipitación

Se denomina precipitación al agua que proviene de la humedad atmosférica y cae a la superficie terrestre, principalmente en estado líquido (lluvia), o sólido (nieve o granizo). Si se considera el análisis de una cuenca totalmente nival, se requiere un mecanismo de medición de precipitación de este tipo.

El tubo muestreador más utilizado corresponde al que se denomina tubo “Monte Rosa”. Este tubo entrega directamente el peso de la nieve contenida en la muestra, expresado en términos de su equivalente en agua, definido como la altura de agua líquida que resultaría de la fusión total de la nieve.

Uno de los problemas del uso de tubos muestreadores es su representatividad, ya que miden la cantidad de nieve que queda depositada en un punto específico de terreno, magnitud que no tiene por qué coincidir con la nieve precipitada, ya que las ventiscas o “vientos blancos” suelen arrastrar la nieve de lugares expuestos, depositándola en lugares protegidos contra el viento (Stowhas B., 2016).

Para salvar parcialmente esta limitación, deben hacerse varias mediciones simultáneas del equivalente en agua de la nieve a lo largo de un perfil longitudinal de terreno que sea representativo. Este perfil se conoce con el nombre de “ruta de nieve”. Un promedio de todas las

mediciones efectuadas se considera más representativo del equivalente en agua promedio al manto (Stowhas B., 2016).

3.2.2. Evaporación

La medición de la evaporación se efectúa con evaporímetros. Por ser diferentes las condiciones naturales de un lago o embalse (Profundidad, temperatura del agua, área de la superficie) de las del evaporímetro, es necesario aplicar un coeficiente de corrección denominado coeficiente de embalse. Se define entonces el coeficiente de embalse de evaporímetro como la Ecuación (4).

$$C = \frac{E_{real}}{E_{med}} \quad (4)$$

Dónde:

C : Coeficiente de Embalsamiento, [-]

E_{real} : Evaporación Real, [m]

E_{med} : Evaporación Medida, [m]

Existen diversos evaporímetros para medir la evaporación, el más básico, más frecuentemente usado y ocupado en este estudio, es el evaporímetro de bandeja o estanque tipo A del U.S.W.B. El coeficiente de embalse para este tipo de evaporímetros puede variar según recomendaciones de la FAO (2006) entre 0,35 y 0,85 dependiendo de diversos factores.

3.3. EMBALSE PARA USO DE AGUAS

Un embalse puede ser una estructura con propósito único, tal como la de suministro de aguas o control de inundaciones, o puede ser un embalse con propósitos múltiples, en el cual las zonas de almacenamiento están identificadas de acuerdo a los diferentes propósitos como muestra la Figura 3.1 (Chow, Maiment, & Mays, 1988).

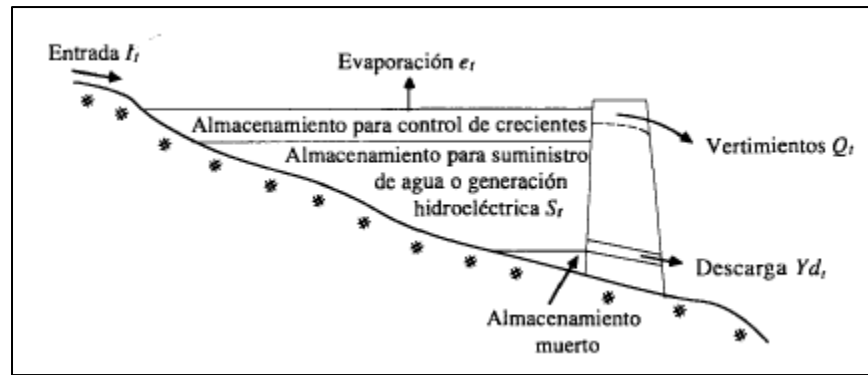


Figura 3.1: Zonas de almacenamientos en un embalse multipropósito (Chow, Maiment, & Mays, 1988)

Dos variables hidrológicas importantes son la capacidad de almacenamiento en el embalse y el caudal firme o descarga de agua promedio anual a través de la presa que pueda garantizarse utilizando un análisis de la información histórica. Puede existir un alto grado de incertidumbre, en el caudal firme, especialmente para un período histórico corto (Chow, Maiment, & Mays, 1988).

3.3.1. Caudal Firme

El caudal firme de un embalse es la tasa de desembalse media anual que bajará el nivel a su mínimo permitido solamente una vez durante la sequía crítica de registro. La sequía crítica de registro es un período con una duración de varios años que contiene lluvias y caudales bajos sostenidos para el cual existen registros hidrológicos de lluvia caudales y evaporación, cerca del sitio del embalse. El caudal firme se determina simulando el balance de agua en el embalse utilizando intervalos mensuales de tiempo t , $t = 1, 2, \dots, T$ (Chow, Maiment, & Mays, 1988).

La información mensual de caudales de entrada en el embalse I_t y la evaporación neta e_t (evaporación menos precipitación en la superficie del embalse) se obtiene de medidas tomadas en o cerca del sitio del embalse durante el período de registro largo, que ojalá incluya la sequía crítica. Los registros de uso de agua del sitio que debe ser abastecido (Ciudad, Área de irrigación, etc) se analizan para determinar la relación d_t entre el uso de agua medio mensual y el uso de agua medio anual. La variable d_t , denominada el factor de demanda, representa la proporción del caudal firme anual necesario en el mes t . Luego el balance de agua en el embalse se calcula hacia adelante en el tiempo (Chow, Maiment, & Mays, 1988).

$$S_t = S_{t-1} + I_t - Yd_t - A_t e_t - Q_t \quad (5)$$

Dónde:

S_t : Agua almacenada en el tiempo t , [m^3]

Y : Tasa de desembalse, [m^3]

A_t : Área superficial del embalse para el tiempo t , [m^2]

Q_t : Volumen de descarga a través del vertedero en el mes t , [m³]

Si el rango permisible de operación de almacenamiento está localizado entre S_{min} y S_{max} , el caudal firme es el valor de Y que da $S_t = S_{min}$ solamente una vez durante el período de cálculo (con $S_t > S_{min}$ para los demás meses). Normalmente, el caudal a través del vertedero es $Q_t = 0$, pero cuando los caudales de entrada en el embalse son altos puede ocurrir que S_t , tal como se calcula en la Ecuación (5), resulte mayor S_{max} ; en este caso $Q_t = S_t - S_{max}$ y se utiliza un nuevo valor de $S_t = S_{max}$ en el siguiente paso (Chow, Maiment, & Mays, 1988).

4. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca hidrográfica del río Maule se sitúa casi completamente en la VII Región del país, con una superficie de 20.865 [km²], siendo la cuarta en extensión del país (Dirección General De Aguas, 2005).

Su régimen hidrológico es de alimentación mixta, o nivo-pluvial. En sus zonas altas y medias el río Maule es de régimen marcadamente nival, presentando un gran aumento de caudal en los meses de primavera producto de los deshielos cordilleranos. En la zona baja, el río Maule posee un régimen pluvial, por lo cual presenta crecidas asociadas directamente con las precipitaciones (Dirección General De Aguas, 2005). Se estima que cerca de un 30% de su área se encuentra por sobre la línea de nieves.

El río Maule tiene una longitud de casi 250 kilómetros y nace en el extremo norponiente de la Laguna del Maule, a 2.175 [msnm], embalse natural que ha sido peraltado artificialmente para aumentar su capacidad de almacenamiento de aguas.

En los primeros kilómetros corre por un lecho angosto y encajonado por altas montañas y sus primeros afluentes de importancia que tributan al río Maule en el sector andino, son los ríos Puelche que se une a 31 kilómetros de su nacimiento y el Cipreses, efluente de la Laguna Invernada, de superficie que bordea los 5 [km²], a 1.305 [msnm] (CADE-IDEPE, 2004).

El río Maule, a 75 kilómetros de su origen, aumenta considerablemente su caudal cuando se une con su principal afluente en el sector alto, el río Melado. El río Guaiquivilo-Melado nace de la confluencia de los ríos Cajón Troncoso y Palaleo, siendo este último el que desagua la laguna Dial, situada a unos 70 kilómetros de esta unión. El Guaiquivilo-Melado mantiene un rumbo de sur a norte y constituye un típico valle interandino longitudinal. Las aguas del río Melado son usadas para el riego de gran parte de la provincia de Linares desde Colbún hasta Longaví, por medio del Canal Melado (CADE-IDEPE, 2004).

Antes de llegar a la llanura del valle central, el río Maule esta represado en el embalse Colbún, ubicado a 48 kilómetros al sureste de Talca, constituyendo el mayor embalse artificial en Chile y el mayor lago en la zona central del país con sus 1600 [Hm³].

El Maule atraviesa gran parte de la llanura aluvial del valle central sin recibir tributarios. Los ríos generados en la cordillera de los Andes aquí corren más bien paralelos a su curso y son captados por el río Loncomilla, que drena toda la cuenca sur, y por el Claro, que colecta las aguas del sector norte (CADE-IDEPE, 2004).

El río Loncomilla, sin duda el afluente más importante del Maule se une por el sur, cerca de San Javier. Se forma tras la unión de los ríos Longaví y Perquilauquén, los que proceden desde el oriente y occidente, respectivamente. Sus principales tributarios por su ribera oriental son los ríos Achibueno y Putagán, además de otros cursos menores. A su vez, el río Ancoa es un afluente del Achibueno (CADE-IDEPE, 2004).

Más al Este, a los pies de la Cordillera de la Costa, el Maule recibe las aguas del río Claro, que viene del norte y colecta las aguas del sector norte de la cuenca, recibiendo aportes de uno de sus afluentes, el río Lircay. A partir de esta junta corre confinado por cerros de la cadena costera y sólo en sus 10 últimos kilómetros se ensancha en un estuario que en su boca tienen cerca de 900 metros de ancho.

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 kilómetros, el río Maule desemboca en el océano Pacífico, al norte de la ciudad de Constitución.

4.2. 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 caudales de origen pluvial, como también para conocer las áreas nevadas, que posteriormente se convierten en caudales de deshielo.

Unos de los estudios frecuentemente consultados para conocer la línea de nieve en la zona centro-sur de nuestro país durante una tormenta, es la de Peña & Vial (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 con esto, se estima la elevación de la línea de nieve a partir de gradiente térmico de $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ [m]}$. y una temperatura umbral de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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

Finalmente se utilizará el estudio de Benítez & Vial (1997), el cual complementa los resultados obtenidos por Escobar & Anabalón (1991). Los resultados para la temporada entre Mayo - Septiembre (Pluvial) y para la temporada entre Octubre y Abril (Nival), se entregan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Cota de línea de nieve en zona de estudio (Benítez & Vial, 1997)

Temporada	L.N. Máxima	L.N. Media	L.N. Mínima
Pluvial	2100	1550	1180
Nival	2500	2000	1700

4.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HIDROELÉCTRICO DE LA CUENCA

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 con esto la cuenca del río Maule ocupa el sexto lugar dentro del país en el orden de importancia de los recursos hidroeléctricos desarrollables con que aún se cuenta, siendo precedida por las de los ríos Bío-Bío, Baker, Yelcho, Pascua y Puelo. (ENDESA, 1973).

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

En la Figura 4.1 se muestra un esquema con los elementos más importantes del sistema hidroeléctrico del río Maule Alto.

El río Maule nace de una laguna natural de origen volcánico de 86 [km²] de superficie, llamada Laguna del Maule, donde existe una central hidroeléctrica de paso, en ejecución llamada Los Cóndores. Esta entrará en funcionamiento comercial para el año 2020.

Aguas abajo se pretende aprovechar por segunda vez las aguas provenientes de Laguna del Maule, con el proyecto central de paso La Mina. Esta se beneficia del potencial energético existente en la zona cordillerana. Su entrada en funcionamiento fue en el año 2017.

Por el sector de la rama del río Cipreses, que está alimentado por Laguna Invernada, se ubica la bocatoma de la central de tipo embalse llamada al igual que el río, central Cipreses. Mientras que la central de paso Ojos de Agua aprovecha las filtraciones de la laguna Invernada y el desnivel existente entre los afloramientos de ese cuerpo de agua y la casa de máquinas de la central Cipreses.

La central Isla es una hidroeléctrica de pasada, la cual utiliza las aguas provenientes del río Cipreses y Maule captadas en la bocatoma Isla y una aducción que toma las aguas ya generadas por la central Cipreses.

Posteriormente estas aguas mediante una obra de toma que se ubica en el canal de evacuación de la central Isla, son conducidas por un canal paralelo al río Maule hasta la central de paso Curilín que por segunda vez genera con estas aguas.

De forma análoga, la descarga de la central Curilín es aprovechada inmediatamente por la obra de toma de la central de pasada Loma Alta, las que finalmente devuelven las aguas a su cauce natural en el río Maule.

Por el sector de la ribera sur del río, se encuentra la central de embalse Pehuenche que genera a partir de las aguas retenidas en el embalse Melado, lago creado de manera artificial con la construcción de una presa que almacena las aguas que proviene del río Melado y las captadas por una bocatoma en el río Maule, inmediatamente aguas abajo de la descarga de la central Loma Alta.

Finalmente, antes de terminar el sector alto de la cuenca del Maule se encuentra el Embalse Colbún, que almacena las aguas del río Maule después de unirse a la descarga de la central Pehuenche. De esta manera encontramos las primeras dos centrales de paso llamadas Chiburgo y San Clemente que aprovechan las aguas del embalse, las cuales son destinadas a los sistemas de riego Maule Sur y Maitenes respectivamente. Las aguas del embalse son generadas por la central Colbún que a su vez son conducidas al embalse Machicura. Este embalse, de menor capacidad permite regular las aguas que son generadas por la central Machicura, las que luego de su descarga, vuelven a ser utilizadas por una pequeña central de pasada llamada San Ignacio.

A continuación, se entrega una tabla resumen con un resumen de los caudales de diseño para las turbinas, alturas de caídas y potencia instalada de las centrales que interviene en la cuenca alta del Río Maule.

Tabla 4.2: Resumen Centrales Cuenca Alta Río Maule

Central	Caudal Diseño [m³/s]	Potencia Instalada [MW]
Los Cóndores	25	150
La Mina	60	37
Ojos de Agua	13	9
Cipreses	36	106
Isla	84	68
Curilinke	84	40
Loma Alta	84	89
Pehuenche	300	570
San Clemente	17	5
Chiburgo	20	19
Colbum	280	474
Machicura	280	95
San Ignacio	180	37

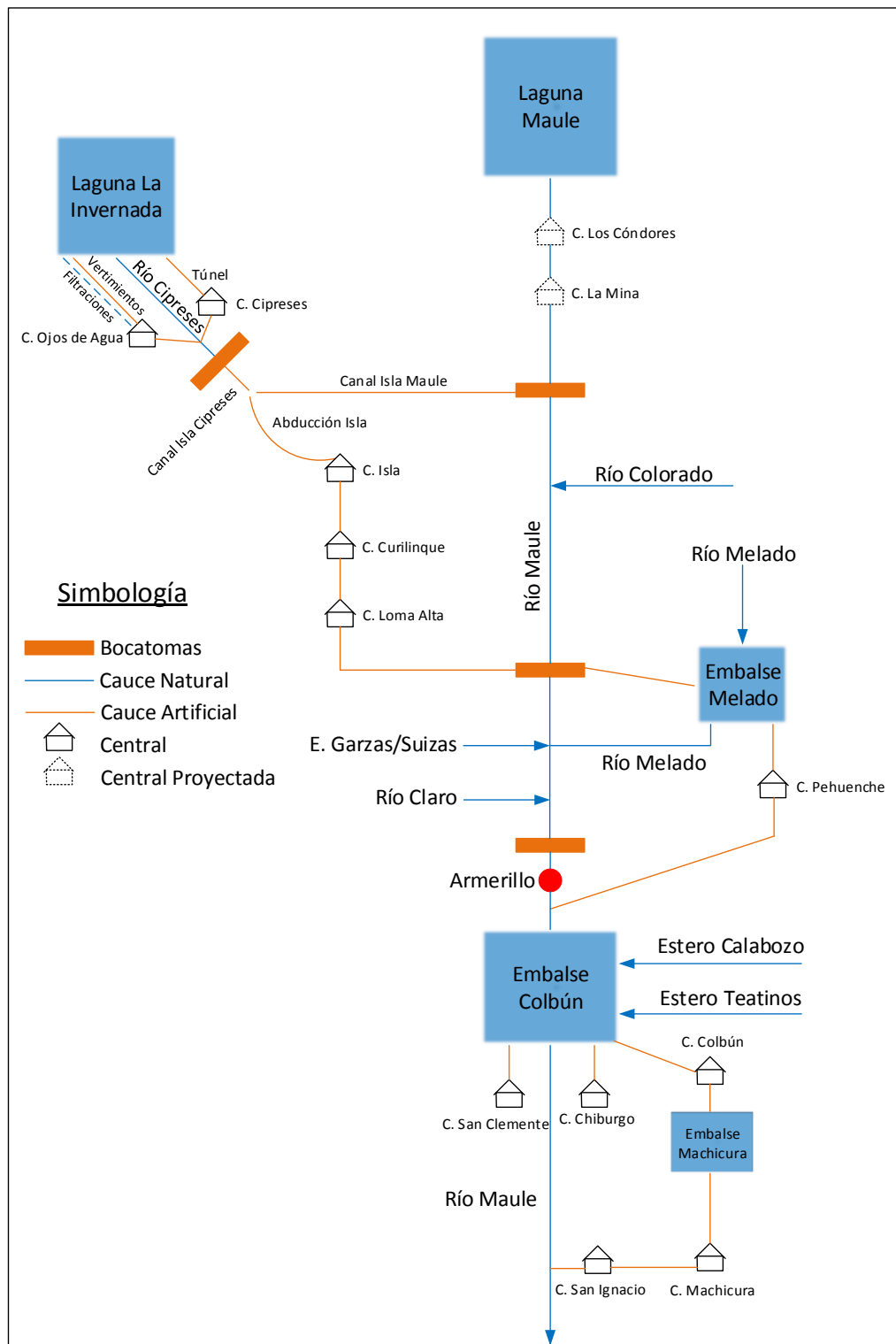


Figura 4.1: Esquema de la cuenca alta del río Maule (Elaboración Propia)

Como se ve, el caudal del río Maule es desviado en gran parte de su curso, los usuarios que aprovechan los recursos del río Maule de manera no consuntiva son los siguientes:

- Colbun S.A
- Ente Nazionale per l'Energia ElettricaA (ENEL)
- Pehuenche S.A
- CIA. Siderúrgica de Talca Ltda.
- Celulosa Constitución S.A.
- Romero Boada, Cristian Adolfo
- Sash, Santiago y Otros
- González Ovalle, Vicente

4.4. INFORMACIÓN FLUVIOMÉTRICA, NIVELES DE LAGOS Y EMBALSES

La cuenca del Maule Alto posee una de las redes de registros hidrográficos más completa 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 usaron tanto estaciones fluviométricas como de niveles de lagos y embalses. Las estaciones fluviométricas en general superan los 50 años de registros, llegando incluso sobre los 95 años, como es el caso de Maule en Armerillo.

En la Tabla 4.3, se muestra una lista con las estaciones 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.

Tabla 4.3: Estaciones fluviométricas y niveles de lago utilizadas en el estudio (Red Hidrométrica DGA)

Tipo	Código BNA	Nombre	UTM Norte	UTM Este
Nivel de Laguna	07300000-9	Laguna del Maule	6.011.793	360.133
	07317004-4	Embalse Melado	6.040.123	310.670
Fluviométrica	07300001-7	Río Maule En Desagüe Laguna Del Maule	6.013.297	359.684
	07308003-7	Canal Las Garzas	6.040.638	319.022
	07317002-8	Canal Melado En Los Hierros	6.030.342	313.163
	07321002-K	Río Maule En Armerillo	6.046.213	308.554
	07321003-8	Canal Maule Norte En Aforador	6.046.456	308.349
	07321005-4	Canal de Evacuación Pehuenche	6.043.736	303.831

Como se mencionó anteriormente, las coordenadas son UTM (*Universal Transversal de Mercator*), WGS-84, Huso 19 (72°W - 66°W hemisferio sur). A continuación, se muestra en la Figura 4.2 la ubicación de las estaciones mencionadas anteriormente.

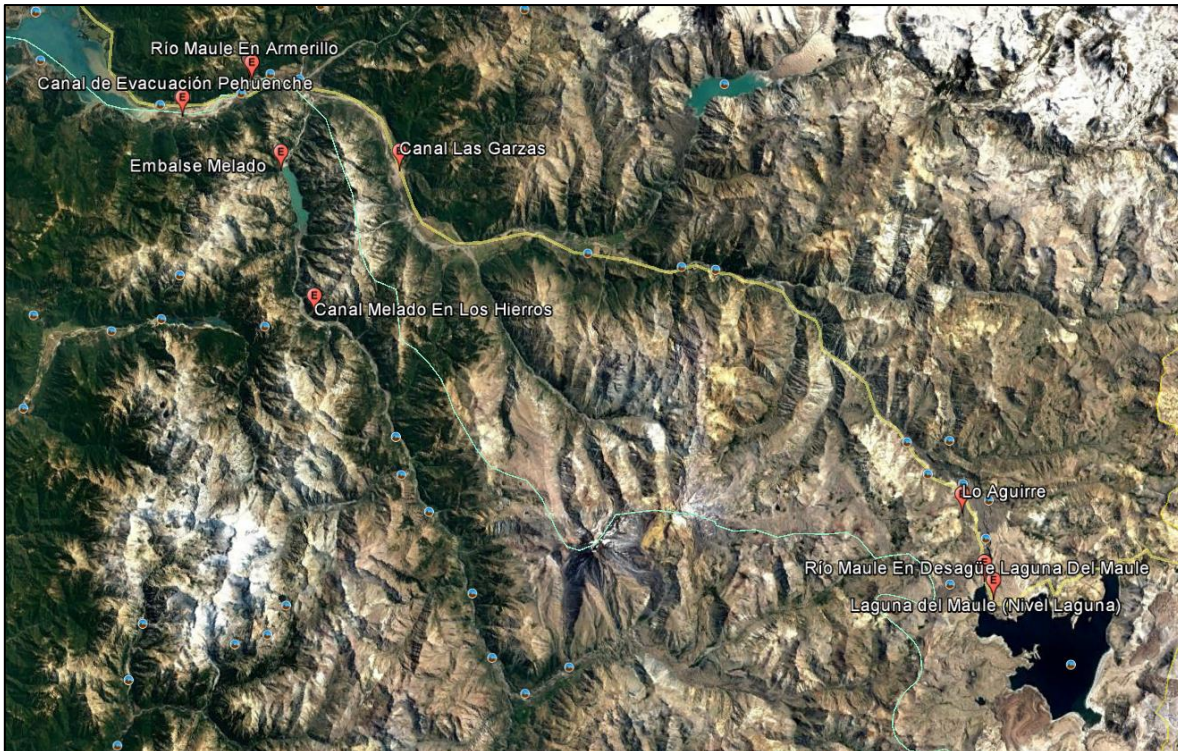


Figura 4.2: Mapa estaciones fluviométricas y niveles de lago utilizadas en el estudio (Elaboración Propia)

Esta información fue controlada por Endesa (Hoy Enel) y posteriormente pasaron a ser monitoreadas por la DGA. Sin embargo, existen estaciones donde ambas entidades controlaron simultáneamente, como es el caso de los Niveles de Laguna del Maule o de Maule en Armerillo, donde fueron controladas por Enel y la Dirección General de Aguas.

4.5. SECTOR DE RIEGO

La Junta de Vigilancia del Río Maule tiene por objeto administrar y distribuir las aguas a que tienen derecho sus miembros en las fuentes naturales, explotar y conservar las obras de aprovechamiento común y realizar los demás fines que le encomiende la ley (Junta de Vigilancia Río Maule, 1959).

Las juntas de vigilancia agrupan grandes organizaciones de riego como por ejemplo Maule Sur. En 1953 se construye un canal matriz por parte de la ex Dirección de Riego, la cual corresponde a la unificación de 16 canales particulares que tenían bocatomas independientes en el río Maule. De esta misma manera, se han ido formando otras organizaciones las cuales pertenecen a la Junta de Vigilancia del Río Maule. En la Tabla 4.4 se muestra un resumen de las asociaciones más grandes que pertenecen a la junta.

Tabla 4.4: Asociaciones de canalistas del río Maule. Incluye superficies de riego y acciones (Elaboración Propia)

Canal	Superficie Regada [Ha]	Acciones
Maule Norte	70.000	37.766,48
Melado	33.600	18.000,00
SORPAM	27.300	12.311,88
Maule Sur	30.000	24.115,36

Las repercusiones que pueda tener la laguna del Maule, afectan a todos los regantes, eso quiere decir que afecta a cerca de 190.000 [Ha] que se encuentran bajo riego, las cuales su mayoría son cultivos agrícolas.

El río Maule tiene un total de 142.348,75 acciones que incluyen asociaciones de canalistas y particulares, por lo tanto, a su máxima capacidad según la Resolución N°105, la cual fija como caudal máximo en 200[m³/s], se obtiene el valor 1,4 [l/s] por acción. A continuación, se detalla los usuarios consuntivos del río Maule:

- | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| ➤ Canal Las Garzas | ➤ Canal Armonía | ➤ Canal Cunaco |
| ➤ Canal Las Suizas | ➤ Canal Huilquilemu | ➤ Canal Guiones |
| ➤ Canal Maule Norte | ➤ Canal Hacienda Maule | ➤ Canal Esperanza Sur |
| ➤ Canal Esperanza | ➤ Canal La Isla | ➤ Canal Peñuelas Sur |
| ➤ Canal Riesco Maitenes | ➤ Canal Santa Rosa | ➤ Canal Rosa Fabry |
| ➤ Canal Mariposas-San Vicente | ➤ Canal Melado | ➤ Canal Benavente Uno |
| ➤ Canal Prado interesado | ➤ Canal Maule Sur-Chiburgo | ➤ Canal Benavente Dos |
| ➤ Canal Silva Henríquez | ➤ Canal Santa Elena Alto N°1 | ➤ Canal Benavente Tres |
| ➤ Canal Oriente | ➤ Canal Sana Elena Alto N°2 | ➤ Canal Bustamante |
| ➤ Canal Lircay Mandaiola | ➤ Canal Santa Elena Alto N°3 | ➤ Canal Romero |
| ➤ Canal Santa Elena | ➤ Canal Santa Elena Alto N°4 | ➤ Canal Michaud |
| ➤ Canal Peña Palo Seco | ➤ Canal Santa Elena Bajo N°6 | ➤ Canal Gatica |
| ➤ Canal Riesco Chico | ➤ Canal Estero La Barra | ➤ Canal Cerda |
| ➤ Canal Sandoval-San Miguel | ➤ Canal Floresta N°8 | ➤ Canal San Pablo |
| ➤ Canal Flor de Llano | ➤ Canal Flor Lillo Uno y Dos | ➤ Canal Olivar-San Ignacio |
| ➤ Canal Bella Unión | ➤ Canal Flor Lillo Tres | ➤ Canal Pando |
| ➤ Canal Volcán | ➤ Canal Caracoles-Media Maquina | ➤ Canal Bobadilla |
| ➤ Canal Chequén | ➤ Canal Abránquil B | ➤ Canal San Luis |
| ➤ Canal Montero | ➤ Canal El Carmen | ➤ Canal Mercedes |
| ➤ Canal Colín | ➤ Canal Benavente B | ➤ Canal Melozal |
| ➤ Canal Peña | ➤ Canal San Ramón | ➤ Canal El Molino y La Unión |
| ➤ Canal Quiñantú | ➤ Canal de aguas canal San Rafael, | ➤ Canal Unificado Chivato- |
| ➤ Canal Duao Zapata-Vista Hermosa | Las Cabras, El Macho y Santa Blanca | Loncoche |

5. CARACTERÍSTICAS LAGUNA DEL MAULE

5.1. CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA DE LA LAGUNA DEL MAULE

Laguna del Maule es un embalse natural de origen volcánico. Ubicada a unos 2.175 [msnm], está laguna no confluencia ningún afluente, solo recibe el aporte nival de su cuenca. En la Figura 5.1 se observa la importante componente nival de la zona de estudio.



Figura 5.1: Fotografía de la Laguna Maule (Elaboración Propia)

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 [m³] a más de 2.000 millones de [m³], de los cuales 1.570 millones de [m³] son utilizables. La regulación permitió mejorar la seguridad de riego en el valle del Maule y de generación en las centrales hidroeléctricas ubicadas aguas abajo, tanto existentes como futuras, como es el caso de la central Los Córdones y La Mina. 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 metros del túnel de aducción. Las obras civiles fueron construidas en un convenio entre la Dirección de Riego (actualmente Dirección de Obras Hidráulicas) y Endesa (Hoy Enel), denominado “Convenio Fisco-Endesa de 1947”.

La presa principal tiene una longitud de coronamiento de 193 metros y una altura máxima sobre el lecho del río Maule de unos 30 metros; 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 metros y una longitud de 130 metros y es de tipo homogéneo, con protección de enrocados en ambos taludes (EDIC Ingenieros, 2004).

Para su funcionamiento normal, la laguna tiene cuatro compuertas de toma, dos auxiliares y dos principales de 2,4 metros de alto por 1,6 metros de ancho. Estas son accionadas a través de un sistema oleoeléctrico, que trabaja con aceite a presión. El caudal máximo que puede evacuar cada compuerta es de 79,5 [m³/s] en la cota máxima (ENDESA, 1998). Las aguas son entregadas al cauce natural del río Maule.

El vertedero es de tipo abanico y posee un umbral libre de compuertas, de unos 40 metros de longitud, en desarrollo semicircular, que le permiten evacuar hasta 250 [m³/s] con una carga máxima de 2 metros (INGENDESA, 2007). Las aguas vertidas se conducen por un rápido de descarga, de unos 150 metros 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.

5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA AFLUENTE A LA LAGUNA DEL MAULE

La Figura 5.2 muestra la cuenca a la cual pertenece la laguna del Maule. La cuenca tiene como punto de control el desagüe de la laguna, el cual a su vez da inicio al río Maule. La superficie de la cuenca es de aproximadamente 316 [Km²], de los cuales 58 [Km²] corresponde a la laguna, cuando está a cota más alta (ENDESA, 1998).

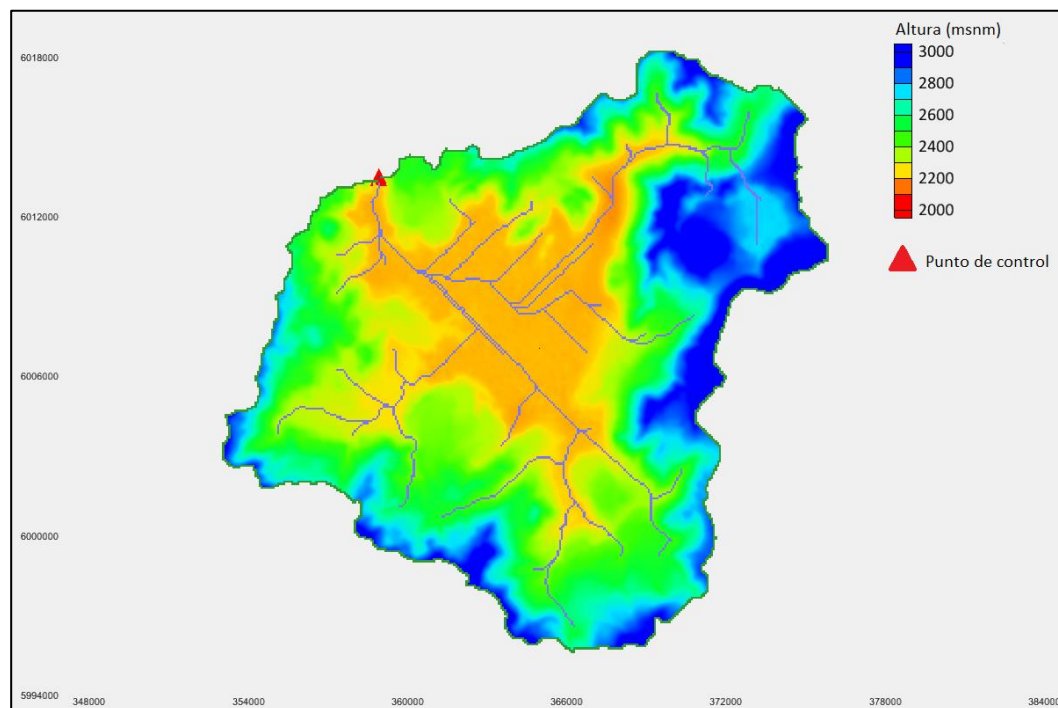


Figura 5.2: Cuenca afluyente a la Laguna del Maule (Elaboración Propia)

El clima es templado cálido. En verano las condiciones de tiempo son estables, soleadas y secas, con algunas precipitaciones ocasionales. En invierno el tiempo es variable, donde destacan las bajas temperaturas y las frecuentes precipitaciones del tipo nival.

La zona es de gran aridez y presenta solo vegetación de cordillera, compuesta por pequeños arbustos, musgos y líquenes. A esta altura de la cordillera no existe agricultura y la ganadería se da en los meses de verano, cuando la cuenca no está cubierta de nieve.

La laguna se encuentra a pocos metros del paso internacional Pehuenche, en dirección a Argentina, dentro del territorio nacional, por lo cual tampoco destacan grandes concentraciones urbanas dentro de la cuenca. Las zonas urbanas más próximas fuera de la cuenca son por el sector nacional La Mina y por el sector trasandino Las Loicas.

Los parámetros morfológicos más importantes de la cuenca perteneciente a la laguna se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Parámetros morfológicos de la cuenca afluente a la laguna del Maule (Elaboración Propia)

Parámetro de la cuenca		Valor
Ubicación punto control (UTM)	Coordenada X [m]	359.700
	Coordenada Y [m]	6.013.620
Área de la cuenca [Km ²]		308
Pendiente media de la cuenca [m/m]		0.203
Largo de la cuenca [Km]		26,8
Altura Media de la cuenca [msnm]		2.450

5.3. CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LA LAGUNA DEL MAULE

5.3.1. Curvas características de la Laguna del Maule

El almacenamiento de un embalse queda definido y controlado por las curvas área - cota y la curva volumen - cota, ambas curvas son obtenidas por planimetría topográfica, el cual es un proceso previo a la construcción del embalse. Al no disponer de las curvas, estas se han calculado a través de la serie de datos de altura y volumen (ENDESA, 2016) ocupada durante el estudio.

La información entregada por Endesa (Hoy Enel), consta de los volúmenes diarios de la laguna en hectómetros cúbicos ([Hm³]) y la altura de la cota de agua respecto al mar, eso quiere decir en [msnm]. Para trabajar solamente con las alturas de agua en la laguna y no referenciarse sobre el mar, el origen de la curva fue trasladado en 2152,14 [m] el cual es el punto más bajo de la laguna (ENDESA, 1998).

Las Figura 5.3 y Figura 5.4 muestra las curvas de cota-volumen y cota-área de la laguna del Maule obtenida de la serie de datos.

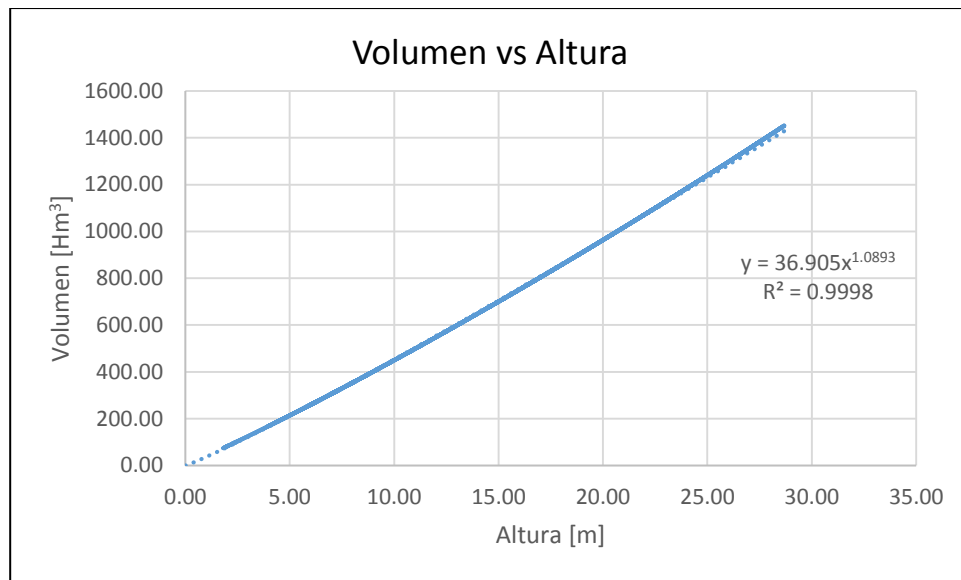


Figura 5.3: Curva Volumen de Agua vs Altura, Laguna del Maule (Elaboración Propia)

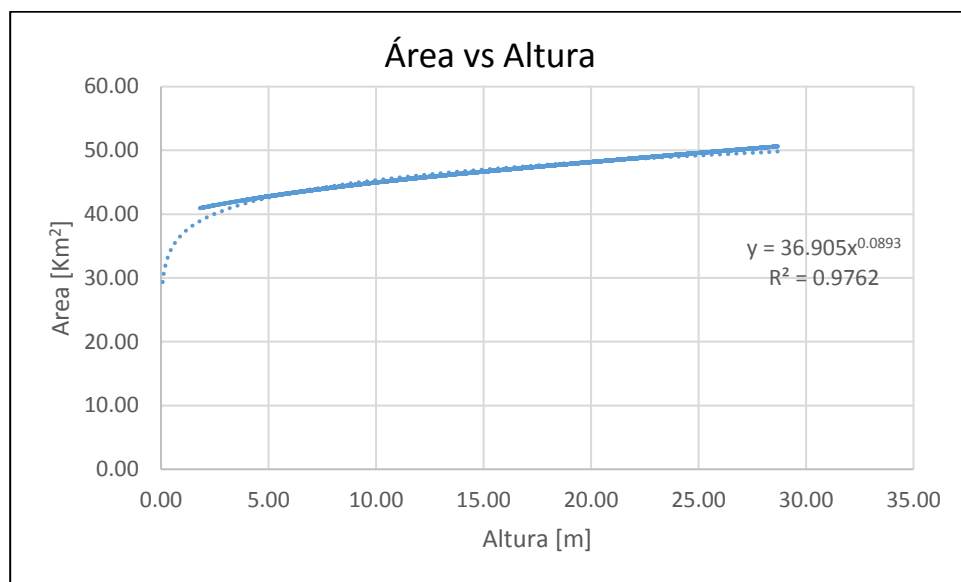


Figura 5.4: Curva Espejo de Agua vs Altura, Laguna del Maule (Elaboración Propia)

Utilizando ambas curvas se ajustaron líneas de tendencias del tipo potencial, con muy buenas correlaciones en ambos casos. La Ecuación (6) y (7) corresponden al volumen embalsado y el espejo de agua respectivamente, ambas en función de la altura.

$$V_M = 36,905h_M^{1,0893} \quad (6)$$

Dónde:

V_M : Volumen embalsado en la laguna del Maule, [Km³]

h_M : Altura del espejo de agua, [m]

$$A_M = 36,905 h_M^{0,0893} \quad (7)$$

Dónde:

A_M : Área del espejo de agua en la laguna del Maule, [Km²]

h_M : Altura del espejo de agua, [m]

Recordar que la derivada del volumen respecto a la altura corresponde al área del embalse

$$A_M = \frac{\partial V}{\partial h} = 40,2 h_M^{0,0893} \quad (8)$$

Si bien esta ecuación, teóricamente es correcta, tiene un menor coeficiente de correlación (0,9687) comparada con la ecuación obtenida por el ajuste de mínimos cuadrados mostrada en la ecuación (7) (0,9762), por lo tanto, se decide utilizar la relación práctica y no la teórica.

5.3.2. Precipitación en la Laguna del Maule

Corresponde al volumen de agua caído en la Laguna en los días de lluvia. Para el cálculo del volumen se considera la máxima área de la laguna y la altura de agua caída durante el evento.

La estación meteorológica más cercana a la Laguna del Maule corresponde a Lo Aguirre, la cual tiene los siguientes datos importantes:

Tabla 5.2: Estaciones meteorológica Lo Aguirre (Red Hidrométrica DGA)

Tipo	Código BNA	Nombre	UTM Norte	UTM Este	Fecha Inicio
Meteorológica	07301000-4	Lo Aguirre	6.017.938	358.068	1998

Como se observe, su entrada en funcionamiento se produce el año 1998, acumulando un total de 19 años hasta el año 2016. El intervalo de tiempo que se considera para este estudio, como se explica más adelante en el Punto 7, son 25 años (Desde 1992 hasta 2016).

Para completar los años faltantes (1992-1998), se utilizó una correlación entre las estaciones de Armerillo y Lo Aguirre con la ayuda del mapa de isoyetas del Balance Hídrico realizado por la DGA como contribución para el Programa Hidrológico Internacional UNESCO (Dirección General de

Aguas, 1988). Se puede ver una parte de este mapa en la Figura 5.5, de la cual se obtiene la isolínea media anual en Armerillo con 2.500 [mm/años] y en la isolínea media anual en la Laguna del Maule con 1.500 [mm/años]. Por lo tanto, la correlación es igual a:

$$P_{LM} = R \cdot P_A \quad (9)$$

$$R = \frac{1.500}{2.500} = 0,6$$

Donde:

P_{LM} : Precipitación en la Laguna de Maule, [mm]

P_A : Precipitación en Lo Aguirre, [mm]

R : Coeficiente de Correlación, [-]

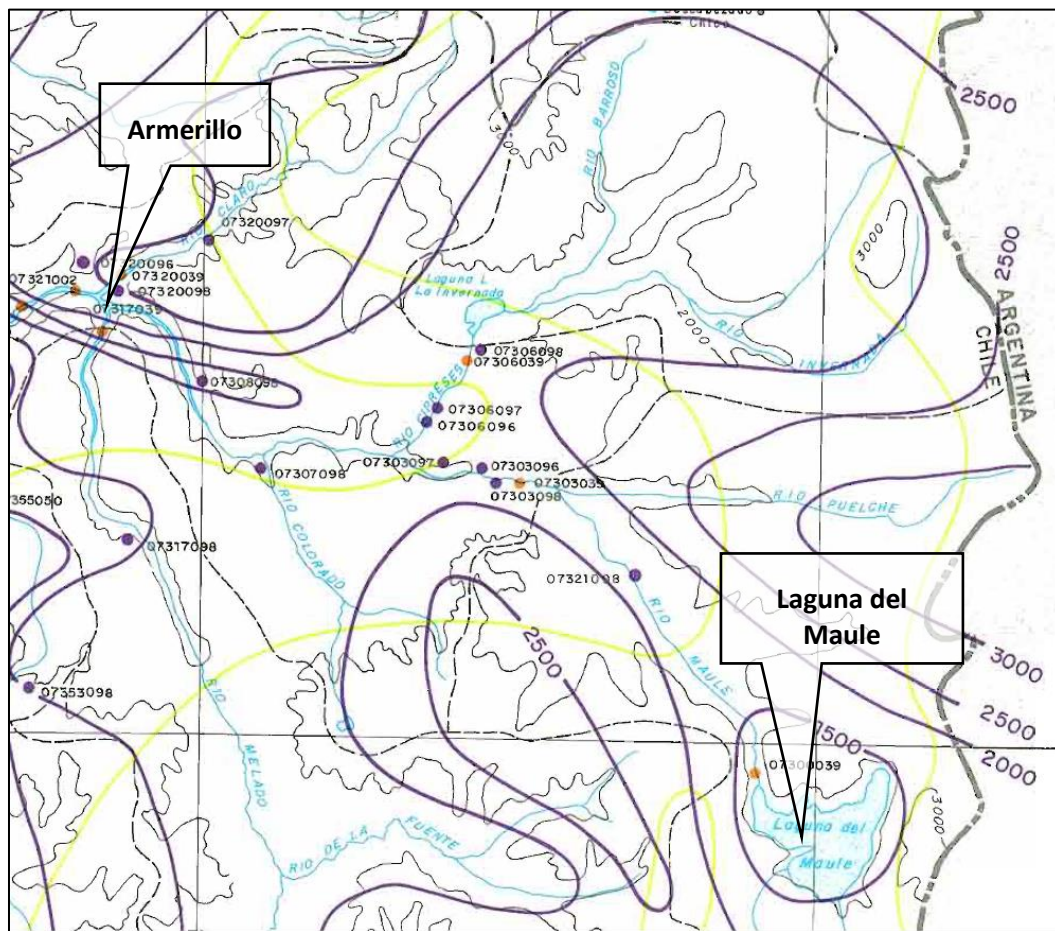


Figura 5.5: Mapa de Isoyetas (Dirección General de Aguas, 1988)

5.3.3. Evaporación de la Laguna del Maule

Las pérdidas de evaporación corresponden al volumen de agua que se disipa por la acción diaria de la temperatura y del viento en la superficie del embalse, la cantidad de agua evaporada va a depender de área del espejo de agua, de la ubicación del embalse y de las fluctuaciones de temperatura de la temporada.

Debido al considerable tamaño de la superficie inundada, las pérdidas provocadas por la evaporación son relevantes. La estación Evaporimétrica en la laguna fue instalada el año 1957 y consta de registros pobres e incompletos. Valores medios anuales de tanque bordean los 1200 [mm/año] (IPLA, 1983) como valor máximo.

El estudio “Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración en Chile” (CRN-CIREN, 1997), entrega una estadística de valores medios mensuales para evaporaciones mensuales, la cual está construida a base de fórmulas empíricas. La Figura 5.6 muestra la información de ambos estudios.

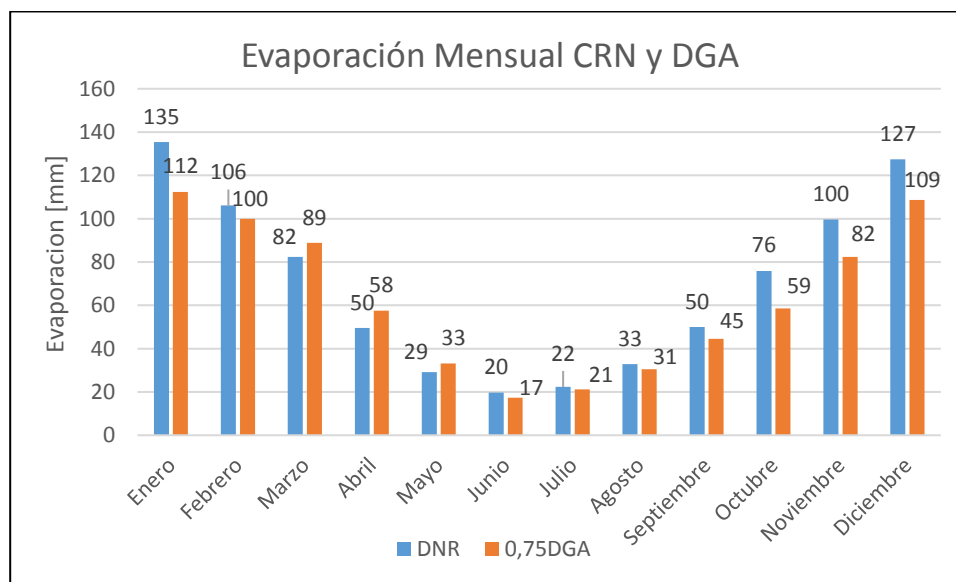


Figura 5.6: Evaporación media mensual entregados por la Comisión Nacional de Riego y la Dirección General de Aguas (Elaboración Propia)

Al existir una variación interanual casi nula, se observan que los resultados son bastantes similares, por lo tanto, se espera seguir con las mismas tasas de evaporación de embalse. Para el estudio se utilizará la estadística de evaporímetros, debido a que se situaban en el lugar in situ.

Para el valor del coeficiente anual de embalse, en la literatura se recomiendan distintos valores para este coeficiente dependiendo de humedad, velocidad del viento y cantidad de áreas verdes. En ausencia de información se recomienda un valor del orden 0,7 (Stowhas B., 2016) o igual 0,8 (UNESCO, 1982). Finalmente se tomó un valor igual a 0,75, lo cual equivale a un promedio de ambos valores.

6. ACTUAL MANEJO OPERACIONAL DE LA CUENCA

6.1. CAUDAL EN ARMERILLO

El manejo de la cuenca superior del río Maule tiene como una variable de gran importancia el caudal en la estación fluviométrica “Maule En Armerillo”. Esta estación se encuentra justo aguas arribas del embalse Colbún como se muestra en la Figura 6.1. Tiene la importancia que determina el caudal total de la cuenca media del río, entre Laguna del Maule y el embalse Colbún.



Figura 6.1: Ubicación estación Maule en Armerillo (JVRM)

Debido a la cantidad de hidroeléctricas y canales de riego, en la actualidad gran parte del caudal no escurre por su cauce natural. Canales de riego como Las Garzas ó Las Suizas, extraen sus derechos consuntivos y estos no son devueltos al río. Las centrales tipo embalse como La Invernada o el embalse Melado retienen afluentes que depositan sus aguas al río Maule. Esto genera un problema en Armerillo, debido a que el caudal medido en la estación no es el valor de la cuenca intermedia. Esto genera la necesidad de hacer una reconstrucción de su caudal.

Actualmente la determinación del caudal del río Maule reconstruido en Armerillo, tiene una metodología de cálculo directa, sumando los caudales de estaciones fluviométrica de la DGA en canales que extraen agua del río y las aguas del río Melado, las cuales son retenidas en embalse Melado. En la Figura 6.2 extraída directamente de la Junta de Vigilancia se muestra un esquema simplificado donde se muestran los canales que extraen aguas desde el río Maule o incluso antes de la confluencia entre un afluente y el cauce principal.

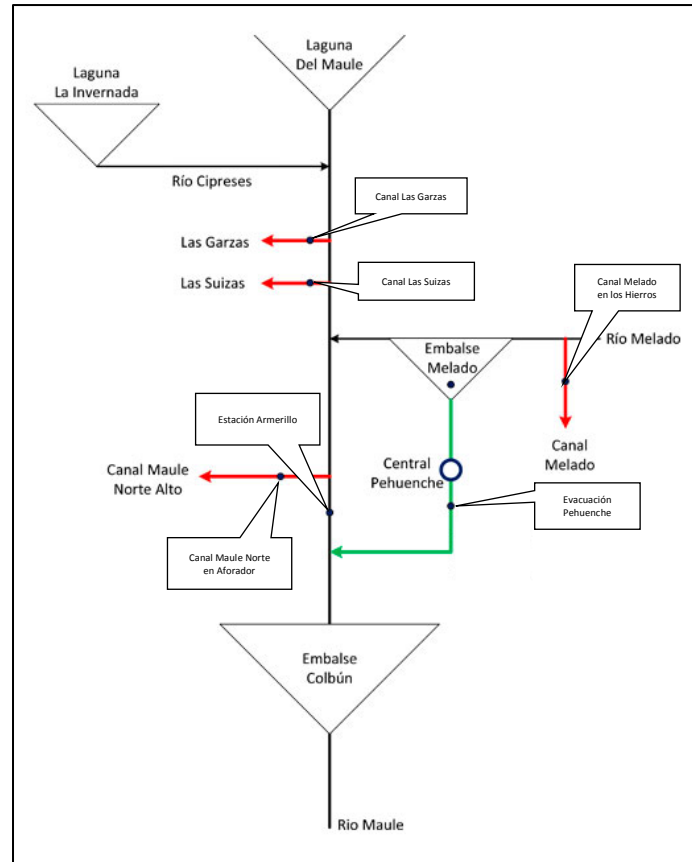


Figura 6.2: Esquema simplificado, cuenca Maule alto (Sitio web JVRM)

De esta manera, conocido los canales que extraen aguas del régimen natural del río, el caudal reconstituido en Armerillo se obtiene mediante la Ecuación (10).

$$Q_{RA} = Q_A + Q_{CLG} + Q_{CLS} + Q_{CMH} + Q_{CMNA} + \Delta_{EM} + Q_{CEP} \quad (10)$$

Dónde:

Q_{RA} : Caudal reconstituido en Armerillo, [m³/s]

Q_A : Caudal en Armerillo, [m³/s]

Q_{CLG} : Caudal en Canal Las Garzas, [m³/s]

Q_{CLS} : Caudal en Canal Las Suizas, [m³/s]

Q_{CMH} : Caudal en Melado en Los Hierros, [m³/s]

Q_{CMNA} : Caudal en Maule Norte en Aforador, [m³/s]

Δ_{EM} : Variación Embalse Melado, [m³/s]

Q_{CEP} : Caudal en Canal de Evacuación Pehuenche, [m³/s]

Los valores del Canal Las Garzas y Las Suizas son referenciales de acuerdo con lo establecido por el departamento de hidrología DGA a nivel central. Además, para el cálculo de Variación Embalse Melado, se toma el último registro del día del volumen del embalse, se resta con el del día anterior y se divide por 86.400 para pasar el volumen a valor de caudal en [m³/s] (Junta de Vigilancia Río Maule, 2016).

Este cálculo se hace de acuerdo con la Ordenanza de la DGA N° 681 propuesta el 28 de Junio del 2013. La metodología para calcular dicho caudal esta descrita en el “Manual de Operación Hidrométrica”, con una modificación con respecto al texto original. Se considera el caudal de generación de la Central Pehuenche como el valor medido directamente de la estación fluviométrica DGA denominada Canal de Evacuación Central Pehuenche (Dirección General De Aguas Maule, 2013).

Desde el punto de vista de satisfacer los derechos de los regantes, el caudal del río puede presentar dos condiciones:

1. Condición Río Libre: El caudal natural del río es mayor al derecho de los regantes dada por la Resolución N°105 (Figura 6.8). En este caso se distribuye el caudal máximo para riego y el diferencial positivo queda a disposición generación, en Embalse Colbún (Propiedad de Colbún S.A).
2. Condición Río Deficitario: El caudal natural del río es menor al derecho de los regantes dada por la Resolución N°105 (Figura 6.8). En este caso se distribuye el caudal entre los regantes. Colbún S.A no puede disponer de recursos. El déficit puede ser cubierto desde alguna reserva. La cuenca superior del río Maule tiene 4 embalses de agua: Colbun, Embalse Melado, Laguna Invernada y la Laguna del Maule los cuales se ubicaban como se muestra en la Figura 6.3 y que adicionalmente menciona las cotas de elevaciones y capacidad máxima de cada uno.

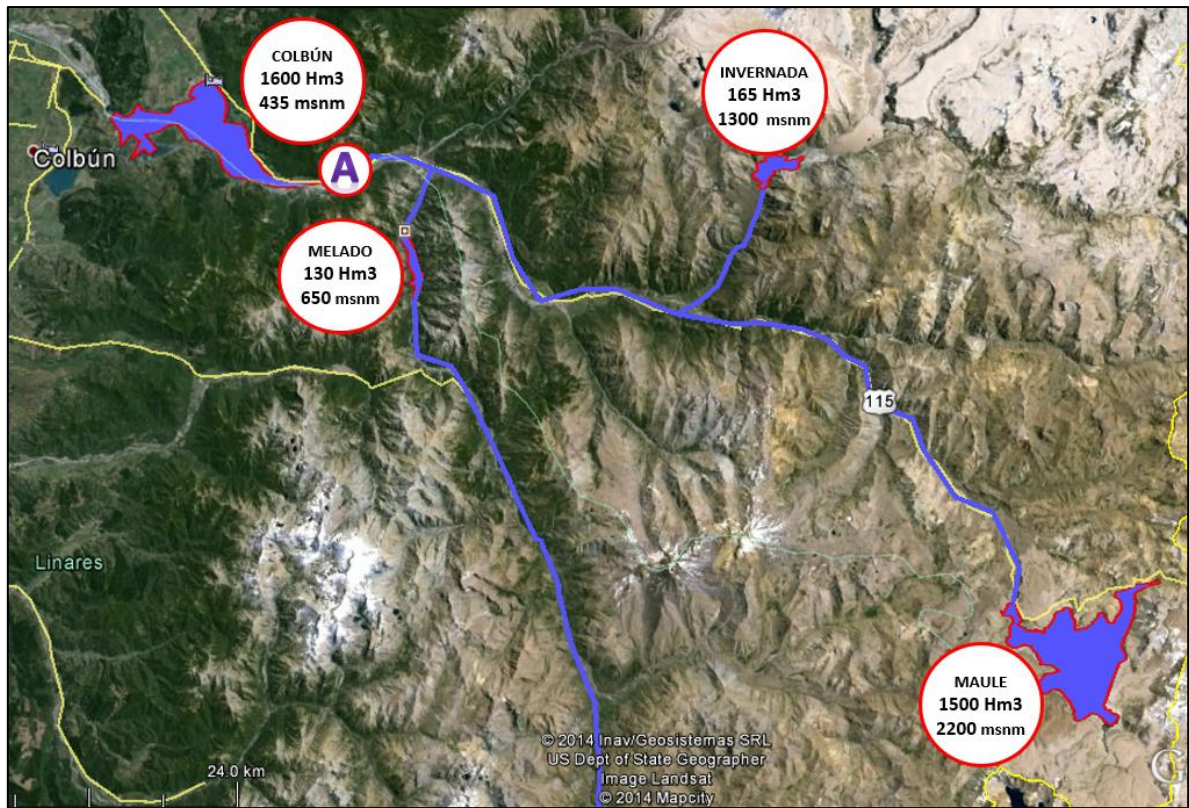


Figura 6.3: Ubicación Reservas de Agua en la cuenca alta del río Maule (JVRM)

Por último, en este caudal reconstituido, al abrir las compuertas de Laguna del Maule y la Laguna Invernada se ve afectado por los caudales aportados por éstas, por lo tanto, el caudal reconstituido en régimen natural se calcula como se muestra en la Ecuación (11). La diferencia entre caudal bruto y neto será explicada en conjunto con el Convenio FISCO – ENDESA, el cual establece las condiciones de uso de ambas lagunas.

$$Q_{RN} = Q_{RA} - Q_{LM} - Q_{LI} \quad (11)$$

Dónde:

- Q_{RN} : Caudal en Régimen Natural, [m³/s]
- Q_{RA} : Caudal reconstituido en Armerillo, [m³/s]
- Q_{LM} : Caudal Laguna del Maule, [m³/s]
- Q_{LI} : Caudal Laguna la Invernada, [m³/s]

6.2. CONVENIO FISCO - ENDESA DE 1947

El convenio del Maule fue suscrito en 1947 entre el Departamento De Riego de la Dirección General De Obras Públicas, hoy la actual Dirección Obras Hidráulicas (DOH) y la Empresa Nacional De Electricidad (ENDESA). Éste establece las condiciones de explotación y aprovechamiento del río Maule a partir de su regulación por medio de los embalses Laguna del Maule, Laguna Invernada y de los afluentes que llegan a esta última (Fisco - ENDESA, 1947).

6.2.1. Artículo Primero

El artículo uno del convenio explica la construcción del embalse en la laguna del Maule, el cual tiene por objetivo regularizar el régimen del río Maule para dar mayor seguridad de riego. Con una capacidad inicial de 850 [Hm³] (Proyecto Original) y con el objetivo de utilizar las aguas en riego y generación eléctrica, el proyecto amplió su capacidad embalsable a 1.570 [Hm³] (Proyecto Modificado). Éste artículo además fija en 160 [m³/s] la necesidad máxima estacional en Armerillo, ampliable a 200 [m³/s], para atender ampliaciones futuras. La situación actual de la cuenca corresponde a un pleno desarrollo de los sistemas de riego que requiere de los 200 [m³/s].

Finalmente este artículo hace la división del embalse en tres porciones: una porción superior con un volumen de 900 [Hm³] cuyas aguas estarán destinadas a suministrar los gastos deficitarios para la regulación del riego y los gastos necesarios para la generación de energía eléctrica, los que se administrarán con régimen de uso normal de las aguas; una porción intermedia con un volumen de 500 [Hm³] cuyas aguas constituirán una reserva ordinaria destinada a los mismos fines y cuyo uso podrá tener algunas restricciones con respecto al régimen de uso normal; y una porción inferior con un volumen de 170 [Hm³] cuyas aguas constituirán una reserva extraordinaria, que podrá utilizarse sólo en casos especiales (Fisco - ENDESA, 1947).

El convenio establece las restricciones en términos de caudales y volumen para la generación eléctrica y riego en función de la porción donde esté operando la laguna. Los artículos 2 y 3 entregan las limitaciones que tiene el riego. De la misma manera, los artículos 4 y 5 lo hacen para la generación eléctrica. Por último, el artículo número 6 determina la forma de administración de la porción inferior de la laguna.

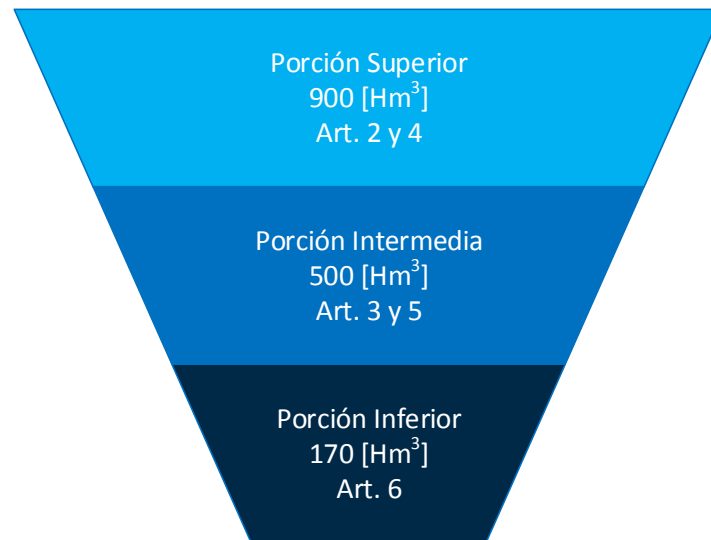


Figura 6.4: División Laguna Maule con volúmenes y artículos por porción (Elaboración Propia)

6.2.2. Artículo Segundo

El artículo dos, define la temporada de riego de nueve meses comprendida entre los meses de Septiembre y Mayo inclusive. Además, para cualquier desarrollo del riego, esto es cualquier caudal entre 160 y 200 [m³/s] reconstituido en Armerillo, permite completar en el río, a disposición de los regantes, los gastos correspondientes a las necesidades del riego, de acuerdo con la siguiente tabla de variación estacional a lo largo de dicha temporada, expresada en función del gasto máximo estacional correspondiente (Fisco - ENDESA, 1947):

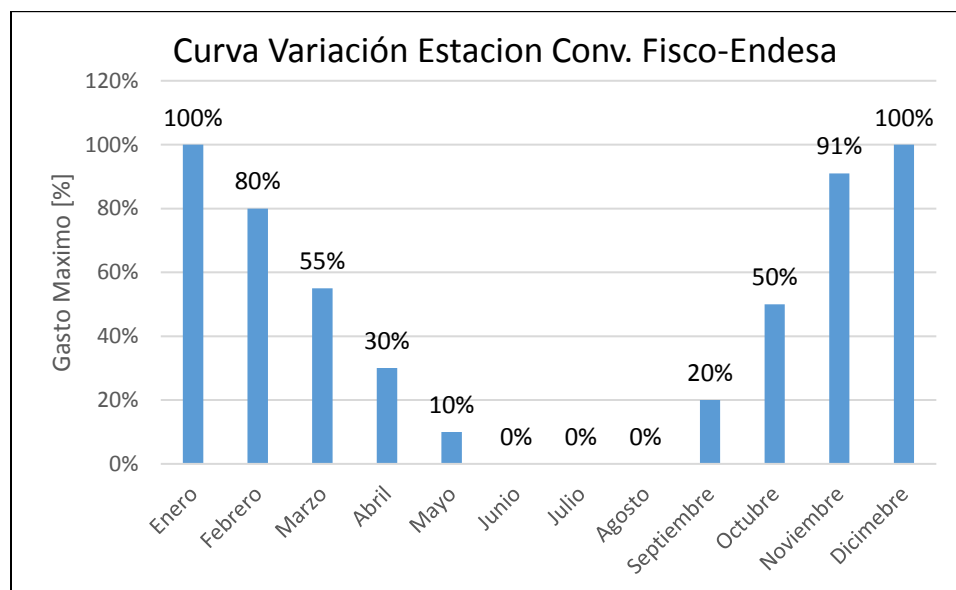


Figura 6.5: Curva variación estacional, convenio FISCO-ENDESA 1947 (Elaboración Propia)

En la Figura 6.5 se observa que los meses de verano tienen una necesidad de riego máxima. Por otro lado, los meses de invierno no presentan caudales de extracción, esto debido a que como se mencionó anteriormente, los meses de Junio, Julio y Agosto no pertenecen a la temporada de riego.

Con este objeto, el Departamento de Riego suministrará desde la Laguna del Maule, los gastos deficitarios del régimen natural de las aguas del río Maule y sus afluentes aguas arriba de Culenar, que sean necesarios para completar las cifras correspondientes antes indicadas (Fisco - ENDESA, 1947).

Este artículo también se refiere a la porción intermedia de forma variable. Mientras no se alcance el desarrollo máximo de 200 [m³/s] se reducirá la reserva ordinaria de 500 [Hm³] en la proporción de 4 [Hm³] por cada [m³/s] no aprovechado en riego, hasta un mínimo de 340 [Hm³] correspondiente al desarrollo de 160 [m³/s]. La reducción de la reserva ordinaria pasará a incrementar la porción superior de uso normal (Fisco - ENDESA, 1947). Debido a que el desarrollo de riego se encuentra en su máxima capacidad, no es necesario tomar en cuenta este párrafo.

Ejemplo: Debido a que el desarrollo de riego se encuentra completo, tomando el caudal máximo estacionario igual a 200 [m³/s]. Si tomamos de ejemplo el año 1998 se tienen los siguientes caudales reconstituidos en Armerillo (11.1.1 ANEXOS):

Tabla 6.1: Ejemplo – Caudales Naturales Río Maule Año 1998 (Elaboración Propia)

Mes	R.N [m ³ /s]	Mes	R.N [m ³ /s]
Enero	402,92	Julio	98,34
Febrero	213,55	Agosto	86,16
Marzo	143,14	Septiembre	98,11
Abril	150,02	Octubre	117,41
Mayo	124,99	Noviembre	88,29
Junio	125,33	Diciembre	72,93

Entonces la laguna del Maule tendría que aportar los siguientes caudales mensuales:

Tabla 6.2: Ejemplo – Caudales Naturales Río Maule, Curva de Variación Estacional y Aportes Laguna del Maule, Año 1998 (Elaboración Propia)

Mes	R.N [m ³ /s]	C.V.E [m ³ /s]	A.L.M [m ³ /s]	Mes	R.N [m ³ /s]	C.V.E [m ³ /s]	A.L.M [m ³ /s]
Enero	402,92	200	0	Julio	98,34	0	0
Febrero	213,55	160	0	Agosto	86,16	0	0
Marzo	143,14	110	0	Septiembre	98,11	40	0
Abril	150,02	60	0	Octubre	117,41	100	0
Mayo	124,99	20	0	Noviembre	88,29	182	93,71
Junio	125,33	0	0	Diciembre	72,93	200	121,07

Solo los meses de Noviembre y Diciembre tiene un régimen natural (R.N) menor al de la curva de variación estacional (C.V.E), por lo tanto, esos meses existe aporte proveniente de la laguna del Maule (A.L.M)

6.2.3. Artículo Tercero

El siguiente artículo estable las restricciones en términos de volumen para los regantes en función de la porción donde esté operando el embalse.

- A. “Mientras el nivel de las aguas del embalse se encuentre dentro de la porción superior, se podrá extraer íntegramente los gastos deficitarios definidos en el Art. 2º, sin más limitación que la indicada en la letra C) del presente artículo.”
- B. “Cuando el nivel de las aguas del embalse se encuentre dentro de la porción intermedia de reserva ordinaria, podrán extraerse íntegramente los gastos deficitarios definidos en el Art. 2º, sólo mientras el total del agua entregada con este fin no sobrepase el 80% de la reserva ordinaria más el 80% de las aguas entrantes a la laguna del Maule, desde el momento que comenzó el uso de la reserva. El Departamento de Riego queda en libertad para reducir oportunamente los gastos suministrados, en forma de cumplir esta condición.”
- C. “Cualquiera que sea la procedencia de las aguas administradas para atender los déficits de riego, no se podrá entregar con este fin en una temporada de riego, un volumen de agua superior a 800 [Hm³].”

En La Figura 6.6 se puede ver un esquema del embalse, resumiendo los tres puntos mencionados anteriormente.

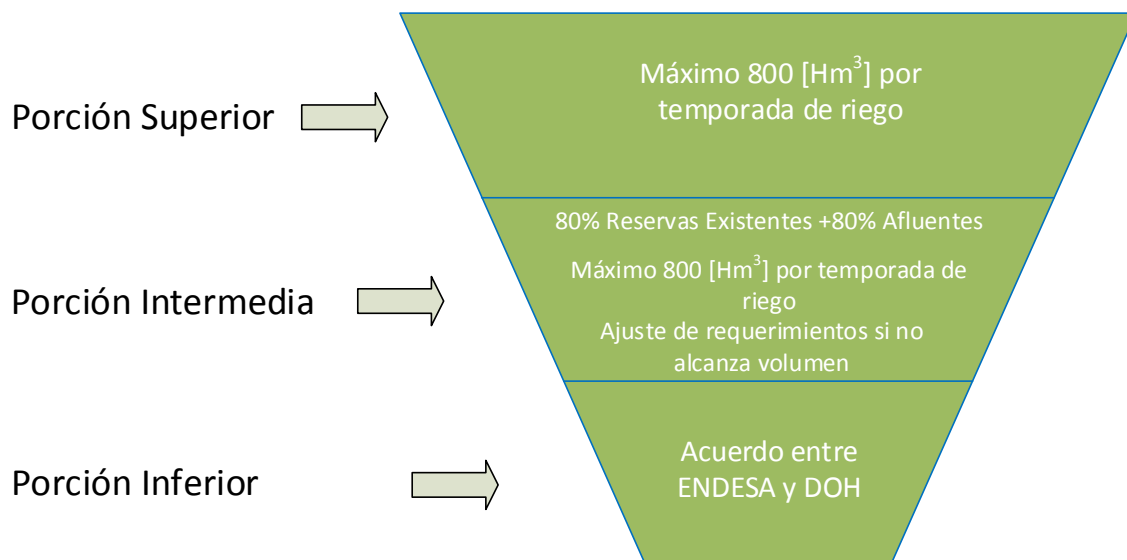


Figura 6.6: Volúmenes disponibles para riego (Elaboración Propia)

Es importante resaltar que para la porción intermedia el artículo tres, no define si el 80% deberá ser aplicado por año calendario o por temporada de riego. Para no crear inconsistencias con la modelación del artículo cinco, se define que este porcentaje solo podrá ser aplicado una vez por año calendario.

Ejemplo: Siguiendo con el año 1998, el 01/01/1998 la laguna tenía embalsado 514 [Hm³] (11.1.3 ANEXOS), por lo tanto, la laguna se encuentra en su porción intermedia, por ende, a los regantes les corresponde un 80% de las reservas ordinarias más un 80% de las aguas entrantes. Las aguas afluentes del año 1998 fueron 344 [Hm³] (Punto 11.1.2 ANEXOS), entonces los regantes pueden utilizar:

$$0,8 \cdot (\{514 - 170\} + 344) = 550,4 \text{ [Hm}^3\text{]}$$

Se debe ir comprando diariamente que las extracciones a la laguna del Maule no superen estos valores.

$$\frac{93,71 \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot (30)[dias] \cdot 86.400 \left[\frac{s}{dias} \right]}{1.000.000 \left[\frac{m^3}{Hm^3} \right]} = 242,8 [Hm^3]$$

$$\frac{121,07 \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot (29)[dias] \cdot 86.400 \left[\frac{s}{dias} \right]}{1.000.000 \left[\frac{m^3}{Hm^3} \right]} = 303,3 [Hm^3]$$

Con 29 días de Diciembre se tiene un extracción total de 546,2 [Hm³] (242,8+303,3) < 5540,4 [Hm³]. Ya con 30 días de Diciembre sobrepasa el límite de riego con 556,7 [Hm³] (242,8+313,8) < 5540,4 [Hm³]. Por lo tanto, ese año se alcanza el máximo de extracción posible de extracción de los regantes.

6.2.4. Artículo Cuarto

Por otro lado, el artículo cuatro establece para la generación eléctrica que, la ENDESA podrá utilizar desde la laguna del Maule, las aguas correspondientes a los gastos deficitarios de riego, sin indemnización a favor de los usuarios de esta agua por esta servidumbre, y además una cuota adicional especial para energía eléctrica, con un volumen de 250 [Hm³] por año calendario. Además, las extracciones para generación de energía eléctrica no podrán exceder de un gasto medio mensual de 25 [m³/s] ni de un gasto medio diario de 30 [m³/s].

Por último, este artículo menciona la posibilidad de expandir su cuota adicional de 250 [Hm³]. Si la ENDESA ha extraído, de su cuota especial de energía eléctrica, menos de 250 [Hm³] anuales durante uno o más años calendarios, podrá hacer una compensación extrayendo mayores cantidades de agua en los años siguientes. La parte no utilizada por la ENDESA de esta cuota anual de 250 [Hm³] podrá acumularse hasta un máximo de 350 [Hm³] para ser usada como una cuota suplementaria a lo largo de uno o más años calendarios.

6.2.5. Artículo Quinto

El artículo cinco es similar al artículo tres, donde se estable las restricciones de generación en función de la porción donde opere la laguna, las cuales son:

- A. *“Mientras el nivel de las aguas del embalse se encuentre dentro de la porción superior, la ENDESA podrá disponer de las aguas embalsadas en la laguna del Maule, de acuerdo al Art. 4º, sin otras limitaciones que las establecidas en ese mismo artículo.”*
- B. *“Mientras el nivel de las aguas del embalse se encuentre dentro de la reserva ordinaria, la ENDESA podrá extraer de la laguna del Maule para la generación de energía eléctrica, además de los gastos deficitarios de riego, solamente una cantidad de agua equivalente al 20% de dicha reserva ordinaria más el 20% de las aguas entrantes a la laguna desde el momento en que comenzó el uso de la reserva. El volumen del 20% de la reserva no se puede aplicar a este cómputo más de una vez por año calendario.”*

- C. “Los volúmenes de compensación establecidos en el Art. 4º, se podrán extraer solamente durante la explotación de la porción superior del embalse, quedando, por lo tanto, interrumpido su uso, durante la explotación de la reserva ordinaria, y reanudándose cuando se llegue nuevamente a la explotación de la porción superior.”
- D. “Si terminada la temporada de riego, en los períodos de invierno, se encontrará una explotación de reserva ordinaria, y la ENDESA hubiere utilizado para la generación de energía eléctrica, el total de las cuotas a que tiene derecho de acuerdo con la letra b) de este artículo, podrá la ENDESA extraer, antes del deshielo, previa autorización del Departamento de Riego, una cuota suplementaria no superior a 50 Hm³, ni al 50% del remanente de la reserva ordinaria, siempre que se compruebe que la existencia de nieve acumulada, asegura que la laguna del Maule recibirá no menos de 500 Hm³ de agua en el deshielo venidero.”

En la Figura 6.7 se puede ver nuevamente el esquema de la laguna, pero ahora resumiendo los cuatro puntos que se operan para generación.

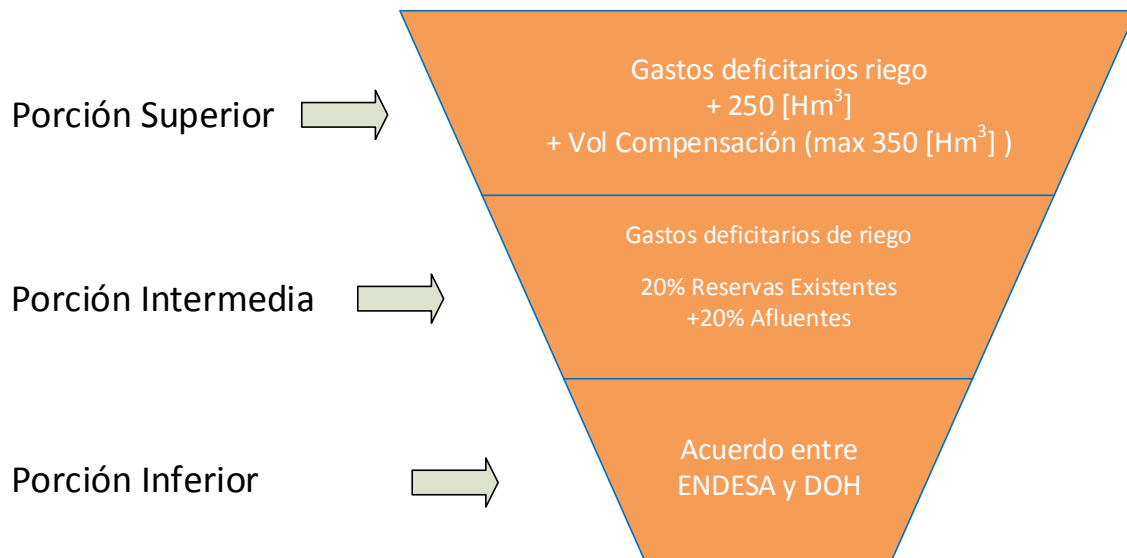


Figura 6.7: Volúmenes disponibles para generación (Elaboración Propia)

El artículo indica claramente que el 20% correspondiente a la porción intermedia solo podrá aplicarse una vez por año calendario, razón por la cual, para mantener consistencia, el riego también podrá extraer el 80% solo una vez por año calendario.

Ejemplo: Utilizando los mismos datos, a ENDESA, ahora Enel (Ex ENDESA) le corresponde:

$$0,2 \cdot (\{514,50 - 170\} + 344) = 137,6 \text{ [Hm}^3\text{]}$$

Se debe ir comprando diariamente que las extracciones a la laguna del Maule no superen estos valores.

$$\frac{25 \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot (63) [dias] \cdot 86.400 \left[\frac{s}{dias} \right]}{1.000.000 \left[\frac{m^3}{Hm^3} \right]} = 136,1 [Hm^3]$$

Con 63 días se tiene una extracción total de $136,1 [Hm^3] < 137,6 [Hm^3]$. Ya con 64 días sobrepasa el límite de generación con $138,2 [Hm^3] > 137,6 [Hm^3]$. Por lo tanto, ese año también se alcanza el máximo de extracción posible para Enel (Ex ENDESA).

6.2.6. Artículo Sexto

Para completar el funcionamiento de la laguna, el artículo 6 administra la porción inferior. Esta no podrá usarse sino con acuerdo entre las partes, tomado especialmente en cada caso (Fisco - ENDESA, 1947). Debido a la incertidumbre de la operación, no se asignan restricciones para la operación de esta porción, igualmente no será necesario asignar restricciones, debido a que durante el desarrollo de esta memoria se pretende no llegar al funcionamiento de la laguna en esta porción.

6.3. RESOLUCIÓN DGA N°105 DE 1983

La resolución DGA fue suscrita en 1983 por la Dirección General De Aguas. Este otorga derechos de aprovechamiento no consuntivos de aguas superficiales a ENDESA, de ejercicios permanente y continuo, en el río Maule por un caudal medio anual de $190 [m^3/s]$, con un máximo de $280 [m^3/s]$, para la generación de energías en las centrales Colbún y Machicura. Adicionalmente redimensiona los derechos consuntivos del río.

Esta resolución tiene fecha de ingreso a la oficina de partes de la DGA el 18 de Octubre de 1979. Se menciona esto porque a la fecha de ingreso de la solicitud, el código de aguas vigente era el anterior al actual, el cual rige desde 1981 hasta la fecha.

En el tercer punto de la resolución, se refiere a los valores mínimos que deberán ser respetados por ENDESA, los cuales son derechos de aprovechamientos existentes en el río Maule, de acuerdo con la distribución que efectúa su Junta de Vigilancia.

Los derechos consuntivos que deberán ser respetados corresponden a los siguientes valores de caudales mostrados en Figura 6.8.

Estos valores de los derechos deberán ser respetados siempre y cuando que en el río exista la disponibilidad equivalente a ellos, incluido el efecto de la aplicación del convenio suscrito entre el Fisco y la Empresa Nacional de Electricidad (Dirección General De Aguas, 1983).

En el caso que la disponibilidad del río sea inferior a los valores de caudales indicados para cada mes, los derechos que deberán ser respetados equivalen a la disponibilidad total de río. El caudal del río se determinará sumando al valor medido en la estación fluviométrica de la DGA "Maule en Armerillo" los caudales captados por los canales situados aguas arribas de esta estación (Dirección General De Aguas, 1983).

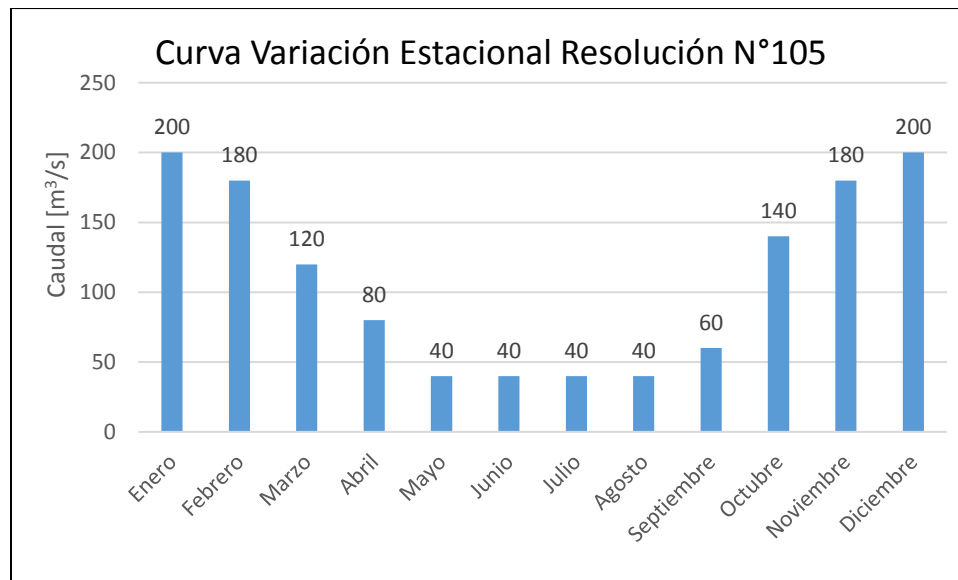


Figura 6.8: Curva variación estacional Resolución N°105, (Elaboración Propia)

La forma en que ENDESA restituye los derechos de aprovechamiento de agua varía según la disponibilidad de agua. Se tiene como obligación restituir en oportunidad sólo los caudales necesarios para que sea respetado los derechos existentes en el río Maule de la forma establecida por la curva anterior. La restitución del resto de los caudales se hará de acuerdo con las necesidades de operación del complejo hidroeléctrico (Dirección General De Aguas, 1983).

La resolución 105 no modifica la forma de administrar el recurso aguas arriba del embalse Colbún. De esta forma se puede afirmar que la cuenca se divide en dos sistemas; el primero, desde la laguna del Maule e Invernada, hasta Armerillo, regulado por el convenio de 1947 el cual entrega la curva de variación estacional, el funcionamiento de ambas lagunas y de la cuenca hasta Armerillo; el segundo sistema desde Armerillo en adelante, regulado por la resolución 105, el cual determina otorga derechos no consultivos a ENDESA para la generación de aguas en las centrales Colbun y Machicura. El ejemplo más claro de la independencia del sistema se muestra a continuación, se toma el mes de Marzo y damos tres caudales de régimen natura:

Tabla 6.3: Ejemplo independencia Convenio 1947 y Resolución N°105

Caudal	Ej. 1	Ej. 2	Ej. 3
Caudal Convenio 1947 [m³/s]:	110		
Caudal Resolución N° 105 [m³/s]:	120		
Régimen Natural en Armerillo [m³/s]:	100	115	150
Aporte Laguna del Maule [m³/s]:	10	0	0
Caudal Consultivo Regantes [m³/s]:	110	115	120
Caudal No Consuntivo ENDESA [m³/s]:	0	0	30

Mencionar algunas situaciones importantes que se producen producto del Convenio de 1947 y de la Resolución N° 105 son las siguientes:

Endesa puede usar sin compensación alguna, todas las aguas desembalsadas de Laguna del Maule por la DOH para riego. Estas aguas pasan por toda la serie de generación: Isla - Curillín - Loma Alta - Pehuenche y quedan disponibles para riego al pasar por Armerillo, lugar donde se contabilizan y se distribuyen para riego. Una vez aplicada la Resolución 105 que establece cuales son los derechos que Colbún puede usar una vez satisfecho la serie mensual de caudales de riego.

Aproximadamente 80 [m³/s] (de un total de 200 [m³/s]) son entregados aguas abajo del embalse Colbún a través de las obras de restitución desde el embalse al río (Canal de Devolución, Canales Sur 1, Sur 2, Sur 3, Duao zapata y San Clemente). Este caudal generalmente es menor a la necesidad de generación de Colbún. También hay meses en los cuales, el requerimiento de generación impuesto por el “Coordinador Eléctrico” podría ser menor al requerimiento de riego. En estos casos, Colbún debe generar lo suficiente como para abastecer sus obligaciones de entrega a riego.

Por otro lado, los ríos Claro y Loncomilla son afluentes del Maule aguas abajo de la zona de riego dependiente de Laguna del Maule, por lo cual no ingresan a la contabilidad del caudal general medido en Armerillo usado para calcular los caudales que pueden retirar los diversos canales. Los afluentes del río Claro y Loncomilla no juegan en esta ecuación de disponibilidad.

6.4. MODELO OPERACIÓN LAGUNA DEL MAULE

En el Maule los derechos de riego y generación se operan de forma independiente y además poseen un orden de utilización. Esto obliga a contabilizar de alguna forma el agua extraída del Maule. A cada una de estas fuentes se asignará un contador en el modelo. Ambos contadores se reinician una vez al año el último día del año (Fin de Diciembre).

El caudal destinado a riesgo según menciona el Convenio Fisco-Endesa viene dada por la Ecuación (12).

$$Q_R = \begin{cases} Q_{RN} + Q_{LMR} & \text{Si, } Q_{RN} < Q_{CVEC} \\ Q_{RN} & \text{Si, } Q_{CVEC} < Q_{RN} < Q_{CVER} \\ Q_{CVER} & \text{Si, } Q_{RN} > Q_{CVER} \end{cases} \quad (12)$$

Dónde

Q_R : Caudal Para Riego, [m³/s]

Q_{LMR} : Caudal Laguna Del Maule Para Riego, [m³/s]

Q_{CVER} : Caudal Curva De Variación Estacional Resolución N°105, [m³/s]

Q_{CVEC} : Caudal Curva De Variación Estacional Convenio Fisco-Endesa 1947, [m³/s]

En los casos que el caudal del río sea menor a los del convenio y para satisfacer el riego se sigue el siguiente orden. Inicialmente el déficit se calcula mediante la diferencia entre el régimen natural del río Maule y los caudales mensuales del convenio de 1947 (Fisco - ENDESA, 1947) como se muestra en la Ecuación (13).

$$D = \begin{cases} 0 & \text{Si, } Q_{CVEC} > Q_{RN} \\ Q_{CVEC} - Q_{RN} & \text{Si, } Q_{CVEC} < Q_{RN} \end{cases} \quad (13)$$

Dónde

D : Caudal Deficitario, [m³/s]

Este déficit se completa con los derechos que disponga la DOH en el Maule como se muestra en la Figura 6.9. La necesidad de riego es el caudal necesario para riego según la curva de variación estacional dada por el convenio Fisco – Endesa. Esta en su primera instancia es suplida por el caudal natural del río Maule. Cuando las aguas no son suficientes, se genera un déficit que es cubierto por las aguas de la lagunas del Maule.

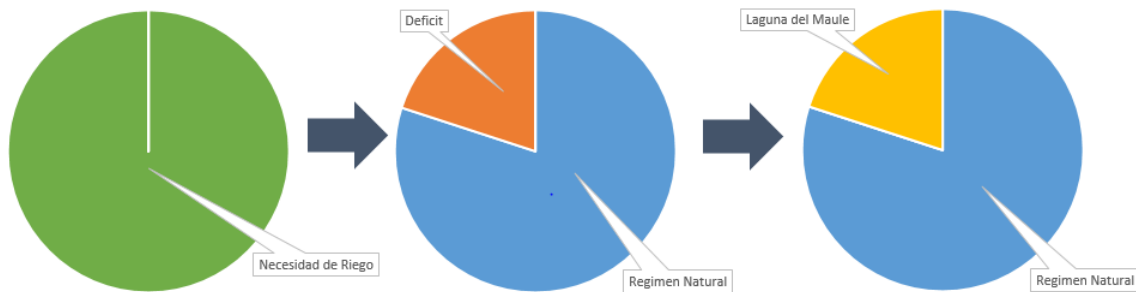


Figura 6.9: Orden para satisfacer la necesidad de riego por el río Maule y sus embalses (Elaboración Propia)

El caudal que aporta la Laguna del Maule viene dado por la Ecuación (14), la cual tiene varias restricciones que se mencionan en el Punto 6.2. El convenio de 1947 en su artículo sexto no entrega reglas claras para la administración de la porción inferior y sumado a que esta memoria no desea estudiar el comportamiento del embalse en esa porción, se ha incluido una restricción adicional en el modelo. A principio de cada mes se calcula el volumen deficitario de riego (V_{EER}) y se comparan con el volumen que dispone el embalse sin considerar la porción inferior (V_{DE}), cuando $V_{EER} < V_{DE}$ no se entregan los recursos.

$$Q_{LMR} = \begin{cases} 0 & \text{Si, } Q_{RN} > Q_{CVEC} \\ D & \text{Si, } Q_{RN} < Q_{CVEC} \end{cases} \quad \text{Si, } Q_{RN} > Q_{CVEC} \quad \wedge \quad V_{TR} < V_{Max R} \quad \wedge \quad V_{EER} < V_{DE} \quad (14)$$

Dónde

V_{TR} : Volumen Extraído Durante La Temporada De Riego Hasta El Tiempo t , [m³]

$V_{Max R}$: Volumen Máximo Permitido Extraer Durante Temporada De Riego Del Año, [m³]

V_{EER} : Volumen Esperado Extraer Para Riego En El Mes, [m³]

V_{DE} : Volumen Disponible a Extraer, [m³]

La condición de volumen máximo permitido extraer durante la temporada de riego se resume en la Ecuación (15).

$$V_{Max R} = \begin{cases} 0 & Si, S_t \leq 170\,000\,000 [m^3] \\ 0,8[(S_t - 170\,000\,000) + I_t] & Si, 170\,000\,000 < S_t < 670\,000\,000 [m^3] \\ 800\,000\,000 & Si S_t \geq 670\,000\,000 [m^3] \end{cases} \quad (15)$$

Es decir, el modelo chequea si existe déficit en el río, si es así se calcula este, basado en la curva del convenio de 1947. Después de calcular el déficit se estima el agua para cubrir este déficit, este cálculo considera la porción embalsada para riego en ese momento sin considerar la porción inferior. Si existen los suficientes recursos hídricos se entregan, de manera contraria se riega con el régimen natural del río.

Por otra parte, aunque el convenio no restringe el uso de derechos de forma simultánea, en la práctica los derechos de generación no se utilizan para completar el déficit de riego. Para el modelo se asignaron los meses Abril, Mayo, Junio, Julio y Agosto para la extracción por generación eléctrica, donde Endesa (Hoy Enel), en la práctica hace sus extracciones y donde normalmente el déficit de riego es cero debido al que régimen natural cubre la necesidad de riego.

Adicionalmente se tiene el caudal para generación eléctrica, el cual viene dado por la Ecuación (16), la cual menciona la posibilidad de utilizar los volúmenes deficitarios del riego.

$$Q_G = \begin{cases} Q_{LMG} & Si, Q_{RN} < Q_{CVER} \\ Q_{RN} - Q_{CVER} + Q_{LMG} & Si, Q_{RN} > Q_{CVER} \end{cases} \quad (16)$$

El convenio no hace mención a la utilización de las aguas excedentes de riego en Armerillo en conjunto a las aguas de la Laguna del Maule. Por otro lado, el convenio si restringe el volumen máximo de extracción anual para generación eléctrica, expresada en la Ecuación (18) y el caudal máximo mensual extraíble de la laguna para la generación entregada en la Ecuación (17).

$$Q_{LMG} = \begin{cases} 0 & Si, V_{TG} > V_{Max G} \\ 25 & Si, V_{TG} < V_{Max G} \wedge V_{EEG} < V_{DE} \end{cases} \quad (17)$$

Dónde

Q_{LMG} : Caudal Laguna Del Maule Para Generación, [m³/s]

V_{TG} : Volumen Extraído Durante El Año Para Generación Hasta El Tiempo t , [m^3]

$V_{Max\ G}$: Volumen Máximo Permitido Extraer Durante El Año Para Generación, [m^3]

V_{EEG} : Volumen Esperado Extraer Para Generación Eléctrica En El Mes, [m^3]

$$V_{Max\ G} = \begin{cases} 0 & Si, S_t \leq 170\ 000\ 000\ [m^3] \\ 0,2[(S_t - 170\ 000\ 000) + I_t] & Si, 170\ 000\ 000 < S_t < 670\ 000\ 000\ [m^3] \\ 250\ 000\ 000 & Si S_t \geq 670\ 000\ 000\ [m^3] \end{cases} \quad (18)$$

Finalmente, la suma de los caudales de riego Q_{LMR} y generación Q_{LMG} es igual al término de descarga Yd_t que se menciona en la Ecuación (5) del balance de masas e igual al término Q_{LM} el cual se menciona en la Ecuación (11).

6.4.1. Criterio de Falla

Según la Curva variación estacional Resolución N°105 (Figura 6.8), para el riego se espera un determinado caudal de agua que varía según el mes del año. Como se ha mencionado con anterioridad este caudal es obtenido del régimen natural del río y si es necesario los aportes de la Laguna del Maule.

Se espera que ese caudal cubra la necesidad de riego en su totalidad, pero en épocas de sequías es necesario trabajar con caudales menores que puedan cubrir de manera mínima, sin causar la pérdida de la temporada agrícola, la cual es la principal fuente económica de los accionistas de la Junta de Vigilancia. El Asesor Técnico de la Asociación de Canalistas Maule Sur, estima que el caudal medio mensual mínimo necesario para satisfacer de manera mínima viene dado por una curva de variación estacional, la cual se muestra en la Figura 6.10.

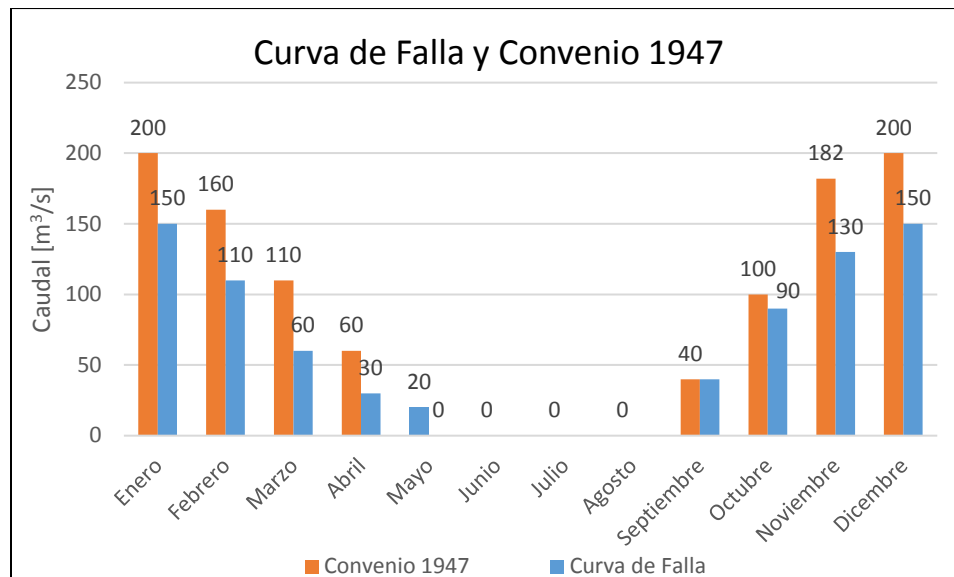


Figura 6.10: Curva variación estacional mínima para satisfacer el riego (Curva de Falla) comparada con curva variación estacional Convenio 1947 (Elaboración Propia)

Observar que los nuevos caudales no son un porcentaje fijo de la curva de variación estacional del Convenio de 1947, sino que varían dependiendo del mes, debido a que en verano la necesidad de agua es mucho mayor que en invierno.

Se considerar una temporada de riego insatisfactoria desde el punto de vista de los recursos hídricos si cumple el siguiente criterio:

- **Criterio de Falla:** El caudal medio mensual reconstituido en Armerillo de al menos un mes debe ser menor al mencionado en la curva de variación estacional mínima para satisfacer el riego (Figura 6.10) o el caudal medio mensual reconstituido en Armerillo de dos meses de verano (Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero) debe ser menor al caudal de la Resolución N° 105 (Figura 6.8).

Con el primer criterio se asegura un caudal mínimo de funcionamiento mensualmente. Con el segundo se espera que en las sequías de verano a lo menos en un mes se pueda contar con el caudal que actualmente se utiliza.

7. OPERACIÓN ACTUAL

7.1. SUSTENTABILIDAD DE LA CUENCA

Una de las interrogantes más grandes que genera el embalse es su capacidad de suplir el déficit de agua a largo plazo ¿La cuenca de la Laguna de Maule capta suficientes afluentes como para suplir el déficit de riego y adicionalmente realizar un aporte a la matriz energética del país de manera sostenida en el tiempo? O ¿La cuenca Laguna del Maule es sustentable para los derechos otorgados?

Para responder las interrogantes que se tengan en este estudio, fue necesario realizar una recopilación de información hidrológica. La estadística utilizada fue caudales “Río Maule en Armerillo” y “Afluentes Laguna del Maule”, ambos entregados por Enel (Ex Endesa) con una extensión desde el año 1960 hasta fines del año 2016. Los datos de régimen natural en Armerillo fueron comparados con las estadísticas entregadas por la Junta de Vigilancia del Río Maule.

Los valores de afluente fueron comparados con un balance hídrico realizado según la Ecuación (5) con los datos conocidos de Evaporación, Caudales Extraídos entregados por la Dirección Obras Hidráulicas, Variación de Volumen también entregado por la Enel (Ex Endesa). Las estadísticas comparadas son similares y cumplen con la confiabilidad que se menciona en el Punto 3.1.1. Se utilizó la información de Enel debido a que la estadística está completa, no como los otros regístritos disponibles, los cuales no contaban con toda la información. Al utilizar los registros de Enel no fue necesario realizar relleno de datos. Los datos utilizados se encuentran en los Anexos de la memoria.

Mencionar que solo se utilizaron datos desde año 1992 en adelante. Esto tiene diferentes razones. La primera razón se produce por la falta de datos para realizar el balance hídrico mencionado anteriormente. Si bien se utilizaron los datos entregados por Enel, podrían existir duda de su exactitud y la única manera de corroborarlos era realizando un balance hídrico. Se solicitó más información a la DGA mediante llamados telefónicos y correos, pero lo enviado corresponde a una serie de datos incompletos, misma información que disponen en su página web. La segunda razón se produce por el alcance del estudio, que corresponde la disponibilidad hídrica de la Laguna en los últimos periodos de tiempo, considerando los recursos hídricos limitados que se disponen hoy en día.

Seleccionada la estadística y la brecha de tiempo, es posible responder la interrogante mencionada anteriormente, primero nos centraremos en el déficit de riego, quien genera las principales extracciones de la laguna. El déficit de la cuenca se calcula como se menciona en la Ecuación (13) y al multiplicarlos por tiempo se obtiene el volumen deficitario. Utilizamos valores mensuales “ i ” y posteriormente sumamos estos valores mensuales para obtener los valores anuales “ a ”.

$$V_{Def_{i,a}} = D_{i,a} \cdot \Delta t_i \quad (19)$$

$$V_{Def_a} = \sum_{i=1}^{12} V_{Def_{i,a}} \quad (20)$$

Por otro lado, para obtener los volúmenes afluentes a la laguna multiplicamos los caudales afluentes por un tiempo determinado y de la misma manera que el volumen deficitario obtenemos los valores mensuales y anuales. Para aislar la porción de los afluentes correspondiente a riego se aplica un factor de 0,8.

$$V_{afl_{i,a}} = 0,8 \cdot I_{i,a} \cdot \Delta t_i \quad (21)$$

$$V_{Afl_a} = \sum_{i=1}^{12} V_{Afl_{i,a}} \quad (22)$$

A continuación, en la Figura 7.1 se grafican los valores de volúmenes afluentes y volúmenes deficitarios en valor absoluto. La Tabla 7.1 muestra un resumen de los valores totales.

Tabla 7.1: Comparación entre Volúmenes Deficitarios y Volúmenes Afluentes, en [Hm³]

	V _{deficit}	V _{afluente}	Diferencia
Promedio	-321,34	295,64	-25,70
Total	-8.033,71	7.391,25	-642,46

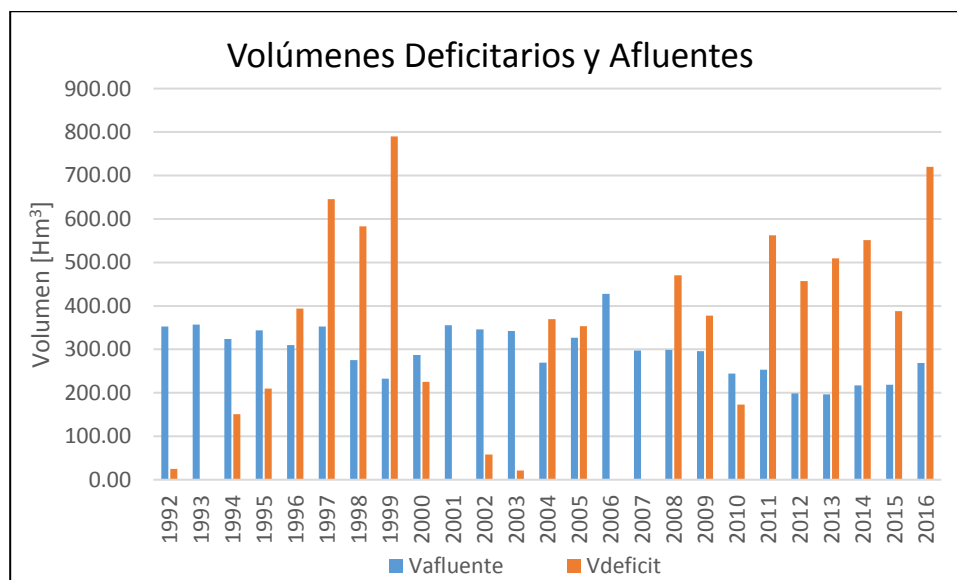


Figura 7.1: Comparación entre Volúmenes Deficitarios y Volúmenes Afluentes (Elaboración Propia)

El resultado es claro, son más de 25 [Hm³] anuales los cuales no puede suplir la cuenca Laguna y que se pierden del embalse. Al largo plazo esos volúmenes se suman al llegar al total de más de 600 [Hm³] los cuales equivalen a más de un 40% de volumen total de la laguna. La pérdida es sostenida pero un 40% no pareciera ser preocupante. Si bien queda claro que la cuenca no genera los recursos que hoy están otorgados, los resultados no concuerdan con las grandes sequías y el bajo volumen del embalse que se ha tenido este último tiempo.

Si miramos detenidamente el gráfico se observa que en los años donde los volúmenes afluentes son menores se producen de manera esperada los mayores volúmenes deficitarios (Entre 1996-1999 y 2011-2016). Los otros años (Entre 1992-1995 y 2000-2010) se observa que los déficits son menores debido a que los volúmenes afluentes son mayores. La gran variabilidad permite que en los años húmedos se pueda satisfacer la necesidad de riego, pero no permite suplir de manera sostenida los años secos.

En los años húmedos, el déficit de riego es pequeño porque el aporte natural del río es importante, por lo cual se reduce el uso de la reserva. En años secos, el déficit de riego es grande porque el aporte natural del río es escaso, por lo que se intensifica el uso de las reservas en Laguna del Maule.

El embalse Laguna del Maule fue planificado para dar seguridad en una escala interanual. Esto implica que el menor uso de las reservas en años húmedos deberá ayudar a crear una reserva para los años secos.

Un análisis acumulativo a lo largo de un período de tiempo debería dar como resultado un volumen afluente similar al déficit de riego sin embargo esto no ocurre, instalando una duda razonable acerca de la seguridad de cumplir la curva de variación estacional del convenio Riego – Endesa de 1947.

Los cambios en la hidrología es el principal argumento para realizar este estudio. Si consideramos que en esta ventana de 25 años hemos tenidos dos grandes periodos de sequía de 4 años cada uno (1998-2002 y 2011-2016), no estamos hablando de evento particulares, sino de ciclos de sequías que probablemente vuelvan a ocurrir en un futuro próximo. Es clara la falta de recursos hídricos en los periodos de sequías que generan la importancia de realizar este estudio.

La actividad económica, en particular la agricultura, requiere de condiciones estables en el tiempo para fomentar la inversión. Esta premisa también se aplica al ámbito de los recursos hídricos. Un embalse de regulación interanual permite mitigar los efectos de un año seco, gracias a la acumulación en años húmedos. El suministro de volúmenes deficitarios para riego debe propender a un equilibrio con los volúmenes afluentes, de tal forma de garantizar la sustentabilidad del embalse. Esta premisa no se está cumpliendo en la Laguna de Maule, porque los volúmenes deficitarios promedios de riego están siendo mayores a los volúmenes afluentes.

Estas grandes razones nos llevan a proponer una curva de variación estacional de caudales más restrictiva, de tal manera de ajustar los volúmenes deficitarios a los volúmenes afluentes al embalse. ¿Qué se gana? Homogeneizar los caudales en los años secos y además de seguir

satisfaciendo el riego de manera normal en los años húmedos, lo que genera de manera global un caudal para riego más homogéneo, mayor y por lo tanto más seguro.

Para el estudio se genera un modelo con las características descritas en el Punto 6.4 y que utiliza los valores hidrológicos mencionados anteriormente. El modelo utiliza la curva de variación estación actual (Fisco - ENDESA, 1947), pero adicionalmente entregaremos resultados con curvas más restrictivas para finalmente entregar una propuesta de nueva curva. Por otro lado, para la generación eléctrica, el modelo también utiliza las restricciones actuales y también entregara resultados más restrictivos variando el volumen máximo a entregar anualmente para finalmente entregar una operación propuesta de nuevo volumen máximo de extracción para generación eléctrica.

7.2. VOLUMEN EMBALSADO Y VOLUMENES EXTRAÍDOS APLICANDO EL CONVENIO ACTUAL

La operación actual considera lo siguiente:

- Curva de Variación Estacional Según Figura 6.8.
- Volumen Máximo de Extracción Para Generación Eléctrica Igual a 250 [Hm³].

Al correr el modelo, el primer resultado que se obtiene es la variación del volumen embalsado durante el período del estudio. En las Figura 7.2, Figura 7.3, Figura 7.4, Figura 7.5 y Figura 7.6 se muestra la evolución del volumen embalsado en función del tiempo. Para una mejor percepción de la información se incluyen los límites de las porciones del embalse. Cada uno de los gráficos almacena la información de cinco años.

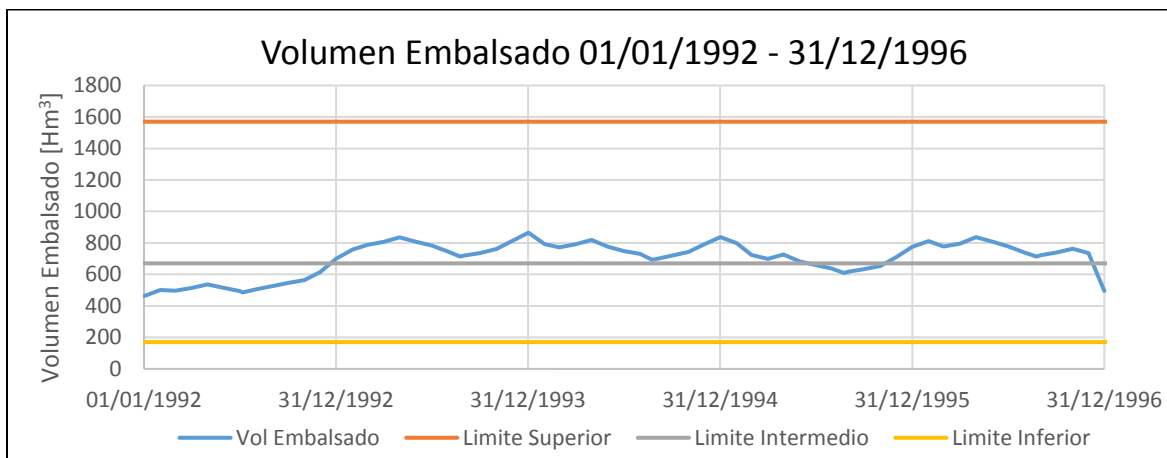


Figura 7.2: Volumen Embalsado Período 1992-1996 (Elaboración Propia)

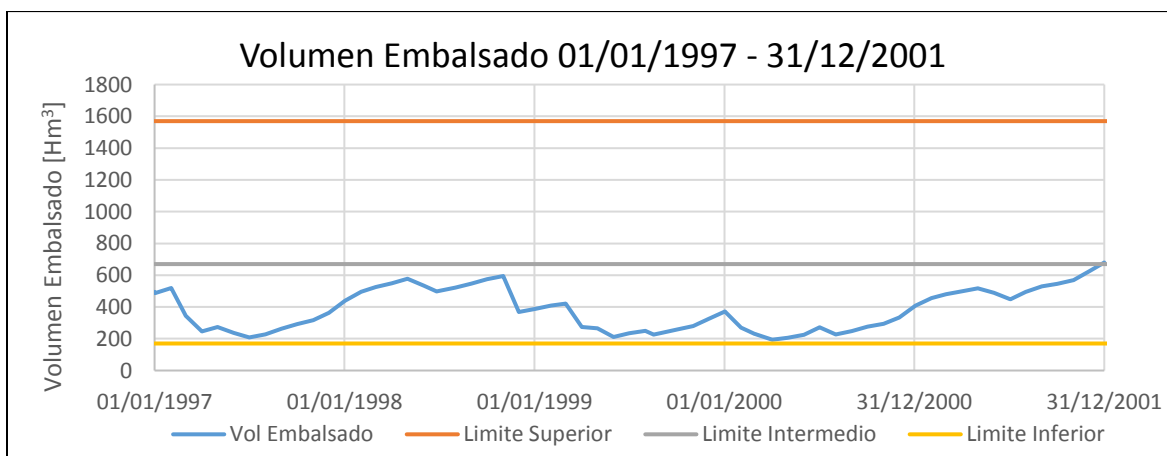


Figura 7.3: Volumen Embalsado Período 1997-2001 (Elaboración Propia)

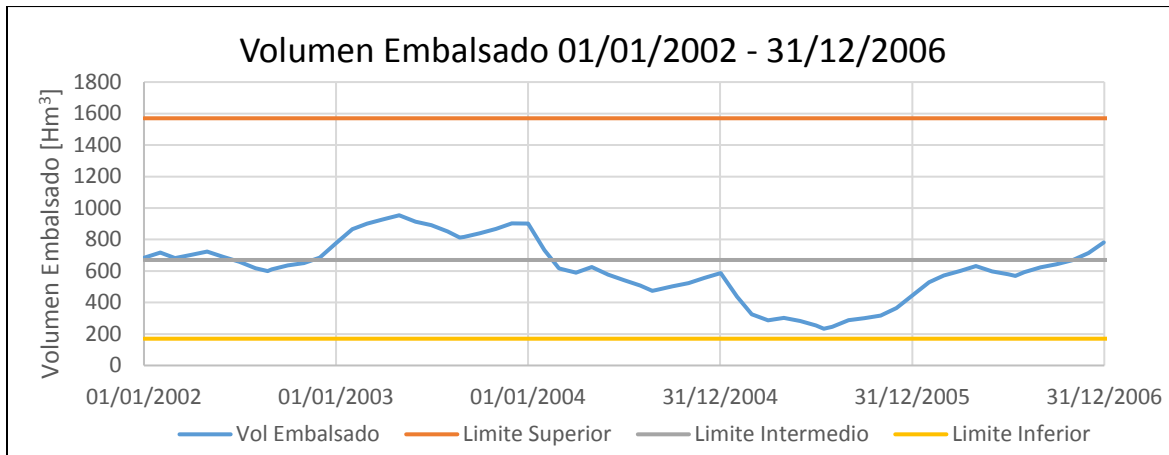


Figura 7.4: Volumen Embalsado Período 2002-2006 (Elaboración Propia)

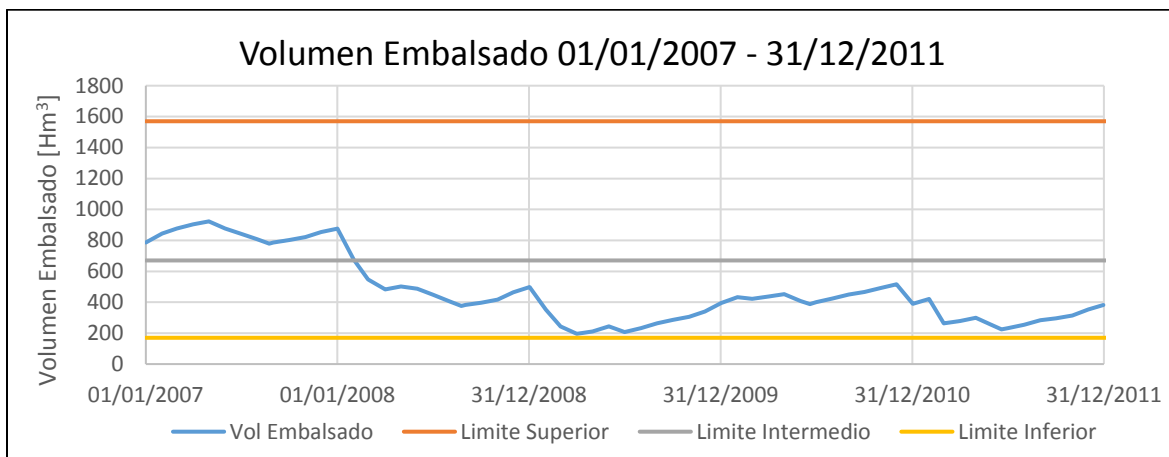


Figura 7.5: Volumen Embalsado Período 2007-2011 (Elaboración Propia)

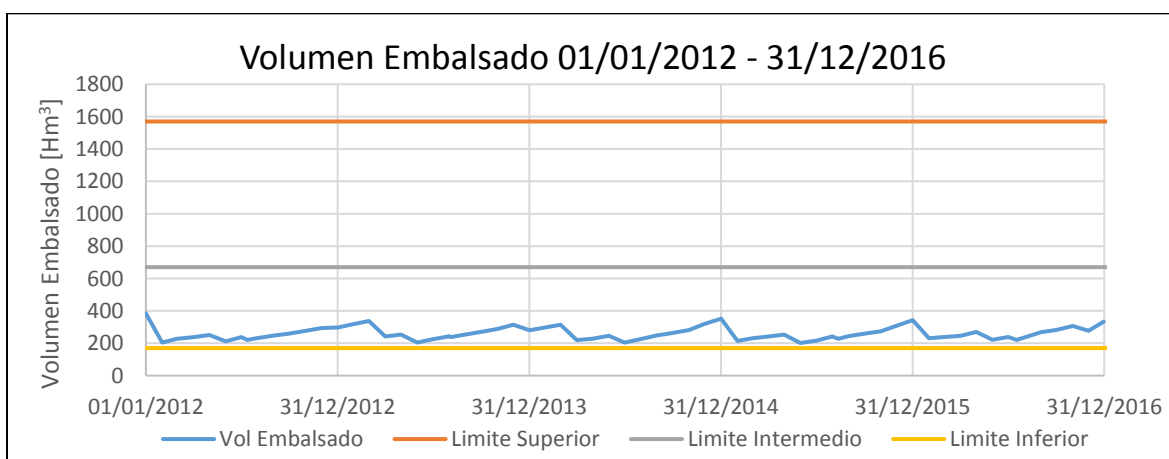


Figura 7.6: Volumen Embalsado Período 2012-2016 (Elaboración Propia)

De manera general se observa que la mayor parte del tiempo el embalse se encuentra en la porción intermedia, lo cual es de esperar debido a que primero el modelo no permite a que esta caiga en la porción inferior y segundo al gran déficit en el río Maule era poco probable que la laguna se mantuviera en la porción superior. En este sentido se vuelve a observar que los años húmedos son 1992-1995, 2003 y 2006-2007, destacados por mantenerse en la porción superior durante mayor tiempo. Por otro lado, se pueden destacar dos períodos de tiempo claros de sequía, entre los años 1996-2001 y el más importante entre 2008-2016 donde la laguna se encuentra de manera peligrosa cerca del límite inferior.

Ahora la pregunta es ¿Cuáles fueron los caudales para que la laguna se comportara de la forma que se mostró anteriormente? En las Figura 7.7 y Figura 7.8 se muestran las extracciones máximas permitidas según el convenio para riego (800 [Hm³] o 80% de la Reserva Intermedia + Afluentes) y generación eléctrica (250 [Hm³] o 20% de la Reserva Intermedia + Afluentes) respectivamente obtenidos de la operación simulada. Adicionalmente se agregaron las cantidades extraídas en la simulación según las restricciones impuestas para riego (Curva de Variación Estacional del Convenio) y generación eléctrica (Gasto Medio Mensual). Recordar que las extracciones máximas permitidas vienen dadas por la condición del embalse, la cual se revisa el primer día de cada año, la cual se muestra en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Estatus de la Laguna el Primer día de año

Año	Porción	Año	Porción	Año	Porción
1992	INTERMEDIA	2001	INTERMEDIA	2010	INTERMEDIA
1993	SUPERIOR	2002	SUPERIOR	2011	INTERMEDIA
1994	SUPERIOR	2003	SUPERIOR	2012	INTERMEDIA
1995	SUPERIOR	2004	SUPERIOR	2013	INTERMEDIA
1996	SUPERIOR	2005	INTERMEDIA	2014	INTERMEDIA
1997	INTERMEDIA	2006	INTERMEDIA	2015	INTERMEDIA
1998	INTERMEDIA	2007	SUPERIOR	2016	INTERMEDIA
1999	INTERMEDIA	2008	SUPERIOR		
2000	INTERMEDIA	2009	INTERMEDIA		

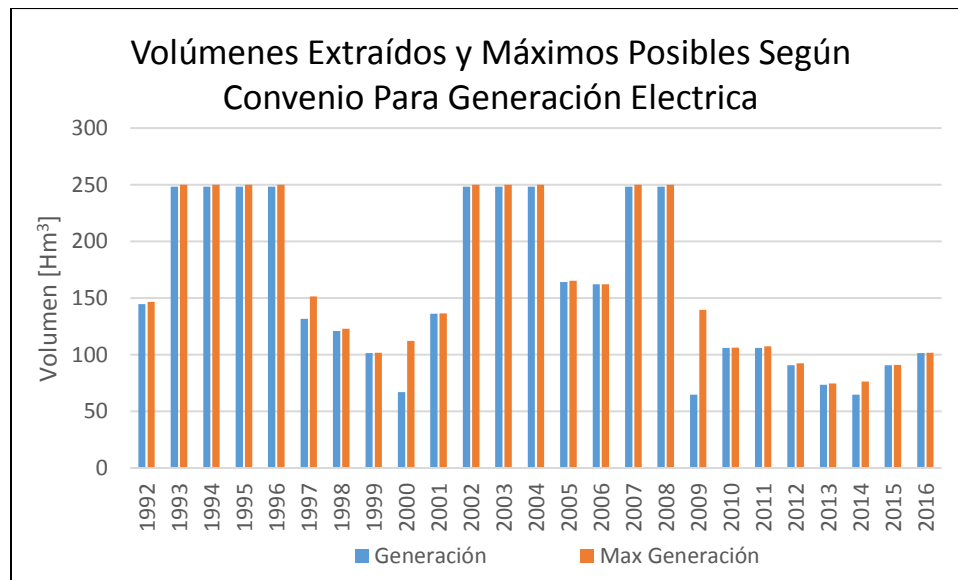


Figura 7.7: Comparación Extracciones Realizadas vs Máxima Permitida por Generación - 1992-2016 (Elaboración Propia)

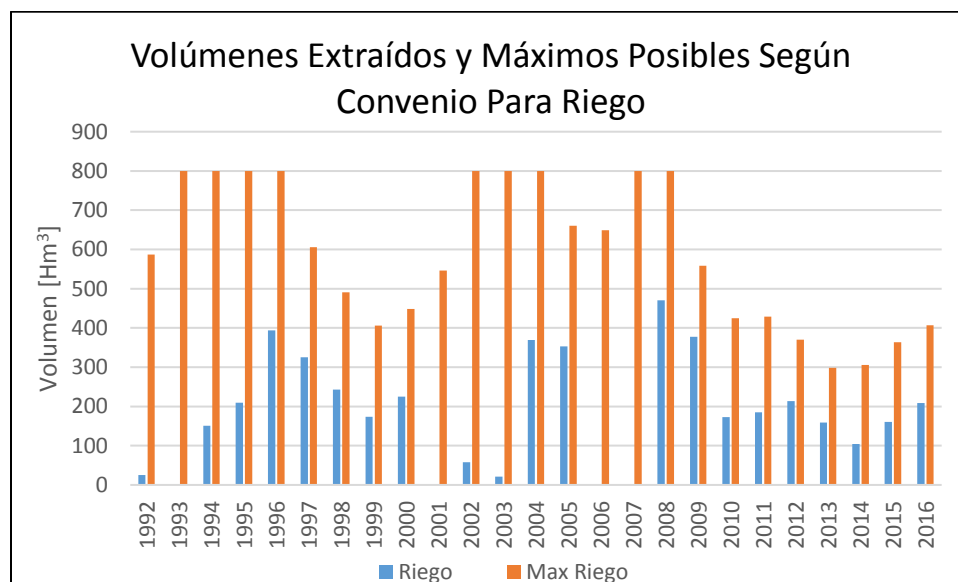


Figura 7.8: Comparación Extracciones Realizadas vs Máxima Permitida por Riego - 1992-2016 (Elaboración Propia)

En el gráfico del riego se observa claramente que las extracciones simuladas se encuentran muy por debajo de los valores máximos permitidos. Esto es sumamente importante debido a que nos corrobora que las restricciones para riego se deben hacer en la curva de variación estación y no son los valores máximos por extraer, ya que estas raras veces son alcanzados. No así es el caso de la generación eléctrica, donde los valores máximos y los valores extraídos son muy similares, porque las restricciones se deben hacer en el valor máximo a extraer.

En resumen, el total de volúmenes entregados para Riego y Generación en todo el período se entregan en la Tabla 7.3. Los volúmenes se entregan en [Hm³].

Tabla 7.3: Volúmenes Entregados En Todo el Período – Operación Actual En [Hm³] (Elaboración Propia)

	Volúmenes Extraídos	Porcentaje
Generación	3.981	46.39%
Riego	4.599	53.61%

Se observa como claramente respetando lo estipulado en el convenio que regula la Laguna del Maule, las extracciones de agua están en un porcentaje muy distinto al 80-20 que describe el convenio. El gran favorecido es Endesa que al no tener restricciones puede extraer grandes cantidades de volúmenes.

7.3. CAUDAL MEDIO MENSUAL PARA RIEGO

Ahora la verdadera importancia del embalse es el caudal de río Maule en Armerillo. Como se mencionó en el Capítulo 6.1 el caudal en la estación cuantifica el déficit, el cual define los derechos de extracciones para el riego y otorga los gastos deficitarios del riego para la generación eléctrica. En las, Figura 7.9, Figura 7.10, Figura 7.11 y Figura 7.12 se muestran los caudales promedios entregados a riego según la Ecuación (12) para los 25 años de análisis en los meses que se tiene mayor déficit (Diciembre - Marzo). Los caudales de Septiembre a Noviembre no se muestran debido a que los caudales en régimen natural son normalmente mayores a los señalados en el convenio de 1947 e incluso de la Resolución N° 105. Los pocos meses que son menores la laguna siempre es capaz de suplir ese déficit.

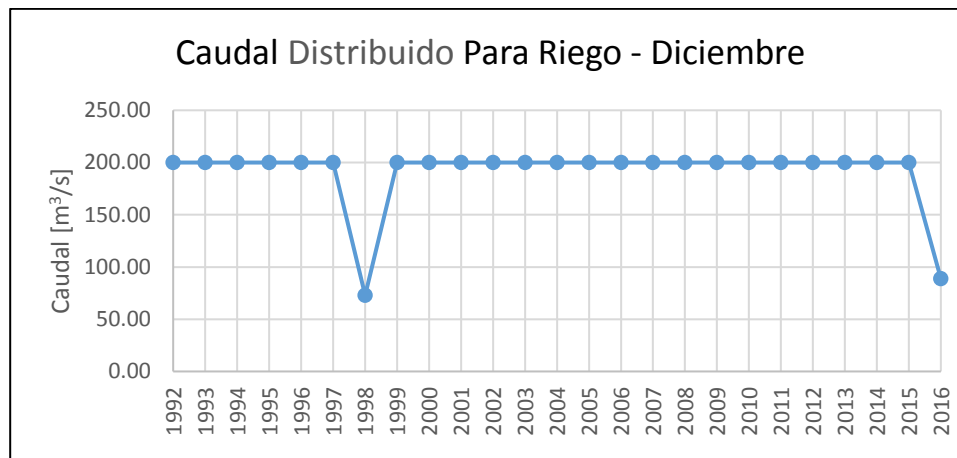


Figura 7.9: Caudal Medio Mensual Para Riego - Diciembre 1992 a 2016 (Elaboración Propia)

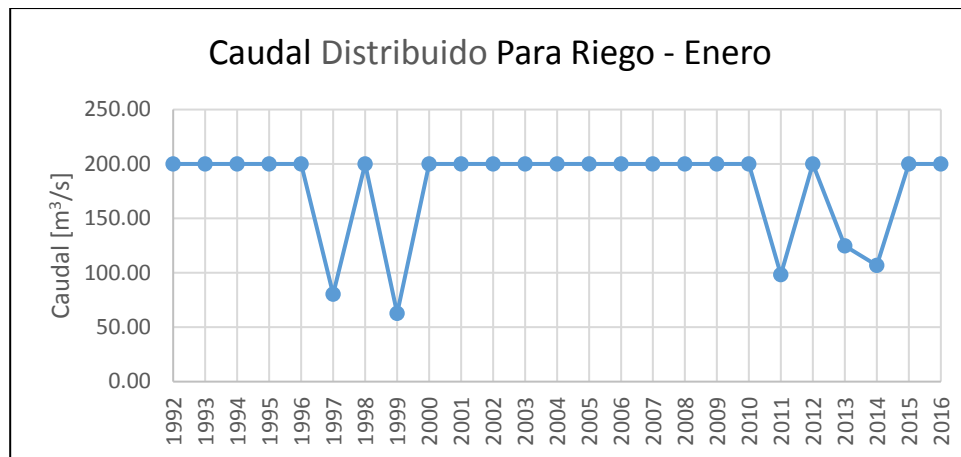


Figura 7.10: Caudal Medio Mensual Para Riego – Enero 1992 a 2016 (Elaboración Propia)

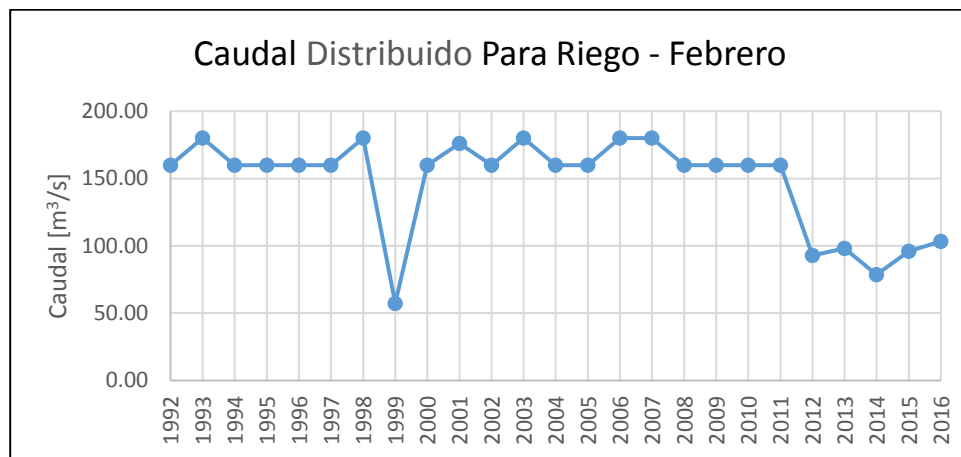


Figura 7.11: Caudal Medio Mensual Para Riego – Febrero 1992 a 2016 (Elaboración Propia)

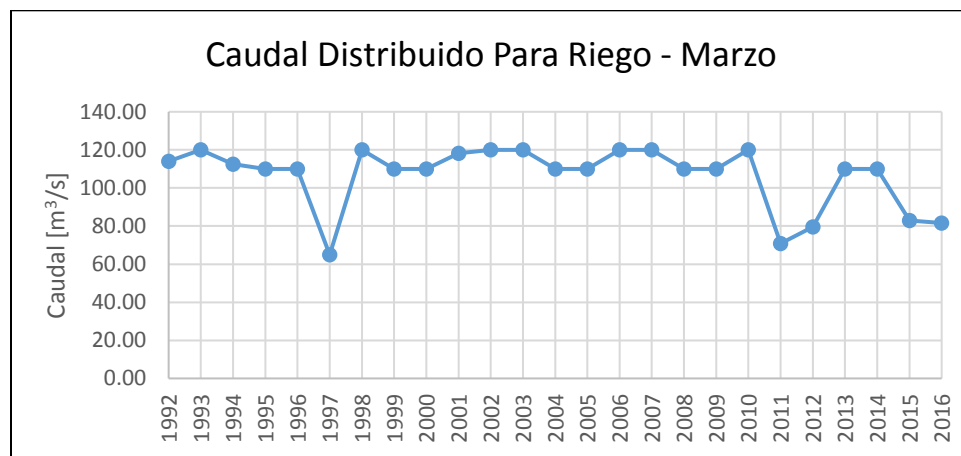


Figura 7.12: Caudal Medio Mensual Para Riego – Marzo 1992 a 2016 (Elaboración Propia)

Se observa claramente como a medida que pasan los meses, la variabilidad aumenta. Diciembre y Enero se ven regulares debido a que gran parte del agua del embalse es gastada en esos meses. Por otro lado, los meses de Febrero y Marzo la variabilidad aumenta por la razón que se explicó anteriormente. Tener en consideración que para los meses de Febrero y Marzo el caudal de la curva es menor, por lo que es probable que el estado de laguna no sea bastante crítico.

7.4. SEGURIDAD DE RIEGO

Por último, se obtiene la seguridad de riego que entrega el embalse según los criterios definidos en el Punto 6.4.1. En la Tabla 7.4 se muestran todas las temporadas de riego analizadas y la situación en la que se encuentran.

Tabla 7.4: Fallos en las temporadas de riego – Operación Actual (Elaboración Propia)

Temporada	Situación	Temporada	Situación
1991 / 1992	Ok	2004 / 2005	Ok
1992 / 1993	Ok	2005 / 2006	Ok
1993 / 1994	Ok	2006 / 2007	Ok
1994 / 1995	Ok	2007 / 2008	Ok
1995 / 1996	Ok	2008 / 2009	Ok
1996 / 1997	Falla	2009 / 2010	Ok
1997 / 1998	Ok	2010 / 2011	Falla
1998 / 1999	Falla	2011 / 2012	Falla
1999 / 2000	Ok	2012 / 2013	Falla
2000 / 2001	Ok	2013 / 2014	Falla
2001 / 2002	Ok	2014 / 2015	Falla
2002 / 2003	Ok	2015 / 2016	Falla
2003 / 2004	Ok	2016 / 2017	Falla

Con un total de 26 temporadas, 9 generaron fallo y 17 cumplieron con la demanda hídrica. Por lo tanto, la seguridad riego es igual a:

$$\% \text{ Seguridad Riego} = \frac{17}{17 + 9} \cdot 100 = 65,38\%$$

Con esta seguridad de riego tan baja, nace nuevamente la necesidad de dar una solución al problema, considerando los riesgos que genera las sequías a nivel de Riego y Generación de Electricidad.

8. SOLUCIONES ESTUDIADAS

Una vez comprobada la falta de recursos hídricos, en la cuenca Laguna de Maule en el Capítulo 7.1, y estudiado los criterios que restringen de mayor manera el funcionamiento actual en el Capítulo 7.2, es hora de generar un análisis de sensibilidad para analizar cómo reacciona el embalse y los caudales al imponer una modificación en el convenio actual.

8.1. ALTERNATIVAS 1, 2 y 3

Se presentan tres alternativas, las cuales están descritas a continuación:

La alternativa 1 considera lo siguiente:

- Disminución de un 5% del Gasto Máximo en los caudales de la curva de variación estacional. Disminuye en 10 [m³/s] todos los meses.
- Disminución de un 5% en la máxima extracción anual permitida a Enel. Volumen máximo anual para extraer son 237,5 [Hm³].

La alternativa 2 considera lo siguiente:

- Disminución de un 10% del Gasto Máximo en los caudales de la curva de variación estacional. Disminuye en 20 [m³/s] todos los meses.
- Disminución de un 10% en la máxima extracción anual permitida a Enel. Volumen máximo anual para extraer son 225 [Hm³].

La alternativa 3 considera lo siguiente:

- Curva de Variación Estacional según Asesor Técnico Asociación Canalistas Maule Sur descrita en la Tabla 8.1, mostrada en la Figura 8.1.
- Disminución de un 20% en la máxima extracción anual permitida a Enel. Volumen máximo anual para extraer son 200 [Hm³].

Tabla 8.1: Curva Variación Estacional Asesor Técnico (Asero Técnico)

Mes	Cauda [m ³ /s]	Mes	Cauda [m ³ /s]
Enero	160	Julio	0
Febrero	140	Agosto	0
Marzo	80	Septiembre	40
Abril	50	Octubre	100
Mayo	20	Noviembre	140
Junio	0	Diciembre	160

Se aclara que estos escenarios solamente implican un cambio en la curva de variación estacional y volumen máximo extraíble para generación, todas las otras restricciones del convenio se mantienen. Las nuevas curvas de variación estacional se muestran en la Figura 8.1, donde también se muestra la curva de variación estacional que entrega el Convenio de 1947.

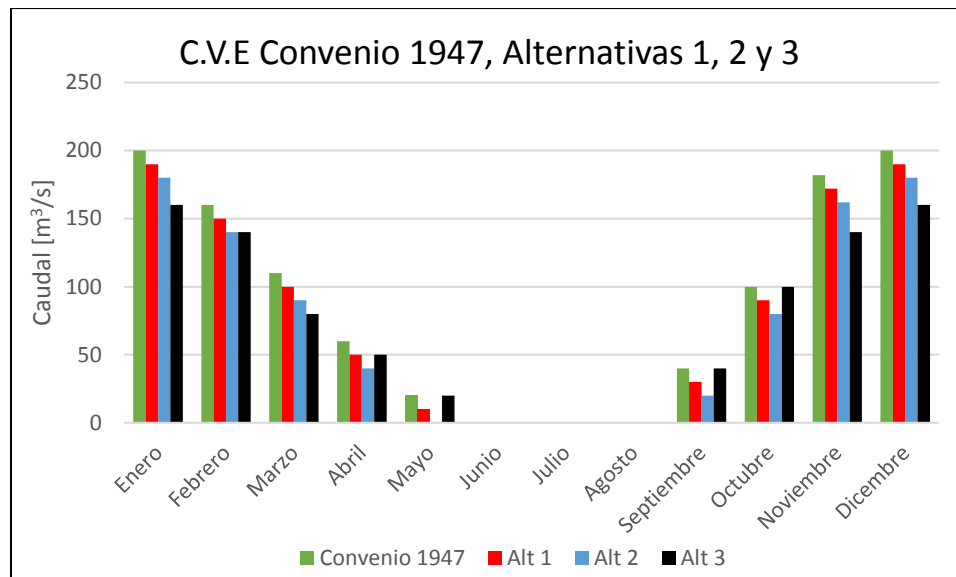


Figura 8.1: Curva Variación Estacional Alternativa 1, 2, 3 y Curva Variación Estacional Convenio 1947 (Elaboración Propia)

8.1.1. VOLUMEN EMBALSADO Y VOLUMENES EXTRAÍDOS

Al igual que en los resultados mostrados en la operación simulada para la situación actual, se realiza una comparación gráfica entre el volumen embalsado con las nuevas configuraciones y la operación actual. Las Figura 8.2, Figura 8.3, Figura 8.4, Figura 8.5 y Figura 8.6 se muestran la evolución del volumen embalsado en función del tiempo. Cada uno de los gráficos almacena la información de cinco años.

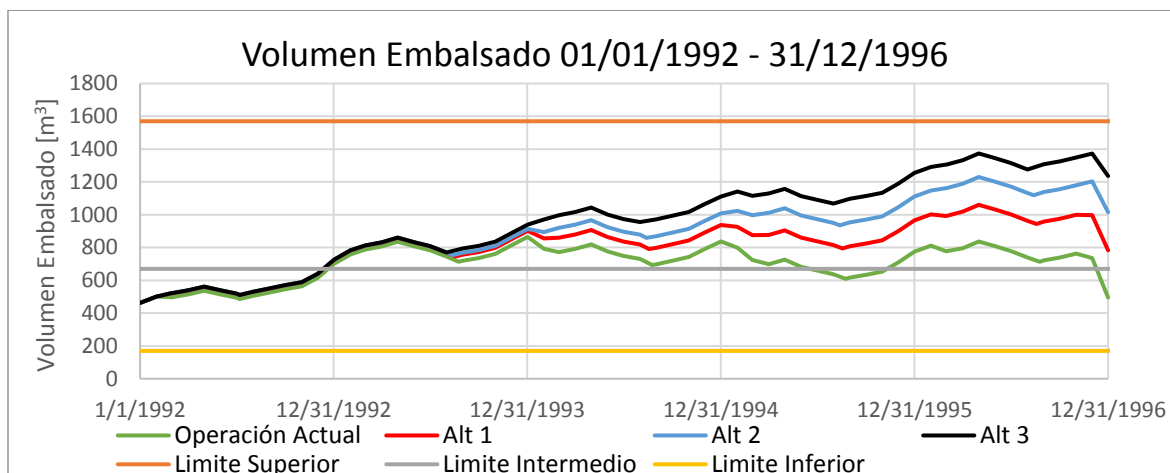


Figura 8.2: Comparación Volumen Embalsado Período 1992-1996 (Elaboración Propia)

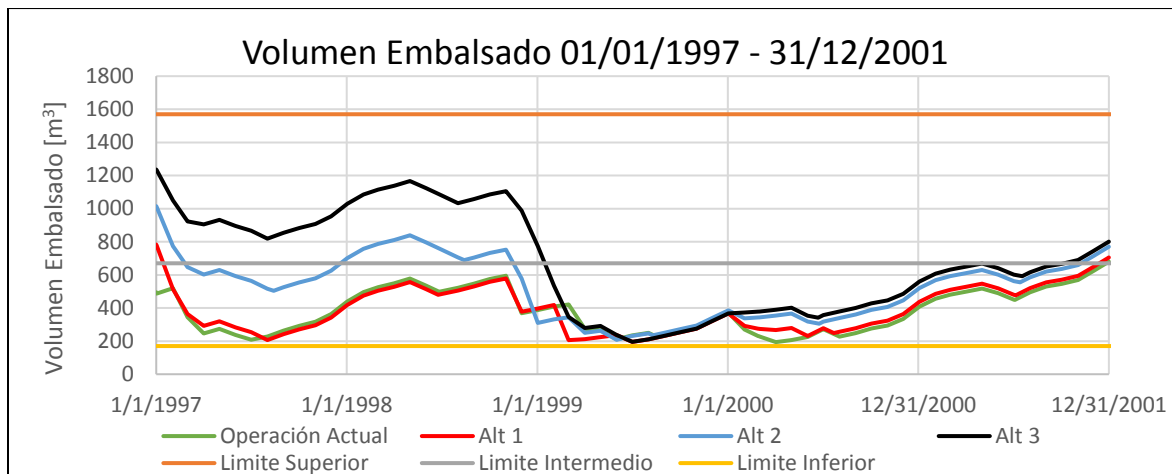


Figura 8.3: Comparación Volumen Embalsado Período 1997-2001 (Elaboración Propia)

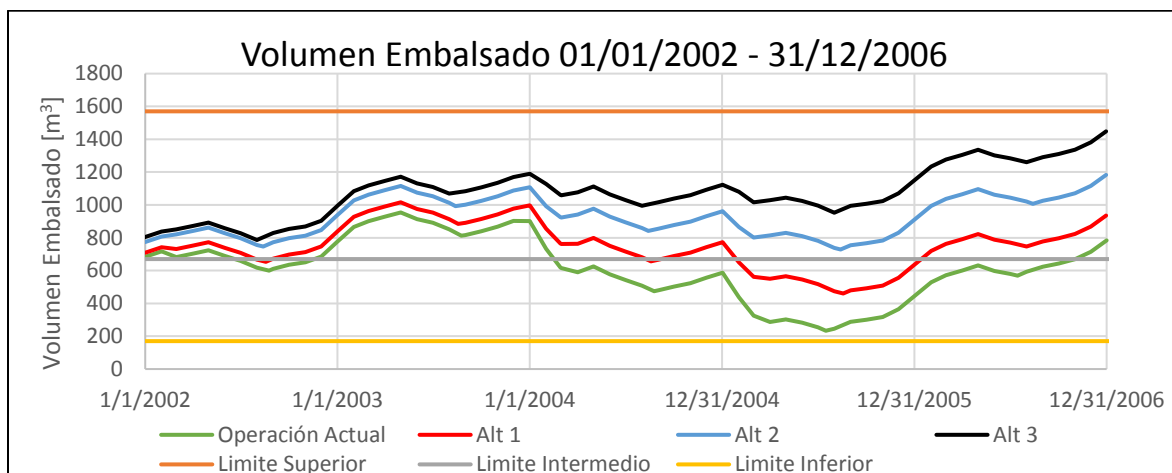


Figura 8.4: Comparación Volumen Embalsado Período 2002-2006 (Elaboración Propia)

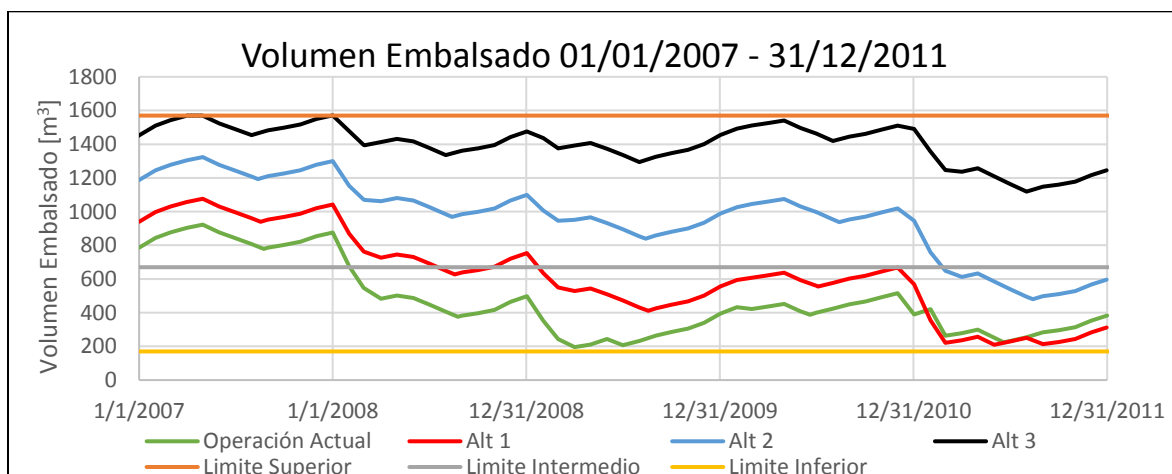


Figura 8.5: Comparación Volumen Embalsado Período 2007-2011 (Elaboración Propia)

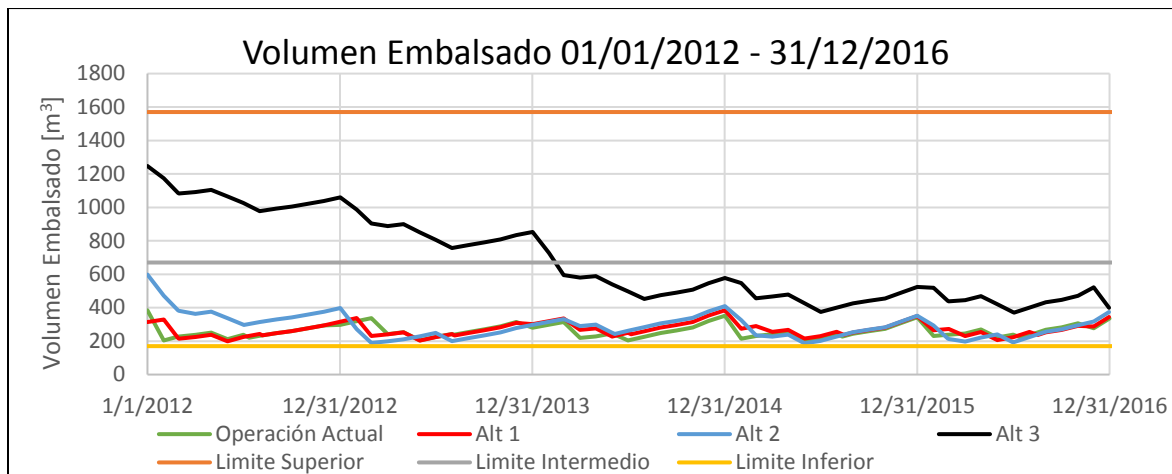


Figura 8.6: Comparación Volumen Embalsado Período 2012-2016 (Elaboración Propia)

Se observa, claramente en los 5 gráficos como la alternativa 1, 2 y 3 mantiene el embalse lejos de la zona crítica en comparación a la operación actual.

La Figura 8.5 muestra el funcionamiento que se espera del embalse en períodos con poco déficit de riego. Las alternativas 2 y 3 mantiene al embalse en su porción superior, incluso en la alternativa 3, es necesario usar el vertedero (Mes de Abril del 2007, generando una evacuación de 19 [Hm³]) lo cual en la práctica se puede manejar para que no se produzca, utilizando esas aguas para generar electricidad (El CEN está obligado a generar electricidad con las aguas más baratas, que son aquellas que están más próximas de rebalsar. Este es una de las muchas restricciones que tiene el CEN para la red de energía). La alternativa 1 lamentablemente cae en la porción intermedia debido a las restricciones son menores a las alternativas 2 y 3.

Inevitablemente, las tres curvas caen en los últimos 5 años del estudio donde se produce una acumulación de años secos. La Figura 8.6, muestra como el agua embalsada de la alternativa 3 cae desde principios de año 2011 de manera gradual, hasta mediados del año 2014. Desde este punto, el agua embalsada se mantiene aproximadamente constante entre los 400 y 600 [Hm³] y no cercana al límite inferior como es el caso de la operación actual y de las alternativas 1 y 2. Estas dos últimas alternativas caen bajo los 200 [Hm³] (01/06/2012 – 199 [Hm³] para la alternativa 1 y 01/06/2015 – 187 [Hm³] para la alternativa 2). Se aprecia en este período de sequías, que los volúmenes entregados en la alternativa 1 y 2, corresponden a los afluentes del invierno inmediatamente anterior, perdiéndose el efecto de regulación interanual.

En Figura 8.3 muestra la única oportunidad donde las 3 alternativas caen hasta llegar al límite inferior de la porción intermedia en Marzo de 1999. Esto se explica debido a que el déficit de volumen para riego más grande de los 25 años analizados se produce en el año 1999 (Ver Figura 7.1) con casi 790 [Hm³]. De todas maneras, se observan como las alternativas 2 y 3 tienen una recuperación de laguna mucho más rápida que la alternativa 1 y la operación actual.

Por otro lado, es posible comparar las extracciones totales anuales que generan las alternativas con el caso base. La Figura 8.7 compara los volúmenes de riego, mientras que la Figura 8.8 compara los volúmenes para generación eléctrica.

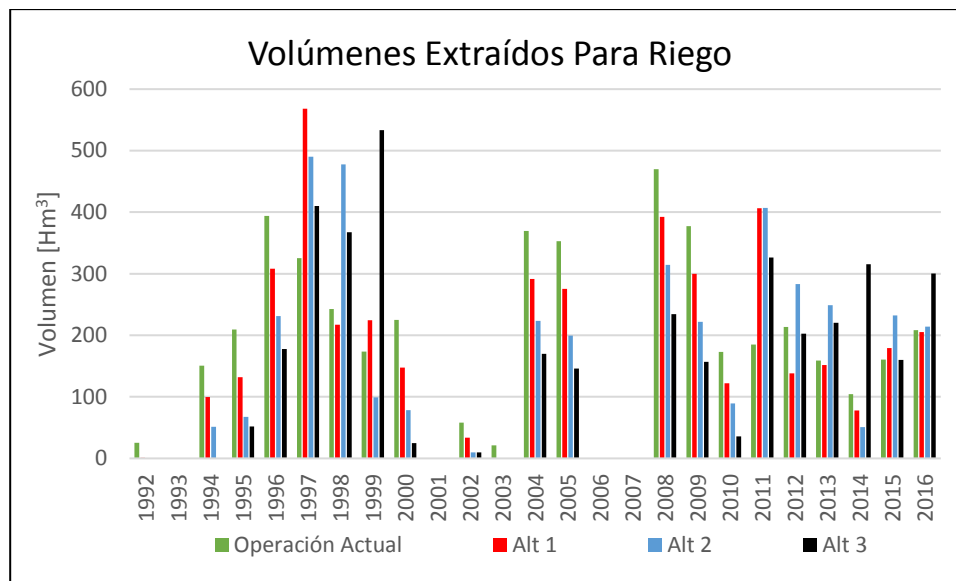


Figura 8.7: Comparación Volúmenes Extraído Para Riego - Operación Actual, Alternativa 1, 2 y 3 (Elaboración Propia)

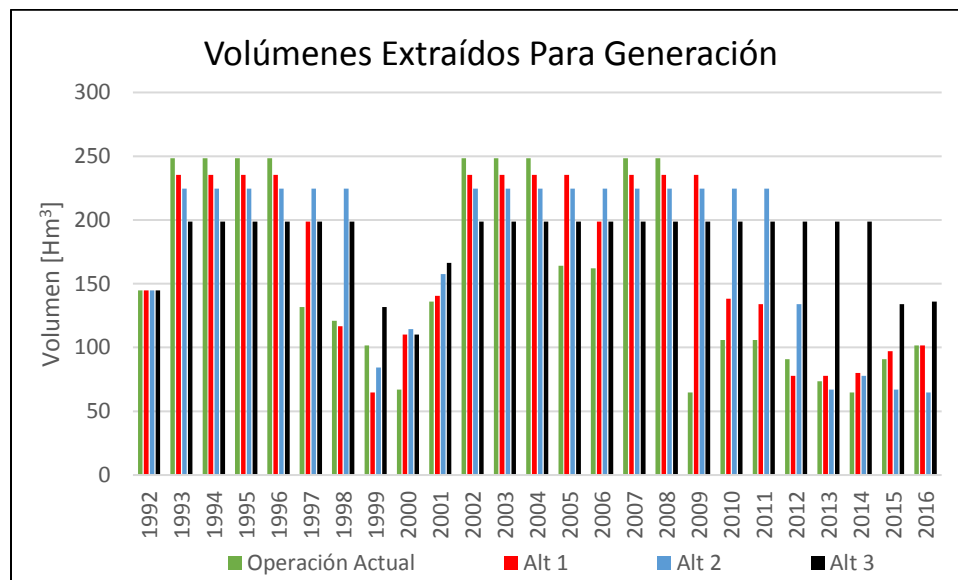


Figura 8.8: Comparación Volúmenes Extraídos Para Generación - Operación Actual, Alternativa 1, 2 y 3 (Elaboración Propia)

Los ciclos secos o de grandes déficits según la Figura 7.1, se encuentran entre los años 1997 – 1999 y 2011 – 2016. Para el primer periodo, la operación actual llega con un volumen embalsado cercano a la porción intermedia (495 [Hm³] al 01/01/1997), en cambio las tres alternativas llegan bien preparadas para la sequía, con volúmenes superiores (783 [Hm³], 1.015 [Hm³] y 1.236 [Hm³])

respectivamente para las alternativas 1, 2 y 3 al 01/01/1997. Ver Figura 8.3). Es por esa razón, que la operación actual tiene tan bajo aporte durante todo este periodo de sequía. La alternativa uno, gasta la mayoría de sus recursos el primer año, además recordar que es la alternativa que viene con menor volumen embalsado. En cambio, las alternativas 2 y 3 que además de venir con mayor volumen de agua embalsado, reparten de mejor manera los recursos hasta el año 1999, donde se produce el mayor déficit y, por ende, la necesidad de agua también es mayor. En esta fecha toma gran importancia que las reservas de agua estén disponibles.

El año 2011 tiene características similares, pero más crítico. Mientras las alternativas 1 y la operación actual llegan cercanos a la porción intermedia (569 [Hm³] y 390 [Hm³] al 01/01/2011 respectivamente), la alternativa 2 y 3 llega casi en la porción superior (946 [Hm³] y 1.491 [Hm³] al 01/01/2011 respectivamente. Ver Figura 8.6). El ciclo seco es tan grande y extenso que las todas las opciones y la operación actual caen bordeando la porción inferior, sin lograr satisfacer la necesidad de riego. La única que se mantiene de mejor manera es la alternativa 3 como se dijo anteriormente, manteniendo el volumen embalsado en un promedio de 767 [Hm³] desde el 2011 al 2016.

Por otro lado, para la generación existe la variación correspondiente al máximo volumen anual destinado a generación. Además, al estar más tiempo el embalse en su porción superior, los volúmenes para generación se extraen al máximo posible como se muestra en las alternativas 2 y 3, en los años 2009, 2010 y 2011, no así la operación actual y las alternativas 1 que entregan volúmenes muy por debajo a los entregados en la porción superior.

La disminución del máximo volumen extraíble para generación es compensado con el aumento de los años de la laguna en su porción superior, pero esto solo si se mira de manera interanual. Este aumento de años en la porción superior es bueno para la generación, pero no tan bueno para el riego, ya que coincide que, los años 2008 al 2014 son de sequía, y se podría utilizar esos volúmenes de generación para riego o para años posteriores. Esto hace pensar que es necesario incluir una restricción al uso de los recursos considerados en la generación.

Al observar los volúmenes extraídos para generación eléctrica en el período 2009 a 2016, en las tres alternativas y la operación actual, se genera la duda de cómo varían los volúmenes extraídos en los 25 años de estadísticas en las distintas alternativas tanto para Riego como para Generación. Para el primero se espera que los volúmenes disminuyan por la restricción a la curva de variación estacional y así tener volúmenes para las épocas de sequías. Por otro lado, para el segundo, en un principio también se espera que los volúmenes disminuyan, ya que su cuota máxima disminuye. En Tabla 8.2 se muestran los volúmenes extraídos en los años de simulación en las tres alternativas y operación actual (Operación Actual también se muestra en la Tabla 7.3).

*Tabla 8.2: Estadísticas Total Volumen Extraídos Período 1992-2016, Operación Actual, Alternativas 1, 2 y 3 en [Hm³]
(Elaboración Propia)*

	Operación Actual	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Riego	4.599 (54%)	4.271 (50%)	3.991 (47%)	3.843 (46%)
Generación	3.981 (46%)	4.270 (50%)	4.506 (53%)	4.599 (54%)
Total	8.560	8.541	8.496	8.441

Vemos como los volúmenes disminuyen para el riego lo cual estaba dentro de lo esperado como se mencionó anteriormente, no así en la generación, en donde los volúmenes extraídos aumentan incluso llegando a ser superior que los de riego. Esto se debe a que el embalse está en la porción superior mucho más tiempo, por lo cual Enel tiene la opción de hacer uso de sus retiros al máximo, no así el riego, donde la curva de variación estacional es una mayor restricción que los 800 [Hm³]. Al revisar nuevamente la Figura 8.7, vemos una extracción máxima de 568 [Hm³] (Alternativa 1 – Año 1997), la cual no está cercana a los 800 [Hm³], en cambio Enel realiza extracciones máximas de forma más recurrente.

Por último, mencionar que la diferencia entre los 8.561 [Hm³] y los 8.441 [Hm³] entre la operación actual y la propuesta son 65 [Hm³] es igual a la diferencia que se produce al final de la operación en la Figura 8.6 donde la operación actual termina con un volumen embalsado igual a 334 [Hm³] y la operación propuesta termina con 400 [Hm³] generando una diferencia de 66 [Hm³].

8.1.2. CAUDAL MEDIO MENSUAL PARA RIEGO

Se vuelven a calcular los caudales destinados a riego para las tres alternativas y se comparan con la operación actual. Se aclara que se calculan los caudales según la Ecuación (12) variando el Q_{LMR} que en esta ocasión debe suplir los déficits según las nuevas curvas de variación estacional en los años secos. Los máximos caudales están al aplicar la Resolución N°105 en los años húmedos.

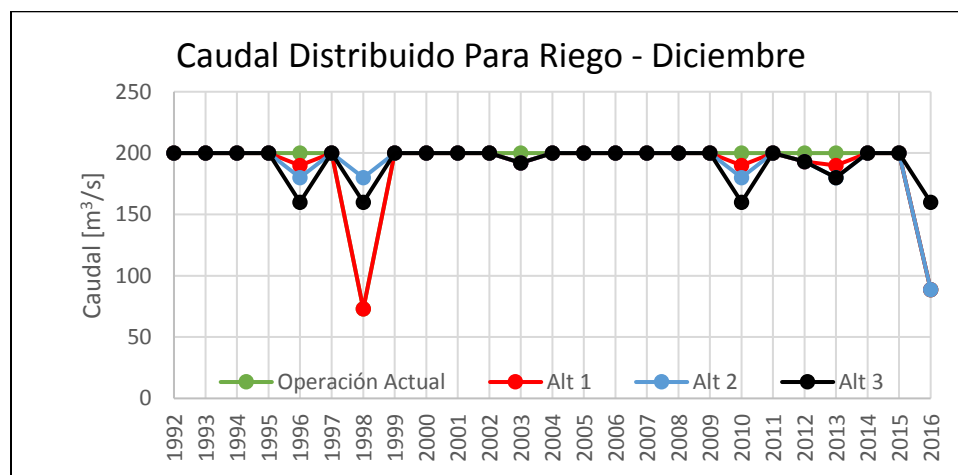


Figura 8.9: Caudal Medio Mensual Para Riego, Operación Actual, Alt 1, 2 y 3 – Diciembre 1992 a 2016 (Elaboración Propia)

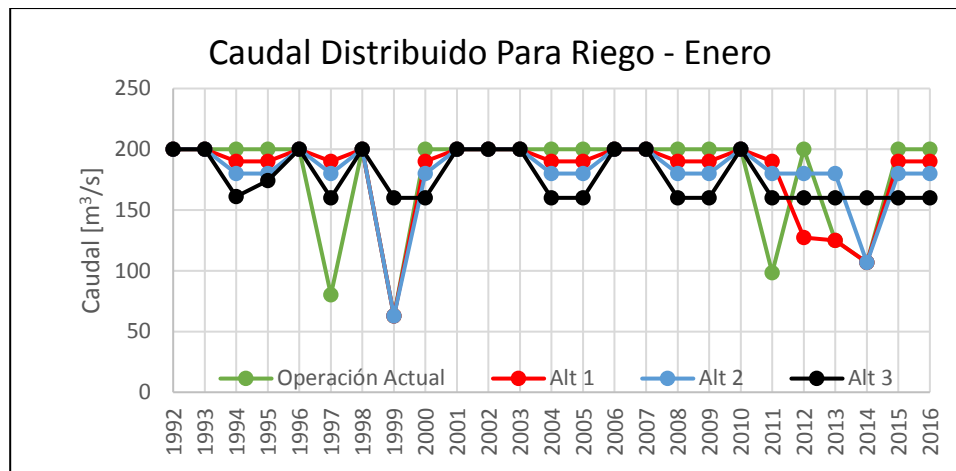


Figura 8.10: Caudal Medio Mensual Para Riego, Operación Actual, Alt 1, 2 y 3 – Enero 1992 a 2016 (Elaboración Propia)

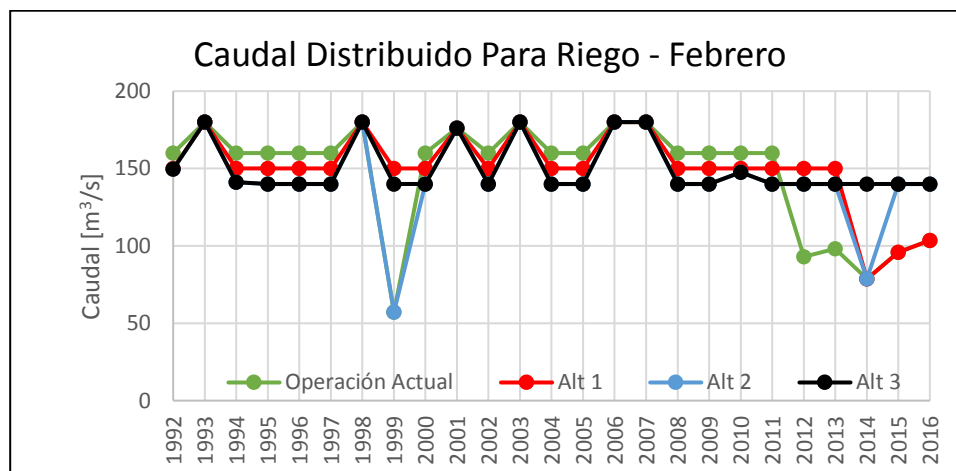


Figura 8.11: Caudal Medio Mensual Para Riego, Operación Actual, Alt 1, 2 y 3 – Febrero 1992 a 2016 (Elaboración Propia)

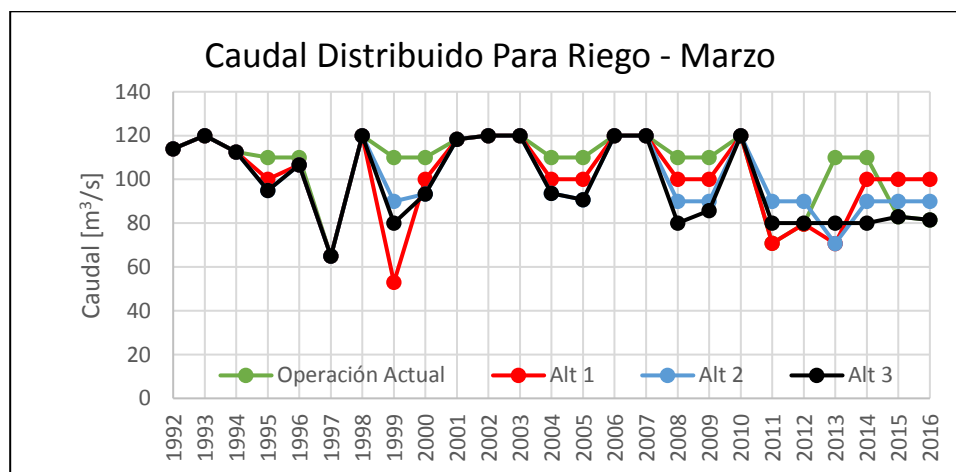


Figura 8.12: Caudal Medio Mensual Para Riego, Operación Actual, Alt 1, 2 y 3 – Marzo 1992 a 2016 (Elaboración Propia)

Uno de los principales objetivos, es bajar la variabilidad que han presentado actualmente los caudales de riego, donde existen años con caudales muy altos en veranos, sobre 500 e incluso 600 [m³/s], en los cuales solo 200 [m³/s] son destinados a riego y otros años con caudales muy bajos, con 80 y 70 [m³/s] en los mismos meses de verano. Claro ejemplo de esto es la alternativa 3 en el mes de Enero y Febrero, donde se mantiene de manera bastante constante, con pequeñas variaciones en algunos años.

A continuación, entregamos algunos datos estadísticos que ayudan en este análisis. Los caudales promedio en los 25 años y su desviación estándar. Las Tabla 8.3 y Tabla 8.4 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 8.3: Estadísticas Caudales Diciembre y Enero – Caso Base, Alt 1, 2 y 3 en [m³/s] (Elaboración Propia)

	Diciembre				Enero			
Caudal	Caso Base	Alt1	Alt2	Alt3	Caso Base	Alt1	Alt2	Alt3
$Q_{\max}$	200	200	200	200	200	200	200	200
$Q_{\min}$	72,93	72,93	88,72	160,00	62,78	62,78	62,78	160,00
Q_{prom}	190,47	188,67	191,75	192,21	178,92	180,46	180,38	176,61
Q_{desv}	32,41	32,08	22,26	14,68	43,24	34,66	30,41	19,30

Tabla 8.4: Estadísticas Caudales Febrero y Marzo – Caso Base, Alt 1, 2 y 3 en [m³/s] (Elaboración Propia)

	Febrero				Marzo			
Caudal	Caso Base	Alt1	Alt2	Alt3	Caso Base	Alt1	Alt2	Alt3
$Q_{\max}$	180	180	180	180	120	120	120	120
$Q_{\min}$	57,20	78,60	57,20	140,00	64,92	52,94	64,92	64,92
Q_{prom}	147,29	150,16	144,41	150,17	106,59	101,21	100,78	98,37
Q_{desv}	35,24	24,80	27,99	16,57	16,16	19,05	16,25	18,03

Se observa que en los meses de Diciembre y Enero los caudales promedios se mantienen constantes, pero las desviaciones estándar van disminuyendo, lo cual es concordante con las motivaciones del estudio, es decir, lograr condiciones de riego estables en el tiempo. Además, es importante destacar que los caudales mínimos aumentan considerablemente, dejando de haber caudales bajo los 100 [m³/s] que generan las sequías.

Ahora para el mes de Marzo se produce una disminución de los caudales promedios. Las desviaciones estándar en este mismo mes aumentan o se mantienen constante, pero recordar que los meses de más importancia en el riego son Diciembre y Enero.

Los resultados descritos anteriormente se producen debido a que el embalse gasta sus aguas en los meses de Diciembre y Enero, dejando los meses de Febrero y Marzo una mayor variabilidad.

8.1.3. SEGURIDAD DE RIEGO

Queda por determinar la cantidad de fallos, la cual se espera que sea menor y por lo tanto aumente la seguridad de riego en las tres alternativas. En la Tabla 8.5, Tabla 8.6 y Tabla 8.7 se muestran todas las temporadas de riego analizadas y la situación en la que se encuentran según los criterios del Punto 6.4.1 para la solución 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 8.5: Fallos en las temporadas de riego – Alternativa 1 (Elaboración Propia)

Temporada	Situación	Temporada	Situación
1991 / 1992	Ok	2004 / 2005	Ok
1992 / 1993	Ok	2005 / 2006	Ok
1993 / 1994	Ok	2006 / 2007	Ok
1994 / 1995	Ok	2007 / 2008	Ok
1995 / 1996	Ok	2008 / 2009	Ok
1996 / 1997	Falla	2009 / 2010	Ok
1997 / 1998	Ok	2010 / 2011	Ok
1998 / 1999	Falla	2011 / 2012	Falla
1999 / 2000	Ok	2012 / 2013	Falla
2000 / 2001	Ok	2013 / 2014	Falla
2001 / 2002	Ok	2014 / 2015	Falla
2002 / 2003	Ok	2015 / 2016	Falla
2003 / 2004	Ok	2016 / 2017	Falla

Con un total de 26 temporadas, 8 generaron fallo y 18 cumplieron con la demanda hídrica. Por lo tanto, la seguridad riego es igual a:

$$\% \text{ Seguridad Riego} = \frac{18}{8 + 18} \cdot 100 = 69,23\%$$

Tabla 8.6: Fallos en las temporadas de riego – Alternativa 2 (Elaboración Propia)

Temporada	Situación	Temporada	Situación
1991 / 1992	Ok	2004 / 2005	Ok
1992 / 1993	Ok	2005 / 2006	Ok
1993 / 1994	Ok	2006 / 2007	Ok
1994 / 1995	Ok	2007 / 2008	Ok
1995 / 1996	Ok	2008 / 2009	Ok
1996 / 1997	Falla	2009 / 2010	Ok
1997 / 1998	Ok	2010 / 2011	Ok
1998 / 1999	Falla	2011 / 2012	Ok
1999 / 2000	Ok	2012 / 2013	Ok
2000 / 2001	Ok	2013 / 2014	Falla
2001 / 2002	Ok	2014 / 2015	Ok
2002 / 2003	Ok	2015 / 2016	Ok
2003 / 2004	Ok	2016 / 2017	Falla

Con un total de 26 temporadas, 4 generaron fallo y 22 cumplieron con la demanda hídrica. Por lo tanto, la seguridad riego es igual a:

$$\% \text{ Seguridad Riego} = \frac{22}{4 + 22} \cdot 100 = 84,62\%$$

Tabla 8.7: Fallos en las temporadas de riego – Alternativa 3 (Elaboración Propia)

Temporada	Situación	Temporada	Situación
1991 / 1992	Ok	2004 / 2005	Ok
1992 / 1993	Ok	2005 / 2006	Ok
1993 / 1994	Ok	2006 / 2007	Ok
1994 / 1995	Ok	2007 / 2008	Ok
1995 / 1996	Ok	2008 / 2009	Ok
1996 / 1997	Falla	2009 / 2010	Ok
1997 / 1998	Ok	2010 / 2011	Ok
1998 / 1999	Falla	2011 / 2012	Ok
1999 / 2000	Ok	2012 / 2013	Ok
2000 / 2001	Ok	2013 / 2014	Ok
2001 / 2002	Ok	2014 / 2015	Ok
2002 / 2003	Ok	2015 / 2016	Ok
2003 / 2004	Ok	2016 / 2017	Ok

Con un total de 26 temporadas, 2 generaron fallo y 24 cumplieron con la demanda hídrica. Por lo tanto, la seguridad riego es igual a:

$$\% \text{ Seguridad Riego} = \frac{24}{2 + 24} \cdot 100 = 92,31\%$$

Un 65% de seguridad de riego para un embalse que está destinado casi en su totalidad al riego es muy bajo. En general se esperaría que estos embalses tengan sobre un 85% de seguridad de riego. Ahora proponer un cambio en la operación de la laguna no es algo menor. El convenio lleva vigente desde 1947, más de 50 años por lo que se debe asegurar que el cambio al convenio asegure el riego por un período de tiempo los más prologando posible. En ese sentido y considerando el cambio en la hidrología por el calentamiento global o simplemente por el cambio natural en la hidrología.

La seguridad de riego aumenta llegando sobre el 80% en la alternativa 2. La alternativa 1 aumenta levemente a un 69%. Para la alternativa 3 se obtiene una seguridad de riego altísima, donde solamente dos temporadas tendrían problemas serios con los caudales, entre ella la más importante en la temporada 1996 / 1997 y la temporada 1998 / 1999.

8.2. COMPARACIÓN CON LA OPERACIÓN REAL

En la práctica, ni Enel ni la JVRM utilizan todos los recursos. Entre ellos llegan a acuerdos para autorregular las extracciones, debido a que ellos ya tienen conocimiento de la falta de recursos hídrico en la Laguna, lo cual valida la idea realizar un cambio en convenio actual.

En la Figura 8.13 se muestra el comportamiento de la operación propuesta en comparación con la operación actual y con los datos medidos en el embalse de manera real:

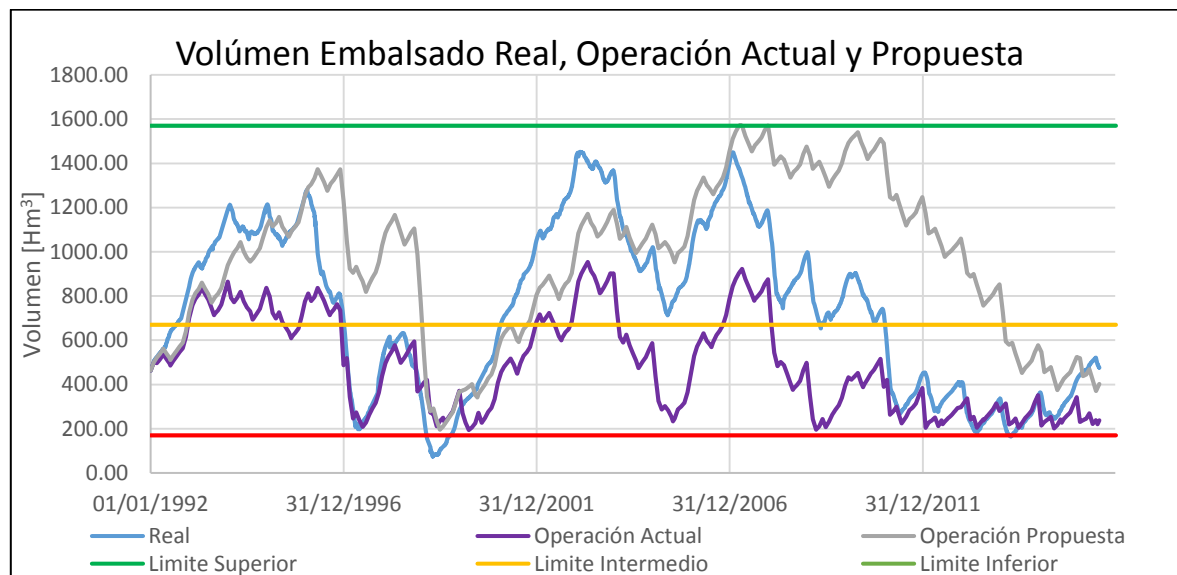


Figura 8.13: Comparación Volumen Embalsado – Operación Actual, Propuesta y Valores Reales (Elaboración Propia)

Se observa claramente que, al operar de acuerdo con las modificaciones propuestas, el embalse se mantendría en su porción superior la mayor parte del tiempo, también se aprecia que

la modificación propuesta en la curva de variación estacional de riego genera un decaimiento gradual del volumen embalsado ante un ciclo de años secos como el registrado a partir del año 2011. En la condición “Real” y “Operación Actual”, se produce un decaimiento severo en el ciclo indicado.

Por último, también se ve como la curva de datos reales cae bajo la porción inferior en el año 1999. Como se mencionó anteriormente, el modelo generado, no permite realizar extracciones si se llega a la porción inferior, pero en la práctica estos pueden ser utilizados, aunque como se observa son solo en casos muy particulares, dejando de lado la posibilidad de proponer cambios del convenio para hacer uso de esta porción.

9. CONCLUSIONES

Después de mostrar los resultados y analizarlos es necesario dar las conclusiones y dar respuesta a los objetivos propuestos que motivaron este estudio. Actualmente la menor precipitación en la zona central de Chile en los últimos 6 a 7 años, se ha traducido en una disminución de los caudales disponibles en la cuenca del Maule, caracterizada por un intenso uso agrícola (sobre 200.000 ha bajo riego) e hidroeléctrico (sobre 1600 MW de potencia instalada).

La reducción de los caudales en régimen natural ha aumentado la presión por usar los volúmenes reservados en el embalse Laguna del Maule. La reposición de recursos en este embalse no ha tenido una tasa compatible con las extracciones de los últimos años, observándose una disminución de los volúmenes embalsados. Se ha estudiado, para el período de 25 años (1992 – 2016), la reposición de recursos a través de afluentes al embalse y los volúmenes deficitarios de riego que deben ser cubiertos desde el embalse. La comparación de ambos volúmenes deja en evidencia un preocupante desequilibrio ya que, en el período estudiado, la reposición de recursos ha sido menor al volumen deficitario demandado para desarrollar el riego, es decir, la subcuenca Laguna del Maule no tiene la capacidad de producir los recursos que se demandan aguas abajo para desarrollar el riego. A pesar de esta realidad, la configuración de derechos, es decir, la posibilidad de hacer extracciones no ha sido ajustada. Las extracciones de riego y generación en el embalse Laguna del Maule están reguladas por el convenio Riego-Endesa de 1947. Este documento tiene ya 70 años, y fue desarrollado a partir de la hidrología disponible a la fecha. El estudio plantea la necesidad de actualizar los criterios de extracción a la nueva realidad hidrológica de la cuenca.

Se realizó un modelo de simulación operacional a partir de los criterios de extracción fijados por el Convenio Riego-Endesa de 1947, para analizar cuáles serían los volúmenes máximos entregados para riego y generación, cumpliendo todas las restricciones del convenio.

Las principales restricciones a riego son: Cuando el embalse está en su porción superior, un volumen máximo de 800 [Hm³] y una curva de variación estacional en el punto de demanda de riego. Cuando el embalse está en su porción intermedia, un volumen máximo del 80% del embalse, más el 80% de los afluentes al embalse y la misma curva de variación estacional en el punto demanda de riego.

Las principales restricciones a generación son: Cuando el embalse está en su porción inferior, un volumen máximo de 250 [Hm³]. Cuando el embalse está en su porción intermedia, un volumen máximo del 20% del embalse, más el 20% de los afluentes al embalse.

El modelo deja en evidencia que la extracción ajustada a convenio genera una seguridad de riego aproximada del 65%, de acuerdo con el criterio de falla basado en opinión de expertos. La condición más restrictiva del convenio para Riego es la aplicación de la curva de variación estacional. La extracción para riego basada en una interpretación irrestricta del Convenio Riego-Endesa de 1947, tiende a satisfacer la curva de variación estacional en los años con disponibilidad, disminuyendo el stock de recursos para los años secos y provocando fallas en la temporada agrícola.

Los resultados de la modelación en condición actual no son exactamente idénticos a la serie estadística real observada, ya que ambos sectores (riego y generación), han realizado

autorestricciones, por condiciones específicas de demanda agrícola o eléctrica que han permitido reservar recursos para años posteriores, aun teniendo la posibilidad de extraerlos, de acuerdo con sus derechos.

El estudio plantea un escenario en el cual ambos sectores extraen todos sus derechos, dentro de las restricciones que impone el convenio Riego-Endesa y dentro de la disponibilidad de recursos de acuerdo con la hidrología ocurrida.

La simulación operacional bajo criterios irrestrictos del Convenio Riego-Endesa, muestra que en el período de análisis (1992 – 2016), se habría entregado un volumen total de 4.599 [Hm³] para riego y un volumen total de 3.961 [Hm³] para generación. Esto implica que el volumen total entregado desde el embalse habría salido en una proporción 54:46, lo cual no es compatible con la configuración de derechos en el embalse (los derechos son aproximadamente en proporción 80:20). Esto se debe a que sobre los derechos de riego aplican mayores restricciones que sobre los derechos de generación, particularmente, la curva de variación estacional en el punto de demanda de riego (Maule en Armerillo). El derecho de Endesa, a pesar de ser 4 veces más pequeño, tiene mayores probabilidades de extraerse por completo, ya que las restricciones están relacionadas con el volumen máximo a extraer y una tasa de extracción que impone cierto período de tiempo para cumplir dicho volumen.

La aplicación de las reglas operacionales actuales puede llevar a una baja seguridad de riego, por lo cual se plantea una modificación de las restricciones asociadas al riego. Se proponen unas rebajas homogéneas de 5% y 10% en la curva de variación estacional, de tal forma de descomprimir el uso de los recursos del embalse, toda vez que los caudales objetivos aguas abajo, disminuyen. Se aplican las mismas rebajas de 5% y 10% en los volúmenes máximos disponibles para Endesa.

Una rebaja del 5% en la curva de variación estacional no mejora sustancialmente la seguridad de riego. Una rebaja de 10% aumenta la seguridad de riego hasta un 84%. En este segundo escenario, la rebaja en la curva de variación estacional permite obtener condiciones más estables, al mismo tiempo que disminuyen los valores máximos disponibles.

Finalmente se aplica una disminución en la curva de variación estacional basada en opinión de expertos, considerando los valores mínimos requeridos para una temporada de riego ajustada, pero sin pérdidas agrícolas. Esta disminución de los caudales de riego se asocia a una rebaja en los derechos de generación de 250 [Hm³] a 200 [Hm³]. La aplicación de estas nuevas condiciones operativas permite garantizar condiciones de riego y generación muy estables en el tiempo. Al plantear una sumatoria de los volúmenes entregados en todo el período de control para riego y generación, se observan los siguientes totales: Riego 3.843 [Hm³] y Generación 4.599 [Hm³]. Naturalmente, el total extraído desde el embalse resulta menor al extraído con las reglas operacionales actuales, ya que se están endureciendo las condiciones de extracción. Este cambio, además, permite mantener el embalse con mejores condiciones generales, al aumentar en todo momento el volumen embalsado.

Por otra parte, el volumen total extraído se reparte en proporción 46:54. Esta proporción es similar a la proporción que se produciría al aplicar las reglas operacionales actuales que es cercano al 50:50, por lo cual no se afecta la posición de importancia relativa que el Convenio Fisco – Endesa

pretendió establecer entre ambos sectores productivos. Esta proporción está lejos de lo propuesto por el Convenio Fisco – Endesa, pero como se dijo anteriormente es similar a lo que operación actual. En la búsqueda de una nueva solución es posible incorporar esta variable para que el nuevo Convenio se acerque más a lo que el Convenio de 1947 pretendía.

Por último, esta memoria no considero temas económicos. Esta es una variable muy relevante y complejo que debe ser agregada en los próximos estudios o evaluaciones. Los valores de las aguas generadas no son fijos y varían en función de la necesidad energética y disponibilidad de energías en ese momento (Solar, Termoeléctrica, Eólica, etc). Además, este valor varía entre las centrales de embalse dependiendo de la cantidad de agua disponible en el embalse (A medida que existe menor agua embalsada, mayor es el precio del agua generada). Por otra parte, los regantes también se puede considerar un precio variable del agua para riego dependiendo de la estación del año (Las aguas de verano tienen mayor precio que las de invierno).

10. REFERENCIAS

- Benítez, A., & Vial, F. (1997). *Estimación De La Linea De Nieve Entre Latitudes 28° y 38° Sur. Informe Técnico Biblioteca Hidrología INGENDESA.*
- CADE-IDEPE. (2004). *Diagnostico Y Clasificación De Los Cursos Y Cuerpos De Agua Segun Objetivos De Calidad, Cuenca Del Río Maule / Direccion General De Aguas.* Santiago.
- Chow, V., Maiment, D., & Mays, L. (1988). *Hidrología Aplicada.* Nueva York: McGraw-Hill.
- CONIC-BF. (2013). *Pronóstico De Deshielo Cuenca Ríos Aconcagua, Colorado, Rapel, Tinguiririca, Maule, Laja y Bío-Bío / Centro De Despacho Económico De Carga - Sistema Interconectado Central.*
- CRN-CIREN. (1997). *Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración en Chile - Comisión Nacional de Riego y Centro de Información de Recursos Naturales.*
- Dirección General De Aguas. (1983). *Resolucion N°105: Derecho De Aprovechamiento No Consuntivo En El Río Maule En Favor De ENDESA.* Santiago.
- Dirección General de Aguas. (1988). *Balance Hídrico de Chile.* Santiago.
- Dirección General De Aguas. (2005). *Evaluación De Los Recursos Hidricos Superficiales De La Cuenca Del Río Maule.* Santiago.
- Dirección General De Aguas Maule. (2013). *Orden N°681: Calculo Caudal Reconstituido En Armerillo.* Talca.
- EDIC Ingenieros. (2004). *Estudio Del Comportamiento Geotécnico Del Muro Del Embalse Laguna Del Maule. Modificación Del Coronamiento Para Uso Vial / Dirección General Aguas.* Santiago.
- ENDESA. (1973). *Catastro De Los Recursos Hidroeléctricos De Chile - Empresa Nacional De Electricidad Sociedad Anónima.*
- ENDESA. (1998). *Manual De Operaciones Local: Laguna Del Maule - Empresa Nacional De Electricidad Sociedad Anónima.*
- ENDESA. (2016). *Cota Y Volumen Embalsado Laguna Del Maule - Empresa Nacional De Electricidad Sociedad Anónima.* Talca.
- Escobar, F., & Anabalón, R. (1991). *Análisis De Las Rutas De Nieve Del País / Dirección General De Aguas.*

- FAO. (2006). *Serie FAO Riego y Drenaje N°56 - Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Roma.
- Fisco - ENDESA. (1947). *Convenio FISCO - ENDESA: Aprovechamiento De Las Aguas De La Laguna Del Maule*.
- INGENDESA. (2007). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecta Los Condores*.
- IPLA. (1983). *Balance Hidrologico Nacional Regiones V, VI, VII y Metropolitana / Dirección General de Aguas*.
- Junta de Vigilancia Río Maule. (1959). *Estatutos De La Junta Vigilancia Rio Maule, Primera Seccion*. Talca.
- Junta de Vigilancia Río Maule. (22 de Noviembre de 2016). *Calculo Caudal Reconstituido En Armerillo*. Obtenido de http://www.jvriomaule.cl/caudal_reconstituido_armerillo.html
- Peña, H., & Vidal, F. (1993). *Estimación De La Línea De Nieve Durante Eventos De Precipitación Entre Latitudes 28° y 38° Sur / XI Congreso Nacional De Ingeniería Hidráulica*.
- Stowhas B., L. (2016). *Fundamentos De Hidrología Aplicada* . Valparaíso: USM.
- UNESCO. (1981). *Methods for Water Balance Computation - Organización De Las Naciones Unidas Para La Educación, la Ciencia y La Cultura* . Paris.
- UNESCO. (1982). *Guía Metodológica Para La Elaboración Del Balance Hídrico De América Del Sur - Organización De Las Naciones Unidas Para La Educación, la Ciencia y La Cultura* . Montevideo.

11. ANEXOS

A continuación, se entregan los anexos al estudio.