



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

MODELO PARA EVALUAR LOS BENEFICIOS ASOCIADOS A UN EMBALSE DE
ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA MINERÍA, CONSIDERANDO
INCERTIDUMBRE HIDROLÓGICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

GINO STEFANO STURLA ZERENÉ

PROFESOR GUÍA:
PEDRO RIVERA IZAM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
XIMENA VARGAS MEZA
BONIFACIO FERNÁNDEZ LARRAÑAGA

SANTIAGO DE CHILE
AÑO 2013

RESUMEN

El principio orientador del desarrollo de esta tesis consiste en la valoración del agua como recurso imprescindible para asegurar una vida digna al ser humano, económicamente sustentable y en armonía con su entorno físico y social, considerando una visión que coloque a la Sociedad Civil por sobre el Estado y el Mercado en la gestión del recurso.

Este trabajo es parte de una iniciativa privada, cuyo objetivo va en el sentido anteriormente mencionado; se ha generado un proyecto pensando en el bienestar colectivo, considerando con el mayor esfuerzo y sensatez posible, sus múltiples variables. La propuesta considera un incremento significativo en la calidad de vida de los agentes de una cuenca en particular de nuestro país, la cuenca del río Aconcagua, sin mermar en ningún caso la situación de alguno de sus actores.

Transfer S.A. ha diseñado un proyecto propio y exclusivo, en su etapa conceptual, el cual propone una estrategia eficiente para mejorar las condiciones en la cuenca del río Aconcagua (Proyecto TSA) el cual consiste en un trasvase desde la cuenca del río Rapel, (en el cual se ha demostrado que se pueden extraer al menos 25 m³/s sustentablemente de los 174 m³/s en promedio que llegan a su desembocadura), hacia el sistema gran Valparaíso por al menos 2 m³/s. A cambio de esto la empresa ESVAL, la sanitaria, libera sus derechos de aprovechamiento consuntivos, permanentes, en el río Aconcagua, los cuales se trasladarán aguas arriba hasta la restitución de la última central hidroeléctrica de pasada. Transformados en derechos de aprovechamiento consuntivo, eventuales en su gran mayoría (intercambio con el MOP), éstos serán trasladados hacia la cuenca del Río Blanco, donde se encuentra la mina Andina de CODELCO, donde serían embalsadas las aguas y gestionadas lo más eficientemente posible. El Proyecto TSA ha requerido un análisis en detalle de este último punto, para saber cuánta con cuánta agua se dispone para embalsar y en qué condiciones (Costos, seguridad, sustentabilidad, etc.).

La labor realizada en este trabajo de título ha permitido cuantificar el agua disponible en la cuenca del río Blanco, particularmente aguas arriba del punto de captación de la central hidroeléctrica Aconcagua, donde se ubicaría un embalse de abastecimiento minero. A través de un modelo que considera la incertidumbre hidrológica generando series sintéticas en una sub-cuenca (modelo periódico auto-regresivo), se han obtenido curvas de distribución acumulada de probabilidad empírica de la tarifa implícita (valor del agua que hace el VAN cero, considerando costos por construcción de embalse y central a pie de presa, pago e ingresos por agua solicitada o entregada a central Aconcagua, beneficios de una central a pie de presa, etc.) a pagar por Codelco Andina y la distribución acumulada de probabilidad empírica de la seguridad de abastecimiento a la misma (Cantidad real de agua recibida por Codelco a lo largo de 40 años, dividida por la cantidad de agua a un caudal fijo constante).

Lo anterior se ha realizado para 12 escenarios distintos, considerando las combinaciones de abastecimiento de 1 y 1.2 m³/s para volúmenes de un embalse de 30, 40 y 50 millones de metros cúbicos. Y además la posibilidad de intercambiar aguas con la central hidroeléctrica Aconcagua. Los resultados se presentan como una herramienta para la toma de decisiones por parte de la Minera, la cual debe valorar dos elementos: El costo y la Seguridad, para poder escoger el escenario óptimo. El modelo considera la incertidumbre hidrológica, generando series sintéticas con modelos auto-regresivos y ha permitido simular de buena forma el sistema hidráulico mostrando un buen rendimiento, entregando como herramientas para la toma de decisiones de la Minera, la distribución de frecuencias de la tarifa implícita a pagar por el agua y la seguridad de abastecimiento.

AGRADECIMIENTOS

A Don Juan Carlos Fernández Lazo por financiar este trabajo y su apoyo permanente, profesional y personal, por su confianza y voluntad para formarme. A Don Fernando Cabrera y Mario Reyes, de Transfer S.A., donde llevo más de 2 años trabajando, lugar en que pude hacer esta memoria, que representa un parte de un gran proyecto de interés público: Extraer aguas desde el Río Rapel genera un impacto ambiental mucho menor que el espléndido beneficio social que se generaría al llevar estas aguas hacia la Quinta Región. ¿Quiénes deben asumir los costos? Los que utilizan el agua como factor productivo y han mermado históricamente las condiciones de la cuenca, la Minería, la Agroindustria, la Hidroelectricidad, las Empresas Sanitarias y otras Industrias. Además el Estado a través del MOP como fomento a los pequeños y medianos agricultores. ¿Quiénes serán los Beneficiados? Los que merecen este recurso como un Derecho: la población para consumo doméstico, las comunidades indígenas y los pequeños y medianos agricultores. Dada la inflexibilidad de nuestra legislación, este proyecto coloca de forma razonable e inteligente el derecho al agua por sobre su uso como factor productivo, sin dejar éste último de lado, pues necesitamos de bienes para nuestro desarrollo material y luego espiritual.

A mi profesor guía Pedro Rivera Izam, por su apoyo desinteresado, su respaldo en momentos difíciles, su amistad y lucidez para guiar este trabajo dándome consejos profesionales en materia de hidrología. Pero fundamentalmente agradezco sus sabias palabras en instantes delicados de mi vida.

A mi profesora Co-guía Ximena Vargas Meza y mi profesor integrante Bonifacio Fernández, por ser partícipes de este trabajo con mucha responsabilidad y asumiendo su intachable rol de académicos de vasta trayectoria y gran calidad humana.

Al Área de humanidades de la Escuela de Ingeniería, especialmente a los profesores Renato Espoz, Andrés Monares y Alfredo Jocelyn-Holt, por su capacidad crítica del sistema político-económico dominante en la actualidad, su invitación a reflexionar desde otras disciplinas y a luchar por la justicia social. En este mismo sentido agradezco a don Jorge Lavandero Illanes, por su inmensa vitalidad, su coraje y por permitirme conocer en profundidad su lucha por el cobre (recursos naturales), que la constitución política define como la propiedad del Estado Chileno (al igual que múltiples declaraciones de la Naciones Unidas) más protegida que cualquier otra, sin embargo, nosotros los dueños del recursos, no estamos recibiendo nada, sólo pasivos ambientales, ni siquiera la renta al dueño de la los recursos, señalada en cualquier libro de Economía.

A los maravillosos amigos que conocí en la Escuela de Ingeniería, con los cuales compartí momentos inolvidables, y siguen estando presentes en mi vida, son muchos, mis disculpas por no nombrarlos. A los grandes profesores de la Escuela, y a la Universidad de Chile, a lo que le queda de Universidad Pública. Tengo total certeza que recuperará ese rol crítico, independiente, que ha perdido, hoy el aporte estatal es menos del 10% y está fuertemente controlada y atada por el poder económico.

A mis padres, mis 4 hermanas y 2 hermanos, que junto a mis abuelos, tíos y primos, han sido un sustento fuerte y permanente, fundado en un amor insobornable, desde que nací en 1986. Pocos años después de nacer, mi padre me llevaba a la marchas para recuperar la democracia, hoy poco ha cambiado, poco hemos recuperado, es por eso que la lucha frontal se hace más importante que nunca desde todo ángulo, especialmente en el control de los recursos naturales (línea de este trabajo de título), pensando siempre en la justicia social.

Y a la mujer que me acompañó durante este proceso, ella me ha dio muchas veces las fuerzas para seguir adelante, con su paciencia, criterio y amor genuino.

Tabla de Contenido

I.- Introducción	12
I.1- Contexto Nacional.....	12
I.2 Rol del Proyecto TSA	15
I.3 Función del Trabajo de título	17
II.- Objetivos	20
II.1 Objetivo General	20
II.2 Objetivos Específicos	20
III.- Alcances.....	22
IV.- Antecedentes	25
IV.1.- Proyecto TSA-Codelco	27
IV.2.- Cuenca del Río Blanco	32
IV.2.1 Características hídricas de la cuenca del Río Blanco	34
IV.3.- Mina Codelco Andina.....	35
IV.4.- Información de caudales: Estudios y Registros DGA	36
IV.5 Registros de mediciones.....	39
IV.6 Glaciares en la Cuenca del Río Blanco.....	40
IV.7 Registros de mediciones	44
IV.8 Antecedentes Central Hidroeléctrica Blanco y Consumos Codelco.....	45
IV.9 Antecedentes Embalse, Evaporación y Central A pie de Presa	45
V.- Marco Teórico	46
V.1 Estadígrafos.....	46
V.1.1 Parámetro o estadígrafo de posición	46
V.1.3 Parámetro de asimetría	47
V.1.3 Coeficiente de correlación	47
V.2 Distribuciones de Probabilidad.....	48
V.2.1 Distribución normal.....	48
V.2.2 Distribución Gama o Pearson tipo III.....	48
V.3 Test Estadísticos.....	49
V.3.1 Comparación de los promedios. Test de Student.	49
V.3.2 Comparación de dos varianzas. Test de Fisher-Snedecor.....	50
V.3.3 Test de coeficientes de auto correlación.....	50
V.4 Periodicidad en Series Hidrológicas.....	51

V.5 Modelos Auto-regresivos Orden 1 y Orden 2	52
V.5.1 Modelo AR (1)	52
V.5.1 Modelo AR (2)	53
V.6 Criterio de Información de Akaike	54
V.7 Estacionariedad de los parámetros	54
V.8 Independencia y Normalidad de los residuos	54
V.9 Corrección de Parámetros en Modelos GAR (1)	55
V.10 Normalización	56
V.11 Modelo Embalse y Simulaciones.....	57
VI.- Evaluación Hidrológica de la Cuenca del Río Blanco	58
VI.1 Central Hidroeléctrica Blanco	59
VI.3 División Andina Codelco	62
VI.2 Régimen Natural	63
VI.3 Análisis Estadístico	64
VI.3.1 Estadígrafos y Correlaciones.....	64
VI.6.2 Test estadísticos (Promedio y Desviación)	67
VI.7 Ajuste Probabilístico Río Blanco en Blanco.....	73
VI.8 Desagregación Espacial	76
Figura VI.8.2 Factor desagregación en base a estudios públicos de Codelco EIA	76
VI.8.1- Rendimientos medios	77
VI.8.2 Período Común	80
VI.8.3- Estructura Probabilística.....	81
VI.8.4- Estructura de Dependencia.....	84
VII.- Generación de Series Sintéticas	86
VII.1 Discusión	86
VII.2 Modelo Auto-regresivo	86
VIII.- Modelo Embalse.....	92
VIII.1 Justificación	92
VIII.2 Modelo	92
VIII.3 Embalse.....	94
VIII.3.1. Curvas Embalse	95
VIII.3.2. Costos del Embalse.....	97

VIII.4 Evaporación desde el Embalse.....	98
VIII.5 Intercambio aguas con central Aconcagua.....	100
VIII.5 Generación de Energía a Pie de Presa.....	101
VIII.6 Evaluación Económica.....	101
VIII.6.1 Valor Presente.....	101
VIII.7 Aportes Cuenca Intermedia.....	102
IX.- Simulaciones Y Resultados.....	103
IX.1 Escenarios de Simulación.....	104
IX.2 Resultados por Escenario.....	106
IX.2.1. Escenario 1.....	106
IX.2.2. Escenario 2.....	108
IX.2.3. Escenario 3.....	110
IX.2.4. Escenario 4.....	112
IX.2.5. Escenario 5.....	114
IX.2.6. Escenario 6.....	116
IX.2.7. Escenario 7.....	118
IX.2.8. Escenario 8.....	120
IX.2.9. Escenario 9.....	122
IX.2.10. Escenario 10.....	124
IX.2.11. Escenario 11.....	126
IX.2.12. Escenario 12.....	128
IX.3 Estado del Embalse y Traspasos entre CODELCO y CH Aconcagua.....	130
IX.3.1 Escenario 1.....	130
IX.3.2 Escenario 2.....	131
IX.3.3 Escenario 3.....	132
X.- Análisis de resultados.....	134
X.1. Cuadro resumen y Análisis Resultados.....	134
X.1.1 Cuadro Resumen.....	134
X.1.2 Análisis de resultados.....	134
X.2. Seguridad de Abastecimiento, Costos de Embalse y Central a Pie de Presa.....	136
XI.- Conclusiones y Recomendaciones.....	138
XI.1 De los resultados arrojados por las simulaciones: Interpretación y trabajo futuros de relevancia.....	138

XI.3 Lineamientos en torno a la gestión del agua, su valor social y uso minero.....	139
XII.- Referencias	141
XIII.- Apéndice	144
XIII.1. Test Chi-Cuadrado por mes para ajuste de función de probabilidad Gamma..	144
XIII.2. Test Medias Adimensionales y Coeficiente de Variación para supuestos de Desagregación Espacial.....	144
XIII.3. Test de Auto Correlación para justificar el traslado en la Desagregación Espacial	145
XIII.4 Normalización en base a distribución Gamma	145
XIII.5. Parámetros en base a las ecuaciones de cada modelo mensual y su orden, dado por el criterio de información de Akaike.....	150
XIII.6. Estacionariedad de los parámetros de los modelos PAR (1) y PAR (2).....	150
XIII.7. Independencia (iid) y Normalidad de los residuos de los Modelos PAR (1) y PAR (2)	151
XIII.8. Capacidad del modelo para replicar propiedades de la serie histórica original.	151
XIII.9. Resolución mensual del modelo para un caso particular.....	151
XIII.10. Flujos de Caja para dos Escenarios (Para cada uno de los 12 escenario se simularon 20 hidrologías)	152

Índice de Tablas

- Tabla IV.1 Consumo unitario cobre en la minería
- Tabla IV.4.1 Caudales probabilidad de excedencia, por mes. Estación río Blanco en Blanco.
- Tabla IV.6.1 Cantidad y tipo de glaciares en Aconcagua
- Tabla IV.6.2 Cuenca Total Río Blanco y Cuenca aportante CH Aconcagua
- Tabla VI.1.1 Generación bruta central Aconcagua (GWh). 1993-2004.
- Tabla VI.1.2 Caudales mensuales Central Blanco (m³/s). 1993-2004.
- Tabla VI.1.3 Caudales mensuales utilizados por Central Blanco (m³/s)
- Tabla VI.1.4 Caudales extraídos por Andina (Estudio 4C Ingenieros)
- Tabla VI.6.2.1 Test para comparación de medias
- Tabla VI.6.2.2 Test para comparación de varianzas
- Tabla VI.8.1.1 Cuencas de Interés
- Tabla VI.8.1.2 Caudales Medidos por Codelco (Régimen Natural) en km 15-16 (En m³/s)
- Tabla VI.8.1.3 Caudales Años Hidrológicos comunes, Codelco km 15-16 (en m³/s)
- Tabla VI.8.1.4 Caudales Años Hidrológicos comunes, estación Río Blanco en Blanco DGA (en m³/s)
- Tabla VI.8.1.5 Caudal medio series de interés
- Tabla VI.8.1.6 Caudal medio series de interés
- Tabla VII.2.1 Orden del modelo por mes
- Tabla VII.2.2. Parámetros mensuales para los modelos PAR (1) y PAR (2)
- Tabla VII.2.3 Ejemplo de Serie Sintética para 40 años Caudales mensuales río Blanco en Estación Blanco
- Tabla VIII.3.1.1 Datos curvas de embalse, obtenidas desde ArcGis
- Tabla VIII.3.1.2 Volumen y Altura Embalse
- Tabla VIII.3.1.3 Altura y Área Embalse
- Tabla VIII.3.2.3 Características embalses de referencia
- Tabla VIII.3.2.4 Costo Para tres volúmenes de embalse (Aproximado)
- Tabla VIII.4.2.1 Serie Evaporación mensual Vilcuya
- Tabla VIII.5.1 Parámetros intercambio Embalse-Aconcagua
- Tabla IX.1.1 12 Escenarios a evaluar para efectos de este trabajo (pueden haber muchos)
- Tabla IX.2.1.1 Resultados simulación Escenario 1
- Tabla IX.2.2.2 Resultados simulación Escenario 2
- Tabla IX.2.3.1 Resultados simulación Escenario 3
- Tabla IX.2.4.1 Resultados simulación Escenario 4
- Tabla IX.2.5.1 Resultados simulación Escenario 5
- Tabla IX.2.6.1 Resultados simulación Escenario 6
- Tabla IX.2.7.1 Resultados simulación Escenario 7
- Tabla IX.2.8.1 Resultados simulación Escenario 8
- Tabla IX.2.9.1 Resultados simulación Escenario 9
- Tabla IX.2.10.1 Resultados simulación Escenario 10
- Tabla IX.2.11.1 Resultados simulación Escenario 11
- Tabla IX.2.12.1 Resultados simulación Escenario 12
- Tabla X.1.1.1 Cuadro Resumen Tarifa-Seguridad por Escenario

Índice de Figuras

- Figura IV.7.2 Digitalización Mediciones km 15-16 Codelco
- Figura VI.1 Caudales registrados entre 1970 y 2010 en la Estación DGA Río Blanco en Blanco. En rojo un año con falta de información (no representativo). La línea continua corresponde a una media móvil de orden $n=4$.
- Figura VI.2.1 Cuenca A correspondiente a aporte hidroeléctrico
- Figura VI.1.2 Características Hidroeléctrica Aconcagua S.A.
- Figura VI.1.3 Generación Diaria Centrales Blanco y Juncal 2010-2012
- Figura VI.3.1 Caudales anuales río Blanco en Blanco, años información depurada
- Figura VI.3.1.1 Caudales medios mensuales régimen natural.
- Figura VI.3.1.2 Desviación de caudales mensuales régimen natural
- Figura VI.3.1.3 Asimetría de caudales mensuales régimen natural.
- Figura VI.3.1.4 Auto correlación de orden 1 serie mensual río Blanco.
- Figura VI.3.1.5 Auto correlación de orden 1-4 serie mensual río Blanco
- Figura VI.6.2.1 Caudales medios mensuales río Blanco en Blanco, distintos períodos.
- Figura VI.6.2.2 Desviaciones mensuales río Blanco en Blanco, distintos períodos.
- Figura VI.6.2.3 Caudales anuales río Blanco en Blanco, años información depurada
- Figura VI.6.2.4 Caudales medios mensuales, años información depurada.
- Figura VI.6.2.4 Desviaciones mensuales, Caudales anuales río Blanco en Blanco, años información depurada.
- Figura VI.6.2.5 Coeficiente de variación río Blanco en Blanco, años información depurada.
- Figura VI.6.2.6 Coeficiente de Asimetría para caudales, años información depurada.
- Figura VI.6.2.7 Auto correlación orden 1 para serie depurada
- Figura VI.6.2.8 Auto correlación orden 2 para serie depurada
- Figura VI.7.1 Ajuste probabilístico gráfico serie depurada 50 años río blanco en blanco
- Figura VI.7.1 Ajuste probabilístico gráfico serie depurada 50 años río blanco en blanco
- Figura VI.8.2 Factor desagregación en base a estudios públicos de Codelco EIA
- Figura VI.8.1.1: Tres cuencas de Interés, Río Blanco en Blanco (Negro), Río Blanco en km 15 (Rojo), Río Blanco en km 16 (Azul).
- Tabla VI.8.1.1 Cuencas de Interés
- Figura VI.8.2.1 Caudales mensuales adimensionales para período común, Río Blanco en Blanco (Negro) y Río Blanco en Km 15-16 (Rojo).
- Figura VI.8.2.2 Coeficiente de Variación, Río Blanco en Blanco (Negro) y Río Blanco en Km 15-16 (Rojo).
- Figura VI.8.3.1 Curvas de Frecuencia acumulada para caudales mensuales Abril-Septiembre
- Figura VI.8.3.2 Curvas de Frecuencia acumulada para caudales mensuales Octubre-Marzo
- Figura VI.8.4.2 Auto correlación de orden 1 serie río Blanco en Km 15-16 (Línea punteada azul corresponde a media móvil con $n=5$). Nuevo Auto correlación de orden 1 serie río Blanco en Km 15-16 (Línea punteada naranja corresponde a media móvil con $n=5$)

- Figura VI.8.4.3 Auto correlación de orden 2 serie río Blanco en Km 15-16 (Línea punteada azul corresponde a media móvil con n=5). Nuevo Auto correlación de orden 2 serie río Blanco en Km 15-16 (Línea punteada naranja corresponde a media móvil con n=5)
- Figura VI.8.4.4 Auto correlación orden 1 serie río Blanco en Blanco (Línea punteada azul corresponde a media móvil con n=5). Auto correlación de orden 2 serie río Blanco en Blanco (Línea punteada azul corresponde a media móvil con n=5)
- Figura VII.2.1 Serie mensual sintética para un año cualquiera. En gris serie desagregada espacialmente.
- Figura VIII.2.1 Esquema traslado derechos hasta embalse
- Figura VIII.3.1 Ubicación muro Embalse Río Blanco
- Figura VIII.3.1.1 Curva Altura muro-Área Superficial Embalse
- Figura VIII.3.1.2 Curva Altura muro-Volumen Embalse
- Figura VIII.3.1.2. Función de costo aproximada para el Embalse.
- Figura VIII.4.2.1 Curvas evaporación Balance hídrico c1987 DGA
- Figura IX.2.1.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 1
- Figura IX.2.1.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 1
- Figura IX.2.2.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 2
- Figura IX.2.2.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 2
- Figura IX.2.3.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 3
- Figura IX.2.3.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 3
- Figura IX.2.4.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 4
- Figura IX.2.4.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 4
- Figura IX.2.5.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 5
- Figura IX.2.5.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 5
- Figura IX.2.6.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 6
- Figura IX.2.6.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 6
- Figura IX.2.7.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 7
- Figura IX.2.7.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 7
- Figura IX.2.8.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 8
- Figura IX.2.8.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 8
- Figura IX.2.9.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 9
- Figura IX.2.9.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 9
- Figura IX.2.10.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 10
- Figura IX.2.10.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 10

- Figura IX.2.11.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 11
- Figura IX.2.11.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 11
- Figura IX.2.12.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 12
- Figura IX.2.12.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 12
- Figura IX.3.1.1 Estado embalse para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 1
- Figura IX.3.1.2 Estado de traspasos con CH Aconcagua para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 1. El eje X corresponde a los meses.
- Figura IX.3.2.1 Estado embalse para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 2
- Figura IX.3.2.2 Estado de traspasos con CH Aconcagua embalse para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 2. El eje X corresponde a los meses.
- Figura IX.3.3.1 Estado embalse para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 3
- Figura IX.3.3.2 Estado de traspasos con CH Aconcagua embalse para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 3. El eje X corresponde a los meses.
- Figura X.1.1.1 Tarifa y Seguridad Promedio por Escenario, luego de simulaciones bajo incertidumbre
- Figura X.1.1.2 Escenarios ubicados en función de su tarifa implícita y seguridad
- Figura IX.3.1 La coordinación de los actores es fundamental: iniciativas privadas ayudan significativamente pero también se deben legislar desde la ciudadanía y exigir el cumplimiento razonable de la norma, sino desaprovechamos nuestros recursos y nuestra potencial mejor calidad de vida material y espiritual.

I.- INTRODUCCIÓN

El agua merece hoy, más que nunca en la historia del hombre, una atención especial. La experiencia ha demostrado que cuando un bien es escaso las preocupaciones aumentan, entendiendo la escasez como concepto dinámico; hoy nuestra comunidad tiene conciencia del valor múltiple del agua, que es un recurso imprescindible para cualquier actividad. El ser humano requiere del agua para bebida, pero también para dar sustento a un vivir digno; este recurso es un factor productivo esencial en la agricultura, la minería, en la creación de bienes de consumo, así como también un elemento clave en la preservación de los ecosistemas, de la biodiversidad que sostiene nuestro planeta.

Chile posee alrededor del 40-50% de las riquezas de cobre en el mundo, y su proceso productivo requiere mucha agua: una tonelada de cobre fino en promedio requiere la misma cantidad que una persona durante 2 años viviendo en la ciudad. Dependiendo del tipo de mineral, de la eficiencia de los procesos y otras variables, se requieren cantidades que promedian alrededor de los 800 litros por tonelada de mineral a procesar. El cobre Chileno es explotado mayormente por las empresas privadas (70% aprox.) y por la empresa estatal CODELCO (28% aprox.). Es el único país en el mundo que no cobra Royalty, regalía o renta minera, sólo existe un impuesto específico en torno al 5%, mal llamado royalty que las mineras lograron en promedio reducir al 1,7 % aumentando los costos. El detrimento al patrimonio nacional no ha sido compensado con un Royalty que es en definitiva un costo de producción que no se le ha hecho ver a los productores, esto es un regalo: o sea hoy el cobre NO es el sueldo de Chile¹.

Hoy el panorama nacional en torno a esta riqueza es pésimo, estremecedor; CODELCO menos que nunca puede perder fuerza, pues sustenta en gran medida la economía nacional, y debe posicionarse como una empresa capaz de gestionar sus recursos hídricos con visión de futuro, a modo de ejemplo para la minería privada. Esta gestión y uso del recurso para procesos debe considerar la multitud de variables en juego: sociales, ambientales, económicas, etc. Este trabajo de título se enmarca dentro de un proyecto que conmina a Codelco a asumir el liderazgo en materia ambiental, específicamente respecto al agua, incorporando los costos ocultos, para no retrasar sus inversiones y no ser considerado como un "mal vecino".

I.1- Contexto Nacional

El agua en Chile, declarada como Bien Nacional de Uso Público en el artículo 5° del Código de Aguas² de 1981, se presenta bajo diversos escenarios. La zona norte utiliza

¹ Para mayor información revisar el libro "*Royalty, Regalía o Renta Minera. Lo que sólo Chile no cobra*", 2003, de uno de los grandes defensores de esta riqueza nacional, Jorge Lavandero Illanes.

² CHILE. Ministerio de Justicia de Chile. Código de Aguas, agosto 1981.

principalmente recursos subterráneos, muchos de los cuales se encuentran en acuíferos de los cuales algunos están sufriendo un decaimiento en sus niveles freáticos, por ejemplo, el acuífero de Copiapó. La zona central aún depende fuertemente de los recursos superficiales. De la Sexta Región al sur, el agua abunda, sin embargo, localmente existen diversos conflictos asociados a su uso consuntivo y no consuntivo.

El Código de Aguas de 1981, creó la figura jurídica del Derecho de Aprovechamiento sobre las aguas (Artículo 6°)³, que faculta a su titular, la posibilidad de usar y gozar del recurso, no así de disponer. El dominio, en la legislación chilena posee 3 características: uso, goce y disposición. Dada esta figura, el agua sigue siendo Bien Nacional de Uso Público, sin embargo los agentes privados inscriben, previa asignación (constitución o reconocimiento) por parte de la Dirección de Aguas (DGA), el Derecho de Aprovechamiento en el Registro de Aguas de los Conservadores de Bienes Raíces, generando así certeza jurídica para las transacciones entre los actores del mercado, los cuales, según los principios de la legislación, posibilitarían una asignación óptima del recurso en términos económicos.

La situación ha sido compleja, Carl J. Bauer lo resume en su libro "Contra la Corriente" en el año 2002, "La experiencia Chilena con políticas de aguas de libre mercado ha sido dispareja. El Código de Aguas de 1981 ha tenido tanto ventajas como desventajas, y ofrece lecciones valiosas para otros países interesados en los mercados de aguas y los derechos de aguas privatizados. La lección más general es que los mecanismos de mercado pueden hacer algunas cosas bien y otras mal - que los mercados no son automáticos ni se auto-regulan, sino dependen de sus contextos sociales, institucionales y geográficos -. En Chile, el Código de Aguas ha funcionado relativamente bien dentro del sector agrícola, a pesar de que el mercado de aguas mismo ha sido limitado. El código ha funcionado mucho menos bien al nivel de cuencas hidrográficas, donde el marco institucional ha revelado serias fallas en la coordinación de diferentes tipos de usuarios de aguas y de diferentes sectores económicos. Estas fallas son un reflejo tanto de la actual Constitución (1980), como del código de aguas y, por lo tanto, tiene implicancias similares para otras áreas de políticas públicas y de regulación ambiental"⁴

Esto ya lo anticipaba Marcel Claude, en 2006, "Es difícil pensar que el crecimiento económico de un país pueda ser sustentable si el recurso económico más básico y fundamental- recuérdese que no hay ningún proceso productivo que no requiera del agua como insumo- está fuertemente afectado por problemas de contaminación de toda índole y en donde no pareciera existir una voluntad política eficaz para lograr una utilización óptima y eficiente de este recurso. Si a esto se agregan los serios impedimentos que tiene la autoridad para regular este recurso, los problemas se hacen más difíciles de resolver. Al respecto considérese que el instrumento de regulación por excelencia - El Código de

³ Ibid.

⁴ BAUER, CARL. *Contra la corriente: privatización, mercados de agua y el Estado en Chile*, Santiago: Ediciones Terram, Colección ecología y medio ambiente. p.171.

Aguas de 1981- formalizó el principio de la propiedad de los derechos de agua y revocó el rol predominante que tenía el Estado bajo la ley anterior de 1967. La creación de mercados de transacción de estos derechos que ampara dicho código, en un escenario de altos costos de transacción y rigidez en la infraestructura de riego, hacen que las transacciones de dichos derechos de uso sean poco frecuentes y favorezcan la alta concentración de la propiedad y como es obvio, el monopolio privado sobre un recurso de vital y trascendente importancia...”⁵

Se debe destacar las modificaciones realizadas al Código de Aguas en la Reforma del 2005, que entregaron más atribuciones a la DGA. Un aspecto importante es el pago de patentes por no uso, cuyo objetivo fue desincentivar la especulación, sin embargo, no se ha cumplido por diversas razones, entre ellas, la poca fiscalización de la DGA y los subterfugios administrativos y legales utilizados por los grandes especuladores. Por otro lado quienes sí están pagando patentes como el caso de ENDESA S.A., por derechos de aprovechamiento no consuntivo para fines hidroeléctricos, no han devuelto los derechos por el hecho de que estos pagos de patente, una vez realizado el proyecto, aparecen como crédito en el pago de impuestos. (Ver reformas al Código de Aguas, 2005).

Dada las pocas facultades de la autoridad (DGA, u otro órgano del Estado) para intervenir en el mercado de las aguas, incorporando las señales para una mejor asignación del recurso tomando en cuenta los aspectos económicos, sociales, culturales y ambientales, toda iniciativa particular en ese sentido es de gran valor, no obstante se deben realizar cambios sustanciales en la legislación. El proyecto TSA⁶, busca que uno de los actores más importantes en la cuenca del río Aconcagua, CODELCO, lidere una iniciativa de mejora en el uso del agua, considerando también como aliados a la Sanitaria ESVL y posiblemente el MOP.

CODELCO sería la empresa, llamada a liderar este proceso, dado que el mayor producto marginal del recurso está asociado a la minería y además, está aguas arriba en esta cuenca. Concluye su libro Carl Bauer “Es bueno recordar el sabio dicho: No todos podemos vivir Aguas arriba”⁷

Más aún, hoy CODELCO tiene otra razón fundamental para liderar el tema, junto a los demás actores. El documento publicado por Chile Sustentable recientemente en Enero de 2013 “Reformas constitucionales en materia de aguas y reformas al Código de Aguas. Comisiones de trabajo, proyectos de ley y mociones parlamentadas presentadas a tramitación (1992-2012)”⁸, contiene un texto unificado con las propuestas al código de

⁵ CLAUDE, MARCEL. *Una vez más la miseria, ¿Es Chile un país sustentable?*, Santiago: Ediciones LOM. p. 52.

⁶ JUAN CARLOS PERNANDEZ LAZO Y OTROS. Proyecto TSA. Idea propia y exclusiva de la empresa Transfer S.A., desarrollo conceptual completo. Iniciativa para una mejor y sustentable asignación de los recursos hídricos en Aconcagua. 2012.

⁷ BAUER, CARL. Ob. cit., p. 177.

⁸ Comisiones de trabajo, Proyectos de Ley y Mociones Parlamentarias presentadas a tramitación (1992 y 2012). *Reformas Constitucionales en materia de aguas y reformas al Código de Aguas*. Programa Chile Sustentable, propuesta ciudadana para el cambio, enero 2013.

aguas 2008-2012, donde una de ellas incorporaría un inciso en el Artículo 56° del Código de Aguas: "Agréase un inciso tercero al artículo 56° del Código de Aguas: Todo explotador minero cuya extracción de agua exceda los 200 l/s. deberá incorporar el uso de agua desalinizada, a partir del año 2016 y disminuir su extracción de los afluentes superficiales y subterráneos utilizados actualmente."

La iniciativa de Transfer S.A., el Proyecto TSA⁹, demuestra irrefutablemente que para el caso de la Mina Andina de Codelco y otras, es mucho más rentable en términos económicos, sociales y ambientales, trasladar aguas desde fuentes alternativas. ¿Por qué la ley tendría que obligar a utilizar agua Desalinizada? La Minería sin duda debe compensar el daño histórico, actual y futuro en materia ambiental, el caso del agua es esencial y eso significa asumir altos costos: En la zona central estos recursos se podrían utilizar para mejorar la situación del valle, sin necesidad de desalinizar, pues es menos económico, sustentable e innovador, que un trasvase de cuenca.

I.2 Rol del Proyecto TSA

Transfer Comunicaciones, empresa dedicada a generar proyectos para mejorar la asignación de los recursos ha tomado una gran iniciativa respecto al uso de los recursos hídricos para fines mineros en la cuenca del río Aconcagua. Esta región, históricamente agrícola, tiene una intensa actividad minera en una de sus cuencas de cabecera, la del Río Blanco. Se ubica aquí la División Andina de Codelco que utiliza los recursos de este río, afluente al Aconcagua. Andina enfrenta una expansión al 250% de su capacidad actual y contar con un suministro seguro de agua fresca es fundamental. Para producir una tonelada de cobre se requiere 0.91 metros cúbicos de agua, para el caso de CODELCO-Andina.

Esta división consume, para procesos, 700 l/s de agua fresca y en un futuro requerirá dos veces y media esta cantidad, o sea al menos unos 1.8 metros cúbicos por segundo (m³/s). La cuenca del río Aconcagua, de la cual es afluente el Río Blanco, se encuentra con un nivel de estrés alto, para el 2020 se proyecta, según datos entregados por el Mercurio de Valparaíso en un estudio Elaborado por Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. Ingenieros Consultores¹⁰: "Si se proyecta que algunos sectores incrementen fuertemente sus consumos en los próximos años, especialmente para riego en la agricultura, energía, actividad industrial y minera. De hecho, de acuerdo al estudio de demanda elaborado por Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. Ingenieros Consultores, para el año 2021, el sector

⁹ JUAN CARLOS FERNANDEZ LAZO Y OTROS. Proyecto TSA. Idea propia y exclusiva de la empresa Transfer S.A., desarrollo conceptual completo. Iniciativa para una mejor y sustentable asignación de los recursos hídricos en Aconcagua. 2012.

¹⁰ ALVAREZ, OSVALDO. *¿Quiénes son los dueños del agua en la Región de Valparaíso?* (En Línea) El Mercurio de Valparaíso, 14 de Enero 2013 <<http://www.mineriacluster.cl/nclipp/news/viewnews2.php?cli=8&id=174886>>. p. 1 [consulta: 10 enero 2013].

energía requerirá 99,830 m³/s, agropecuario 50,612 m³/s, industria 11,069 m³/s y minería 3,685 m³/s. En ese entendido, el análisis consigna que –en un pronóstico conservador– considerando principalmente las nuevas hectáreas que se incorporarán a la agricultura, asociadas a los proyectos de grandes obras de riego, y los proyectos de ampliación de la gran minería, además del crecimiento vegetativo de la población y la actividad industrial, que al 2021 la demanda crecerá en casi 37 metros cúbicos por segundo.”

Dada esta situación y lo propuesto en el subcapítulo anterior Transfer S.A. ha propuesto a Codelco liderar el tema del suministro de Aguas. Ya lo señala Álvaro Hernández en su tesis de MBA, U de Chile, dado a conocer que CODELCO tiene un rol político y social particular: “El análisis ha sido realizado en la perspectiva de una empresa privada, que evalúa los costos y beneficios de la decisión, del punto de vista económico y estratégico. Como resultado de esto, se ha llegado a que la opción de no vender es lo mejor, lo que se ve reforzado aún más si se considera que Codelco es una empresa estatal, y que la decisión de transferir los derechos de aprovechamiento de aguas a un privado tiene un impacto social, macroeconómico y político considerable en la economía de la región; debido a que se genera un monopolio natural tremendo poder sobre toda la actividad económica en la región. Situación que el dueño, el Estado, deberá evaluar y medir como consecuencia si se piensa vender.”¹¹

El proyecto TSA de Transfer S.A. propone que Codelco debe incorporar los costos ambientales, sociales, económicos, culturales etc.; lo más rápido posible y traer agua de una fuente alternativa, en este caso el Río Rapel, mediante una estrategia inteligente para compensar el daño histórico ambiental, y futuro por cierto, de forma responsable, mostrando una visión de largo plazo como empresa del Estado, coordinando su actuar con el mundo privado y público (Sanitarias, Agricultores, Agroindustria, MOP, etc.).

El proyecto TSA-Codelco propuesto por Transfer a la empresa estatal, considera en principio traer 2 m³/s del Río Rapel para el Sistema Gran Valparaíso (Cerro La Esperanza), para así liberar el agua que la Sanitaria capta en Las Vegas (Río Aconcagua), trasladando el punto de captación hasta la restitución de la última central de la cuenca (centrales en cadena).

Parte de estos Derechos de Aprovechamiento trasladados administrativamente podrán ser intercambiados con el MOP (Embalse Puntilla del Viento) por derechos de aprovechamiento de aguas eventuales, de tipo consuntivo, para embalsarlos en la cuenca del río Blanco y dar certeza a las operaciones de la cuprífera estatal.

¹¹ HERNANDEZ, ALVARO. Valoración del negocio recursos hídricos. Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Dirección de Empresas. Profesor Guía: Enrique Jofré Rojas. Santiago, Universidad De Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial. 2001, p.56.

La cuenca del río Aconcagua, situada en el valle central, con gran aporte nival, contiene innumerables actores, de todo tipo, los cuales enfrentan problemas asociados a la gestión del agua. Hoy se ha superado el límite declarado por el banco mundial respecto a los conflictos de agua: La V región cuenta con menos de 1000 m³/hab./año, lo cual la hace un área preocupante y donde se requiere intervención con mirada de largo plazo.

Cualquier estrategia bien fundamentada que mejore la condición de los actores sin generar inconvenientes en los aspectos “no económicos”, significa sin duda un aporte a la sociedad. Este trabajo de memoria se enmarca dentro de una idea en etapa de factibilidad, generada por la empresa Transfer S.A. y presentada a la compañía Codelco, que va en la línea inequívoca de realizar un aporte a la cuenca, en los términos recién planteados.

La idea de Transfer S.A. presenta diversas aristas que serán explicadas en el capítulo de Antecedentes de este trabajo, a grandes rasgos se realiza un trasvase de cuenca desde el Río Rapel, aguas abajo de la central Rapel, dos intercambios de agua uno con la Sanitaria ESVAL y otro con el MOP, y finalmente la acumulación de ésta en la cuenca del río Blanco. Este trabajo asume la tarea de cuantificar el agua almacenable antes de la captación de la central Hidroeléctrica Aconcagua en el Río Blanco

I.3 Función del Trabajo de título

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto TSA, que busca el objetivo de coordinar actores importantes dentro de la cuenca del Río Aconcagua para lograr un mejor uso de los recursos hídricos, pensando fundamentalmente en la producción sustentable de Cobre de CODELCO, que significa un aporte al año 2011 de 7 mil millones de dólares, un 70% del presupuesto en educación (2011), a modo de ejemplo. Como se mencionó parte de este proyecto considera almacenar agua en la cuenca del río Blanco. En esta última etapa de acumulación, se hace fundamental la simulación de la operación de un embalse, considerando los caudales futuros en el río, los demás aspectos del balance, las obligaciones aguas abajo y las oportunidades de gestión. La cuenca del río Blanco tiene ciertas particularidades que la hacen especial, a modo de ejemplo, es una cuenca nival, posee intervención minera y existen 4 centrales hidroeléctricas en cadena. Estos y otros aspectos hacen de la estimación de caudales futuros, un problema interesante. De este último aspecto se encarga este trabajo, realizando una evaluación hidrológica de la cuenca para poder generar series futuras de caudales mensuales a 40 años con un modelo auto-regresivo, para una posterior simulación económica de la operación de un embalse de acumulación mediante el método Montecarlo, incorporando escenarios de gestión, posibilitando la propuesta de medidas, en las que participarían los actores de la cuenca, CODELCO, ESVAL, MOP y otros; avanzando siempre en el sentido de un uso sustentable que coloque en armonía la producción económica, los usos básicos, ambientales, sociales, etc. Todo esto, requiere un marco legal, eficiente y eficaz, que

intervenga, entregando señales a los actores, cosa que hasta el día de hoy, no ha ocurrido. Esta iniciativa de Transfer S.A. busca marcar un precedente, que sin duda deberá ser considerado por la ciudadanía y las autoridades, mal llamadas así, pues sólo son representantes de la ciudadanía y no del poder económico; es así como se han regalado nuestros recursos naturales, utilizando como instrumento el estado, el poder judicial, el parlamento y lamentablemente el brazo armado del estado de derecho, la fuerza.

En términos prácticos, este trabajo, se enfoca en el problema de la acumulación de aguas, que exceden las utilizadas por la central hidroeléctrica Aconcagua en el Río Blanco, en un embalse. Este embalse se ha evaluado económicamente y en términos de seguridad de abastecimiento, para distintos escenarios de demanda de agua fresca para Codelco. Central es aquí el volumen de almacenamiento y un aspecto innovador, la posibilidad de préstamos con la central, pagados en base al costo de oportunidad del uso del agua, o sea las ganancias que le reporta cada metro cúbico de agua a las centrales de Colbún S.A.

Los resultados de las simulaciones entregan para 12 escenarios, la distribución de probabilidades de la tarifa implícita (la que cubre inversión y costos anuales, VAN=0 en 40 años) y la distribución de probabilidades de la seguridad de abastecimiento. Estas herramientas, serán de gran utilidad en las decisiones futuras que tome CODELCO y los demás actores del proyecto. Demás está decir que el modelo puede generar resultados para otros escenarios de interés de CODELCO y los demás Actores.

El profesor Pedro Rivera, en relación a la gestión del agua en el país y con especial preocupación por la zona norte y central, señala, “La sequía y los problemas regulares de disponibilidad de agua no son solamente consecuencia de no tener embalses y de que el agua se “pierda en el mar”, tal como ha dicho enfáticamente el Gobierno últimamente, desde el MOP y desde la CNR. Esto no solamente es desprestigiar toda la importancia del río en cuanto a relaciones territoriales y sentido ambiental; también es desconocer la realidad del problema. Por ejemplo, si el Embalse Puntilla del Viento, un gran embalse proyectado para la cuenca de Aconcagua, se construyera, podría almacenar en promedio 100 millones de m³ al año de agua real, o sea un poco más de 3 m³/s en promedio. Esto equivale a menos del 10% del río de Aconcagua en la desembocadura. Habría que construir 10 Puntillas del Viento en Aconcagua para que el agua no se “pierda”. Físicamente, esto es totalmente imposible. Significaría hacer muros hasta el cielo.”¹²

Precisamente la función del Proyecto TSA, y particularmente de este trabajo, va en el sentido de conjugar diversas aristas con el objetivo de dar sustentabilidad al uso del agua, no aferrarse a una solución única como la “Carretera Hídrica” o la “Desalinización”, sino

¹² RIVERA, PEDRO. 2012. *La carretera del agua y la sequía institucional* (En línea) El Dinamo 22 febrero 2012 <<http://www.eldinamo.cl/blog/la-carretera-del-agua-y-la-sequia-institucional/>> [consulta: 13 Marzo 2013].

que avanzar de forma razonable considerando el valor del recurso asociado a sus distintos usos. Nuevamente, se recalca, ésta es una iniciativa privada que busca coordinar actores en una cuenca, dada la ineficacia que han demostrado la legislación y además su aplicación. Todo lo propuesto en la práctica, siempre deberá ir acompañado de una legislación que busque el bien común y resguarde efectivamente los derechos básicos de la ciudadanía, permitiendo a la administración del estado intervenir cuantas veces sea necesario y asignando fondos para la fiscalización y entrega de señales, regulación, debidamente consultadas con los actores involucrados (todos).

II.- OBJETIVOS

II.1 Objetivo General

Construir, como parte del Proyecto TSA (que busca mejorar la asignación del agua en la cuenca del Aconcagua), un modelo que permita cuantificar el agua disponible en la cuenca del Río Blanco, aguas arriba de la captación de la central hidroeléctrica Aconcagua, para evaluar económicamente un embalse de abastecimiento minero, considerando incertidumbre hidrológica; obteniendo así, para diversos escenarios de caudal y volumen de embalse, la distribución de probabilidades empírica de la tarifa implícita a pagar por el agua (Codelco-Andina en este caso) y de la seguridad de abastecimiento (para la producción de cobre).

II-2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar la cuenca del río Blanco perteneciente a la cuenca alta del río Aconcagua, en base a estudios e información disponible en los registros de la DGA tanto como en otras publicaciones asociadas.
2. Realizar una evaluación hidrológica de la cuenca del río Blanco para reconstruir el régimen natural y obtener una serie significativa de años hidrológicos completos, testeados estadísticamente.
3. Desagregación espacial de las series del río Blanco en Blanco (Punto de confluencia con el río Juncal), para conocer el comportamiento de los caudales aguas arriba del punto de captación de la central Aconcagua, donde se ubicará el embalse de acumulación. Esto evaluando la conservación de los caudales medios adimensionales, coeficiente de variación, estructura de probabilidades y de auto-dependencia.
4. Construir un modelo de generación de series sintéticas de caudales mensuales en el Río Blanco, en el sector de ubicación del muro del embalse, utilizando modelos auto-regresivos periódicos.
5. Construir un modelo para el Embalse proyectado y simular su operación para distintos escenarios de abastecimiento de agua a CODELCO, volúmenes de embalse y posibilidades de préstamos de Agua con la Central Aconcagua, considerando incertidumbre hidrológica.
6. Presentar los resultados de las simulaciones en términos de la distribución de probabilidades empírica de la tarifa implícita por metro cúbico de agua (Valor que hace

el VAN igual a cero, costos del embalse y préstamos y beneficios de una central a pie de presa) y la distribución de probabilidades empírica de la seguridad de abastecimiento

7. En base a los resultados para diversos escenarios (12 en total para este trabajo de título) indicar lineamientos en las posibilidades de gestión y toma de decisiones en el proyecto TSA. Entregar, en definitiva una herramienta que permita colocarse en diversos escenarios y conocer los resultados dados los supuestos del modelo.

III.- ALCANCES

Como se menciona anteriormente, este trabajo de título está enmarcado dentro del Proyecto TSA de la empresa Transfer S.A., que en su versión original considera la acumulación de aguas en el Río Blanco. La obra que almacene las aguas no podrá alterar el funcionamiento de la central, o sea sólo acumulará los excedentes que ella no aprovecha. Una parte de estos excedentes corresponderán a los llamados derechos de aprovechamiento eventuales, que deberán ser justificados legalmente; este trabajo sólo se preocupará del agua como excedente que puede ser aprovechada.

La función principal en este trabajo es la cuantificar los recursos que son excedentes actualmente y en base a su estructura hidrológica evaluar los beneficios asociados a la construcción de un embalse, considerando distintos escenarios de demanda de agua, de volumen de embalse y la posibilidad de intercambio de aguas (compra y venta) con la central hidroeléctrica Aconcagua (Captación en río Blanco aguas abajo del potencial embalse).

Respecto a la información utilizada como antecedentes ésta se remitió a estudios realizados por CODELCO en la cuenca, de carácter público, debido a la negativa de la empresa a entregar mayor información. Por otro lado, se cuenta con información de algunas memorias de título y otros trabajos en la cuenca. Los datos de caudal y evaporación se recopilaron de la DGA vía solicitud y registros en un libro del MOP. No se realizaron campañas de terreno para mediciones. Para reconstruir el régimen natural hidrológico en el punto de salida de la cuenca del río blanco se han considerado las extracciones de Codelco y las extracciones de la Central Aconcagua (CDEC-SIC). Esto se ha hecho considerando lo declarado por Codelco y desagregando en base a una metodología propia, los datos de la página web del Centro de Despacho económico de Carga, respecto a la generación de la Central Aconcagua, que tiene captación en el río Blanco y en el río Juncal.

Para efectos de la hidrología, se considera un modelo periódico auto-regresivo (PAR), de órdenes 1 y 2, según el mes del año. No se consideran modelos de base física o funciones de transferencia con variables exógenas; todo esto debido a la cantidad y calidad de información en la zona (sólo se cuenta con una estación fluviométrica en la salida de la cuenca del río Blanco). Además el registro considerado estadísticamente razonable es de 50 años, lo cual implícitamente contiene mucha información y es un buen antecedente para proyectar series sintéticas de aquí a 40 años.

La mencionada desagregación espacial, se realizó replicando medias adimensionales, coeficientes de variación, estructura de probabilidades y de dependencia. Todo esto debidamente justificado en base a herramientas estadísticas. Esto, dada la poca

información de mediciones realizadas por Codelco aguas arriba de la captación de la central hidroeléctrica Aconcagua en el río Blanco, publicadas en el estudio de impacto ambiental del proyecto de expansión Andina 244.

Respecto a lo anterior también es necesario aclarar que esta cuenca (la del río Blanco) tiene un alto contenido de Glaciares, 52 en total ¹³ y la expansión de la Mina Andina de Codelco provocaría daños importantes, aún no cuantificados, lo cual alterará probablemente la situación hidrológica, pensando en que existen glaciares en roca afectados directamente y glaciares blancos afectados indirectamente. En este trabajo de título sólo se considera la información estadística de la muestra de 50 años hidrológicos completos. Sin duda para afinar la evaluación una etapa siguiente deberá considerar esto y elementos de cambio climático, lo cual implicaría abordar modelos de base física.

Respecto a la resolución del modelo hidrológico y por ende del modelo del embalse, ésta se consideró mensual. Para la generación de series hidrológicas sintéticas por 40 años se considera un modelo PAR, cómo se anteriormente. Lo central es tener una buena estimación de los caudales, no obstante la simulación de la operación de la central hidroeléctrica Aconcagua, no será la óptima pues dentro del mes hay cierta variabilidad; esto tiene consecuencias no abordadas en este trabajo, sin embargo no tan significativas, dado el carácter estacional fuertemente marcado en esta cuenca. El volumen del embalse será neto, el tema de los sedimentos no se considerará, o sea, siempre se hablará de volumen útil. Esta cuenca, dada la pendiente y sus características morfológicas está muy expuestas al arrastre de sedimentos; éste trabajo supondrá siempre volúmenes útiles. Se podría pensar en dragar el embalse como en muchos lugares del mundo, pero eso tiene un costo, no considerado en este trabajo.

Para efectos de las simulaciones se generaron escenarios razonables de acuerdo a las necesidades de Agua fresca para CODELCO Andina (1.2 y 1 m³/s) y las posibilidades técnicas y económicas de construcción de un embalse (30 - 50 millones de metros cúbicos). Evidentemente se puede utilizar el modelo con otros valores. Las tarifas implícitas calculadas para 40 series hidrológicas en cada uno de los 12 escenarios, representan el costo de embalsar el agua, considerando costo del embalse y una central hidroeléctrica a pie de presa, los intercambios de agua con la central al precio de la energía (costo de oportunidad) y la generación a pie de presa. A su vez se calculó además, la probabilidad de abastecimiento de agua a CODELCO, entendida como o que suministra embalse versus lo que debería abastecer, esto último también para 40 series, por escenario.

¹³ BOWN, FRANCISCA, RIVERA, ANDRES Y ACUÑA, CESAR. *Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes*. Annals Glaciology. p.46.

Para la evaluación económica no se considerará el pago de impuestos, solo se hará en términos de costos y beneficios. Además no se cuantifican costos ambientales, sociales y culturales en la evaluación económica. Uno de los elementos importantes consiste en los glaciares (52 en la cuenca del Río Blanco), parte de los cuales han sido destruidos por CODELCO y serán destruidos por el rajeo de la expansión Andina 244, lo cual significa un detrimento en el patrimonio del estado, por lo tanto un costo que debe asumir la empresa Codelco a modo de Royalty por el agua: Al menos la construcción de un embalse y compensación con agua fresca de buena calidad aguas abajo de la cuenca, proveniente de fuentes alternativas.

IV.- ANTECEDENTES

El recurso hídrico corresponde a un insumo estratégico para la minería en Chile. En el norte el agua es un recurso escaso y limitante para la producción de cobre. En la zona central existen innumerables conflictos en torno a la gestión del agua, lo cual podría afectar las condiciones productivas de la minería.¹⁴

La cuenca del valle del Río Aconcagua corresponde a una de las más intensivas en uso del recurso hídrico, en ella conviven actividades de minería, hidroelectricidad, agricultura, agroindustria y otras industrias. Esta cuenca se encuentra agotada en términos de recursos superficiales y subterráneos¹⁵, lo cual ha convertido al recurso en un bien escaso y preciado, se encuentran transacciones por más de 10 millones de pesos el litro por segundo. El plan director de aguas del Aconcagua¹⁶, en 2001, indicó medidas para mejorar la gestión del recurso en la cuenca, mencionando, como ya se hacía desde hace décadas la necesidad de embalses, de los cuales sólo el Chacrillas es hoy una realidad y más adelante, potencialmente algunos más, como por ejemplo Puntilla del Viento que lleva 40 años en carpeta.

En la cabecera de la cuenca, específicamente en la del río Blanco, se sitúa la mina Andina de Codelco, la cual tiene reservas para más de medio siglo de explotación y requiere como principal factor productivo el agua, que hoy obtiene de los derechos que posee la compañía en el mismo río Blanco. La expansión proyectada para la producción, así como los posibles cambios globales, manifestados en una menor disponibilidad de recursos superficiales, generarán una mayor tensión por el recurso para fines mineros, aumentando los costos económicos, sociales y ambientales considerablemente. Dentro de este marco surge la idea de generar estrategias que mejoren la gestión del agua en la cuenca, siendo una de ellas la propuesta TSA-Codelco (Transfer S.A. 2012), la cual, considera un trasvase de cuenca desde el río Rapel, dos intercambios de aguas y la acumulación en un embalse en una sub-cuenca del Río Blanco.

El Río Blanco posee una cantidad de 52 glaciares¹⁷, es una cuenca completamente nival y no ha sido muy estudiada, no se cuenta con registros de información contundentes¹⁸. La estación río Blanco en Blanco (DGA), realiza mediciones desde 1914 en la cuenca, registrando los caudales del río antes de la confluencia con el río Aconcagua. Pese a no

¹⁴ HERNANDEZ, ALVARO. Ob. cit.

¹⁵ DARH, DGA. 2004. *Evaluación de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Aconcagua*. Informe técnico. DGA. MOP. CHILE.

¹⁶ AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS. 2001. *Plan director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Aconcagua*. Elaborado para DGA. MOP. CHILE.

¹⁷ BOWN, FRANCISCA, RIVERA, ANDRES Y ACUÑA, CESAR. Ob. cit. p.46.

¹⁸ PERÉZ, RENE. Estudio de recursos hídricos sector alto hoya ríos blanco abastecimiento y drenaje. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Profesor Guía: Guillermo Cabrera. Santiago, Universidad De Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. 1991, p.6.

haber estaciones meteorológicas vigentes dentro de la cuenca, existe información en cuencas cercanas, como Juncal, la cual permite adaptar información a la cuenca del río Blanco. Uno de los estudios realizados corresponde a la investigación de nieves y escorrentía de deshielo en la cuenca alta del río Aconcagua¹⁹, donde se generaron modelos para la escorrentía de deshielo en la cuenca con punto de salida Aconcagua en Chacabucuito, con herramientas estadísticas y físicas. Esta investigación no consideró en particular la cuenca del río Blanco, sin embargo, muchos de los análisis permiten asociar ciertas características a esta cuenca.

La hidrología del río Blanco es de tipo nival, con un promedio de aproximadamente 10 m³/s, antes de la confluencia con el río Aconcagua, presentando sus mayores caudales en los meses de Diciembre y Enero²⁰. El diseño de este embalse, para acumular aguas intercambiadas aguas abajo y trasladadas, debe considerar una evaluación hidrológica que permita generar caudales semanales para los próximos 50 años (Transfer S.A., 2012). Lo anterior es el objetivo fundamental de este trabajo de título. Los dos enfoques para abordar este tipo de problema corresponden a modelos estadísticos y modelos de base física. La mayoría de los procesos hidrológicos son de naturaleza estocástica lo cual ha permitido el desarrollo de un área importante en la hidrología dedicada a la generación de y predicción de caudales. Un proceso estocástico tiene una componente determinista y otra aleatoria, por lo tanto trata con variables aleatorias y sus resultados son inciertos²¹. El enfoque estocástico permite generar series futuras en base al análisis histórico de las series registradas. Por otro lado existen los modelos distribuidos de base física, recientemente utilizados en la cuenca del río Juncal²², los cuales requieren información importante y precisa ser calibrado, pues realizan el balance de la cuenca en base muchos parámetros: las ecuaciones físicas del sistema, en este caso, del derretimiento, acumulación y flujo en el suelo, etc. Otro enfoque, que además considera las relaciones entre las forzantes meteorológicas y los caudales salientes de la cuenca son las funciones de transferencia²³, las cuales han sido utilizadas con buenos resultados para cuencas nivales donde la información es escasa y no tiene sentido realizar un modelo de base física. Un modelo estocástico y un modelo de funciones de transferencia se pueden construir tomando como principal información los caudales en la salida de la cuenca y los registros meteorológicos en cuencas cercanas, adaptados a la cuenca en estudio. Ambos modelos deben ser calibrados con los registros de caudales en régimen natural en la estación Blanco en río Blanco de la DGA.

¹⁹ CARTES, MAURICIO Y OTROS. *Investigación de nieves y escorrentía de deshielo en la cuenca alta del río Aconcagua. Aplicación de modelos de simulación nival y de pronóstico de volúmenes de Deshielo*. Estudio elaborado por Universidad de Chile para DGA, MOP, CHILE.

²⁰ CADE-IDEPE. *Diagnóstico y clasificación de los cuerpos y cursos de agua según objetivos de calidad*. Estudio para DGA, MOP, CHILE.

²¹ FERNANDEZ, BONIFACIO. 1990. *Modelos estocásticos en hidrología*. Revista Chilena de Ingeniería hidráulica.

²² QUEZADA, M. *Caracterización de los procesos hidrológicos relevantes en la cuenca del río Juncal, mediante un modelo hidrológico distribuido*. Profesor guía: Ximena Vargas. Memoria para optar al grado de Ingeniero Civil. Universidad De Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

²³ VARGAS, XIMENA. *Apuntes hidrología*. Apuntes de clases curso CI41C. Universidad de Chile.

Para simular la operación de un embalse y evaluar una potencial optimización de su operación, se debe formular un esquema de operación, con variables endógenas, exógenas, una función objetivo y las restricciones. En recursos hídricos, se suele asociar un valor futuro al agua²⁴.

EL consumo de agua fresca en Minería ha ido siendo más eficiente asintóticamente, siempre será un recurso fundamental el agua, para el proceso productivo. CODELCO-Andina hoy consume 0.91 metros cúbicos por tonelada de mineral procesado. La tabla siguiente muestra valores promedio de consumo de agua fresca en procesos mineros a nivel Nacional ²⁵:

PROCESO	Consumo Unitario de Agua Fresca		
	Año 2000 1 m3/ton mineral	Año 2006 2 m3/ton mineral	Año 2009 3 m3/ton mineral
Concentración	1,1 (0,4-2,30)	0,79 (0,3-2,1)	0,72 (0,3-2,0)
Hidrometalurgia	0,3 (0,15-0,4)	0,13 (0,08-0,25)	0,13 (0,07-0,92)

1 Fuente: Documento " Uso Eficiente de Aguas en la industria minera, APL 2002

2 Fuente: Estudio "Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2009", COCHILCO.

3 Fuente: Estudio "Derechos, extracciones y tasas unitarias de consumo de agua del sector minero, regiones centro-norte de Chile" marzo 2008, Proust Consultores DGA.

Tabla IV.1: Consumo unitario cobre en la minería

IV.1.- Proyecto TSA-Codelco

Este trabajo de título, como ya se mencionó, se enmarca dentro de un proyecto (Transfer S.A., Proyecto TSA) que busca dar sustentabilidad a la gestión del agua en la cuenca del río Aconcagua Conminando a Codelco a liderar un proceso junto a actores importantes como ESVAL, MOP, Agricultores, Industria, etc.; cuyo objetivo fundamental sea asegurar el abastecimiento de agua fresca para la Minera Estatal, pero aumentando necesariamente la oferta de agua en la cuenca, trayendo recursos desde el Río Rapel que en promedio en su desembocadura se tienen 174 m³/s ²⁶.Y para efectos de hacer más eficiente el proceso, generar los intercambios ya esbozados y detallados más adelante.

²⁴ BEYÁ, IGNACIO. *Optimización de la operación del sistema embalse Puclaro incorporando el objetivo de generación hidroeléctrica*. Profesor guía: Marcelo Olivares. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.

²⁵ COCHILCO. 2009. *Consumo de agua en la minería del cobre*. Comisión Chilena del Cobre. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. p.9

²⁶ INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE. 2011. *Temas prioritarios para una Política Nacional de Recursos Hídricos*. Comisión de Aguas. p.16

El proyecto está siendo evaluado en su etapa de pre-factibilidad y propone los siguientes conceptos prácticamente nuevos en Chile y cuyo objetivo esencial es avanzar hacia una gestión sustentable del recurso, no obstante será la ciudadanía a través de su poder constituyente y su soberanía, quien deba presionar para generar una legislación que intervenga siempre en función de la sustentabilidad y el bienestar de toda la comunidad, en convivencia armónica con el desarrollo económico. Algunos conceptos del Proyecto TSA:

- Fuentes Alternativas
- Tránsito de Cuenca
- Intercambio de Aguas (Derechos de Aprovechamiento)
- Tránsito Administrativo
- Regulación-Embalse (Gestión)

El proyecto considera el traslado de agua desde la cuenca del río Rapel hacia la cuenca del río Aconcagua, particularmente al sistema Gran Valparaíso, con el objetivo de liberar las aguas captadas por la Sanitaria de la región, en el Río Aconcagua. Estos derechos de aprovechamiento liberados (permanentes, consuntivos) serían trasladados aguas arriba hacia el punto de captación de los derechos del potencial Embalse Puntilla del Viento, para ser intercambiados (en los meses que sea necesario) por derechos de aprovechamiento eventuales consuntivos de Puntilla.

Es necesario aclarar que los derechos de aprovechamiento consuntivos de ejercicio permanente y continuo que serían liberados en la captación Las Vegas de Esval, no necesariamente serán trasladados administrativamente hacia la zona de restitución de las centrales (Embalse Puntilla del Viento), sino que podrían ser intercambiados directamente con los derechos de aprovechamiento consuntivos de ejercicio eventual discontinuo que posee la Dirección de Obras hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) (del orden de 2-3 m³/s como promedio). Esto por supuesto será evaluado y discutido entre los actores, sin embargo es claro que siempre para la DOH, independiente se construya o no Puntilla del Viento, será mejor contar con derechos de aprovechamiento permanentes. Los intercambios, previo traslado administrativo, o no, con la DOH, serán evidentemente en valor esperado, dada la distinta naturaleza de los derechos de aprovechamiento.

En la Figura IV.1.1 y la Figura IV.1.2, se esquematiza la situación antes y después del proyecto TSA de Transfer S.A. Se coloca el proyecto Embalse Puntilla del Viento, independiente se lleve a cabo o no, lo fundamental aquí son sus derechos de aprovechamiento (DOH), ya constituidos por la Dirección General de Aguas.

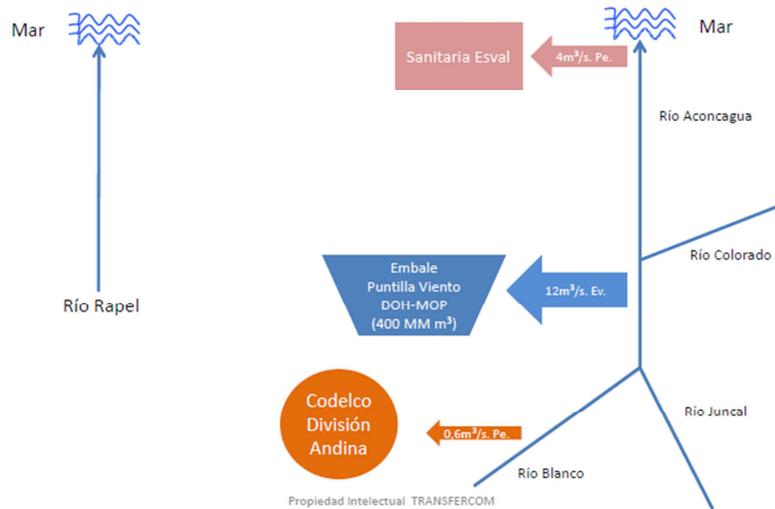


Figura IV.1.1 Esquema Actual Aconcagua (actores del proyecto)

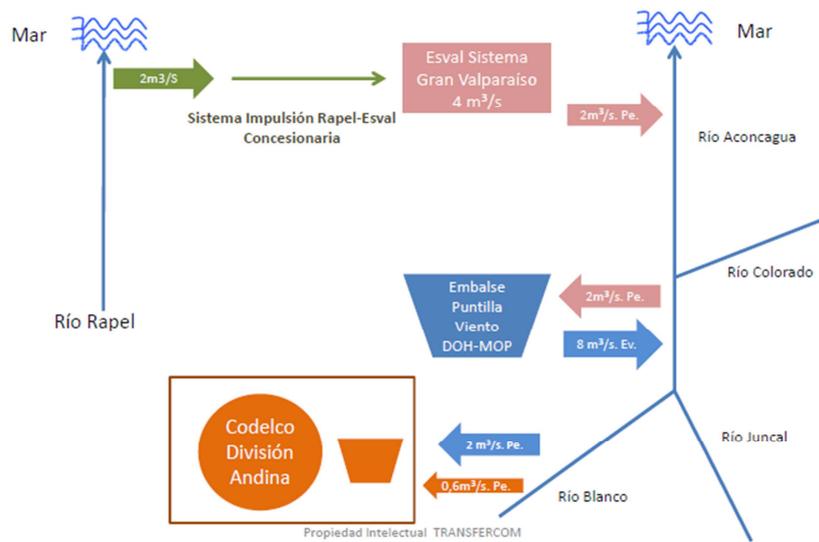


Figura IV.1.2 Esquema Proyecto Aconcagua (actores del proyecto)

El proyecto Puntilla del Viento (DOH) posee 400 millones de metros cúbicos anuales en derechos de aprovechamiento consuntivo, de tipo eventual (lo que se traduce en un valor esperado anual mucho menor, del orden de los 60 millones de m^3 , o sea un flujo de $2 m^3/s$, promedio). El embalse se ubicaría entre las centrales Los Quilos y Chacabuquito.

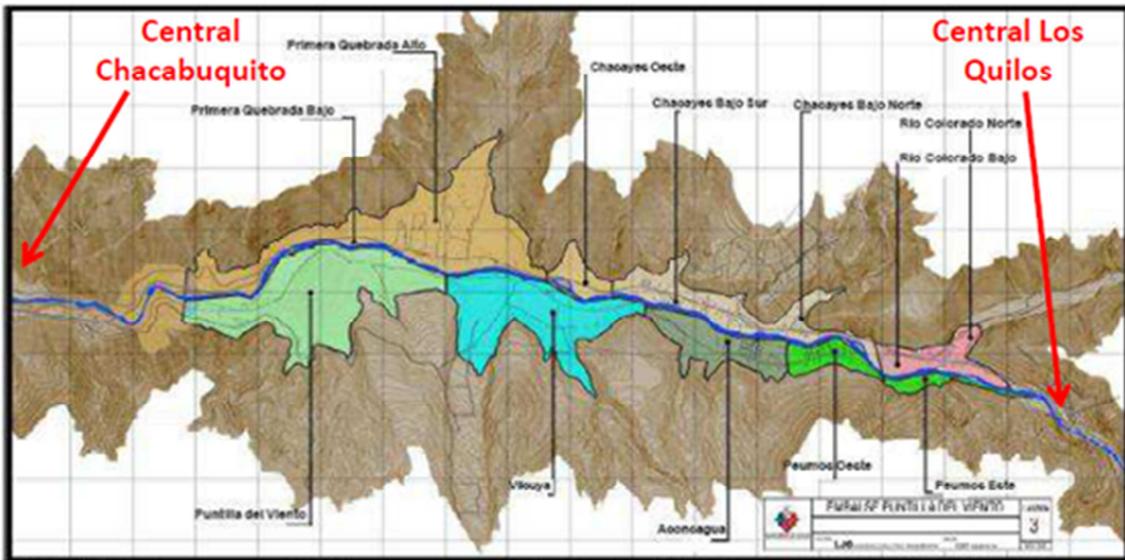


Figura IV.1.3 Embalse Puntilla del Viento

Volviendo a recalcar que los derechos de aprovechamiento liberados por ESVAL en su Captación las Vegas, pueden ser trasladados administrativamente o mediante un intercambio directo con la DOH, lo cual dependerá de la construcción o no del Embalse Puntilla del Viento. En términos prácticos esto conviene observarlo mes a mes, ya que en los meses de abundancia probablemente sea factible trasladar hacia la cuenca del Río Blanco derechos de aprovechamiento permanentes, sin embargo el grueso son derechos de aprovechamiento eventuales. La siguiente Figura IV.1.4, grafica esto, en términos de volumen o valor esperado de la existencia del agua asociada a tales derechos.

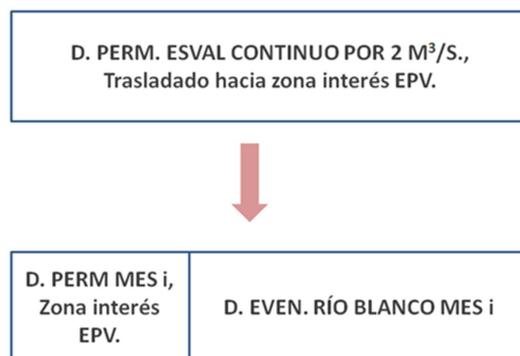


Figura IV.1.4 Intercambio mensual derechos permanentes por eventuales (Consuntivos)

Se enumeran a continuación algunos Beneficios del Proyecto:

- Aumento de oferta de agua en una cuenca declarada en agotamiento por la Dirección General de Aguas. Las aguas provenientes del río Rapel aguas abajo de la central Rapel no provocan alteración ambiental en aquel ecosistema. Estudios han demostrado que de los 170 m³/s promedio de Rapel, en la Desembocadura, extraer hasta 25 m³/s no genera alteración del ecosistema, problemas de salinidad en captaciones u otra inconveniencia.
- Mejor asignación de los recursos, situación más eficiente. No se deteriora condición de otro actor, situación "Win-Win" (todos ganan). En términos económicos es un movimiento en el sentido de Pareto. De todas formas aquí no sólo se trata de eso, esta asignación de recursos es respetuosa con el carácter histórico de esta cuenca agrícola y sus múltiples dimensiones.
- Seguridad y eficiencia para producción de Codelco, empresa nacional de alta importancia. Codelco en 2011, generó excedentes cercanos a 8 mil millones de dólares. Esta empresa debe liderar los temas ambientales y sobre todo en recursos hídricos. No obstante esto debe marcar un precedente para mejorar la legislación y sobre todo la aplicación correcta de esta: Fiscalización, Transparencia, Servicio Público, etc.
- Avance en el sentido de la gestión integrada de los recursos, tema declarado fundamental por organismos como Naciones Unidas para el Desarrollo y la CEPAL; al considerar sinergias con actores de tipo Sanitario, Hidroeléctricos, Agricultores, Agroindustria, otras Industrias y usos ambientales, entre otros.
- El embalse a evaluar en este trabajo cumple una función recientemente incorporada a estas obras, el Control de Crecidas, mitigando impactos aguas abajo. No se considera como un beneficio económico en este trabajo, y por ende, se obtendrá una menor tarifa implícita, sin embargo, se debe considerar.
- El embalse en este proyecto se asume como un costo de infraestructura, sin embargo, dado que CODELCO afecta y afectará glaciares, que tienen entre sus funciones principales la de regulación estacional e interanual del agua. Esta característica de las cuencas nivales y nivo-glaciales, son esenciales y su detrimento, o sea deterioro y destrucción de glaciares, daña el patrimonio de la ciudadanía. El Royalty al agua, que será abordado

en la tesis de Magister en Derecho Ambiental en la escuela de Derecho de la U. de Chile, del mismo autor de este trabajo, tendrá entre sus objetivos demostrar que el agua en su carácter de factor productivo, tiene un valor, un costo para quien lo usa, tal como lo tiene el mineral: un royalty, una regalía o una renta hídrica.

IV.2.- Cuenca del Río Blanco

La cuenca del río Blanco es afluente del río Aconcagua. La cuenca que forma el punto de drenaje Aconcagua en Chacabuquito contiene dos cuencas de tipo nival importantes, la del río Juncal y la ya mencionada del río Blanco. Ambas poseen gran cantidad de glaciares y potencial para acumular nieve. La cuenca del Río Juncal ha sido estudiada en bastantes aspectos, destacan varios trabajos realizados en la Universidad de Chile (investigaciones, memorias de título, proyectos para la DGA, etc.). Esta cuenca posee además estaciones meteorológicas con información histórica, registros de tipo Snow Pillow, además de campañas en terreno realizadas por la DGA.²⁷

Se presentan 2 figuras. La primera, Figura IV.2.1 una imagen general de la cuenca alta del río Aconcagua. Se aprecia la estación fluviométrica río Blanco en Blanco y la ubicación de la mina Andina de Codelco. La figura IV.2.2 presenta la delimitación realizada para la cuenca del río Blanco, con drenaje en punto de ubicación de la estación fluviométrica recientemente mencionada. Área total, 384 km². Es una cuenca nival.

²⁷ Web DGA, www.dga.cl.

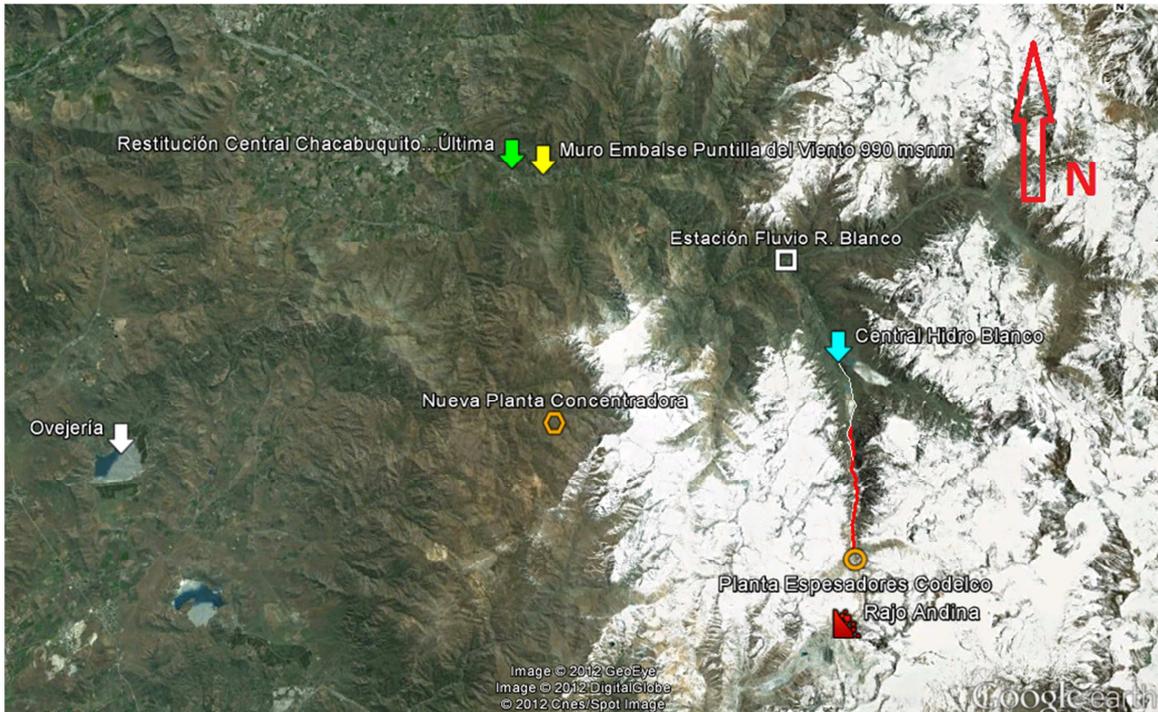


Figura IV.2.1 Imagen Satelital Cuenca Alta Aconcagua

La cuenca del Río Blanco ha sido delimitada con el software WMS, y se presenta en la Figura IV.2.2, junto a una imagen satelital de programa Google Earth.

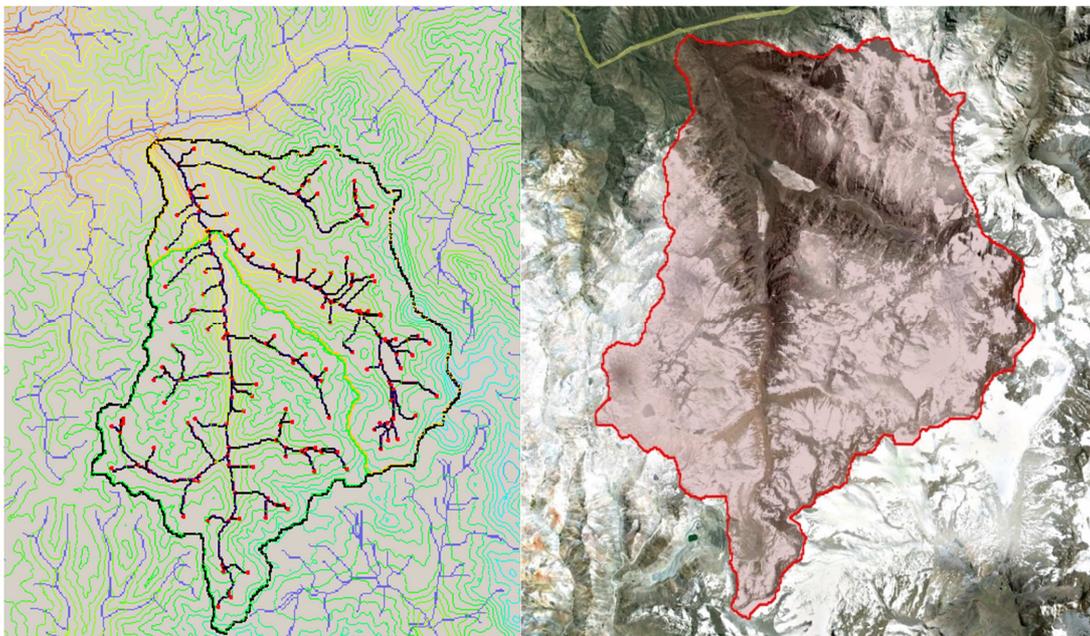


Figura IV.2.2 Delimitación WMS e imagen satelital cuenca río Blanco controlada por la DGA en su punto de salida, claramente identificable en las imágenes.

IV.2.1 Características hídricas de la cuenca del Río Blanco²⁸

El régimen de escorrentía de la hoya hidrográfica del río Blanco corresponde a un régimen nival. Los volúmenes de deshielo observados en el periodo primavera-verano, están condicionados por la cantidad de precipitación acumulada en la cuenca durante el periodo invernal, estableciéndose como válida la relación causa-efecto siguiente:

PRECIPITACION → (derretimiento) → ESCORRENTIA (efecto)

Es la ocurrencia e intensidad de estos eventos hidrológicos lo que determina el comportamiento hídrico de la hoya, y mediante su análisis se estimaran los flujos de agua que se presentan en el sector de estudio, caracterizando su comportamiento hídrico.

La hoya hidrográfica del río Blanco se extiende aproximadamente entre los 32° 55' y 33° 11' latitud sur y entre los 70° 5' y 70° 22' longitud oeste, con una dirección predominante sur-norte.

La cubierta de vegetación natural corresponde principalmente a pastos y arbustos, y en menor proporción, a algunos árboles; ellos se encuentran especialmente sobre los depósitos glacio-fluviales, disminuyendo notablemente en laderas sobre 25° de pendiente. En general, en la hoya hidrográfica, la vegetación está prácticamente ausente sobre la cota 3.000 m.s.n.m. y es gradualmente más abundante a medida que se examinan relieves más bajos.

En la hoya se observa un paisaje modelado por una intensa actividad glacial. Las principales evidencias de esta acción erosiva son los valles del Río Blanco y Los Leones, donde se observan estrías, rocas aborregadas y material morrénico. Existen además pequeños valles que presentan un encajonamiento hacia la parte inferior de Río Blanco. Un ejemplo de estos valles colgantes es el Estero Polvaredas.

En el sector sureste de la hoya entre los 33° 00' y 33° 15' latitud sur, se encuentran los principales glaciares activos de la Cordillera de Los Andes, que cubren entre un 7-10% de la superficie total de la hoya (Fuente, carta 1:150.000 Nieves y Glaciares de Chile, L. Lliboutry). Lliboutry (1956) distingue aquí los glaciares La Paloma, Olivares Alfa, Olivares Beta, Olivares Gamma y Escondido en las nacientes del Río Blanco entre las cumbres del Cerro Altar (5.222 m.s.n.m.), Nevado Olivares (5.025 m.s.n.m.) y Alto del Potrero Escondido (5.010 m.s.n.m.). Más al norte se encuentra el glaciar Los Leones, en las nacientes del río de igual nombre, entre las cumbres del Nevado Juncal (6.110 m.s.n.m.) y Alto de Los Leones (5.400 m.s.n.m.). Los valles de mayor importancia corresponden al del Río Blanco en el cual sus aguas corren de sur a norte, el del Río Los Leones que entrega sus aguas al Río Blanco, y uno de menor envergadura por el cual drenan las aguas del

²⁸ PÉREZ, RENÉ. Ob. cit. p.36.

Estero Polvaredas, de SE a NO, confluyendo en el Río Blanco inmediatamente al norte de Saladillo ²⁹.

El actual valle del Río Blanco es producto de la acción erosiva de glaciares y a procesos posteriores principalmente fluvio-aluvionales. El valle nace a una cota aproximada de 3.800 m a los pies del Cerro Monolito (4.274 m.s.n.m.) y allí su río tiene un caudal alimentado por un curso subterráneo que fluye bajo un glaciar de roca (glaciar Río Blanco) y por los afluentes ubicados a lo largo de su curso. Resulta muy notable el fuerte contraste entre el piso del valle y las elevaciones de los cordones montañosos laterales, el cual queda enmascarado en diversos sectores a lo largo del valle por depósitos glacio-fluviales, aterrazados adosados a las laderas y que están frecuentemente cubiertos por escombros de falda producto del activo proceso de gelifracción.

El Valle Los Leones, también de origen glaciar, tiene una dirección aproximada NNO y entrega sus aguas al valle del Río Blanco aproximadamente a la cota 1.840 m.s.n.m. Este valle nace a los pies del Cerro Alto de los Leones (5.400 m.s.n.m.) y es alimentado principalmente por el glaciar Los Leones. Tanto en el valle del Río Blanco como en el Valle Los Leones, se construyeron embalses de relave que modificaron en una importante zona el paisaje primitivo. Ellos corresponden al tranque de relaves Los Piuquenes y Los Leones. El valle del estero Polvaredas, de modelado glaciar, manifiesta secciones típicamente con forma de U. Es en general, de pequeña anchura y su lecho contiene limitados depósitos glacio-fluviales aterrazados y en su desembocadura en el Río Blanco, registra gran acumulación de escombros de falda y se puede observar que corresponde allí a un valle glacial colgante y ahora relleno por tales escombros³⁰.

IV.3.- Mina Codelco Andina

El yacimiento de cobre de Río Blanco, se ubica en la Cordillera de los Andes, en la cabecera de la hoya hidrográfica del Río Blanco, aproximadamente a 50 km en línea recta al sureste de la ciudad de los Andes y a 50 km en línea recta al noreste de la ciudad de Santiago. Adyacente a esta operación se ubica la mina Los Bronces, propiedad de la Compañía Minera Disputada de Las Condes, que explota el sector oeste del mismo yacimiento.

El acceso se efectúa a través del camino internacional Los Andes-Mendoza, donde a la altura del kilómetro 35 se continúa al sur por un camino pavimentado que llega hasta el campamento Saladillo (1.650 m.s.n.m.).

²⁹ PÉREZ, RENÉ. Ob. cit., p. 37

³⁰ PÉREZ, RENÉ. Ob. cit. p.38.

La mina subterránea Rio Blanco, se ubica 31 km al sur de Saladillo a una elevación aproximada de 3.490 m.s.n.m., a la que se accede por un camino industrial desde el campamento. El rajo abierto Sur-Sur, se encuentra distante aproximadamente 1,6 km al sureste de la mina subterránea a una elevación media aproximada de 4.000 m.s.n.m.

La fisiografía que caracteriza el área del yacimiento, es típica de la cordillera de Los Andes central del país, con profundos valles y escapardas laderas que forman un relieve abrupto desarrollado bajo condiciones de erosión glacial muy activa.

El principal factor en la modelación del paisaje ha sido la intensa actividad glacial y actualmente es la remodelación por acción del agua, que combinada con bruscas variaciones de temperatura origina continuos deslizamientos de piedras y aludes de barro y nieve.

En la zona de las cabeceras, aun se observan amplios circos glaciares con distintos niveles de actividad y evolución. Los cuerpos que se distinguen con mayor claridad corresponden al glaciar Cerro Negro (base 3.550 m.s.n.m.), glaciar Rio Blanco (base 3.900 m.s.n.m.) y glaciar Rinconada (base 4.100 m.s.n.m.). Las tres unidades se encuentran cubiertas por una capa de detritos de espesor variable, y habrían tenido un origen común, producto de desbordes del gran glaciar Olivares, ubicado a una elevación mayor.

Por lo tanto, en el yacimiento y sus alrededores prevalecen las características periglaciales y aún existen zonas mineralizadas cubiertas parcialmente por glaciares de piedras y hielos fósiles, en las nacientes del rio Blanco.

IV.4.- Información de caudales: Estudios y Registros DGA

Para la cuenca del Río Blanco no se cuenta con mucha información y los estudios han sido más bien realizados por Codelco, que extrae agua de la cuenca y, en forma privada, la empresa Colbún, que posee la central hidroeléctrica Aconcagua y una de sus captaciones se ubica en la cuenca del río blanco a 2050 m.s.n.m.

Se presentará la información relevante recopilada, comenzando con el estudio de Cade-Idepe 2004³¹, luego el estudio de escorrentía de deshielo realizado por la universidad de Chile en 2008. Se presentan además elementos propios, como la delimitación de las cuencas, algunas características de ellas, cálculos preliminares. El estudio Cade-Idepe 2004, presenta las curvas de variación estacional para el caudal del río Blanco en Blanco, las cuales serán de gran importancia para verificar el régimen natural a reconstruir en este trabajo.

³¹ CADE-IDEPE. Ob. cit.

Pex (%)	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
5	7.404	5.457	4.409	5.213	5.530	7.526	12.044	24.757	44.824	53.982	26.337	17.707
10	6.696	4.949	2.751	4.615	5.004	6.803	10.861	22.453	38.292	42.381	23.670	14.927
20	5.837	4.333	1.645	3.948	4.367	5.927	9.427	19.662	31.238	31.614	20.440	12.028
50	4.197	3.157	0.726	2.850	3.150	4.253	6.688	14.328	20.210	18.056	14.266	7.650
85	2.176	1.708	0.349	1.804	1.650	2.190	3.314	7.758	10.678	9.057	6.661	3.762
95	0.989	0.857	0.257	1.334	0.769	0.979	1.332	3.899	6.881	6.039	2.194	1.997
Dist	N	N	LG2	LG2	N	N	N	N	G2	L2	N	G

Tabla IV.4.1 Caudales probabilidad de excedencia, por mes. Estación río Blanco en Blanco.

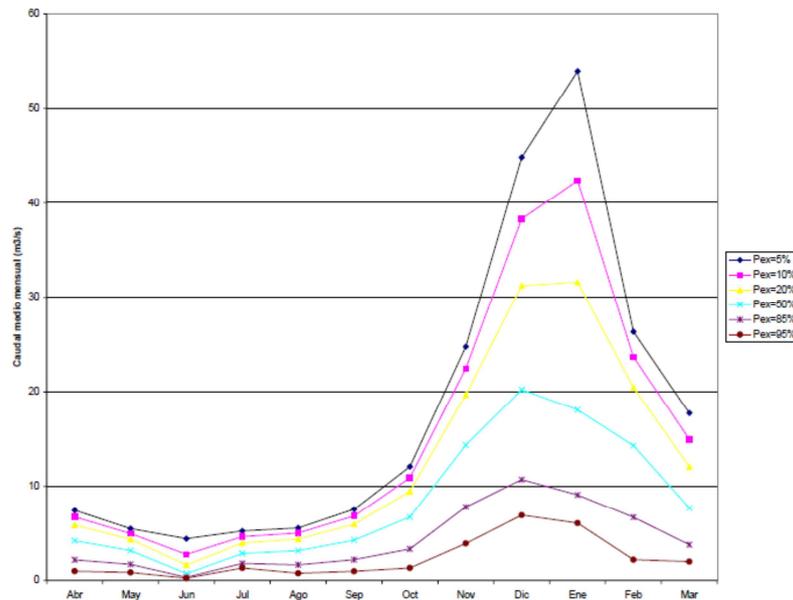


Figura IV.4.2 Curvas variación estacional río Blanco en Blanco (CADE-IDEPE, año 2004)

La cuenca del Río Blanco no ha sido estudiada intensamente. Codelco ha solicitado modelos para determinar caudales disponibles en puntos de la cuenca. Hay estudios por parte de Codelco, que han estimado los caudales en distintos puntos de la cuenca. Tomando como salida de la cuenca el punto justo antes de la captación de la central Aconcagua S.A., que tiene una cuenca de 276 km². El embalse se ubicará sobre este punto de captación en el kilómetro 15 km de la Ruta hacia la mina Andina. En la Figura IV.4.3 se aprecia la red de drenaje de la sub-cuenca que abastece la central Hidroeléctrica Aconcagua S.A., parte Río Blanco.

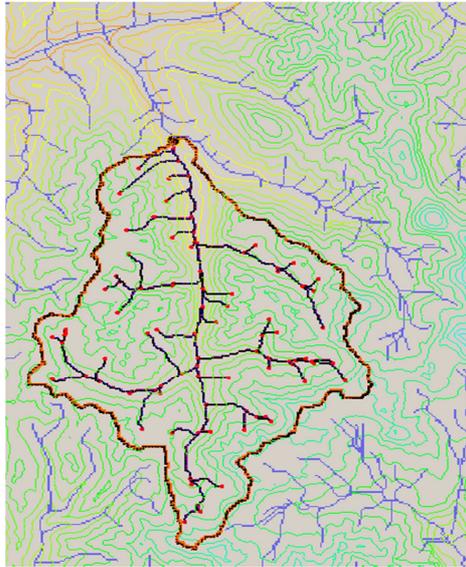


Figura IV.4.3 Cuenca río Blanco, antes captación Central Blanco (HASA).

Se muestra a continuación una imagen satelital Figura IV.4.4 donde se aprecia el punto de captación de la central y el lugar de mediciones durante un período de 10 años (esto se verá con detalles más adelante). El mismo punto de mediciones será en este trabajo de título utilizado como muro del embalse de acumulación de los excedentes, que deberán ser debidamente justificados en cuanto a derechos de aprovechamientos de agua, sean permanentes o eventuales, siempre consuntivos. Este trabajo se preocupa de los volúmenes de agua, sin embargo el proyecto TSA, deberá ser totalmente riguroso en este aspecto.



Figura IV.4.4 Punto de salida captación Río Blanco, Hidroeléctrica Aconcagua S.A.

Además se presenta una foto, Figura IV.4.5 desde aguas abajo, donde se aprecia desde otra perspectiva, la zona de captación de la central, la zona del embalse (mediciones CODELCO) y la mina ubicada a 4500 m.s.n.m. El embalse se ubicaría a 2250 m.s.n.m. La altura es ideal para un tema muy importante. La nueva planta concentradora propuesta para el proyecto Andina 244 se ubicaría en la cuenca del Río Riecillos, aledaña (poniente) a la cuenca del río Blanco a una altura de 2100 m.s.n.m. Es evidente entonces el beneficio, la conducción gravitacional del agua, minimizando los costos de energía.

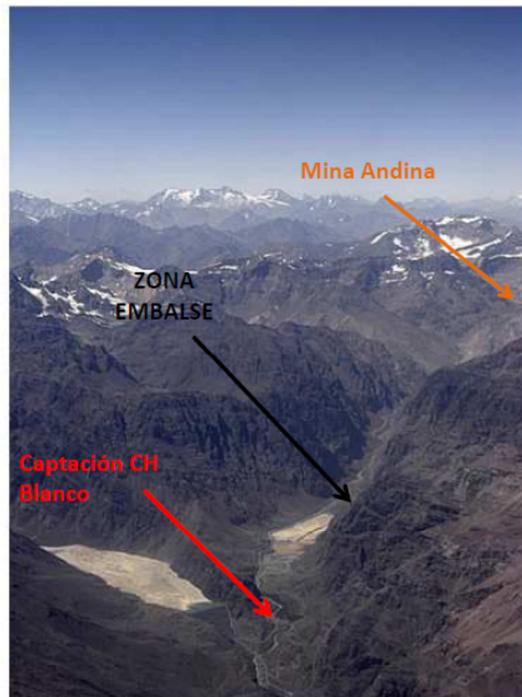


Figura IV.4.5 Foto desde aguas debajo de la cuenca alta del río Blanco.

IV.5 Registros de mediciones

Se ha solicitado, con éxito, los registros fluviométricos; se presenta inicialmente los caudales desde 1970 a 2011 en la estación río Blanco en Blanco, sin relleno, ni suma de extracciones. Se aprecia una clara disminución de los caudales debido a la puesta en marcha de la central Blanco perteneciente a HASA en 1993. El año 1984 presenta menos de 200 datos. El 90% de los años posee más de 320 datos, lo cual hace bastante sólida esta información. Los años hidrológicos que se han sacrificado debido a la deficiencia en la información corresponden a:

- 1983-1984
- 1984-1985
- 2007-2008
- 2009-2010

Para el período 1914-1970 se consideraron los valores de la publicación MOP-DGA, “Caudales medios mensuales de los ríos de Chile”, de la cual se sacrificaron los años en los cuales faltaba al menos un mes. Se cuenta con la información de caudales mensuales en la estación Río Blanco en Blanco desde 1914 a 2011, totalizando 62 años hidrológicos completos.

IV.6 Glaciares en la Cuenca del Río Blanco

Un estudio de Francisca Bown, Andrés Rivera y otros, del Centro de Estudios Científicos (CESC), llamado “Recent glacier variations at the Aconcagua basin, Chilean Andes”³², muestra un catastro de los glaciares, ya sea blancos o en roca, ubicados en la cuenca del río Aconcagua. 52 de ellos están presentes en la cuenca del río Blanco, los cuales presentan 38.5 km² de glaciares blancos y 12.8 km² de glaciares en roca. Esto es fundamental, no ha sido considerado explícitamente en este trabajo en la parte de las simulaciones, sin embargo, es de todas maneras imprescindible tenerlo en cuenta, pues el daño sobre este recurso maravilloso debe evaluarse y compensarse, una forma es construir un embalse de cabecera. A continuación se presenta la tabla presentada en este estudio.

Sub-cuenca	Número de glaciares	Área de glaciares blancos en Km2	Área de glaciares en roca en Km2	Área total en Km2
Río Rocín	9	1.7	2.4	4.1
Río Colorado	13	3.1	5.9	9.0
Río Riecillos	14	2.3	7.3	9.6
Río Juncal	71	35.4	12.0	47.4
Río Blanco	52	38.5	12.8	51.3
Total	159	81.0	40.4	121.2

Tabla IV.6.1 Cantidad y tipo de glaciares en Aconcagua

Una vez más y con el ánimo de redundar, de dejar más que claras las características de la cuenca, se muestra una imagen satelital de la cuenca Figura IV.6.2, donde se observa la gran cantidad de nieve y luego dos imágenes, Figura IV.6.3 y Figura IV.6.4, que muestran la topografía en escala de grises de la cuenca. Se observa que un gran porcentaje de la cuenca se encuentra sobre la línea media de nieve de 2600 m.s.n.m. Las labores de explotación del mineral de la mina Andina de Codelco, se realizan a una altura aproximada de 4500 m.s.n.m, lo cual deja en evidencia su interacción profunda con glaciares en blanco y en roca desde ya hace medio siglo, lo cual seguirá ocurriendo en el futuro.

³² BOWN, FRANCISCA, RIVERA, ANDRES Y ACUÑA, CESAR. Ob. cit. p. 47.

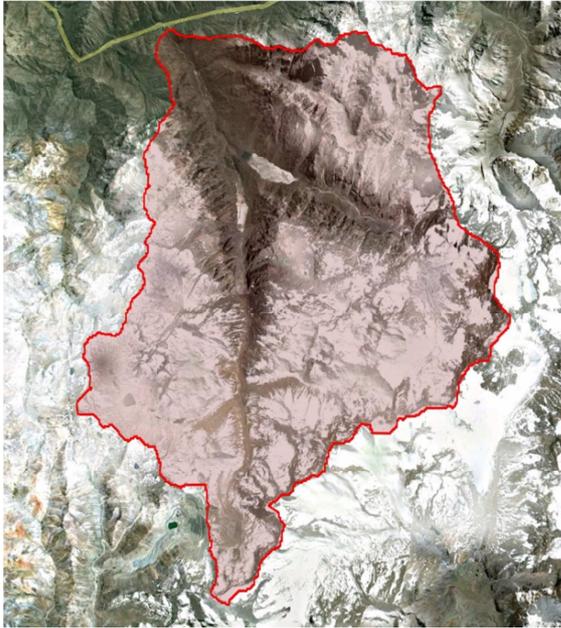


Figura IV.6.2 Cuenca Río Blanco

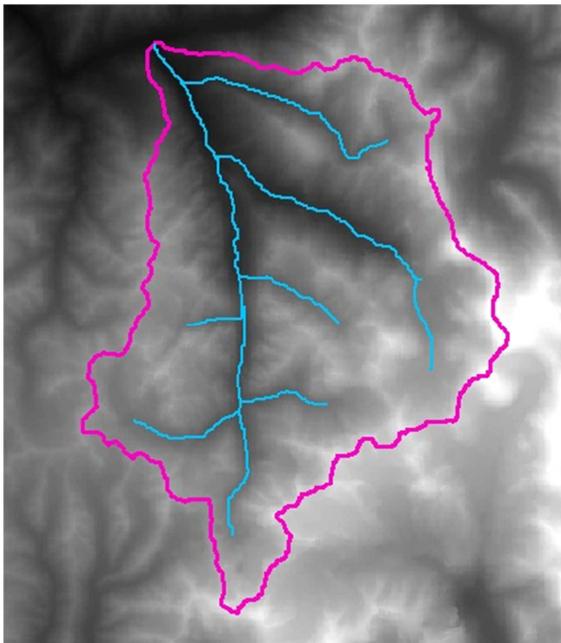


Figura IV.6.3 Elevación Digital Cuenca Río Blanco

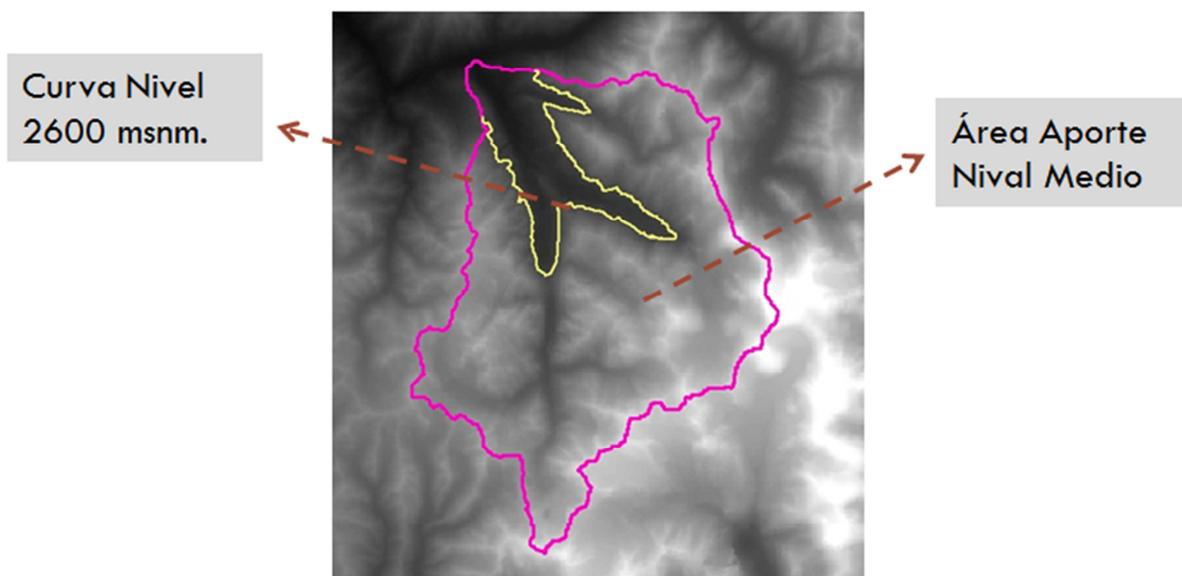


Figura IV.6.4 Elevación Digital Cuenca Río Blanco con línea media de Nieves

Para mayor claridad se presenta el área como porcentaje del total sobre los 2600 m.s.n.m. de las cuencas A y B. La cuenca A es la que tiene punto de salida en la captación de la central Aconcagua, la cuenca B es la restante. Se aprecia esto en la tabla y figura siguiente. Es necesario aclarar que la cuenca de interés para el modelo hidrológico está contenida dentro de la Cuenca A. La diferencia entre la Cuenca A y la Cuenca C (cuenca cuyo punto de salida es el muro del embalse), corresponde a 32 km², lo cual será tratado más adelante con el objetivo de que el embalse deje pasar el agua que naturalmente captaría la central descontando el aporte de estos 32 km² (diferencia entre cuenca A y C)

Cuenca	Área	% Del Área Total	% Del Área total sobre 2600 msnm
Cuenca A	208 km ²	55%	60%
Cuenca B	176 km ²	45%	40%

Tabla IV.6.2 Cuenca Total Río Blanco y Cuenca aportante CH Aconcagua

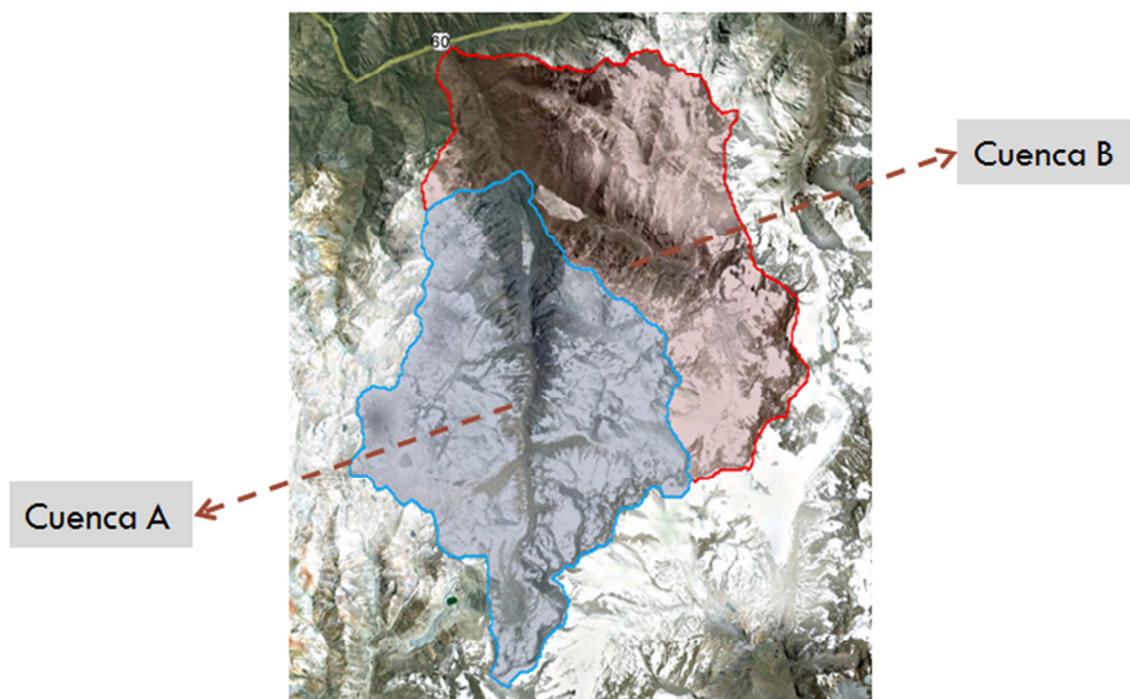


Figura IV.6.4 Imagen satelital cuenca total y cuenca CH Aconcagua

Los modelos utilizados por Codelco han representado caudales mensuales. Con esta información, contenida en el EIA Andina 244³³ y Estudio de 4C Ingenieros³⁴, se han calculados los volúmenes totales factibles de embalsar (Agua sobre los requerimientos de la central HASA), resultados que bastante distintos, de acuerdo al modelo utilizado. Ésta tesis busca estimar los afluentes al embalse, con resolución semanal y mediante una metodología estocástica y otra con funciones de transferencia. Los modelos de la Tabla 3.2.2 son físicos.

Prob. de Excedencia	85%	50%	25%
4C Ingenieros	5 MM de m3	30 MM de m3	60 MM de m3
Golder Assosiates	10 MM de m3	50 MM de m3	80 MM de m3

Tabla IV.6.3 Estimaciones aproximadas para Codelco realizadas por Consultores de Ingeniería

³³ ARCADIS GEOTECNIA. 2011. *Evaluación impacto ambiental, proyecto expansión Andina 244*. SEIA. SEA. Chile.

³⁴ 4C INGENIEROS CONSULTORES. 2007. *Estimación de caudales medio mensuales cuenca Alta Río Blanco*. Estudio realizado para División Andina de Codelco. Chile.

IV.7 Registros de mediciones

Se ha solicitado, con éxito, los registros fluviométricos a la DGA. Se presenta inicialmente los caudales desde 1970 a 2011 en la estación Río Blanco en Blanco, sin relleno, ni suma de extracciones. Se aprecia una clara disminución de los caudales debido a la puesta en marcha de la central Blanco perteneciente a HASA en 1993. El año 1984 presenta menos de 200 datos. El 90% de los años posee más de 320 datos, lo cual hace bastante sólida esta información. Los años hidrológicos que se han sacrificado debido a la deficiencia en la información corresponden a:

- 1983-1984
- 1984-1985
- 2007-2008
- 2009-2010

Para el período 1914-1970 se consideraron los valores de la publicación MOP-DGA, "Caudales medios mensuales de los ríos de Chile"³⁵, de la cual se sacrificaron los años hidrológicos en los cuales faltaba al menos un mes. Se cuenta con la información de caudales mensuales en la estación Río Blanco en Blanco desde 1914 a 2011, totalizando 62 años hidrológicos completos.

Respecto a las Mediciones de Codelco, se cuenta con un registro incompleto de 10 años, pero que fue fundamental para el proceso de desagregación de caudales espacialmente. Este registro fue tomado en el kilómetro 15-16, donde justamente se construiría el muro del embalse. Esta información está en el estudio recién mencionado de 4C ingenieros, presente en la evaluación de impacto ambiental de Andina 244.

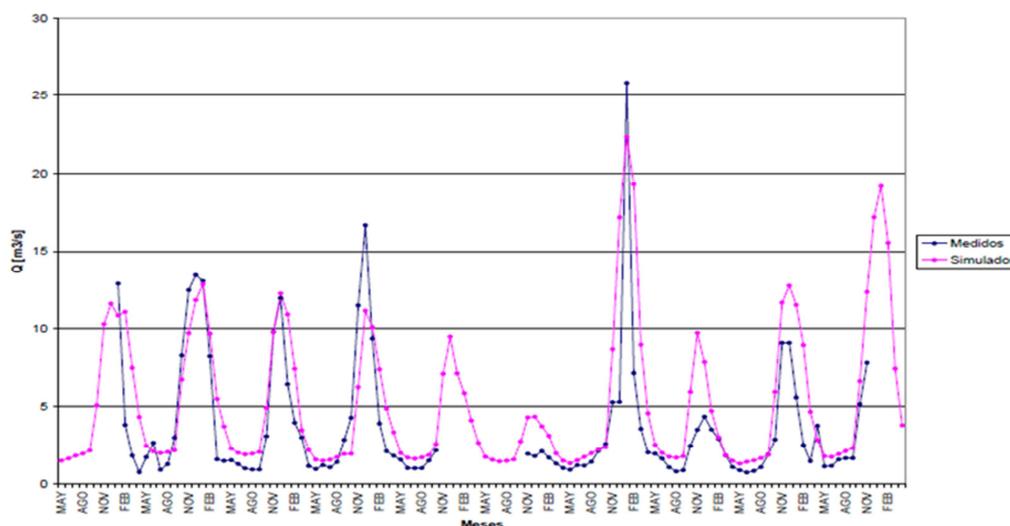


Figura IV.7.1 Mediciones km 15-16 Codelco

³⁵ DGA, MOP. 1978. *Caudales medios mensuales de los ríos de Chile*. Publicación Ministerio de Obras Públicas. Chile.

Dada la permanente negativa de CODELCO a entregar información completa, se digitalizó este gráfico, con rigurosidad en las escalas. Entonces se presentan los registros públicos de CODELCO digitalizados. Esto se tratará con más detalle en el subcapítulo de desagregación espacial.

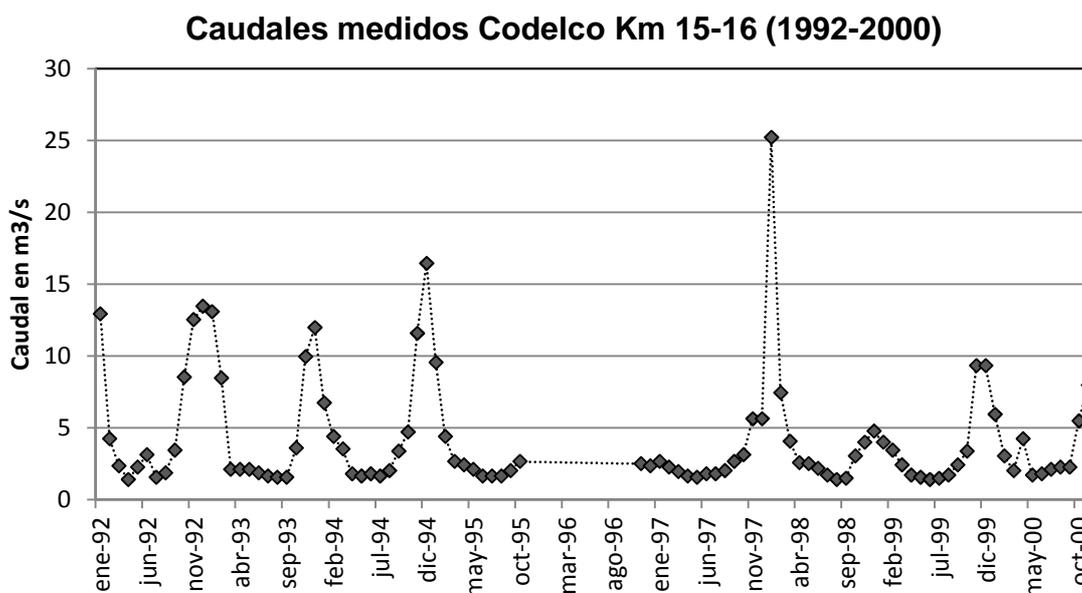


Figura IV.7.2 Digitalización Mediciones km 15-16 Codelco

IV.8 Antecedentes Central Hidroeléctrica Blanco y Consumos Codelco

Estos antecedentes son presentados en el capítulo de Evaluación hidrológica en la sección de la reconstrucción del régimen natural, dado que requieren más cuidado y debieron ser tratados de una forma distinta, con el objetivo de tener mejor precisión en los cálculos.

IV.9 Antecedentes Embalse, Evaporación y Central A pie de Presa

Estos antecedentes son presentados en el capítulo de Modelo del Embalse. Respecto a la Evaporación es necesario mencionar que se utilizaron los registros de evaporación mensual en Vilcuya. Esta estación meteorológica de la DGA se ubica a 1100 m.s.n.m y fueron llevados a la altura de 2250 m.s.n.m. mediante el perfil de evaporación del Balance hidrológico nacional de 1987. En términos porcentuales el aporte de la evaporación al balance es menor al 3%. Demás antecedentes en el capítulo del Modelo del Embalse y en el Apéndice.

V.- MARCO TEÓRICO

Es este capítulo se presentan las principales herramientas estadísticas y de series de tiempo utilizada para la modelación hidrológica. El modelo del embalse propiamente tal es simple, una ecuación con entradas, salidas y una variable de estado que es el volumen del embalse. La central hidroeléctrica propuesta, a pie de presa, no alterará las decisiones del embalse, sólo, tal como en los embalses de riego, generará con las aguas que salen del embalse. Dado que el embalse asegurará la hidrológica natural a la central blanco (siempre que el caudal no supere el máximo de diseño de la central Aconcagua, de 8.6 m³/s), se supone un factor de planta equivalente y un tanto mayor para la central a pie de presa FP=0.6

V.1 Estadígrafos

V.1.1 Parámetro o estadígrafo de posición

Se define el promedio o la media aritmética mediante la siguiente expresión. Este parámetro usualmente se designa por m_x o $xbar$ ³⁶:

$$m_x = xbar = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

V.1.2 Estadígrafo de dispersión

La varianza es el promedio de la suma de los cuadrados de las diferencias entre cada uno de los valores de la muestra y el promedio. Se calcula mediante la expresión siguiente:

$$V = s_x = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m_x)^2}{n}$$

Este es un estimador convergente de la varianza de la población, pues cuando el tamaño de la muestra tiende a infinito el estimador tiende a ser igual a la varianza de la población. Sin Para obtener un estimador sesgado, se acostumbra definirlo con la expresión siguiente, cuando la varianza del universo o población no se conoce:

$$V = s_x = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - m_x)^2}{n - 1}$$

La desviación estándar o desviación típica es igual a la raíz cuadrada de la varianza³⁷.

³⁶ VARAS, EDUARDO Y BOIS, PHILIPPE. *Hidrología probabilística*. Santiago. Ediciones Universidad Católica de Chile. p. 5.

V.1.3 Parámetro de asimetría

Se define como coeficiente de asimetría del universo a la razón entre el tercer momento y el cubo de la desviación estándar. La expresión para calcular un estimador de este parámetro en una muestra es la siguiente³⁸:

$$m_3 = \left[n \sum_{i=1}^n x_i^3 - 3 \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i^2 + \frac{2}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] / [(n-1)(n-2)]$$

V.1.3 Coeficiente de correlación

A veces, es conveniente definir un índice que represente una medida del ajuste de los puntos observados a una línea recta. Al graficar las observaciones en el plano x, y, el plano puede dividirse en 4 partes, trazando una recta horizontal y una vertical a través del punto que representa el promedio de las observaciones.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{n S_x S_y}$$

Siendo;

S_x = Desviación estándar de x.

S_y = Desviación estándar de y.

Esta expresión puede también escribirse en términos de las variables originales, introduciendo la noción de covarianza, y se obtiene que el coeficiente de correlación es igual a la razón entre la covarianza de las variables y el producto de las desviaciones estándar:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{S_x S_y} = \frac{Cov(x, y)}{S_x S_y}$$

Donde $Cov(x, y)$ = covarianza de x e y.³⁹

³⁷ VARAS, EDUARDO Y BOIS, PHILIPPE. p. 6.

³⁸ VARAS, EDUARDO Y BOIS, PHILIPPE. p. 7.

³⁹ VARAS, EDUARDO Y BOIS, PHILIPPE. p.107 y 108.

V.2 Distribuciones de Probabilidad

V.2.1 Distribución normal

Este modelo probabilístico es el más utilizado y el que tiene mayor importancia teórica en el campo de la Estadística y de las Probabilidades. Se dice que una variable tiene una distribución normal si su función densidad de probabilidad está representada por la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0.5\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Para} \quad -\infty \leq x \leq +\infty$$

Los valores μ y σ son los parámetros de la distribución, y puede demostrarse que son iguales respectivamente al promedio y a la desviación estándar de la variable aleatoria⁴⁰.

V.2.2 Distribución Gama o Pearson tipo III

Un modelo muy usado en hidrología es la distribución Pearson tipo III o distribución gama, la cual posee gran flexibilidad y diversidad de formas, dependiendo de los valores de sus parámetros, según se ilustra en la figura 2.3. Esta función es asimétrica y está definida para valores positivos de la variable, lo que concuerda con las propiedades de la mayoría de los registros hidrológicos, o variables físicas de interés en hidrología.

Se dice que una variable aleatoria x tiene una distribución gama si su función densidad de probabilidades es:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left[\frac{x-y}{\alpha} \right]^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-y}{\alpha}\right)$$

Donde α , β , γ son parámetros de la distribución y $\Gamma(\beta)$ es la función gama de β . Dependiendo de los valores de los parámetros esta distribución puede tomar formas más simples conocidas como modelos de gama de uno o dos parámetros. Casos especiales de esta distribución son los modelos exponenciales y log-normal⁴¹.

⁴⁰ *Ibíd.* p.34.

⁴¹ *Ibíd.* P. 44

V.3 Test Estadísticos

V.3.1 Comparación de los promedios. Test de Student.

Considérese que se tienen dos muestras de una misma variable aleatoria: una muestra de tamaño n_1 , media m_1 y desviación estándar s_1 y una segunda muestra de tamaño n_2 , media m_2 y desviación estándar s_2 . Se desea saber si las medias de ambas muestras son significativamente diferentes. Para encontrar la respuesta a esta pregunta se deben distinguir dos casos: muestras grandes, por ejemplo mayor de 50 valores, y muestras pequeñas.

Si los tamaños de ambas muestras son suficientemente grandes, se puede demostrar que el estadígrafo z definido por la fórmula siguiente, tiene una distribución normal con promedio 0 y varianza 1. La probabilidad de sobrepasar el valor del estadígrafo calculado, se obtiene de las tablas de la distribución normal.

$$z = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

En el caso en el que el tamaño de alguna o de ambas muestras sea más reducido, lo cual es la situación corriente en hidrología, entonces el estadígrafo t definido por la expresión siguiente, sigue una ley de distribución de Student:

$$t = \frac{m_1 - m_2}{S \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad \text{Con} \quad s^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

En este caso s es una desviación estándar media que tiene en cuenta los tamaños efectivos de las muestras.

Si la hipótesis que las muestras provienen de una misma distribución es verdadera, en lo posible aproximadamente normal, el estadígrafo t sigue una ley de distribución de Student con $n_1 + n_2 - 2$ grados libertad. Por consiguiente, se debe obtener de la tabla de distribución de la ley de Student, la probabilidad de sobrepasar el valor del estadígrafo calculado, bajo el supuesto de la hipótesis nula, es decir, que ambas muestras provienen de la misma población o universo⁴².

⁴² *Ibíd.* p. 90 y 91.

V.3.2 Comparación de dos varianzas. Test de Fisher-Snedecor

Para comparar las varianzas de dos muestras, se define el estadígrafo F como la razón entre la varianza mayor y la varianza menor. Si ambas varianzas provienen de la misma distribución, aproximadamente normal, el estadígrafo F sigue una distribución con dos parámetros llamada ley de Fisher-Snedecor:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

$g_1 = n_1 - 1$ Y $g_2 = n_2 - 1$ (en el caso $s_1 > s_2$, en caso contrario se define lo inverso)⁴³.

V.3.3 Test de coeficientes de auto correlación

En el caso de los coeficientes de auto correlación de muestras que provienen de dos poblaciones presumiblemente iguales, no existe un planteamiento teórico para demostrar que bajo ciertas condiciones, esos coeficientes provienen de una misma población. Sin embargo se han desarrollado ciertos métodos de carácter empírico para estos efectos, que se usan para tener al menos una idea acerca de la conservación del coeficiente de auto-correlación.

Uno de estos métodos (Alder y Roessler, 1968) consiste en calcular el parámetro:

$$z = \frac{Z_h - Z_g}{\left[\frac{1}{n_1 - 3} + \frac{1}{n_2 - 3} \right]^{1/2}}$$

En que:

$$Z_h = \frac{1}{2} \text{Ln} \left[\frac{1 + r_h}{1 - r_h} \right]$$

$$Z_g = \frac{1}{2} \text{Ln} \left[\frac{1 + r_g}{1 - r_g} \right]$$

r_h = Coeficiente de auto-correlación de la serie histórica.

r_g = Coeficiente de auto-correlación de la serie generada.

⁴³ *Ibíd.*, p. 92 y 93.

n_1 = Número de elementos de la serie histórica.

n_2 = Número de elementos de la serie generada.

Empíricamente se sabe que el parámetro Z está distribuido aproximadamente normal con media cero y varianza uno.

La hipótesis que se plantea en este caso consiste en aceptar Z no es significativamente distinto de cero, los coeficientes de auto-correlación provienen de muestras de una misma población. Al igual que en los casos anteriores se eligió un nivel de significancia de 95%, con lo que se fija el rango de valores de Z en el que se acepta la hipótesis⁴⁴.

V.4 Periodicidad en Series Hidrológicas

La estacionalidad, o la periodicidad en general, se reflejan en el comportamiento de la distribución marginal de la variable y de la estructura de dependencia temporal. Así es como el promedio, la varianza, el coeficiente de asimetría y los demás momentos de orden superior muestran un patrón de comportamiento periódico. Se acostumbra suponer que las series de tiempo hidrológicas son periódicamente estacionarias; esto es, los efectos periódicos se repiten en la misma época del año. La periodicidad del promedio y de la varianza es fácil de observar en un gráfico de la serie de tiempo. La detección de periodicidades en momentos de orden superior no es tan simple y, en algunas circunstancias, pueden requerirse técnicas especiales para ello.

Una serie con w periodos por año y N años de longitud se acostumbra representar por $X_{\gamma,\tau}$ donde $\gamma = 1,2,\dots, N$ es un índice para representar el año y $\tau = 1,2,\dots, W$ representa el periodo. De esta forma $X_{\gamma,\tau}$ es el valor de la variable durante el periodo τ del año γ . La existencia de periodicidad hace que las propiedades estadísticas de la serie cambien durante el año, de manera que el valor de ellas depende del periodo y por lo tanto deben ser calculadas para cada valor de τ .

El promedio muestral y la varianza de la serie para cada periodo τ se calcula como:

$$\bar{X}_{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N X_{v,\tau} = 1,2,\dots, w$$

⁴⁴ MIRANDA, JULIO. *Experimentación con modelos arma en la generación estocástica de caudales*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Profesor Guía: Ximena Vargas y Ernesto Brown. Universidad De Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. 1989. P. 52,53 y 54,

$$S_{\tau}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{v=1}^N (X_{v,\tau} - \bar{X}_{\tau})^2; \tau = 1, 2, \dots, w$$

Similarmente los momentos periódicos de orden superior como el coeficiente de asimetría:

$$g_{\tau} = \frac{N}{(N-1)(N-2)S_{\tau}^3} \sum_{v=1}^N (X_{v,\tau} - \bar{X}_{\tau})^3; \tau = 1, 2, \dots, w$$

La estructura de dependencia temporal del proceso se refleja en la auto-correlación. Esta se estima como el coeficiente de correlación de desfase k del periodo τ , descrito como $r_{\tau}(k)$, el cual representa la dependencia lineal que existe entre los periodos τ y $\tau - k$. Se calcula como: ⁴⁵

$$r_{\tau}(k) = \frac{1}{N S_{\tau} S_{\tau-k}} \sum_{v=1}^N (X_{v,\tau} - \bar{X}_{\tau})(X_{v,\tau-k} - \bar{X}_{\tau-k})$$

V.5 Modelos Auto-regresivos Orden 1 y Orden 2

El modelo a utilizar es un Auto-regresivo Periódico, de orden 1 o 2, PAR (1,2). Dado que la periodicidad tiene el efecto de considerar cada mes como una serie distinta, por supuesto, entrelazadas a través de la auto correlación, se presenta el modelo AR (1) y AR (2). Es necesario anticipar que el criterio de Información de Akaike, presentado en unos párrafos más adelante, indicó que en ningún caso sería necesario un modelo auto-regresivo de orden 3, AR (3).

V.5.1 Modelo AR (1)

Este modelo explica la variable en función de ella misma desfasada en un instante de tiempo (Por ejemplo caudal de mayo en función del caudal de abril) y un término aleatorio, independiente y normal, cuya varianza, al igual que la correlación son estimadas mediante el método de los momentos (MOME). El modelo es el siguiente.

$$Z_{t,m} = \phi_{1,m} Z_{t-1,m} + \varepsilon_{t,m}$$

⁴⁵ FERNANDEZ, BONIFACIO. Ob. cit., p. 639 y 640,

Donde el subíndice m representa el mes. El parámetro que acompaña el término auto-regresivo será calculado para cada mes, como también la desviación del residuo. Éstos son estimados en base al método de los momentos y se calculan de la siguiente forma:

$$\phi_1 = \rho_1 = r_1$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = (1 - \phi_1^2) \cdot \sigma_z^2$$

El modelo auto-regresivo lineal planteado supone comportamiento normal estándar de la variable aleatoria, razón por la cual se ha normalizado, antes de la aplicación del modelo, cada serie mensual.

V.5.1 Modelo AR (2)

Se tiene el planteamiento del modelo, la varianza del error y el despeje de los parámetros en función de los coeficientes de correlación lo cual está dado por las ecuaciones de Yule-Walker⁴⁶, $\Re\Phi = \underline{r}$ proveniente de la aplicación del valor esperado sobre la autocovarianza de la serie histórica asociada al modelo auto-regresivo.

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \varepsilon_t$$

$$\sigma_\varepsilon^2 = (1 - \phi_1 \rho_1 - \phi_2 \rho_2) \sigma_z^2$$

Ecuaciones de Yule-Walker (orden 2).

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}$$

Luego, la relación entre los parámetros y los coeficientes de correlación, que se pueden obtener de la muestra, son.

$$\rho_1 = \frac{\phi_1}{1 - \phi_2}$$

$$\rho_2 = \frac{\phi_1^2 + \phi_2 - \phi_2^2}{1 - \phi_2}$$

⁴⁶ FERNANDEZ, BONIFACIO. *Apuntes hidrología estocástica*. Apuntes del curso ICH3264. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.

V.6 Criterio de Información de Akaike⁴⁷

Akaike propone un criterio de información: Al construir un modelo uno debería aumentar parámetros siempre que el aumento de estos justifique una reducción de la varianza. El criterio de información se define con la fórmula expresada abajo y es un elemento de suma importancia a la hora de escoger el orden del modelo auto regresivo y en consecuencia estimar los parámetros en base a lo ya explicitado anteriormente.

$$AIC = 2(p + q) + N \ln(\sigma_\varepsilon^2)$$

V.7 Estacionariedad de los parámetros

Dado que se aplicarán modelos auto-regresivos de orden 1 y 2 se muestra a continuación los criterios de estacionariedad para cada uno de estos modelos AR (1) y AR (2).

$$AR (1) \quad \sigma_\varepsilon^2 > 0 \Leftrightarrow \phi_1^2 < 1$$

$$AR (2) \quad 0 < \sigma_\varepsilon^2 < \sigma_z^2$$

V.8 Independencia y Normalidad de los residuos

Respecto a la independencia de los residuos de los modelos auto-regresivos aplicados a cada mes, estos deben ser básicamente independientes y de distribución normal. ¿Cuál es la razón de esto? Es una buena señal del modelo, pues refleja que ha logrado captar y reflejar de buena forma la dependencia de la serie histórica.

Para corroborar la independencia no se utilizará algún método complejo o muy rebuscado, sólo se graficará la auto correlación de los residuos de cada mes, dependiendo del orden del modelo (ver Apéndice).

La normalidad se abordará con el procedimiento que consiste en realizar un análisis de frecuencia de la serie de residuos, verificando la bondad de ajuste de la serie a una función de densidad de frecuencia de tipo normal, a través del test Chi-Cuadrado. (ver Apéndice).

⁴⁷ Ibid.

V.9 Corrección de Parámetros en Modelos GAR (1) ⁴⁸

La Estimación de los parámetros del modelo, i , e , λ , α , β , y ϕ , puede ser hecha por el método de momentos. Las siguientes relaciones entre los parámetros del modelo de GAR y los momentos de población de la variable subyacente, Y_i , se pueden derivar

$$\mu = \lambda + \frac{\beta}{\alpha}$$

$$\sigma^2 = \frac{\beta}{\alpha^2}$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta}}$$

$$\rho_1 = \phi$$

Donde μ, σ^2, γ , y ρ_1 son la media poblacional, varianza, coeficiente de asimetría, y el retraso-coeficiente de auto-correlación, respectivamente. Estos momentos pueden ser estimados en base a la muestra. Y_1, Y_2, \dots, Y_N , Usando las relaciones bien conocidas:

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i$$

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - m)^2$$

$$g_1 = \frac{N}{(N-1)(N-2)s^3} \sum_{i=1}^N (Y_i - m)^3$$

$$r_1 = \frac{1}{(N-1)s^2} \sum_{i=1}^{N-1} (Y_i - m)(Y_{i+1} - m)$$

Donde N es el tamaño de la muestra. Desafortunadamente, para las variables dependientes y no normal están sesgados estos estimadores⁴⁹.

⁴⁸ Ibid.

⁴⁹ Ibid.

Por lo tanto, es necesario algún tipo de corrección antes de utilizarlos para resolver el sistema de ecuaciones. (32) Para estimar los parámetros del modelo GAR (sólo el estimador del valor esperado se puede utilizar sin un factor de corrección.)

Basándose en los resultados dados por Kendall (1968), Wallis y O'Connell (1972) sugirió la siguiente corrección para obtener un estimador insesgado de ρ_1 por un modelo auto regresivo AR (1):

$$\hat{\rho}_1 = \frac{r_1(N+1)}{N-4}$$

En lo que r_1 está dada por (33). También Matalas (1966) y O'Connell (1977), entre otros, mostraron que si las variables siguen un (1) proceso de AR, un estimador insesgado de la varianza se puede obtener por:

$$\hat{\rho} = \frac{N-1}{N-K} s^2$$

Donde $K = [N(1 - \hat{\rho}_1^2) - 2\rho_1(1 - \hat{\rho}_1^N)] / [N(1 - \hat{\rho}_1)^2]$ y s^2 y $\hat{\rho}_1$ están dadas por (33) y (34), respectivamente.

V.10 Normalización⁵⁰

Para los objetivos planteados, se utilizan modelos lineales auto-regresivos y de auto-correlación. Estos son equivalentes a modelos probabilísticos bi-variados. Para aplicarlos, es necesario que las variables aleatorias sean normales, cosa que no se cumple en este caso. Por lo tanto, es necesaria una transformación normal o normalización sobre las variables originales. En este caso se usa una normalización y estandarización en base a la aplicación de las funciones de probabilidad acumulada y de las funciones inversas de probabilidad acumulada, tanto de las distribuciones Gamma como Normal estandarizada.

Si los meses de las series a considerar en este trabajo distribuyen Gamma con parámetros α_s y β_s , entonces el caudal normalizado de q_s , Nq_s , se estima como:

$$Nq_s = \phi^{-1}(G(q_s; \alpha_s, \beta_s))$$

⁵⁰⁵⁰ RIVERA, PEDRO. 2011. *Apuntes regulación del agua: conceptos y casos de estudio*. Apuntes de clases curso CI5107. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Universidad de Chile.

En que G es la función de probabilidad acumulada Gamma de dos parámetros y Φ^{-1} es la función de probabilidad inversa normal estandarizada. Este procedimiento transforma un valor que distribuye Gamma en uno que distribuye Normal de promedio 0 y desviación 1. El procedimiento inverso, o sea transformar un valor que distribuye normal estandarizado a un valor Gamma de parámetros conocidos, se puede obtener directamente de la ecuación de normalización y se estima como sigue, en que G^{-1} es la función inversa de probabilidad acumulada Gamma de dos parámetros.

$$q_s = G^{-1}(Nq_s)$$

V.11 Modelo Embalse y Simulaciones

Esto será explicado en los capítulos correspondientes con el objetivo de contextualizar los temas de mejor manera. Esto incluye el tema de la Ecuación de continuidad, la Evaporación, la central ubicada a pie de presa, los traspasos de Agua con la central hidroeléctrica Aconcagua S.A. y otros.

VI.- EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO BLANCO

Dados los elementos presentados en el capítulo de antecedentes, se procede a realizar la evaluación hidrológica de la cuenca del río Blanco con el objetivo de cuantificar de buena forma los recursos hídricos disponibles. Es una cuenca controlada aguas abajo donde entrega sus aguas al río Aconcagua.

Para el modelo de generación de caudales futuros es relevante conocer el comportamiento natural de la cuenca del río Blanco. Dentro de esta cuenca existen dos actividades económicas que utilizan agua intensivamente. Uno de aquellos usos corresponde al agua extraída por Codelco en la cabecera de la cuenca, la cual es estable, por un lado aumenta con el nivel de producción de la minera, pero disminuye con las tecnologías de eficiencia implementadas en los últimos años. Las extracciones de Codelco varían entre los 600 a 700 l/s, lo cual representa alrededor del 10% del caudal promedio anual, en régimen natural. Por otro lado, aguas abajo, antes de la afluencia del río los Leones, existe una extracción desde 1993 de la central hidroeléctrica Blanco perteneciente a Hidroeléctrica Aconcagua S.A. (HASA en adelante). Esta central tiene un caudal de diseño de 8.6 m³/s, y un caudal medio alrededor de 5.5 m³/s, lo que significa alrededor del 55-60% del volumen total de la cuenca con punto de salida en la estación fluviométrica. Una pregunta interesante es qué porcentaje del volumen de la cuenca con punto de salida justamente en la captación de HASA, representa la generación de la central Blanco.

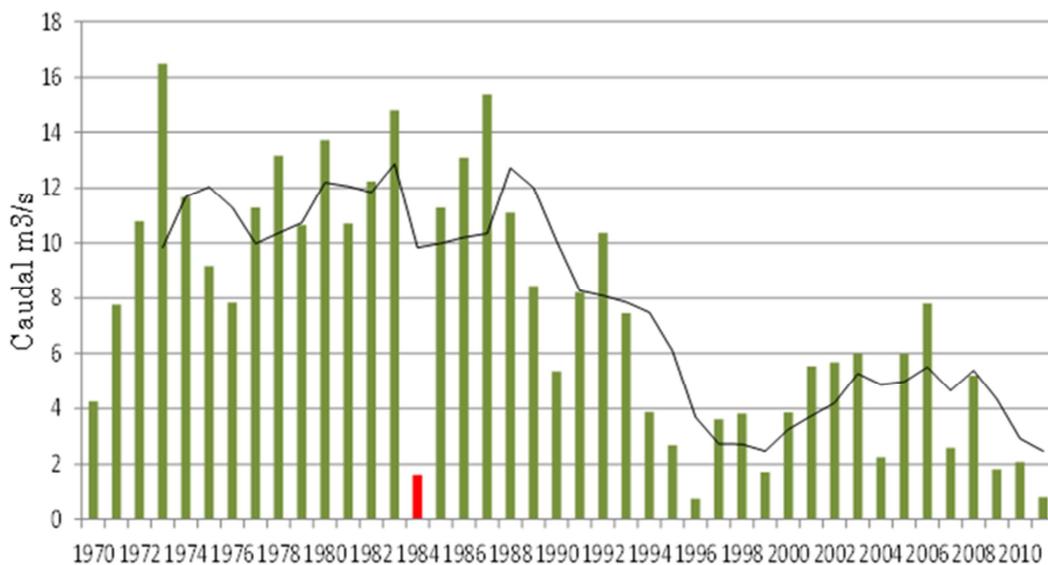


Figura VI.1 Caudales registrados entre 1970 y 2010 en la Estación DGA Río Blanco en Blanco. En rojo un año con falta de información (no representativo). La línea continua corresponde a una media móvil de orden $n=4$.

VI.1 Central Hidroeléctrica Blanco

La central Aconcagua capta aguas del río Blanco y Juncal. Interesa lo que capta en este caso la central Blanco, a nivel diario. La central tiene dos unidades independientes. Blanco y Juncal, la idea sería saber lo que generó la unidad Blanco desde 1993 hasta hoy. Información sobre las características de las centrales se puede encontrar en CDEC-SIC. En la Figura la Cuenca A corresponde a aquella que tiene como punto de salida la captación de la central Aconcagua.

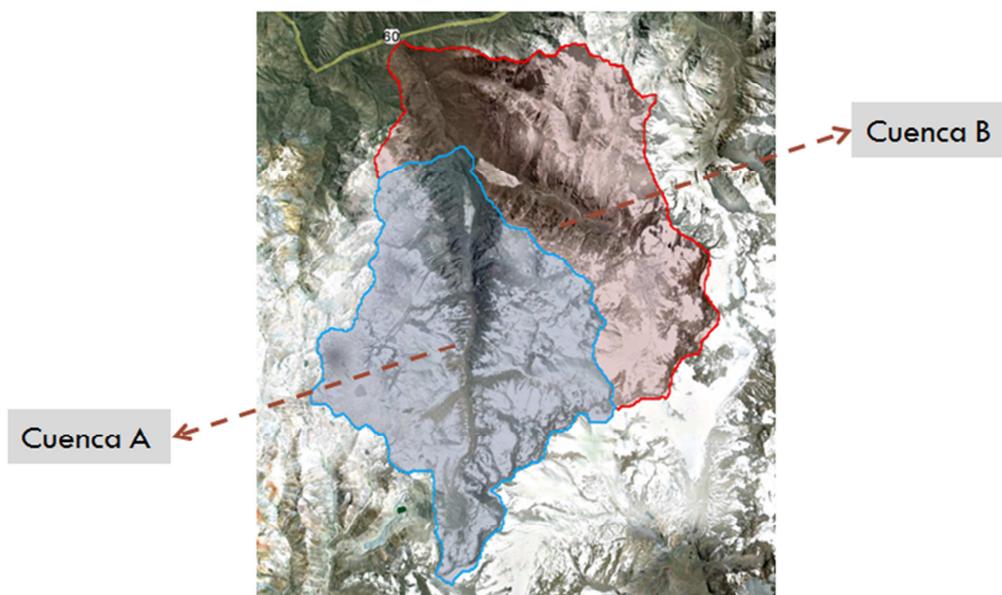


Figura VI.2.1 Cuenca A correspondiente a aporte hidroeléctrico

Central: Central Hidroeléctrica Aconcagua.

- Ubicación: San Esteban, V Región.
- Empresa Propietaria: Hidroeléctrica Aconcagua S.A.
- Año Puesta en Servicio: 1993-94.
- Tipo Central: Pasada.
- Tipo Turbina: Pelton.
- Número de Unidades: 2.
- Gasto Central: 20.2 (m³/s).
- Potencia Total: 79.5 (MW).

Las características de las unidades generadoras que utiliza la Central Hidroeléctrica Aconcagua se muestran en la Tabla 2.2.

UNIDAD:	Blanco	Juncal
Fecha de puesta en servicio:	1993	1994
Tipo de turbina:	Pelton	Pelton
N° de unidades generadoras:	1	1
Potencia nominal:	52,5 MW	27 MW
Potencia máxima:	60 MW	30 MW
Altura de Caída:	654.3 (m)	250 (m)
Gasto Unidad:	8.6 (m ³ /s)	11.6 (m ³ /s)

Figura VI.1.2 Características Hidroeléctrica Aconcagua S.A.

En el estudio de impacto ambiental de la expansión para la mina Andina de Codelco (Andina 244), se presenta la energía generada por la central hidroeléctrica Aconcagua, la cual ha sido repartida de acuerdo a la cantidad de potencia, entre Juncal y Blanco.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1993	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	10.4	13.6	16.9	31.4	38.4	117.1
1994	38.0	32.0	30.0	11.9	10.2	8.3	7.8	10.9	16.2	32.0	54.7	57.6	309.7
1995	58.1	49.0	37.8	22.2	19.8	14.3	13.4	13.5	20.4	26.0	54.9	60.5	390.0
1996	50.7	46.1	38.9	17.6	13.2	9.2	9.7	9.7	9.4	14.7	25.8	36.0	281.0
1997	46.5	36.4	29.6	17.4	11.1	12.4	15.3	19.2	31.4	34.7	51.9	60.5	366.6
1998	60.1	53.4	48.9	36.1	22.7	16.8	13.3	11.2	10.5	26.9	43.2	50.5	393.5
1999	52.4	46.5	32.4	16.0	11.8	10.1	10.2	11.9	18.9	36.5	55.0	59.0	360.7
2000	59.6	36.9	29.6	17.6	11.4	10.7	15.3	17.0	17.8	49.2	51.0	60.4	376.4
2001	60.0	55.0	47.9	23.2	15.3	11.8	11.4	18.2	20.8	44.8	53.0	60.4	421.9
2002	60.7	53.7	42.2	19.8	16.7	17.8	19.3	24.4	23.9	40.3	49.9	58.9	427.4
2003	60.4	54.0	59.5	32.3	19.9	18.7	17.5	16.5	19.4	25.2	57.3	58.2	438.8
2004	60.5	53.7	42.2	21.7	14.2	11.6	10.9	13.1	20.2	21.4	38.0	63.2	370.6

Tabla VI.1.1 Generación bruta central Aconcagua (GWh). 1993-2004.

La forma de repartir la energía y el volumen ha sido en base a las siguientes ecuaciones, lo cual no incluye la varianza y asume propiedades idénticas de cada cuenca:

$$Q_{\text{blanco}} + Q_{\text{juncal}} = 20.2 \qquad \frac{250 \cdot Q_{\text{juncal}}}{654.3 \cdot Q_{\text{blanco}}} = \frac{27}{52.5}$$

Esto da como resultado los siguientes caudales mensuales para la central Blanco:

AÑO	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
93 - 94	0.0	0.0	1.4	2.2	3.0	3.6	7.0	8.2	8.2	7.6	6.5	2.6	4.2
94 - 95	2.2	1.9	1.7	2.3	2.4	4.5	8.0	8.2	8.3	7.7	5.4	3.3	4.6
95 - 96	2.8	2.1	1.9	1.9	3.0	3.7	8.1	8.6	7.2	7.2	5.5	2.6	4.5
96 - 97	1.9	1.4	1.4	1.4	1.4	2.1	3.8	5.1	6.6	5.7	4.2	2.6	3.1
97 - 98	1.6	1.8	2.2	2.7	4.6	4.9	7.6	8.6	8.5	8.4	6.9	5.3	5.2
98 - 99	3.2	2.5	1.9	1.6	1.5	3.8	6.3	7.2	7.4	7.3	4.6	2.4	4.1
99 - 00	1.7	1.5	1.4	1.7	2.8	5.2	8.1	8.4	8.5	5.8	4.2	2.6	4.3
00 - 01	1.6	1.6	2.2	2.4	2.6	7.0	7.5	8.6	8.5	8.6	6.8	3.4	5.1
01 - 02	2.2	1.7	1.6	2.6	3.0	6.4	7.8	8.6	8.6	8.4	6.0	2.9	5.0
02 - 03	2.4	2.6	2.7	3.5	3.5	5.7	7.3	8.4	8.6	8.5	8.4	4.7	5.5
03 - 04	2.8	2.7	2.5	2.3	2.8	3.6	8.4	8.3	8.6	8.4	6.0	3.2	5.0
PROM	2.0	1.7	1.8	2.1	2.7	4.5	7.0	7.8	7.8	7.4	5.7	3.1	4.5
MIN	0.0	0.0	0.9	1.4	1.4	2.1	3.8	5.1	5.4	5.0	4.2	1.7	2.8
MAX	3.2	2.7	2.7	3.5	4.6	7.0	8.4	8.6	8.6	8.6	8.4	5.3	5.5

Tabla VI.1.2 Caudales mensuales Central Blanco (m³/s). 1993-2004.

La metodología antes descrita no es certera, pues no basta con repartir la potencia, no es evidente que los caudales se repartan de esa forma, mucho menos en caudales mensuales y aún menos semanales. Lo que se realizó en este trabajo fue conseguir las series del CDEC-SIC, en los registros diarios de operación. Sin embargo datos diarios y desagregados por central existen desde 2010 a la fecha. Lo que se ha hecho es graficar la generación en cada una de las unidades y se observa que no se cumple que de acuerdo a las potencias se distribuyan los caudales, mucho menos en periodos, secos. Pese a tener sólo 2 años esto es representativo de ese fenómeno, lo cual ha sido corroborado con gente del CDEC-SIS, como medida de validación dada la inexistencia de datos públicos desagregados en la web, www.cdec-sic.cl.⁵¹

Se presenta en la Figura 4.1.1, la operación desde el año 2010 a la fecha de las centrales en forma desagregada. Se aprecia comportamiento periódico (hidrología) y aportes relativos estacionales, incluso mensuales a la generación total. Para efectos de tener una estadística mensual, se ha desagregado la central Aconcagua de acuerdo a los aportes apreciados desde 2010, de forma mensual.

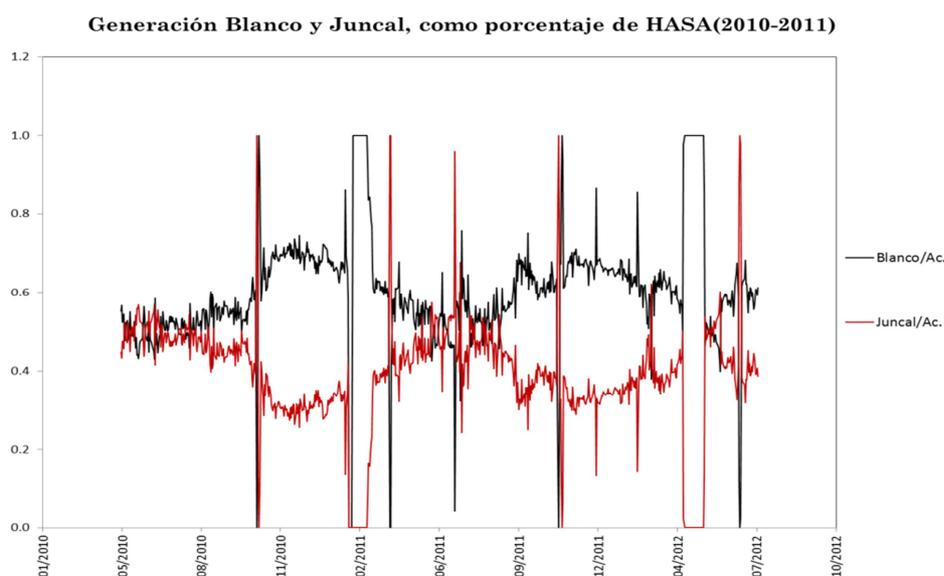


Figura VI.1.3 Generación Diaria Centrales Blanco y Juncal 2010-2012

Se presenta además la generación desde 2004-2010 de la central Aconcagua, en valores diarios. De esta manera se cuenta con todo los datos, al menos mensuales de la central Aconcagua y una metodología más coherente para desagregar por central entre 1993 y 2010. Esta metodología consiste en suponer el aporte porcentual de los años en que se

⁵¹ Página Web del Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC). Registro operación central de generación. www.cdec-sic.cl

tiene registro desagregado por Captación (Blanco y Juncal) para el resto de los años en que no se cuenta con esta desagregación.

Año Hidrológico		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1993	1994				1.4	2.2	3.0	3.6	7.0	8.3	8.2	7.6	6.4
1994	1995	2.7	2.2	1.9	1.7	2.3	2.2	4.2	8.3	8.5	8.3	7.9	5.5
1995	1996	3.2	2.3	1.7	1.6	1.6	2.7	3.4	8.3	8.6	7.3	7.4	5.7
1996	1997	2.5	1.5	1.1	1.1	1.1	1.2	1.9	3.9	5.3	6.7	5.9	4.3
1997	1998	2.5	1.3	1.4	1.8	2.2	4.2	4.6	7.8	8.6	8.6	8.6	7.1
1998	1999	5.2	2.6	2.0	1.5	1.3	1.4	3.5	6.5	7.4	7.5	7.5	4.7
1999	2000	2.3	1.4	1.2	1.2	1.4	2.5	4.8	8.3	8.6	8.5	6.0	4.3
2000	2001	2.5	1.3	1.2	1.8	2.0	2.4	6.5	7.7	8.6	8.6	8.6	7.0
2001	2002	3.3	1.8	1.4	1.3	2.1	2.8	5.9	8.0	8.6	8.6	8.6	6.1
2002	2003	2.8	1.9	2.1	2.2	2.8	3.2	5.3	7.5	8.6	8.6	8.6	8.6
2003	2004	4.6	2.3	2.2	2.0	1.9	2.6	3.3	8.6	8.6	8.6	8.6	6.1
2004	2005	3.1	1.6	1.4	1.3	1.5	2.7	2.8	5.7	8.6	8.6	7.8	5.1
2005	2006	2.3	1.6	2.3	2.3	2.4	3.5	6.2	8.6	8.6	8.6	8.6	7.8
2006	2007	4.4	2.5	2.1	2.6	2.6	3.6	6.5	8.2	8.6	8.6	8.6	7.1
2007	2008	3.3	1.8	1.4	1.7	1.5	2.7	4.5	7.5	8.1	8.6	8.0	4.9
2008	2009	3.2	2.5	2.7	2.1	2.1	3.2	5.2	8.6	8.6	8.6	8.6	6.8
2009	2010	4.6	2.0	1.4	1.4	1.6	2.8	3.3	6.8	8.6	8.6	8.6	6.3
2010	2011	4.3	2.0	1.5	1.5	1.5	1.6	2.5	5.9	7.1	7.0	4.7	4.3

Tabla VI.1.3 Caudales mensuales utilizados por Central Blanco (m³/s)

VI.3 División Andina Codelco

El informe de 4C ingenieros realizado para Codelco-Andina en 2007, indica los caudales han sido extraídos desde el río desde 1996. Hasta la fecha del informe, la información solo se tenía en el periodo 1996-2004. Para efectos del régimen natural mensual utilizado se ha proyectado 2004-2011 un flujo de producción equivalente a 0.7 m³/s, dada la estabilización de la producción de la división Andina de CODELCO. Se muestran las extracciones en la Tabla VI.3.1.

Año Hidrológico		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1999	2000									0.49	0.58	0.58	0.58
2000	2001	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
2001	2002	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.68	0.63	0.7	0.7
2002	2003	0.45	0.64	0.64	0.66	0.69	0.67	0.68	0.66	0.66	0.59	0.63	0.64
2003	2004	0.58	0.68	0.67	0.64	0.67	0.58	0.64	0.66	0.43	0.7	0.7	0.65
2004	2005	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	2006	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2006	2007	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2007	2008	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2008	2009	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2009	2010	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2010	2011	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

Tabla VI.3.1 Caudales extraídos por Andina (Estudio 4C Ingenieros)

VI.2 Régimen Natural

Se cuenta con la información de caudales mensuales en la estación Río Blanco en Blanco desde 1914 a 2011, totalizando 62 años hidrológicos completos. Para el período 1914-1970 se consideraron los valores de la publicación MOP-DGA, "Caudales medios mensuales de los ríos de Chile", de la cual se sacrificaron los años en los cuales faltaba al menos 1 mes. Para el período 1970-2011 se utilizó la información disponible en el registro de estaciones fluviométricas de la DGA, reconstruyendo el régimen natural desde 1993, dadas las extracciones de la Central Hidroeléctrica Blanco y de la división Andina de CODELCO. Para este último período también se sacrificaron los años hidrológicos en los cuales se contaba con poca o nula información en algunos meses.

Se muestra a continuación, en la Figura VI.2.1, el registro depurado de la estación río Blanco en Blanco, el cual contiene información desde 1914 a 2011, representada en años hidrológicos. Es decir, para efectos del gráfico el año 1914 corresponde al año hidrológico 1914-1915 y el año 2010, corresponde a 2010-2011.

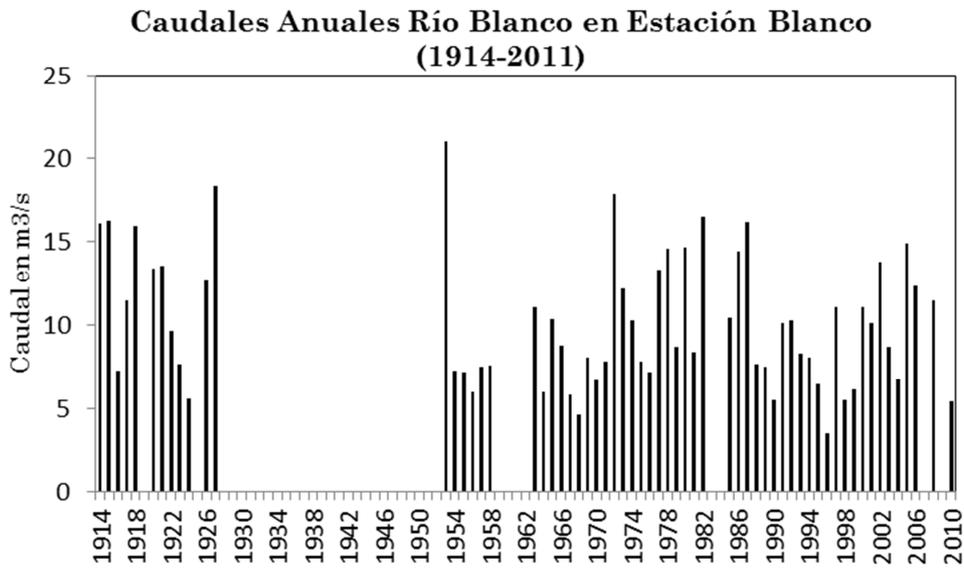


Figura VI.3.1 Caudales anuales río Blanco en Blanco, años información depurada.

VI.3 Análisis Estadístico

VI.3.1 Estadígrafos y Correlaciones

Para la base de datos con 62 años hidrológicos mostrada en la Figura V-14, correspondiente a la muestra empírica, se han calculado los estadígrafos básicos: Promedio, Desviación y Asimetría. A continuación se muestran estos valores para cada mes, considerando años hidrológicos, en la Figura V-14.

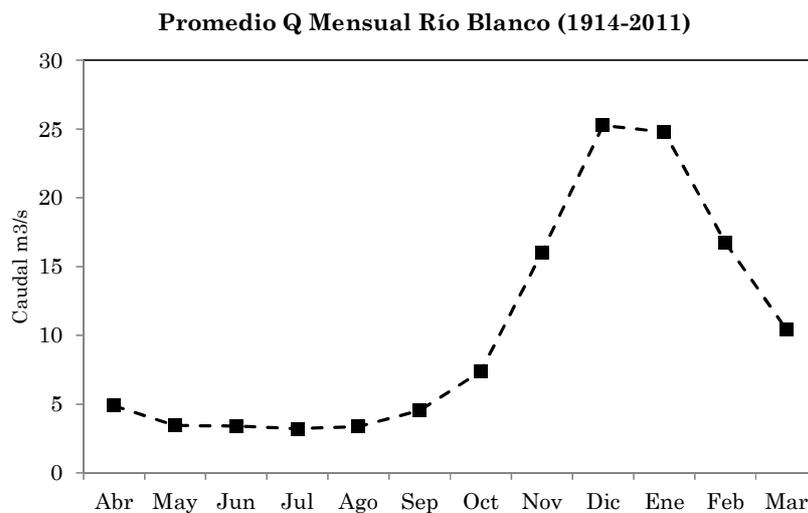


Figura VI.3.1.1 Caudales medios mensuales régimen natural.

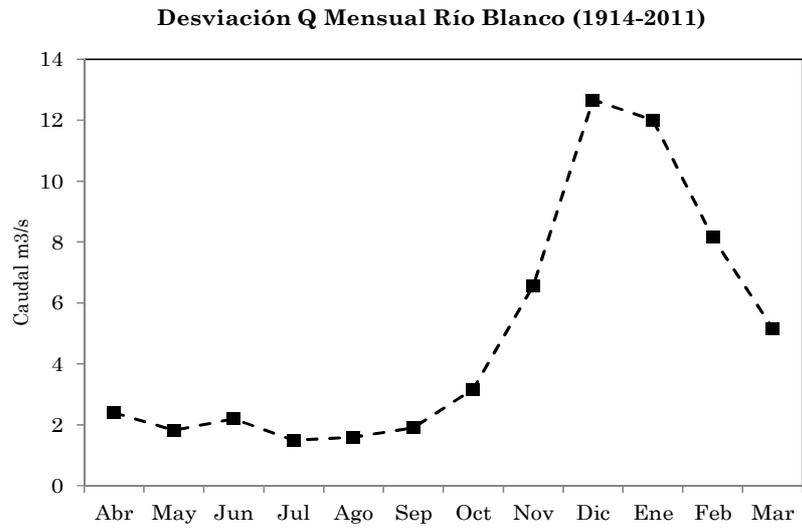


Figura VI.3.1.2 Desviación de caudales mensuales régimen natural

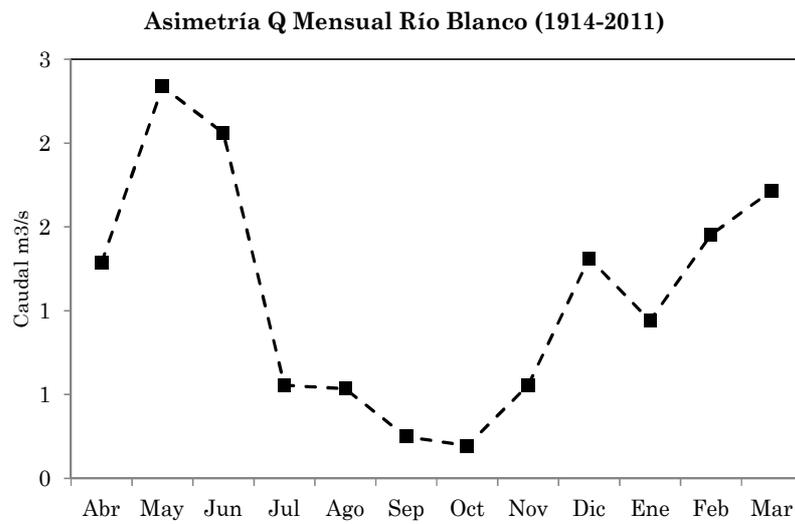


Figura VI.3.1.3 Asimetría de caudales mensuales régimen natural.

Además se ha calculado la auto correlación de orden 1 para esta serie periódica, esto es la correlación del vector de caudales de un mes con el mes anterior. La línea punteada representa una suavización polinómica de la correlación, esto debido a que el fenómeno físico es sí es suave, la aleatoriedad se debe a efectos en el muestreo y será representada con un término de este tipo en el modelo auto-regresivo de generación de series sintéticas. Se aprecia en la Figura V-15.

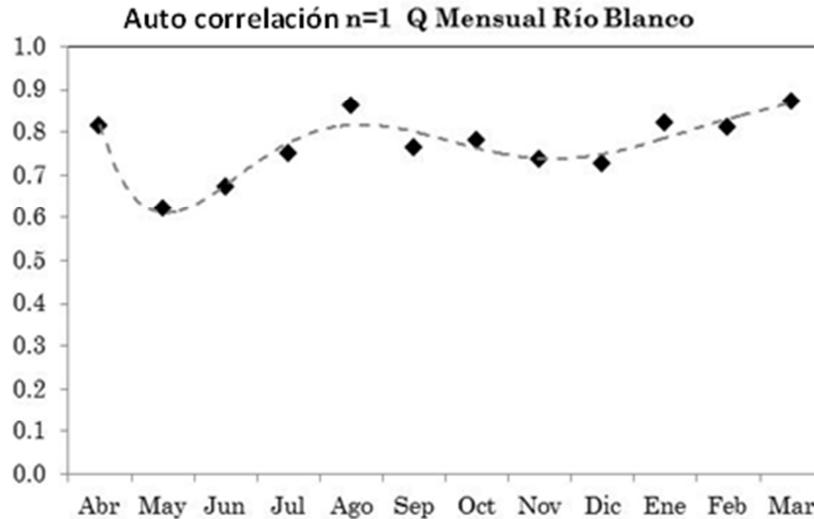


Figura VI.3.1.4 Auto correlación de orden 1 serie mensual río Blanco.

Se ha calculado además la auto correlación de la serie para ordenes mayores, hasta $n=4$, se presenta una figura que ilustra esto, Figura VI.3.1.5. Se aprecia una mayor auto correlación en los meses de deshielo lo cual es bastante coherente dado que la onda es más amplia, los fenómenos físicos son expuestos a menos perturbaciones como en los meses de precipitaciones.

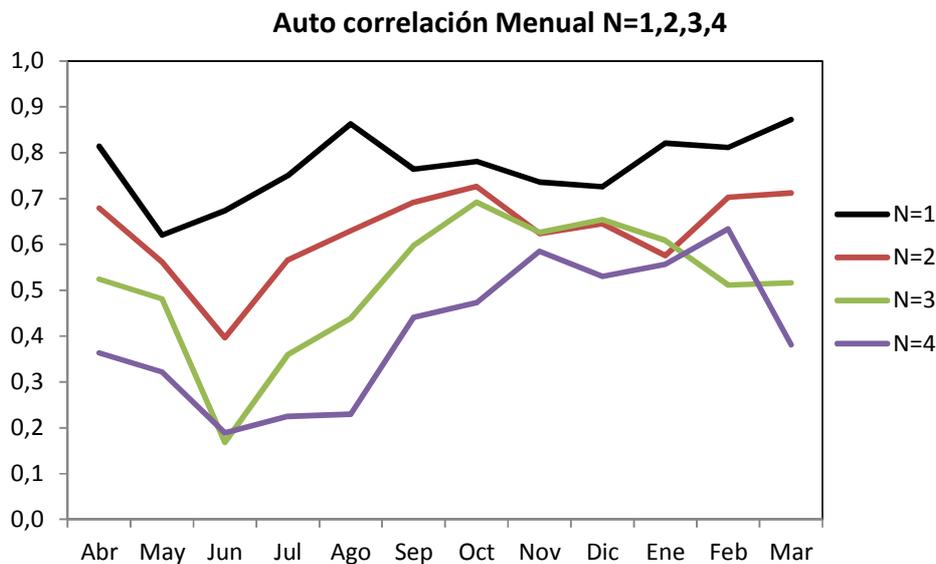


Figura VI.3.1.5 Auto correlación de orden 1-4 serie mensual río Blanco

VI.6.2 Test estadísticos (Promedio y Desviación)

Para efectos de evaluar si hay argumentos para rechazar que 2 muestras provengan de una misma serie, se han realizado test estadísticos para el promedio y la desviación entre distintos grupos de datos.

Se posee registros de caudales mensuales medidos por la DGA en la estación fluviométrica río Blanco en Blanco (63 años hidrológicos completos). Estos se han clasificado en 4 grupos, de acuerdo a la fuente consultada al trabajo sobre ellos:

- Caudales mensuales 1914-1929 (DGA-MOP, Publicación 1978)⁵².
- Caudales mensuales 1952-1970 (DGA-MOP, Publicación 1978).
- Caudales mensuales 1970-1993 (DGA-MOP, Solicitud Información).
- Caudales mensuales 1993-2011 (DGA-MOP, Solicitud Información y Reconstrucción Régimen Natural).

Se han realizado test de hipótesis estadísticos para comparación de medias (T-Student) y varianzas (Fischer-Snedecor) y se ha decidido no considerar el primer grupo por las grandes diferencias encontradas, sobre todo en la varianza.

Se ha dejado el período donde se reconstruyó el régimen natural (1993-2011), separado, con el objetivo de visualizar posibles errores en este proceso. Se aprecia que dado que son 4 grupos, se tienen 6 test para el promedio y 6 test para la desviación. Para el

⁵² DGA. MOP. 1978. *Caudales medios mensuales de los ríos de Chile*. Publicación Ministerio de Obras Públicas. Chile.

promedio se utilizó el Test de Student y para la desviación el test de Fischer-Snedecor⁵³. Los resultados han sido satisfactorios, sin embargo, dada las diferencias significativas principalmente en las varianzas se ha decidido prescindir de la estadística más antigua. Los 50 años escogidos van desde 1953 a 2001, todos años hidrológicos completos. A continuación se presenta, el resultado de los test aplicadas, ya enunciados en el marco teórico. Las muestras son significativas. En amarillo los valores que sospechosos, o sea que están por sobre el 1 %.

TEST T-STUDENT PROMEDIOS														
N														
32	S t	3,02	2,30	2,82	1,73	1,80	2,02	3,38	6,36	11,59	11,77	7,65	5,63	4,93
		-0,59	-0,01	0,49	1,16	0,54	1,34	-0,38	-0,38	-0,15	-1,30	-2,57	-2,70	-0,85
		56,1%	99,5%	62,7%	25,6%	59,2%	19,1%	70,7%	70,6%	88,3%	20,2%	1,5%	1,1%	40,1%
32	S t	1,76	1,04	2,06	1,35	1,43	1,73	2,59	6,04	14,56	12,54	7,58	4,02	4,66
		-1,18	-2,63	-1,77	-2,45	-1,90	-2,46	-2,54	-1,89	-0,99	-1,28	-0,79	-1,18	-1,39
		24,7%	1,3%	8,6%	2,0%	6,6%	1,9%	1,6%	6,8%	32,9%	21,1%	43,6%	24,6%	17,3%
		-15%												
35	S t	1,72	1,23	2,10	1,50	1,55	1,74	2,68	5,85	11,47	11,84	6,50	3,84	4,31
		-0,60	-0,74	-0,89	-0,75	0,07	-1,05	-1,06	-1,09	-1,20	-1,77	-1,94	-1,55	-1,34
		54,9%	46,3%	38,2%	46,0%	94,5%	29,9%	29,5%	28,1%	24,0%	8,6%	6,0%	13,0%	19,0%

Tabla VI.6.2.1 Test para comparación de medias

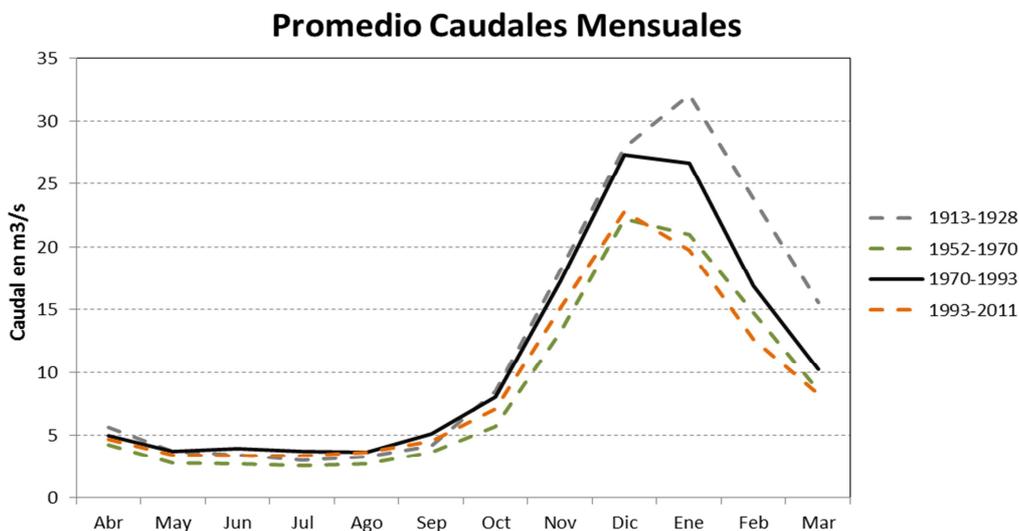


Figura VI.6.2.1 Caudales medios mensuales río Blanco en Blanco, distintos períodos.

En el caso del test de Varianzas Fischer-Snedecor, la situación es distinta y hay evidencia para dejar de lado los datos más antiguos, producto fundamentalmente de una diferencia

⁵³ VARAS, EDUARDO Y BOIS, PHILIPPE. Ob. Cit.

significativa en las varianzas, esto debido, en mayor medida probablemente a las capacidades de medición de la época.

TEST FISCHER-SNEDECOR VARIANZAS													
F	4,88	7,97	1,63	1,33	1,69	1,85	2,98	2,13	0,70	0,55	1,50	2,38	1,38
g1	12	12	12	12	12	12	12	12	-12	-12	12	12	12
g2	20	20	20	20	20	20	20	20	-20	-20	20	20	20
	0,1%	0,0%	16,3%	27,9%	14,4%	10,8%	1,5%	6,5%	23,4%	11,4%	20,5%	4,2%	25,4%
F	0,55	0,29	0,08	0,16	0,44	0,91	1,06	1,76	2,07	0,85	1,44	0,39	1,05
g1	-12	-12	-12	-12	-12	-12	12	12	12	-12	12	-12	12
g2	-12	-12	-12	-12	-12	-12	12	12	12	-12	12	-12	12
	15,5%	2,2%	0,0%	0,2%	8,7%	43,5%	46,0%	17,1%	11,1%	39,3%	27,0%	5,9%	46,5%
F	0,49	1,00	0,24	0,60	0,81	0,89	1,14	1,38	0,65	0,59	0,62	0,29	0,66
g1	-15	15	-15	-15	-15	-15	15	15	-15	-15	-15	-15	-15
g2	-15	15	-15	-15	-15	-15	15	15	-15	-15	-15	-15	-15
	8,7%	49,8%	0,4%	16,3%	34,2%	41,6%	40,0%	26,9%	20,9%	15,8%	18,5%	1,2%	21,6%

Tabla VI.6.2.2 Test para comparación de varianzas

Desviación Caudales Mensuales

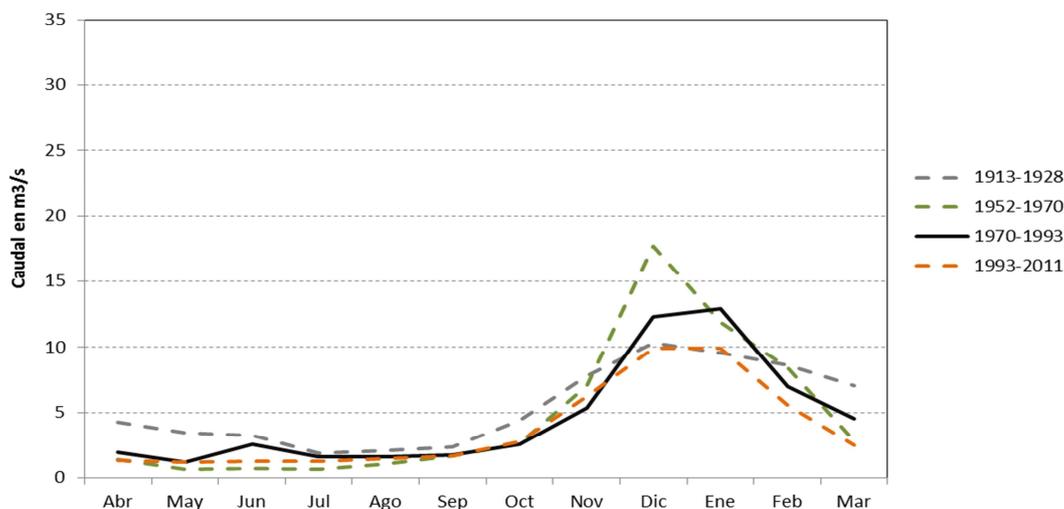


Figura VI.6.2.2 Desviaciones mensuales río Blanco en Blanco, distintos períodos.

Se han eliminado de la serie, por presentar diferencias significativas en cuanto a varianzas (Rechazo de los test, ver valores en rojo). Los datos utilizados corresponden a:

- Caudales mensuales 1952-1970 (DGA-MOP, Publicación 1978)⁵⁴.
- Caudales mensuales 1970-1993 (DGA-MOP, Solicitud Información).
- Caudales mensuales 1993-2011 (DGA-MOP, Solicitud Información y Reconstrucción Régimen Natural).

⁵⁴ DGA. MOP. 1978. Ob. Cit.

Como promedios anuales los datos a utilizar (50 años de registro) son los mostrados en la figura siguiente.

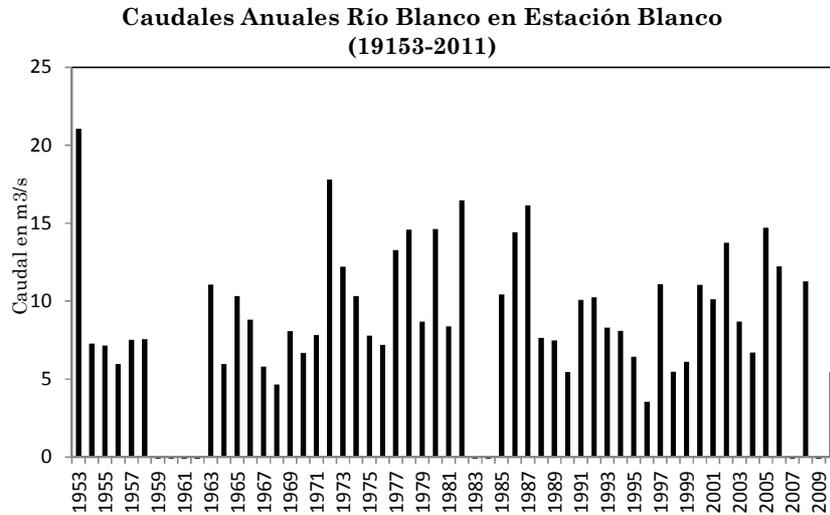


Figura VI.6.2.3 Caudales anuales Río Blanco en Blanco, años información depurada.

En base a los 50 años seleccionados se presentan los gráficos del promedio, desviación, coeficiente de variación y coeficiente de asimetría por mes.

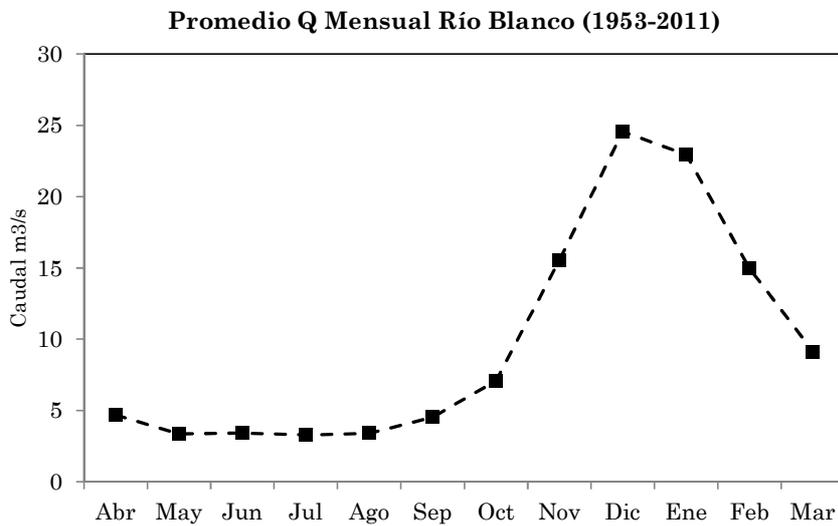


Figura VI.6.2.4 Caudales medios mensuales, años información depurada.

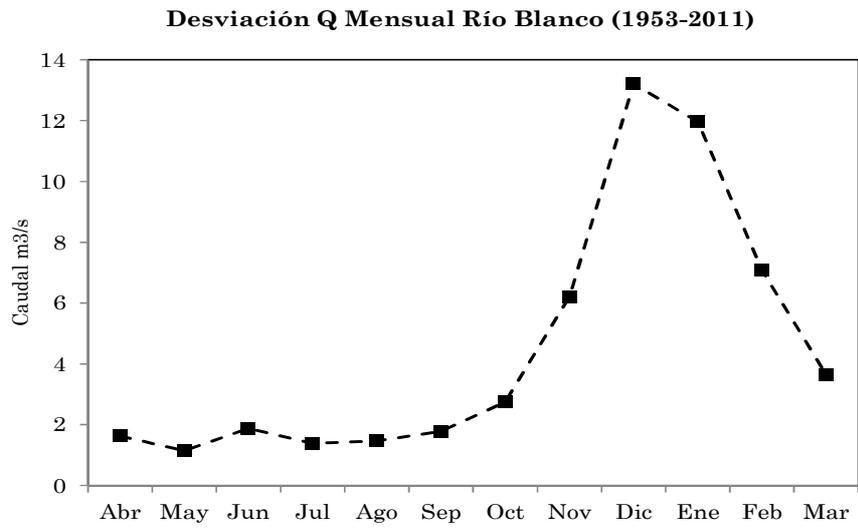


Figura VI.6.2.4 Desviaciones mensuales, Caudales anuales Río Blanco en Blanco, años información depurada.

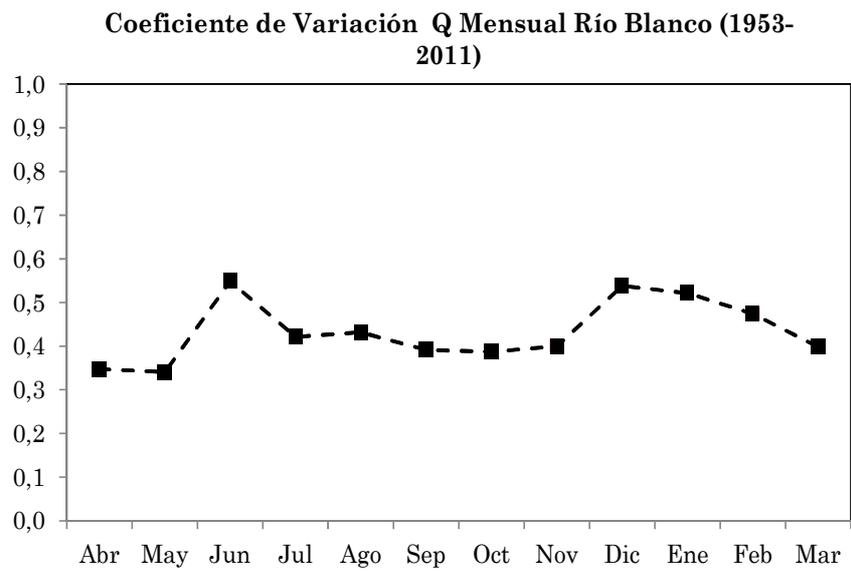


Figura VI.6.2.5 Coeficiente de variación Río Blanco en Blanco, años información depurada.

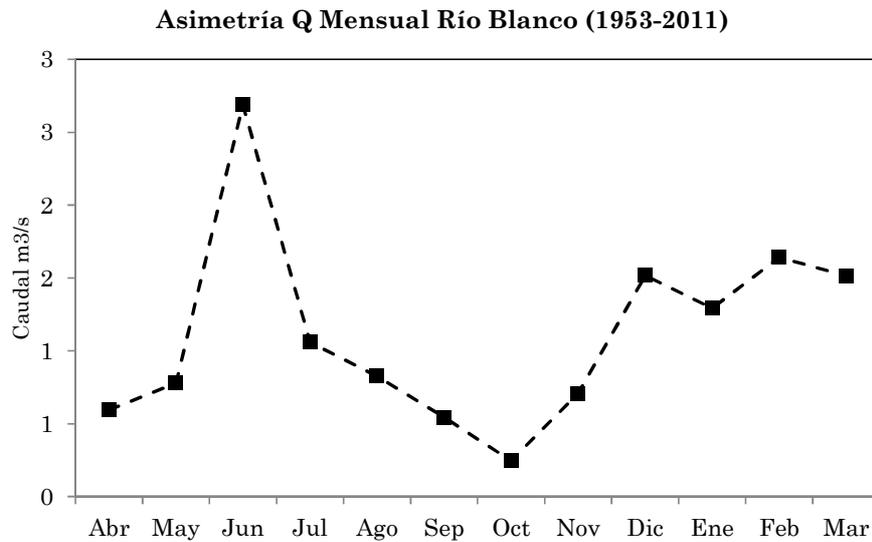


Figura VI.6.2.6 Coeficiente de Asimetría para caudales, años información depurada.

Además se presentan los dos gráficos de auto correlación que serán, previa explicación, en la sección de desagregación temporal, utilizados para los modelos PAR (1) y PAR (2). Estos han sido suavizados con medias móviles $n=5$, dada las características propias de la naturaleza; la incertidumbre va en el término del error del modelo, no tiene sentido agregar aún más aleatoriedad en la parte “determinística”.

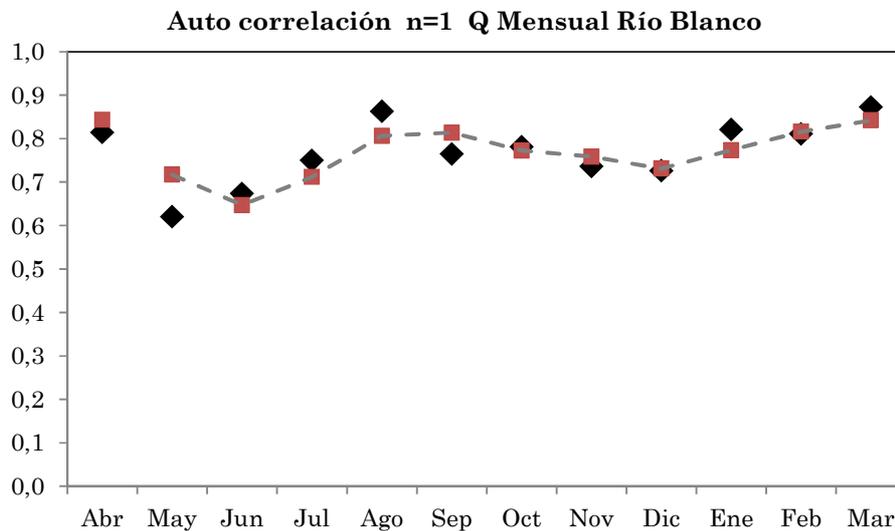


Figura VI.6.2.7 Auto correlación orden 1 para serie depurada

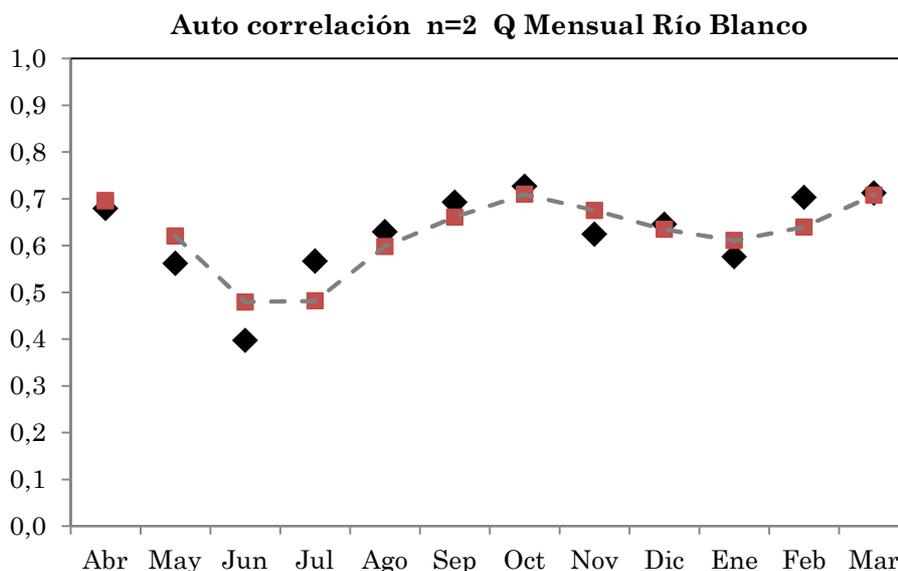


Figura VI.6.2.8 Auto correlación orden 2 para serie depurada

VI.7 Ajuste Probabilístico Río Blanco en Blanco

Dado los 50 años de registro a utilizar, se presenta el ajuste gráfico de probabilidades (Gamma y Normal) para la serie Río Blanco en Blanco (1953-2011), son 50 años hidrológicos completos. Los modelos auto-regresivos PAR (1) y PAR (2), requieren variables normales estandarizadas. Los datos, como vectores de caudales mensuales se ajustan a la distribución Gamma o Los Pearson III. Esto se aprecia gráficamente en las figuras que se exponen en adelante. Para corroborar y tener certeza de trabajar estadísticamente en forma adecuada se realizó el test Chi-Cuadrado resultando todos exitosos para un nivel de confianza del 5%. (Ver Apéndice). El ajuste gráfico muestra una clara tendencia hacia la distribución Gamma en todos los meses, unos más que otros, pero en general es muy razonable. Esto se aprecia en las siguientes dos páginas, ver Figura VI.7.1, donde a la distribución empírica se compara visualmente con un ajuste de la distribución Gamma y Normal.

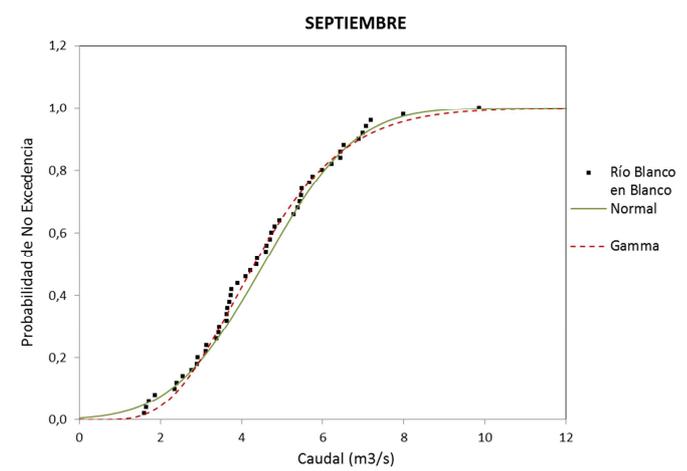
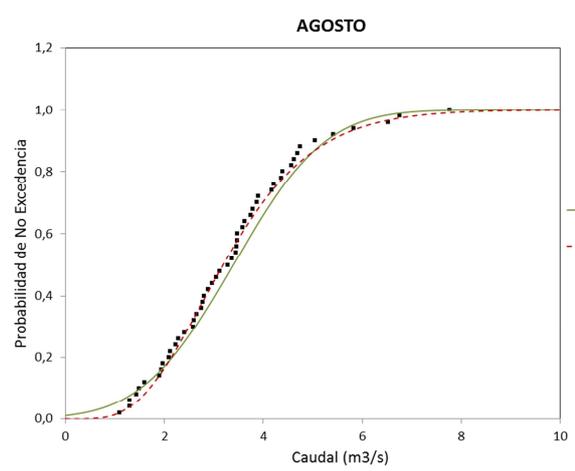
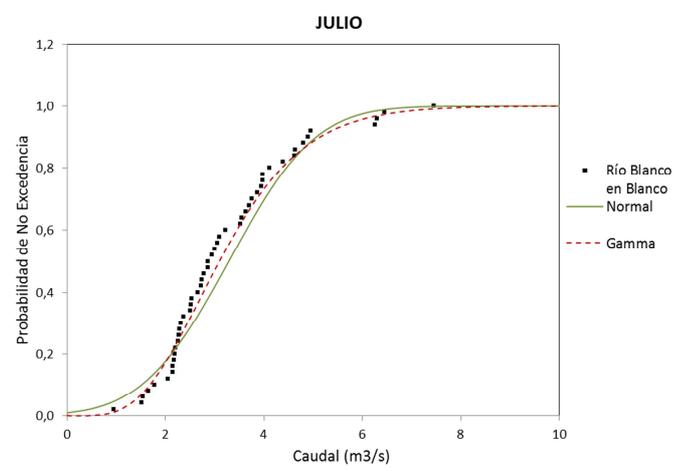
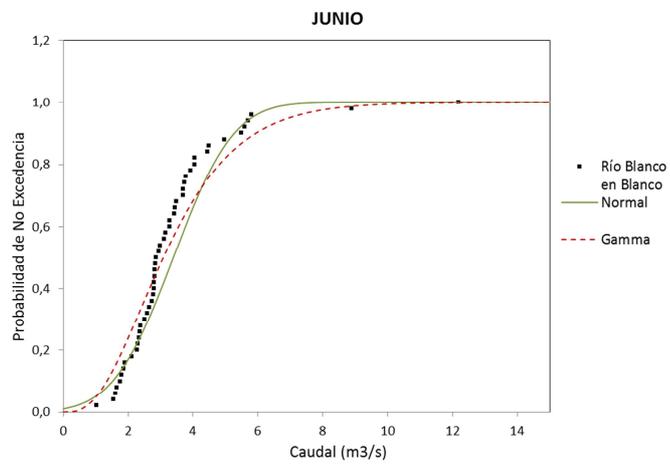
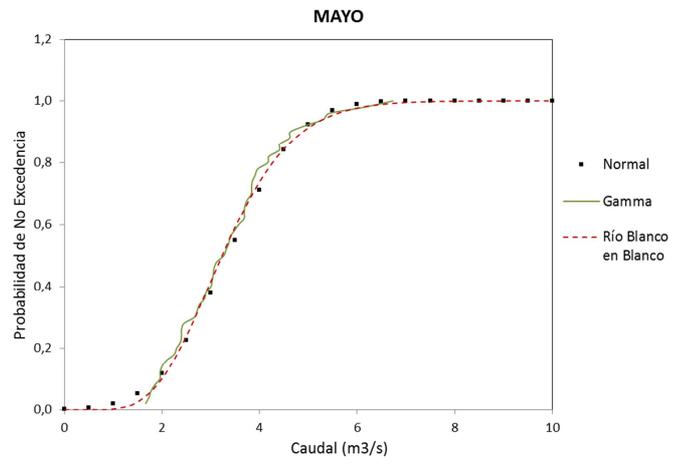
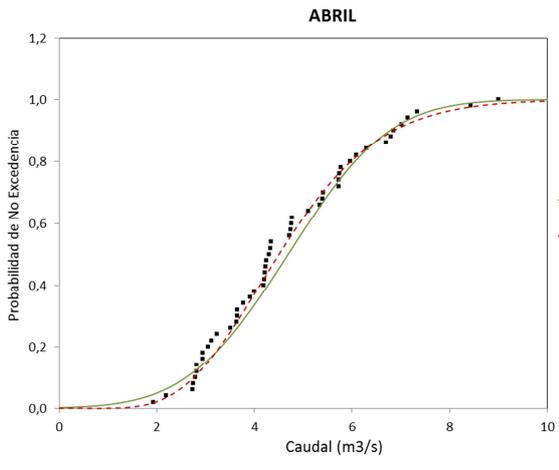


Figura VI.7.1 Ajuste probabilístico gráfico serie depurada 50 años río blanco en blanco. Abril a Septiembre

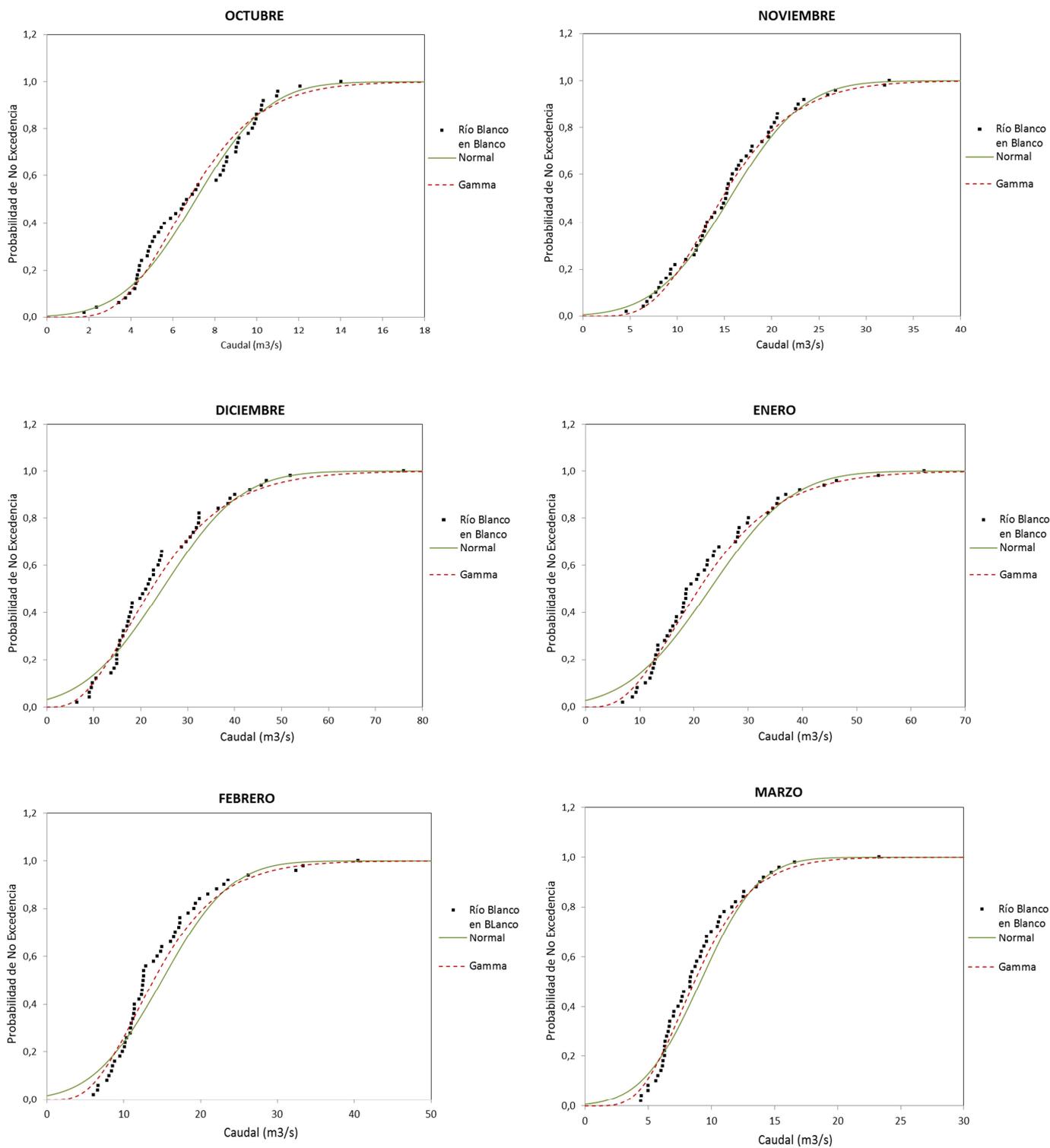


Figura VI.7.2 Ajuste probabilístico gráfico serie depurada 50 años río blanco en blanco. Octubre a Marzo.

VI.8 Desagregación Espacial

La cuenca del río Blanco, como se mencionó en el capítulo de antecedentes, posee grandes reservas nivales. Su altura media es cercana a los 3000 m.s.n.m. Desde un punto de vista razonable se podría pensar en que no hay problemas en replicar las medias adimensionales, los coeficientes de variación (suavizados), la estructura de probabilidad y de dependencia (esta última suavizada). Al hablar de suavizar lo que hay detrás es el comportamiento natural de cualquier sistema físico, más aún hidrológico, los saltos no tienen sentido físico, son producto de errores o incertezas en la medición. Al construir un modelo auto-regresivo se busca sacar toda la información posible de la serie y transformarla en un ruido Blanco.⁵⁵

La desagregación espacial corresponde a llevar los caudales desde la estación Río Blanco en Blanco hacia aguas arriba de la central Blanco, a una cota de aproximadamente 2200 msnm. La división Andina de Codelco realizó durante 10 años mediciones en el kilómetro 15 de la ruta el cual está ubicado a una cota de 2650 msnm. Éste es significativo y corresponde al drenaje de la cuenca de interés. Es por esta razón que para efectos de desagregar o trasponer los caudales, ésta información es sumamente relevante, más que cualquier metodología teórica o semi-empírica. Se muestra en la Figura V-16, el porcentaje del caudal total correspondiente a este punto (muro embalse). Estos porcentajes han sido calculados en base a un promedio entre los valores asociados a los dos estudios previamente descritos de los consultores 4C Ingenieros y Golder Associates⁵⁶. Nuevamente resulta apropiado ajustar una curva que incorpore suavidad, ya que el fenómeno físico en sí debiera ser así, lo cual se aprecia en la Figura VI.8.2.

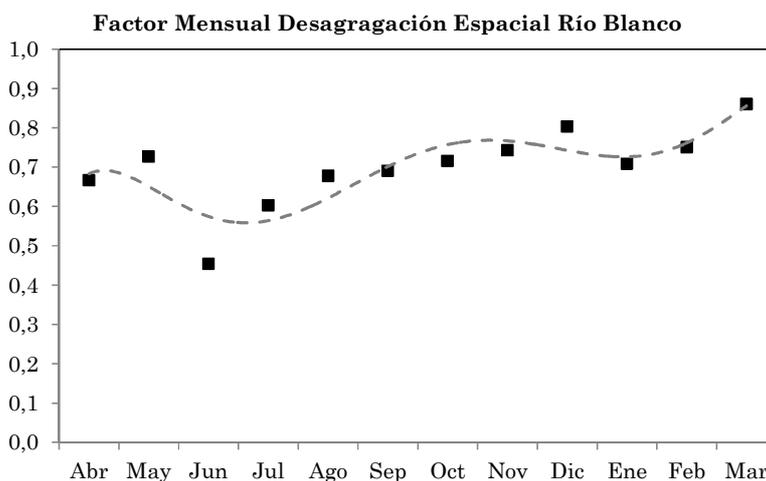


Figura VI.8.2 Factor desagregación en base a estudios públicos de Codelco EIA

⁵⁵ La metodología de desagregación fue propuesta y explicada al autor de este trabajo por el profesor, hidrólogo, Pedro Rivera Izam.

⁵⁶ 4C INGENIEROS CONSULTORES. 2007. Ob. cit.

Se presenta a continuación la desagregación realizada, ésta considera algunos supuestos que serán debidamente justificados tanto conceptual como estadísticamente. Se evalúa además la posibilidad de que los datos de CODELCO estén más cercanos al kilómetro 16, lo cual se descarta dada las diferencias muy notorias con el resto de la cuenca.

VI.8.1- Rendimientos medios

Se posee registros medidos por la DGA en la estación fluviométrica río Blanco en Blanco (63 años hidrológicos completos), y registros medidos por Codelco en el km 15-16 (6 años hidrológicos completos).

Se presentan las cuencas de interés. Para efectos de los registros de Codelco se han delimitado las cuencas cuyos puntos de salida son el km 15 y el km 16.

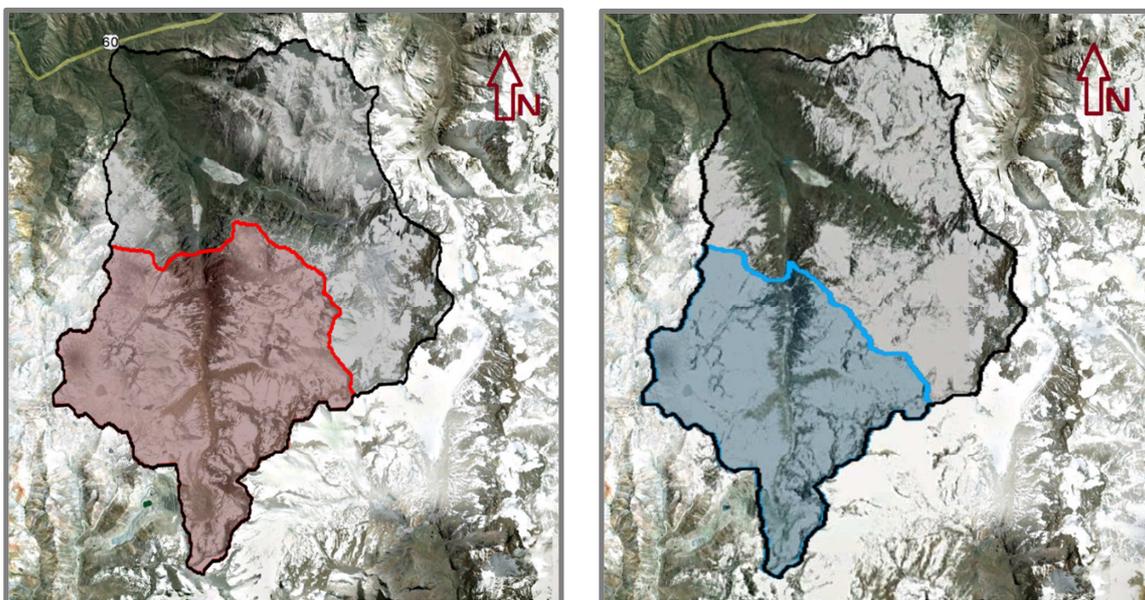


Figura VI.8.1.1: Tres cuencas de Interés, Río Blanco en Blanco (Negro), Río Blanco en km 15 (Rojo), Río Blanco en km 16 (Azul).

Información sobre el área de las cuencas y el porcentaje que representa cada una del total o sea de la cuenca cuyo punto de salida es la estación río Blanco en Blanco de la DGA.

Cuenca	Área (km2)	% Área Total
Río Blanco en Blanco	389	100%
Río Blanco km 15	176	45%
Río Blanco km 16	148	38%

Tabla VI.8.1.1 Cuencas de Interés

Codelco realizó mediciones entre los años 1992 y 2000. Las casillas achurradas representan los datos faltantes. En total se pueden configurar 6 años hidrológicos completos.

Año Calendario	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1992	13.10	4.29	2.38	1.43	2.30	3.18	1.59	1.91	3.49	8.65	12.70	13.66
1993	13.26	8.57	2.14	2.14	2.14	1.91	1.67	1.59	1.59	3.65	10.08	12.15
1994	6.83	4.45	3.57	1.83	1.67	1.83	1.67	2.06	3.41	4.76	11.75	16.67
1995	9.69	4.45	2.70	2.46	2.14	1.67	1.67	1.67	2.06	2.70		
1996											2.54	2.38
1997	2.70	2.30	1.98	1.67	1.59	1.83	1.83	2.06	2.70	3.18	5.72	5.72
1998	25.56	7.54	4.13	2.62	2.54	2.22	1.75	1.43	1.51	3.10	4.05	4.84
1999	4.05	3.49	2.46	1.75	1.59	1.43	1.51	1.75	2.46	3.41	9.45	9.45
2000	6.03	3.10	2.06	4.29	1.75	1.83	2.14	2.30	2.30	5.56	8.10	

Tabla VI.8.1.2 Caudales Medidos por Codelco (Régimen Natural) en km 15-16 (En m³/s)

Se presentan los 6 años hidrológicos completos para los registros medidos por Codelco en el km 15-16. Además el período común correspondiente a la serie mensual de la estación DGA, río Blanco en Blanco.

Año Hidrológico Km 15-16	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1991 1992												
1992 1993	1.43	2.30	3.18	1.59	1.91	3.49	8.65	12.70	13.66	13.26	8.57	2.14
1993 1994	2.14	2.14	1.91	1.67	1.59	1.59	3.65	10.08	12.15	6.83	4.45	3.57
1994 1995	1.83	1.67	1.83	1.67	2.06	3.41	4.76	11.75	16.67	9.69	4.45	2.70
1995 1996												
1996 1997												
1997 1998	1.67	1.59	1.83	1.83	2.06	2.70	3.18	5.72	5.72	25.56	7.54	4.13
1998 1999	2.62	2.54	2.22	1.75	1.43	1.51	3.10	4.05	4.84	4.05	3.49	2.46
1999 2000	1.75	1.59	1.43	1.51	1.75	2.46	3.41	9.45	9.45	6.03	3.10	2.06
2000 2001												

Tabla VI.8.1.3 Caudales Años Hidrológicos comunes, Codelco km 15-16 (en m³/s)

Año Hidrológico Estación Blanco		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1991	1992												
1992	1993	4.34	3.74	4.06	3.55	3.46	4.60	9.89	16.52	22.76	23.59	16.70	11.04
1993	1994	5.74	6.15	3.75	3.22	3.12	4.22	5.14	12.89	19.89	18.10	10.17	8.33
1994	1995	3.51	2.87	2.80	2.66	3.63	3.66	5.90	16.32	24.48	16.16	9.88	6.35
1995	1996												
1996	1997												
1997	1998	2.95	1.67	3.15	2.86	3.79	6.89	7.21	15.89	31.26	35.56	12.35	10.58
1998	1999	7.14	3.91	2.98	2.31	1.97	1.88	4.31	7.75	10.53	9.59	8.86	5.64
1999	2000	2.81	1.85	1.65	1.77	2.12	3.65	6.43	13.03	14.90	12.25	7.82	6.19
2000	2001												

Tabla VI.8.1.4 Caudales Años Hidrológicos comunes, estación Río Blanco en Blanco DGA
(en m³/s)

En la siguiente Tabla VI.8.1.5 se muestra el caudal medio para la serie escogida como histórica aguas abajo en la salida de la cuenca del río blanco en el período total y común y para la sub-cuenca de interés, en el período común.

Serie	Q medio (m3/s)
Río Blanco en Blanco 1953-2011	9.74
Río Blanco en Blanco Período Común	8.32
Río Blanco en km 15-16 Período Común	4.57

Tabla VI.8.1.5 Caudal medio series de interés

Para la serie Río Blanco en Blanco el Factor de rendimiento es:

$$F = \frac{Q_{\text{medio / p.común}}^{\text{Blanco}}}{Q_{\text{medio / 1951-2011}}^{\text{Blanco}}} = 0.85$$

Además se ha calculado, para el período común, el cociente entre el caudal medio de la serie Río Blanco en km 15-16 y Río Blanco en Blanco.

$$F = \frac{Q_{\text{medio / p.común}}^{\text{km15-16}}}{Q_{\text{medio / p.común}}^{\text{Blanco}}} = 0.55$$

Se presentan los rendimientos medios, como caudal por unidad de área, en las cuencas de interés, se ha considerado la posibilidad de que los registros de Codelco correspondan al Km15 o al Km 16. Queda claro que corresponde más al km 15 que al 16, por la mayor

proximidad a la cuenca total que en términos físicos no es tan divergente de la cuenca en estudio. Luego se trabajará en adelante con la cuenca cuyo punto de salida es río Blanco en km-15 como se ha supuesto desde un comienzo, o sea, se verifica el supuesto.

Serie	Período	Q medio (m3/s)	Área (km2)	Rendimiento medio estimado (l/s/km2)
Río Blanco en Blanco 1951-2011	1951-2011	9.74	389	25.0
Río Blanco en Blanco Período Común	Periodo Común	8.32	389	21.4
Río Blanco en km 15 Período Común	Periodo Común	4.57	176	25.9
Río Blanco en km 16 Período Común	Periodo Común	4.57	148	30.8

Tabla VI.8.1.6 Caudal medio series de interés

VI.8.2 Período Común

Se ha graficado el caudal mensual adimensional para los 6 años hidrológicos completos en común (Régimen Natural), entre las series Río Blanco en Blanco (DGA) y Río Blanco en Km 15-16 (Codelco).

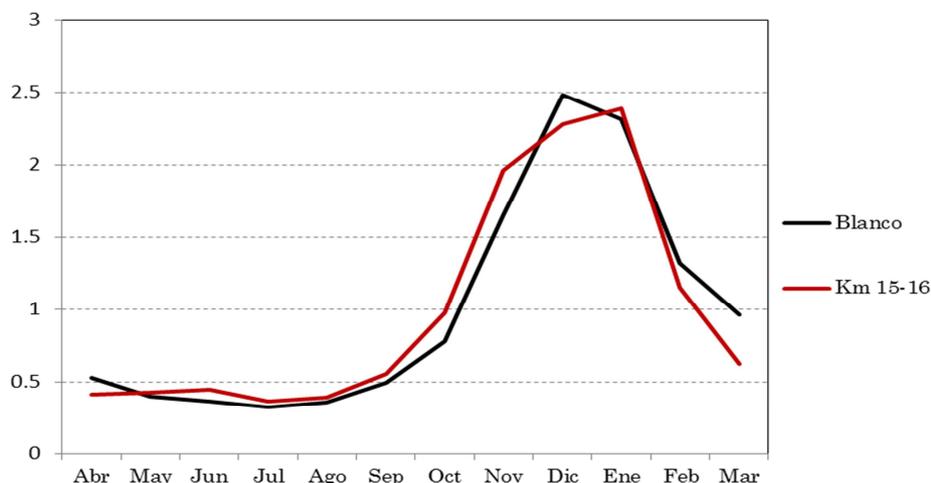


Figura VI.8.2.1 Caudales mensuales adimensionales para período común, Río Blanco en Blanco (Negro) y Río Blanco en Km 15-16 (Rojo).

Además se ha graficado el Coeficiente de Variación, estimado como el cociente entre la desviación estándar y el promedio, para cada mes en el período común de las 2 series de interés.

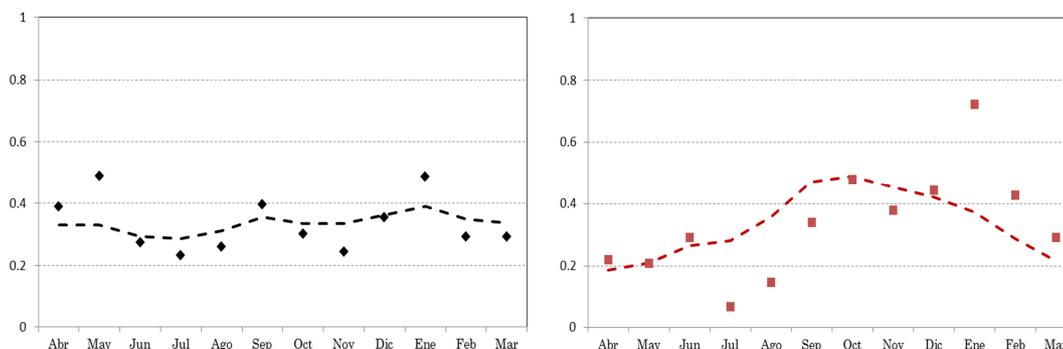


Figura VI.8.2.2 Coeficiente de Variación, Río Blanco en Blanco (Negro) y Río Blanco en Km 15-16 (Rojo).

VI.8.3- Estructura Probabilística

Se graficaron las curvas de frecuencia acumulada para caudales mensuales en los 6 años hidrológicos en común entre las series Río Blanco en Blanco y Río Blanco en km 15-16. Los caudales mensuales se han estandarizado con el caudal medio y la desviación estándar de cada mes, para cada una de las dos series en el período común, esto para que las curvas de frecuencia acumulada sean comparables. La probabilidad empírica de tener valores menores al observado o probabilidad de no excedencia se ha calculado con Weibull⁵⁷.

La curva de frecuencias empíricas acumuladas es una curva en la cual se grafica la variable en función de la probabilidad empírica de tener valores menores al valor observado, llamado también probabilidad de no excedencia. Normalmente se grafica la variable en la abscisa y la probabilidad en la ordenada; sin embargo, lo usual en hidrología, es graficar la probabilidad en la abscisa. La probabilidad de no excedencia asociada a cada valor de la muestra, ordenados en orden creciente, se define de la siguiente manera:

$$Prob(X \leq x_j) = F(x_j) = \frac{j-a}{n+b}$$

Para el caso de Weibull $a=0$ y $b=1$.

⁵⁷ VARAS, EDUARDO Y BOIS, PHILIPPE. Ob.cit.

A continuación en la Figura VI.8.3.1 y la Figura VI.8.3.2, se presenta la distribución de frecuencias acumulada para el período común, entre los registros aguas abajo y en la sub-cuenca, estandarizados para poder comparar. Se aprecia una distribución muy similar, lo cual ratifica el hecho de que es una cuenca bastante homogénea, por la gran cantidad de área ubicada a gran altura, por sobre la línea promedio de nieves.

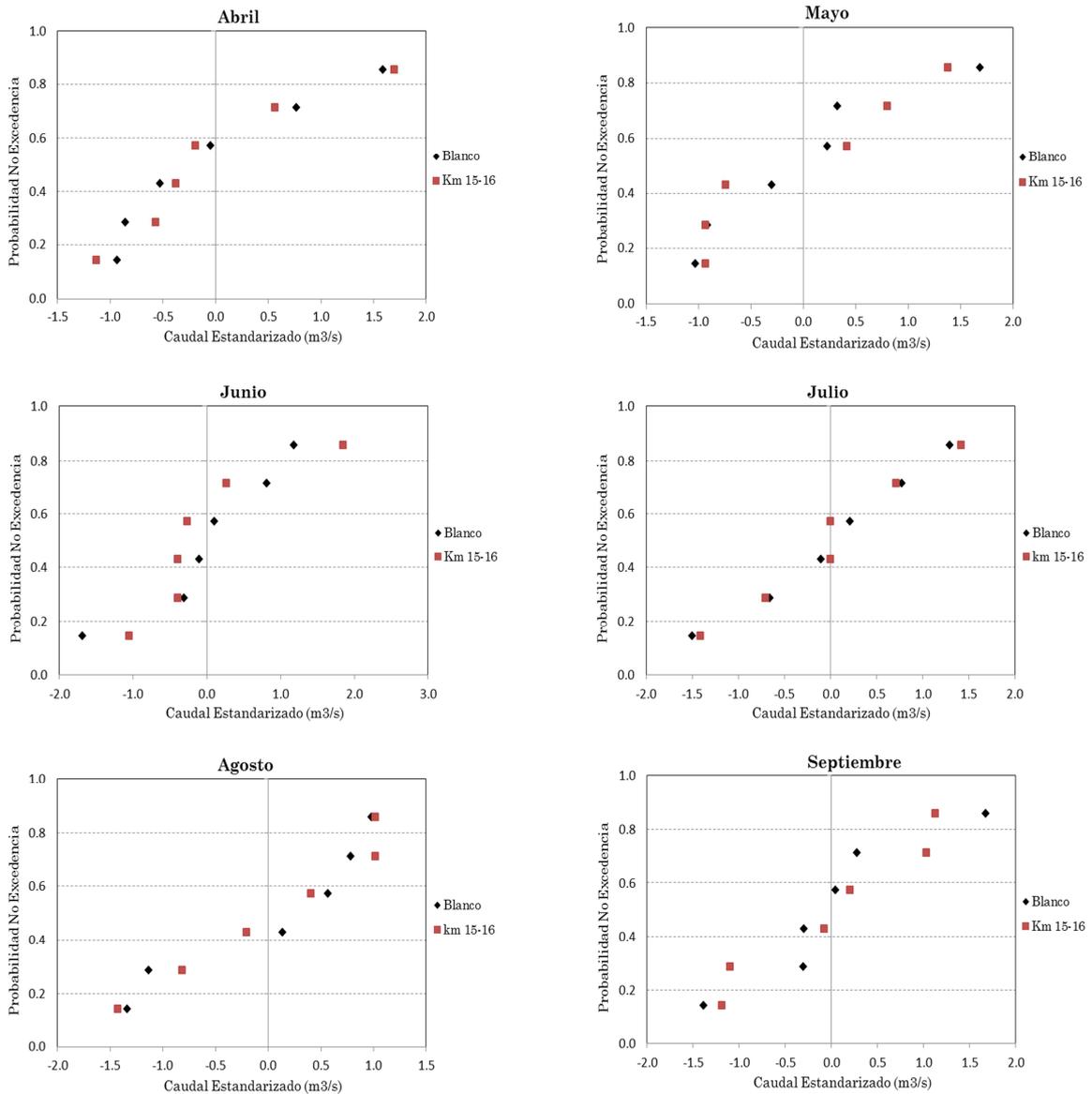


Figura VI.8.3.1 Curvas de Frecuencia acumulada para caudales mensuales Abril a Septiembre

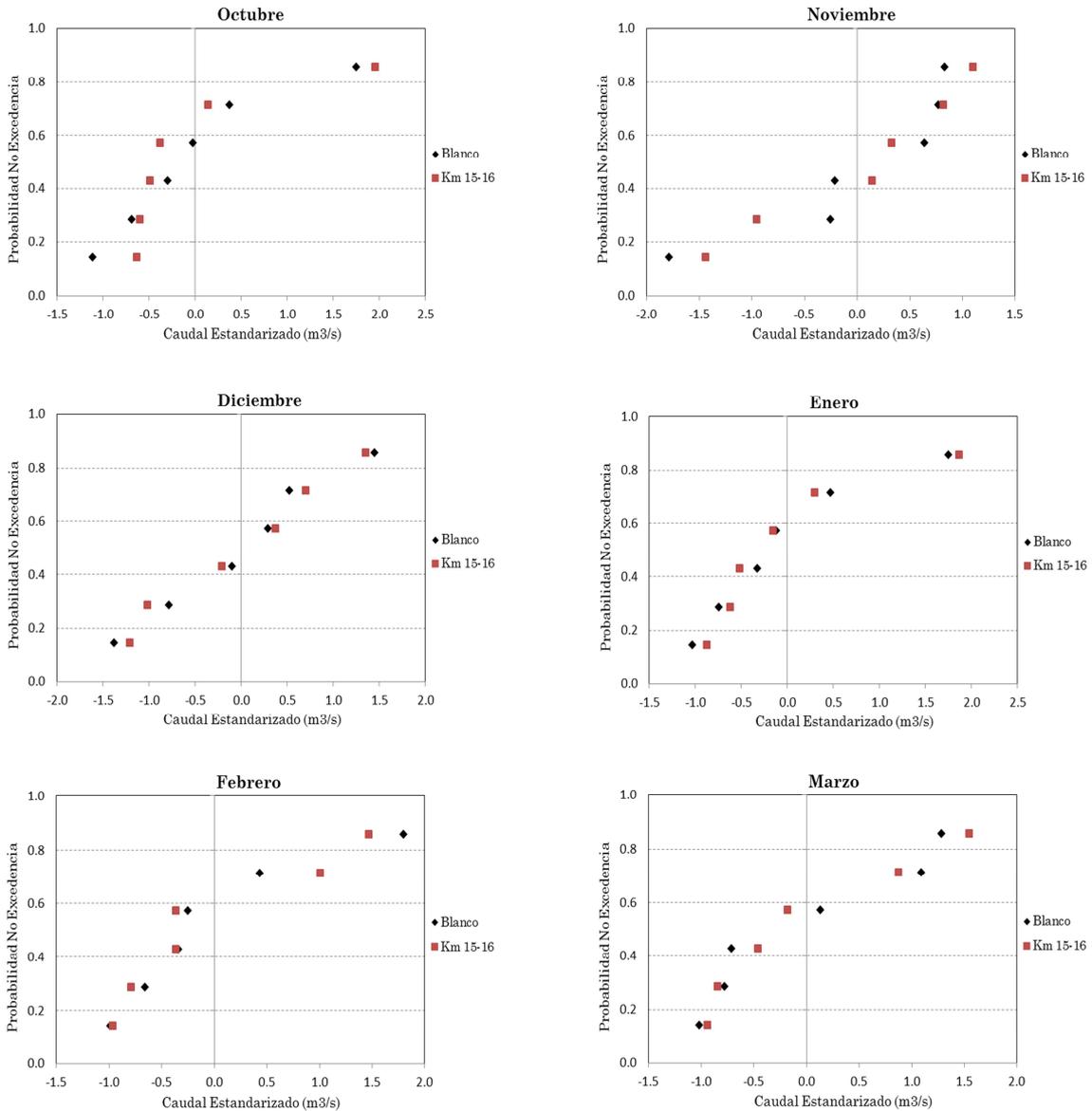


Figura VI.8.3.2 Curvas de Frecuencia acumulada para caudales mensuales Octubre a Marzo

Se observa gráficamente una estructura de probabilidad prácticamente similar a Blanco en río Blanco, estación DGA, lo cual permite reproducir esta estructura en el kilómetro 15, lugar donde se han realizado mediciones por CODELCO, y se emplazará el muro del embalse.

VI.8.4- Estructura de Dependencia

Dada la baja cantidad de datos ($n=6$), hay una sensibilidad alta frente a valores “extraños”. Se presenta una tabla donde se destacan 3 valores de caudales mensuales registrados por Codelco en río Blanco km 15-16. Al calcular de nuevo la auto correlación sin estos valores, se obtiene como resultado uno mucho más suave.

Año Hidrológico Km 15-16		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1991	1992												
1992	1993	1.43	2.30	3.18	1.59	1.91	3.49	8.65	12.70	13.66	13.26	8.57	2.14
1993	1994	2.14	2.14	1.91	1.67	1.59	1.59	3.65	10.08	12.15	6.83	4.45	3.57
1994	1995	1.83	1.67	1.83	1.67	2.06	3.41	4.76	11.75	16.67	9.69	4.45	2.70
1995	1996												
1996	1997												
1997	1998	1.67	1.59	1.83	1.83	2.06	2.70	3.18	5.72	5.72	25.56	7.54	4.13
1998	1999	2.62	2.54	2.22	1.75	1.43	1.51	3.10	4.05	4.84	4.05	3.49	2.46
1999	2000	1.75	1.59	1.43	1.51	1.75	2.46	3.41	9.45	9.45	6.03	3.10	2.06
2000	2001												

Figura VI.8.4.1 Serie 6 años hidrológicos completos Río Blanco en km 15-16. En amarillo caudales que al removerlos suavizan la auto correlación.

Respecto a la auto-correlación, se presenta la auto correlación de orden 1 y 2 para la serie río Blanco en Km 15-16 registrada por Codelco (Régimen Natural). Se presentan 2 gráficos, el primero con todos los datos medidos para los 6 años hidrológicos en común y el otro para el mismo período sin considerar los 4 datos “extraños”.

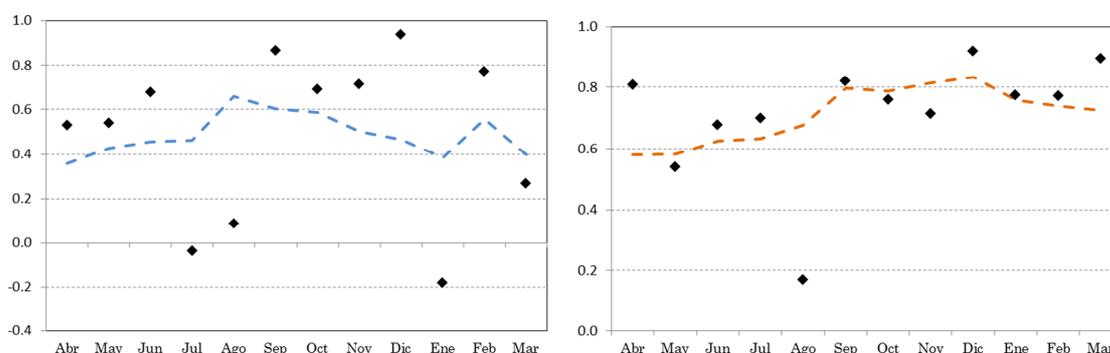


Figura VI.8.4.2 Auto correlación de orden 1 serie río Blanco en Km 15-16 (Línea punteada azul corresponde a media móvil con $n=5$). Nuevo Auto correlación de orden 1 serie río Blanco en Km 15-16 (Línea punteada naranja corresponde a media móvil con $n=5$)

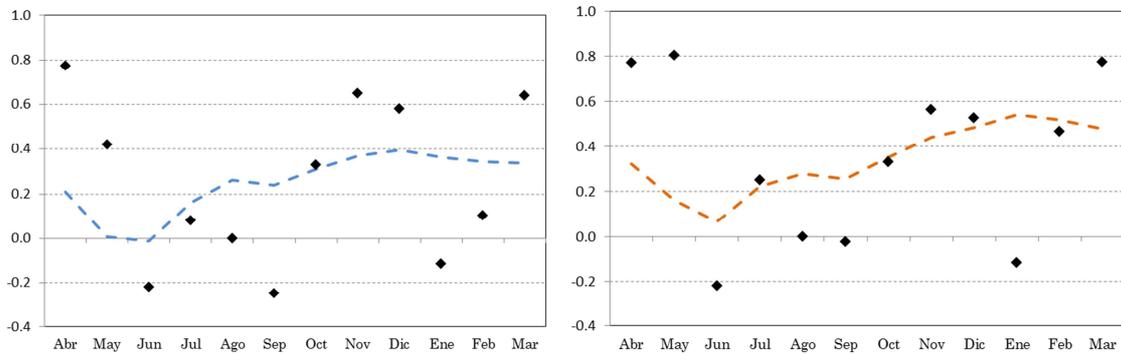


Figura VI.8.4.3 Auto correlación de orden 2 serie río Blanco en Km 15-16 (Línea punteada azul corresponde a media móvil con n=5). Nuevo Auto correlación de orden 2 serie río Blanco en Km 15-16 (Línea punteada naranja corresponde a media móvil con n=5)

Además se presenta la auto correlación de orden 1 y 2 para la serie río Blanco en Blanco registrada por la DGA para el período Común (Régimen Natural).

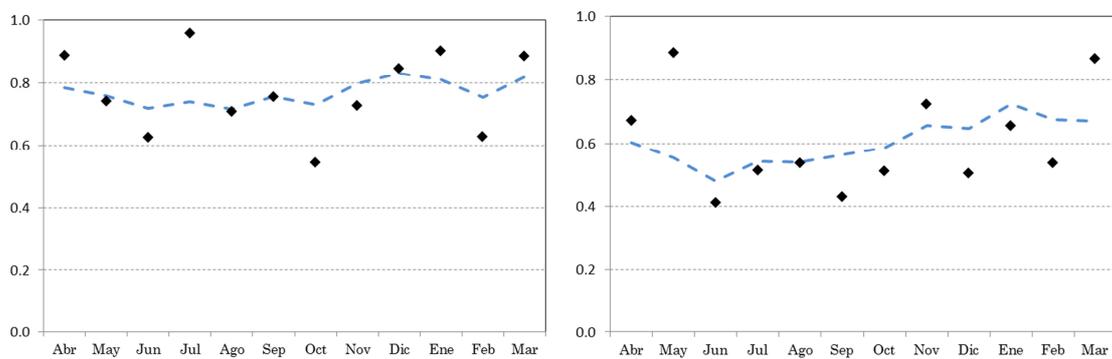


Figura VI.8.4.4 Auto correlación orden 1 serie río Blanco en Blanco (Línea punteada azul corresponde a media móvil con n=5). Auto correlación de orden 2 serie río Blanco en Blanco (Línea punteada azul corresponde a media móvil con n=5)

VII.- GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS

VII.1 Discusión

Para efectos de generar series futuras a 40 años, se puede recurrir a diversos enfoques hidrológicos. A grandes rasgos existen modelos estadísticos que replican la estructura probabilística de la muestra (registros históricos) y otros modelos de base física, calibrados con la muestra pero en los cuales se proyectan parámetros físicos. Éstos últimos son los más utilizados cuando se posee información física de la cuenca y cuando se quiere proyectar cambio climático. Dado que se cuenta con un extenso registro de 62 años en un período de 100 años para el río Blanco y considerando el alcance de 40 años junto con el objetivo de realizar simulaciones y evaluar económicamente las medidas, no se considerará la utilización de un modelo de base física. En efecto, el cálculo del indicador económico de relevancia, el VAN, considera la tasa de interés, que para este estudio será del 10%, la cual hace prácticamente cero los flujos del año 40. Los flujos importantes de los próximos hasta el año 20, y son perfectamente reproducibles con la estructura probabilística y de dependencia de la muestra, pues se cuenta con un N significativo. Por esta razón se considerará la utilización de un modelo auto-regresivo periódico de orden 1 para ciertos meses, un PAR (1) y un modelo auto-regresivo periódico de orden 2 para los demás meses, un PAR (2), que con capaces de generar series sintéticas futuras con las propiedades estadísticas y de dependencia de la serie.

El procedimiento llevado a cabo, para ser riguroso, es el siguiente:

- Verificar se la serie es normal (Test gráfico y Chi-Cuadrado)
- Encontrar el orden del modelo (AIC)
- Calcular los parámetros
- Verificar la estacionariedad de los parámetros
- Verificar la independencia y normalidad de los residuos
- Generar series aleatorias que repliquen la estructura probabilística y de dependencia de la serie histórica, en Río Blanco justo en el muro del embalse proyectado.

El tema de la Normalidad de la serie se apreció en el capítulo VI, donde se vio el ajuste a una distribución Gamma, en el apéndice

VII.2 Modelo Auto-regresivo

Como se ha mencionado, las series mensuales trabajadas corresponden a series periódicas. En efecto el movimiento de traslación terrestre genera, en la latitud de este

estudio, procesos que se repiten año a años, si bien no en el monto de los caudales, sí en su estructura. Se han ajustado modelos PAR (1) y (2) según sea el caso

El modelo a utilizar es un Auto-regresivo Periódico, de orden 1, PAR (1). Este modelo explica la variable en función de ella misma desfasada en un instante de tiempo (Por ejemplo caudal de mayo en función del caudal de abril) y un término aleatorio, independiente y normal, cuya varianza, al igual que la correlación son estimadas mediante el método de los momentos (MOME). El modelo es el siguiente.

$$Z_{t,m} = \phi_{1,m} Z_{t-1,m} + \varepsilon_{t,m}$$

Donde el subíndice m representa el mes. El parámetro que acompaña el término auto-regresivo será calculado para cada mes, como también la desviación del residuo. Éstos son estimados en base al método de los momentos y se calculan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \rho_1 = r_1 \\ \sigma_\varepsilon^2 &= (1 - \phi_1^2) \cdot \sigma_z^2 \end{aligned}$$

El modelo auto-regresivo lineal planteado supone comportamiento normal estándar de la variable aleatoria, razón por la cual se ha normalizado, antes de la aplicación del modelo, cada serie mensual. Además, se debe estandarizar la serie $y_{t,m}$, restando el promedio mensual y dividiendo por la desviación estándar mensual:

$$Z_{t,m} = \frac{y_{t,m} - \bar{y}_{t,m}}{S_{t,m}}$$

De esta forma la variable aleatoria $Z_{t,m}$ distribuye como una normal estándar y es posible construir el modelo PAR (1) propuesto de forma adecuada.

Ya se mostró en el capítulo del marco teórico el mismo desarrollo para el modelo de orden dos. No se mostrará acá. Como las series mensuales no siguen una distribución Normal, sino que se ajustan todas razonablemente (test Chi-Cuadrado) a una función Gamma el procedimiento para poder aplicar el modelo es el siguiente:

- Se asume distribución Gamma para cada mes
- Se pasa a una distribución Normal Estándar
- Se aplican el Modelo Periódico Auto-regresivo PAR(1) y PAR(2)
- Se Vuelve a la Variable Original

Se presenta a continuación el orden de cada uno de los modelos PAR para cada mes en la Tabla VII.2.1:

Mes	Orden
Abril	AR (1)
Mayo	AR (2)
Junio	AR (1)
Julio	AR (1)
Agosto	AR (2)
Septiembre	AR (2)
Octubre	AR (2)
Noviembre	AR (2)
Diciembre	AR (2)
Enero	AR (2)
Febrero	AR (1)
Marzo	AR (2)

Tabla VII.2.1 Orden del modelo por mes

Se estimaron los parámetros mensuales del modelo (Promedio y Desviación del residuo y Coeficiente Auto-regresivo de Orden 1), con lo cual se ha podido generar series futuras de 40 años con resolución mensual. Se han utilizado las correlaciones de primer y segundo orden suavizadas. Para construir los modelos el promedio de cada serie ha correspondido al promedio de la serie en el kilómetro 15, amplificado en la proporción del período común, por mes. El coeficiente de variación se ha utilizado luego de suavizar mediante medias móviles con $n=5$.

Se presentan los parámetros, luego de la metodología ya explicada, de cada modelo, por mes, en la Tabla VII.2.2.

Parámetro / mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Phi 1	0,78	0,44	0,74	0,74	1,25	0,57	0,55	0,60	0,54	1,07	0,71	1,05
Phi 2		0,29			-0,45	0,26	0,30	0,18	0,25	-0,30		-0,21

Tabla VII.2.2. Parámetros mensuales para los modelos PAR (1) y PAR (2)

Se cuenta con los promedios y coeficientes de variación para cada mes. Esto permite además tener la distribución de probabilidades Gamma asociada a cada mes.⁵⁸

⁵⁸ RIVERA, PEDRO. 2011. *Apuntes regulación del agua: conceptos y casos de estudio*. Apuntes de clases curso CI5107. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Universidad de Chile.

Si μ y σ son la media y la σ y Cv el coeficiente de variación definido como el cociente entre σ y μ , entonces los parámetros α y β de la distribución Gamma se estiman como sigue:

$$\alpha = \frac{1}{Cv^2}$$

$$\beta = \frac{\mu}{\alpha}$$

Si se considera que los valores efectivamente medidos, q_s , en el punto de salida de la cuenca (Muro del Embalse, mediciones Codelco Km 15) en el mes s , distribuyen Gamma con parámetros α_s y β_s , entonces el caudal normalizado de q_s , Nq_s , se estima como:

$$Nq_s = \Phi^{-1}(G(q_s; \alpha_s, \beta_s))$$

En que G es la función de probabilidad acumulada Gamma de dos parámetros y Φ^{-1} es la función de probabilidad inversa normal estandarizada. Este procedimiento transforma un valor que distribuye Gamma en uno que distribuye Normal de promedio 0 y desviación 1. El procedimiento inverso, o sea transformar un valor que distribuye normal estandarizado a un valor Gamma de parámetros conocidos, se puede obtener directamente de la ecuación de normalización y se estima como sigue, en que G^{-1} es la función inversa de probabilidad acumulada Gamma de dos parámetros.

$$q_s = G^{-1}(Nq_s)$$

Se utilizó la auto correlación de orden 1 y 2, ya presentados en el capítulo anterior para la serie Río Blanco en Blanco, en la parte de la desagregación espacial. Dado que en el período común se pudo mantener promedio adimensional, coeficiente de variación, estructura de probabilidad y auto correlación de órdenes 1 y 2.

En resumen, se demostró gráfica y teóricamente que la sub-cuenca aportante al embalse contiene propiedades bastante similares a la cuenca del Río Blanco, esto es, se observan características similares para el período común (adimensional), se mantiene la estructura probabilística y además la auto correlación es bastante similar, lo cual permite obtener los parámetros del modelo con el cual se generan las series sintéticas para 40 años en la sub-cuenca aportante al embalse, que es lo fundamental para este trabajo. Se trabajó con variables normales, traídas desde la distribución Gamma que representa la estructura probabilística, para luego de aplicar el modelo PAR (1) - PAR (2), volver con la función inversa antes explicada.

Se muestra a continuación una serie mensual para un año cualquiera, generada por el modelo PAR (1) - PAR (2). En negro se observa la serie generada y en gris la serie desagregada espacialmente para lograr obtener el caudal en el muro del Embalse. A modo de ejemplo.

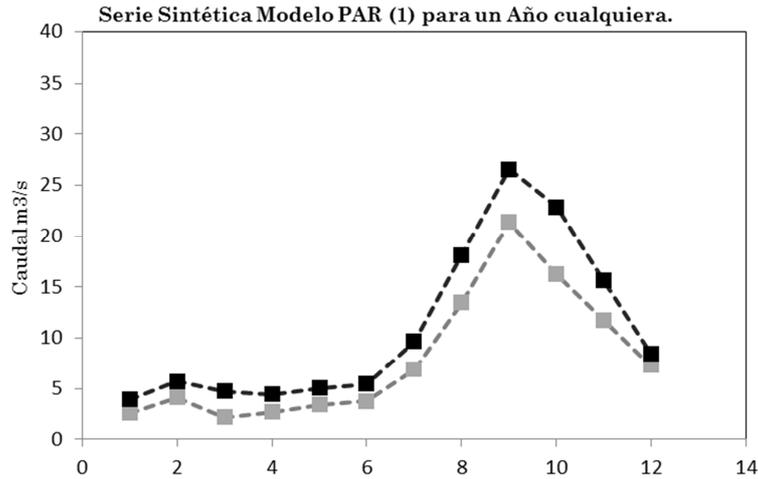


Figura VII.2.1 Serie mensual sintética para un año cualquiera. En gris serie desagregada espacialmente.

El modelo permite generar series de 40 años, las cuales, luego de las correcciones aplicadas, replican de forma razonable la estructura estadística y de dependencia de la serie histórica de 50 años lo cual se puede verificar en la Tabla VII.2.2. Para efectos de simulaciones tipo Montecarlo se simularán N series de 40 años. Se presenta a continuación un ejemplo de serie de 40 años generada en base al modelo PAR (1) y PAR (2).

Año Hidrológico		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
2011	2012	2.6	4.1	2.2	2.7	3.4	3.8	6.9	13.5	21.4	16.2	11.8	7.3
2012	2013	2.2	2.0	1.6	2.1	1.9	3.2	5.9	10.8	14.7	10.4	7.2	6.7
2013	2014	1.7	1.3	0.8	1.2	1.0	2.0	3.6	7.1	9.5	9.5	8.7	7.1
2014	2015	3.4	1.6	1.1	1.4	1.2	2.4	5.4	12.2	15.8	12.7	9.0	5.9
2015	2016	3.4	2.7	1.7	1.9	2.2	3.3	3.8	7.6	10.4	8.4	6.9	5.4
2016	2017	1.7	1.2	0.7	1.0	1.8	2.3	3.5	6.1	9.0	6.8	6.0	6.0
2017	2018	1.7	1.9	1.6	2.1	3.1	4.2	7.6	17.0	29.7	23.5	15.9	11.0
2018	2019	2.7	2.7	1.2	1.8	2.4	3.3	5.6	12.7	24.0	22.1	14.8	8.7
2019	2020	3.9	2.5	2.2	2.4	3.0	3.7	6.5	14.6	27.7	22.4	15.6	10.5
2020	2021	3.1	2.1	1.2	1.8	1.9	2.7	4.8	11.0	14.3	11.8	9.0	6.3
2021	2022	1.6	2.2	1.5	1.7	1.7	2.5	5.5	12.0	21.4	16.8	11.1	8.3

Año Hidrológico		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
2022	2023	3.9	2.9	2.2	2.4	2.6	4.0	6.1	10.9	15.8	12.8	8.7	6.8
2023	2024	2.4	2.1	1.4	1.9	1.9	3.3	6.0	10.8	14.8	16.1	12.4	9.7
2024	2025	3.4	3.2	2.1	2.8	3.9	4.5	6.1	12.1	18.2	17.1	11.7	8.9
2025	2026	4.6	3.1	1.9	2.1	2.5	3.7	6.3	13.1	25.7	21.9	16.1	10.8
2026	2027	3.0	2.6	1.8	2.1	3.0	4.1	5.2	14.0	24.8	17.8	11.5	7.7
2027	2028	2.9	1.9	1.5	2.1	2.9	3.5	4.8	12.7	23.3	21.0	14.1	8.4
2028	2029	3.5	1.9	1.4	2.0	2.2	3.3	5.6	14.7	26.9	18.6	12.3	8.8
2029	2030	3.0	1.6	1.6	2.2	2.6	3.4	6.5	16.5	26.5	22.1	13.7	7.8
2030	2031	2.5	3.2	2.2	2.6	2.5	3.2	4.5	8.4	12.0	10.5	9.4	6.4
2031	2032	1.9	1.9	1.0	1.1	1.3	2.6	5.0	9.8	11.6	9.7	7.7	7.0
2032	2033	2.3	1.4	0.9	1.5	2.0	2.6	4.5	13.3	24.2	15.0	10.0	7.2
2033	2034	3.0	2.0	1.3	2.0	2.0	1.8	2.5	4.9	6.4	6.1	5.8	5.0
2034	2035	2.4	1.5	1.1	1.6	1.7	3.2	4.0	5.6	6.8	6.3	6.3	5.8
2035	2036	2.2	2.0	1.5	2.0	2.2	4.3	5.3	11.4	19.4	17.8	12.9	7.1
2036	2037	4.1	4.1	2.6	3.0	2.6	3.7	6.5	9.7	12.9	9.8	8.0	5.8
2037	2038	3.4	2.4	1.8	2.3	2.8	3.3	7.7	16.4	32.8	22.6	14.8	7.6
2038	2039	2.5	2.6	1.3	2.1	2.7	3.4	5.3	14.4	23.6	16.6	11.6	8.1
2039	2040	2.9	2.6	1.8	2.1	2.8	3.9	6.9	15.6	29.0	22.3	14.8	10.7
2040	2041	3.7	1.9	1.1	1.7	1.8	3.0	5.3	9.6	13.8	13.3	9.7	7.0
2041	2042	2.8	1.4	1.0	1.4	2.2	3.2	6.2	12.6	16.1	15.6	10.1	7.9
2042	2043	2.5	1.4	0.9	1.6	2.5	4.2	6.8	14.7	33.1	23.2	13.1	9.5
2043	2044	3.3	2.1	1.7	2.0	2.5	3.4	7.0	21.3	62.0	59.8	33.5	19.0
2044	2045	5.2	3.7	2.3	2.8	3.1	4.5	5.7	14.5	27.5	28.3	16.7	10.0
2045	2046	3.5	1.6	1.1	1.6	1.4	1.5	2.4	4.3	5.8	5.7	5.3	4.4
2046	2047	4.2	2.6	1.2	1.6	2.3	2.7	6.1	11.9	20.0	16.4	12.2	9.5
2047	2048	3.8	3.0	1.8	2.4	2.6	3.4	5.7	14.9	28.3	19.8	13.7	8.8
2048	2049	3.2	2.3	1.7	2.2	2.4	3.0	4.9	10.8	12.7	15.7	11.5	8.3
2049	2050	2.8	1.5	1.0	1.5	1.5	2.3	3.2	7.6	12.4	11.0	8.8	6.8

Tabla VII.2.3 Ejemplo de Serie Sintética para 40 años Caudales mensuales río Blanco en Estación Blanco

El modelo de generación de series sintéticas ha mostrado ser eficiente en el sentido de replicar el promedio, desviación, la estructura probabilística y la dependencia, de la serie histórica original.

VIII.- MODELO EMBALSE

VIII.1 Justificación

El proyecto TSA-Codelco considera en principio el traslado íntegro de los derechos permanentes en los meses de deshielo, pero debido a la operación de las centrales hidroeléctricas de la cuenca, para los meses de menores volúmenes no habría posibilidad de traslado, lo cual hace necesario el intercambio (a tasas considerando valor esperado) de derechos permanentes por eventuales del Embalse Puntilla del Viento, los cuales serían trasladados hacia la cuenca del río Blanco y la única posibilidad de gestión del agua estaría dada por la construcción de un Embalse, antes de la captación de la central hidroeléctrica Blanco. En este Embalse Codelco acumularía los derechos permanentes trasladados íntegramente y los derechos eventuales

VIII.2 Modelo

Se ha construido un modelo para representar la acumulación de agua en la cuenca del río Blanco, por sobre la captación de la central hidroeléctrica Aconcagua S.A. (cota 2080 msnm). El objetivo principal del modelo es el abastecimiento de un caudal determinado para la expansión de la mina Andina de Codelco (Expansión Andina 244), en principio 1 m³/s (sumado a los 0.7 m³/s, extraídos actualmente).

El modelo considera un volumen de agua entrante al embalse, parte del cual debe ser utilizado para cumplir compromisos aguas abajo (Central y derechos de aprovechamiento); el resto corresponderá a los derechos susceptibles de embalsar por parte de Codelco. Estos derechos corresponden a un vector con componentes mensuales de derechos permanentes y eventuales, trasladados desde aguas abajo por el proyecto TSA-Codelco. El modelo debe considerar la acumulación de lo que efectivamente se puede acumular. En principio se plantea una ecuación de balance:

$$S_t = S_{t-1} + V_{E,t} - V_{CH,t} - V_{CA,t} - Evap_t - Inf_t + P_t - E_t$$

Donde:

S_t : Volumen embalse inicio periodo t

S_{t-1} : Volumen embalse inicio del periodo t-1

$V_{E,t}$: Volumen de agua entrante al embalse periodo t

$V_{CH,t}$: Volumen de agua a entrega a la central periodo t

$V_{CA,t}$: Volumen de agua comprometido aguas abajo (Derechos, prorrateados) periodo t

$Evap_t$: Evaporación periodo t

Inf_t: Infiltración periodo t

Pt: Prestamos de la central periodo t

Et: Entregas a la central periodo t

Los compromisos aguas abajo corresponden al agua que no se puede apropiar Codelco. No siempre serán los derechos que posee mensuales, pues hay situaciones de prorrateo. En un comienzo para las simulaciones anuales del próximo capítulo se supondrá que sólo se debe respetar los caudales captados por la central. Existe otro tema que debe ser evaluado, que son los derechos posee la central y no ocupa, éstos están incluidos en la variable $V_{CA,t}$ que en este caso se supondrán iguales a cero. Esto último es importante recalcar, la variable $V_{CH,t}$ corresponde a lo que captaría la central dado el caudal del río, que es distinto a los derechos que posee la central.

Entonces hay un vector de derechos mensuales que Codelco puede embalsar y su uso efectivo depende de la hidrología. Esto está dentro de la variable $V_{CA,t}$. Se debe recordar que los derechos aguas arriba de Codelco son de tipo permanente y eventual. Los derechos que ya poseen, más los derechos permanentes intercambiados con la sanitaria y trasladados íntegramente y los derechos eventuales trasladados, producto del intercambio Permanentes-Eventuales con Puntilla del Viento.

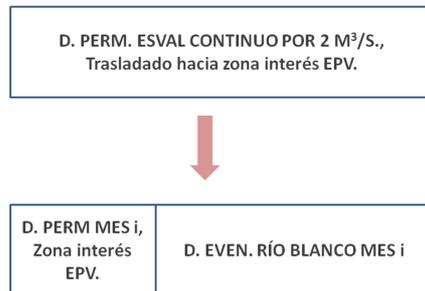


Figura VIII.2.1 Esquema traslado derechos hasta embalse

Es importante dejar en claro que los derechos de aprovechamiento deberán ser debidamente justificados. En este trabajo sólo interesará el excedente por sobre lo que capta la central Aconcagua. Además, dado que la cuenca aportante a la central es 32 km² más grande que la cuenca cuyo punto de salida es el embalse (Ver capítulo VI), el volumen que se debe dejar pasar corresponde a la diferencia entre lo que generaría la central en condiciones normales y los aportes provenientes de la parte de la cuenca de la central que no está dentro de la cuenca del embalse.

$$V_{CH,t} = G_{CH} - A_C$$

Aquí G_{CH} corresponde al volumen que captaría la central Aconcagua en una condición sin embalse. Esto debe ser mantenido pues no se puede afectar su funcionamiento, su factor de planta, a no ser que se permitan los traspasos, debidamente justificados con derechos de aprovechamiento consuntivos aguas debajo de la cadena de centrales en caso de Préstamo (de la Central Aconcagua al Embalse) o Entregas del Embalse a la central para mejorar rellenar la capacidad sub-utilizada en meses de menores caudales.

VIII.3 Embalse

El embalse estará situado en la cuenca del río Blanco aguas Arriba de la captación de la central Aconcagua. Esto sería en el km 15-16 de la ruta que sube por el río Blanco hasta la Mina Andina de Codelco.

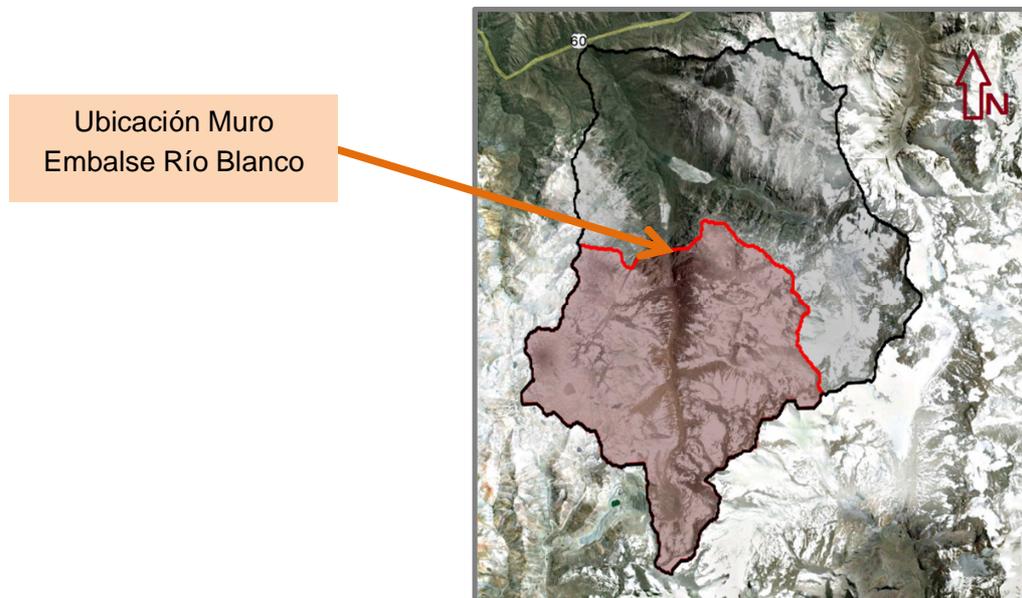


Figura VIII.3.1 Ubicación muro Embalse Río Blanco

VIII.3.1. Curvas Embalse

Cota (msnm)	Área (m ²)	Altura Muro (m)	Coronamiento (m)	Volumen intermedio (m ³)	Volumen Embalse (MM de m ³)
2175	0	0	0	0	0
2200	241342	25	352	6,03	6,03
2225	416082	50	481	8,22	14,25
2250	571045	75	643	12,34	26,59
2275	684930	100	774	15,70	42,29
2300	802176	125	872	18,59	60,88

Tabla VIII.3.1.1 Datos curvas de embalse, obtenidas desde ArcGis

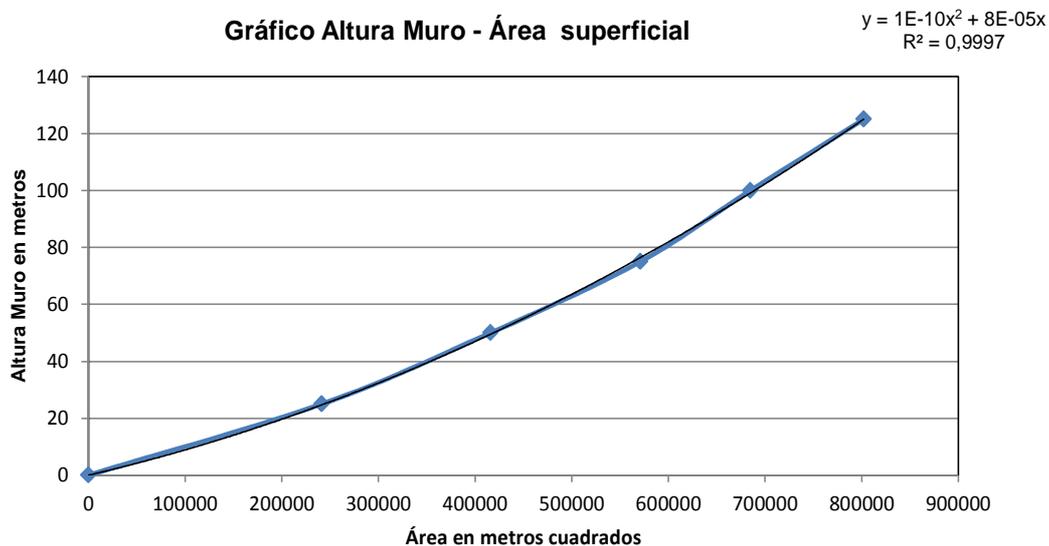


Figura VIII.3.1.1 Curva Altura muro-Área Superficial Embalse

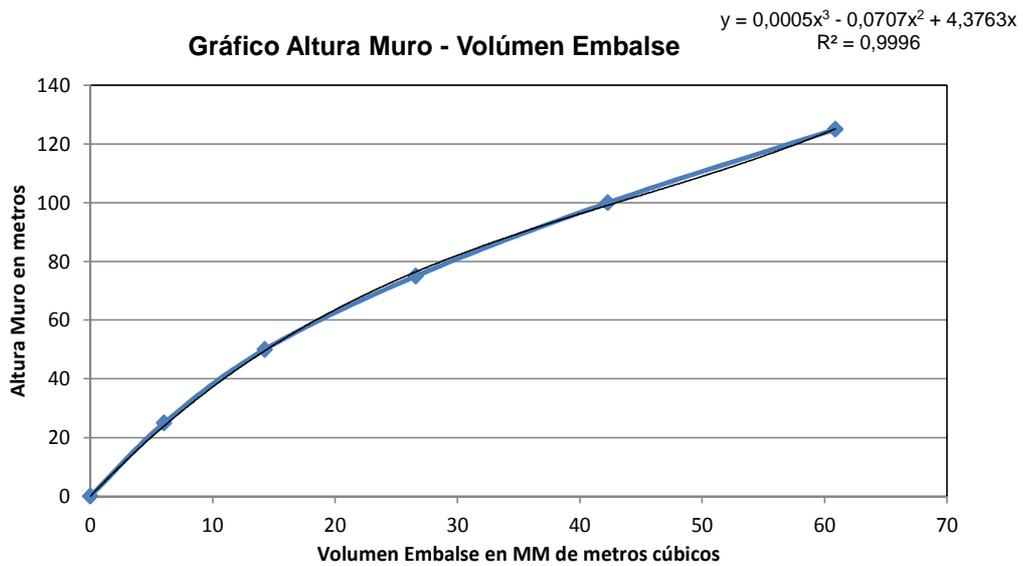


Figura VIII.3.1.2 Curva Altura muro-Volumen Embalse

Funciones ajustadas anteriores muestran las curvas de embalse con funciones ajustadas, para que la ecuación de balance tenga sentido. Con el volumen se conoce la altura que repercute directamente en la generación de energía. Con el volumen de embalse se puede obtener el espejo de agua que repercute directamente en la evaporación.

Se muestran a continuación dos tablas con algunos valores de las curvas o funciones de embalse. Se aprecia claramente que hay a partir de 50-60 Millones de metros cúbico se hace muy alto el muro, esto por las condiciones topográficas del valle.

Volumen (MM de m3)	Altura (m)
0	0
10	37
20	64
30	83
40	97
50	110
60	124

Tabla VIII.3.1.2 Volumen y Altura Embalse

Altura (m)	Área (m2)
0	0
20	181788
40	342638
60	482552
80	601530
100	699570
120	776674

Tabla VIII.3.1.3 Altura y Área Embalse

VIII.3.2. Costos del Embalse

Los costos del embalse han sido calculados en base a experiencias en Chile de tamaños similares, además de las características geométricas del Valle.

Respecto a otros embalses similares se tiene la Tabla VIII.3.2.3 :

Embalse	Altura Muro (m)	Volumen en MM de m ³	Costo en MM US\$	Ancho (m)	Área Inundación (Hás)
Puntilla del Viento	90	85	115	430	450
Chacrillas	102,5	27	65	320	92
El Bato	55	25,5	37	-	117
Corrales	75	50	39	-	-

Tabla VIII.3.2.3 Características embalses de referencia

Respecto a la función de costos ésta se ha supuesto lineal, con coeficiente de posición mayor a cero, o sea no proporcional. Este es un supuesto importante, pero razonable para este trabajo, dado los escenarios. Si se quisiera ser más fino en el cálculo de la función de costos, esto daría para una tesis completa de pregrado. Se presenta la función en el gráfico de la Figura VIII.3.1.2.

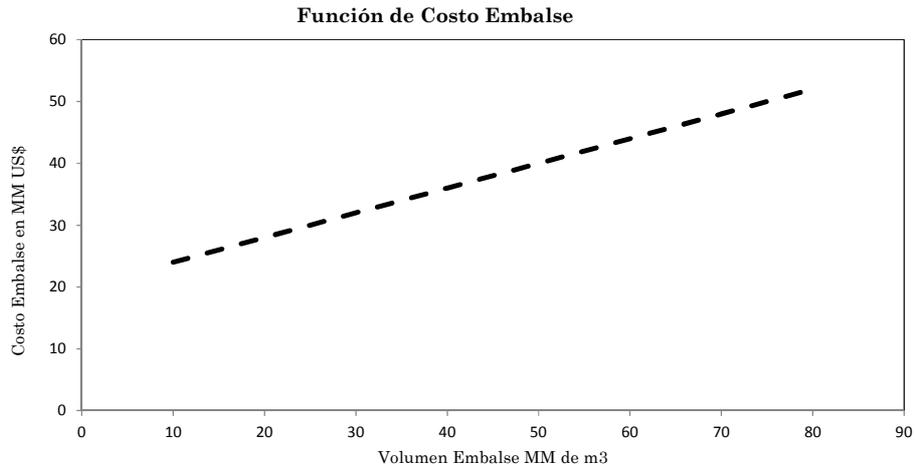


Figura VIII.3.1.2. Función de costo aproximada para el Embalse.

Finalmente para efectos de la Evaluación se consideraron los siguientes costos de embalse para los volúmenes de 30, 40 y 50 Millones de metros cúbicos.

Volumen Embalse (MM de m3)	Costo (Considerando CH) MM US\$
30	75
40	95
50	120

Tabla VIII.3.2.4 Costo Para tres volúmenes de embalse (Aproximado)

VIII.4 Evaporación desde el Embalse

VIII.4.1. Evaporación desde una superficie de agua libre.

La evaporación del agua requiere que las respectivas moléculas adquieran la energía cinética necesaria para que escapen de la superficie de agua. Al adquirir la energía cinética, el agua libera su calor de vaporización (600 al/gr) y por lo tanto la temperatura del agua disminuye. (En el caso de la nieve, el agua está en estado sólido y el escape de las moléculas (vapor de agua) se designa con el nombre de sublimación).

Las moléculas de vapor de agua que escapan pueden chocar con las de aire o condensarse sobre la superficie y por lo tanto algunas de ellas se reincorporaran al agua, se alcanzara un estado de equilibrio en que la presión de las moléculas liberadas se iguala a la presión de vapor del aire en contacto con la superficie del agua. Este equilibrio es un estado de saturación en que existe un proceso continuo de evaporación y

condensación. Solo existirá entonces una evaporación neta cuando el aire en contacto con el agua tiene una presión de vapor inferior a la presión que ejercen las moléculas de agua que escapan al aire, es decir, cuando existe un gradiente favorable de la presión de vapor.

Aunque el principal factor que influye en la tasa de evaporación, es el gradiente de vapor, existen otros elementos que intervienen. Estos elementos pueden clasificarse en: aquellos de origen meteorológicos, que junto con el gradiente de vapor constituyen el poder evaporante de la atmosfera; aquellos dependen de la composición del agua, de la naturaleza de la superficie evaporante y de su aptitud para “alimentar” la evaporación.

VIII.4.2. Evaporación desde una superficie de agua libre.

Diversos factores intervienen en el proceso de evaporación. Aunque, para facilitar la identificación de ellos es necesario distinguirlos separadamente, es necesario tener en cuenta que todos ellos están relacionados entre sí, lo que introduce complicaciones al analizar un caso concreto. Primeramente se identificaran y se explicaran aquellos factores que determinan el poder evaporante de la atmosfera, la tasa de evaporación independientemente del tipo de superficie evaporante. Es decir, a pesar que se está analizando el caso de evaporación de superficies líquidas, los factores meteorológicos que se indican a continuación, también se aplican al caso de evaporación desde el suelo o de la transpiración. Solo cuando se analicen estos procesos, se indicaran los factores que les son propicios.⁵⁹

Año Hidro (mm)	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
2000 2001	149,7	66,6	34	79,4	87,2	95,9	135,8	206	245,7	153,9	145,1	221,3
2001 2002	140,1	70,2	55,7	64,5	75	76	144,1	165,3	105,4	344,3	309,5	267,1
2002 2003	73,4	83,5	58	82	60,5	108,1	126,6	197,8	254,1	325,8	238,5	246,3
2003 2004	127	79,5	47,5	59	92,5	127,3	207,1	247,7	318,2	343	268,1	248,5
2004 2005	99,1	106,4	62,9	34,1	75	105,2	144,9	186,4	310,2	322,1	278	183
2005 2006	141,9	66	26,5	81,3	54,8	109	148,4	252,3	323,5	333,1	232,7	209,9
2006 2007	182,6	145	54	68	93	156	157,4	218,7	313,2	306,7	225,5	229,4
Promedio	130,5	88,2	48,4	66,9	76,9	111,1	152,0	210,6	267,2	304,1	242,5	229,4
Desviación	56,7	41,0	21,1	28,4	30,6	45,6	59,0	80,0	118,9	124,4	98,4	85,1

Tabla VIII.4.2.1 Serie Evaporación mensual Vilcuya

Se presenta una imagen del balance hídrico de 1987 (DGA, Humberto Peña) que permite evaluar cuantitativa y cualitativamente las características de la evaporación en la zona.⁶⁰

⁵⁹ ESPILDROA, BASILIO Y OTROS (1975). *Elementos de hidrología*. Centro de Recursos hidráulicos. Universidad de Chile.

⁶⁰ PEÑA, HUMBERTO Y OTROS (1987). Balance Hídrico de Chile. DGA. MOP

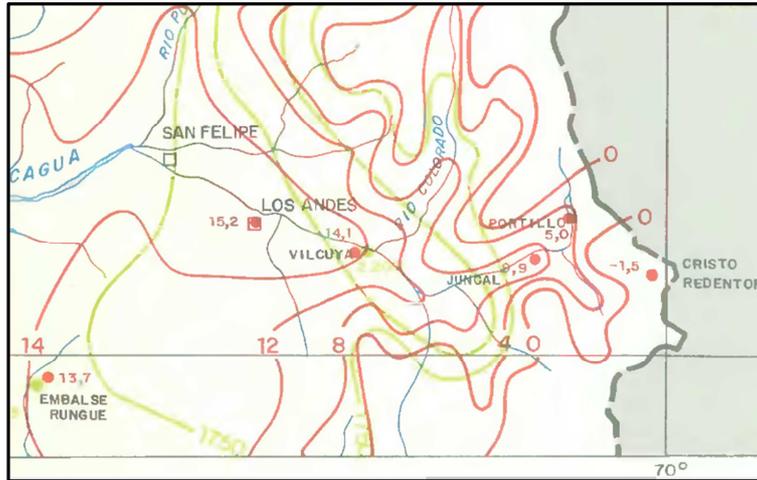


Figura VIII.4.2.1 Curvas evaporación Balance hídrico c1987 DGA

La metodología para subir la evaporación desde Vilcuya 1100 m.s.n.m. a la zona del Embalse en el río Blanco 2250 m.s.n.m., consistió en suponer los mismos valores, dada las isoyetas del Balance Hídrico Nacional de 1987. En el peor de los casos se estaría subestimando la cantidad de agua lo que se compensa con el supuesto de No infiltración además de repercutir en torno al 1%.

VIII.5 Intercambio aguas con central Aconcagua

El intercambio de Aguas con la central Hidroeléctrica Aconcagua S.A. tiene un fundamento clave: Mayor seguridad para CODELCO, sin necesidad de aumentar el tamaño del embalse. De las curvas de embalse se aprecia que, dada la configuración morfológica del valle no se pueden hacer embalses de gran tamaño. Y aumentar el volumen sobre los 60 Millones de metros es muy caro. La alternativa es solicitar préstamos de agua, debidamente justificados con derechos de aprovechamiento de tipo consuntivo y ejercicio permanente aguas debajo de la restitución de la última central.

Para valorar estos préstamos se consideran los siguientes parámetros:

Precio Energía (US\$/MWh)	140
Altura (m)	1200
Eficiencia (%)	80%

Tabla VIII.5.1 Parámetros intercambio Embalse-Aconcagua

Donde se valora en función de la energía asociada que se deja de producir, mediante la ecuación de potencia: $P = \gamma \cdot Q \cdot \Delta H \cdot \eta$.

VIII.5 Generación de Energía a Pie de Presa

El Factor de Planta de la central Blanco es alrededor del 55-60%, en este caso, se dejará pasar una parte del agua que va hacia la central naturalmente. Esto es 176 km² de un total de 208 km², o sea un 85%. Este porcentaje del agua que capta la central Aconcagua, siempre pasará por el embalse. La energía generada es fácil de medir, en este caso como la altura de caída (Dada por la curva Volumen-Área). Se asumirá una eficiencia del 85% y un factor de planta del 65%. Este factor se incrementa un poco respecto al de la central Aconcagua (8-10%) para representar el pago por Potencia Firme, en la Evaluación Económica.

VIII.6 Evaluación Económica

Costos y beneficios a considerar:

- Inversión Embalse y Central a pie de presa
- Costos Operacionales
- Traspasos (Ingreso o Costo) entre Embalse y Generadora Aconcagua
- Ingreso generación de energía a pie de presa
- Gastos en Ingeniería e Imprevistos

Evidentemente esta estructura genera más costos que beneficios. La tarifa implícita que se calcula por el agua, o sea la que compensa los “costos” es la que hace el Valor Presente igual a cero, definido en lo que sigue.

VIII.6.1 Valor Presente

La fórmula exacta para calcular el valor presente (V) es la siguiente:

$$V = \frac{N_1}{1+i} + \frac{N_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{N_t}{(1+i)^t} + \dots = \sum_{j=1}^n \frac{N_j}{(1+i)^j}$$

En esta ecuación i es la tasa de interés de mercado para un periodo (la cual se considera constante). N_1 es el ingreso neto (positivo o negativo) en el periodo 1, N_2 es el ingreso neto en el 2, N_t es el ingreso neto en el periodo t , y así sucesivamente. El flujo de pagos

$(N_1, N_2, \dots, N_t, \dots)$ tendrá el valor presente, V , dado por la fórmula anteriormente expresada⁶¹.

VIII.7 Aportes Cuenca Intermedia

Como se vio en el sub-capítulo de desagregación espacial, la cuenca del cuyo punto de salida es la captación de la Central Hidroeléctrica Aconcagua es 32 km² más grande que la cuenca aguas arriba del muro del embalse (Mediciones CODELCO). Para efectos del modelo esto se agrega con la ecuación que sigue, donde el rendimiento medio de la cuenca intermedia es equivalente a la cuenca más pequeña, es de 25.9 (l/s/km²), lo cual está incluido en el modelo de esta forma.

$$V_{CH,t} = G_{CH} - A_c$$

⁶¹ SAMUELSON, PAUL, NORDHAUS, WILLIAM D Y MCGRAW-HILL, *Microeconomía con aplicaciones a Latinoamérica*. México. p.292

IX.- SIMULACIONES Y RESULTADOS

El método de Montecarlo es un método no determinístico o estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. El método se llamó así en referencia al Casino de Montecarlo (Principado de Mónaco) por ser “la capital del juego de azar”, al ser la ruleta un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Montecarlo datan aproximadamente de 1944 y se mejoraron enormemente con el desarrollo de la computadora.

Se han desarrollado simulaciones con una resolución mensual, donde se ha representado el modelo descrito en el capítulo VIII. Mediante el Modelo

Se ha simulado la operación del embalse en base a la ecuación:

$$S_t = S_{t-1} + V_{E,t} - V_{CH,t} - V_{CA,t} - Evap_t - Inf_t + P_t - E_t$$

La discretización, para estas simulaciones es mensual, se ha considera nula la Infiltración y los compromisos aguas abajo están representados sólo por la central Aconcagua. Los caudales afluentes han sido generados con modelos AR (1) y AR (2) dependiendo del mes, en el punto de salida de la cuenca, o sea, el muro del Embalse.

El caudal utilizado por la central, o sea no susceptible de embalsar ha sido supuesto como el promedio anual durante toda su operación (18 años). Cabe recordar que una parte del aporte de la central 32 km² de un total de 208 km² o sea el 15.3% proviene de un aporte intermedio, o sea la parte de la cuenca total de la central Aconcagua que no está dentro de la cuenca de interés para el embalse.

Para efecto de las simulaciones se ha considerado los siguientes supuestos:

- El Embalse posee derechos de aprovechamiento, justificados, sobre toda el agua que no es captada por la central ($V_{CA,t}=0$ para todos los meses)
- El Embalse puede solicitar préstamos a la central cuando no sule su demanda y además puede rellenar la capacidad sub-utilizada de la central cuando hay abundancia (El factor a simular será del 10%, eventualmente podría ser menos o más)
- La demanda actual de CODELCO es 0,7 m³/s y se aumenta en 1 o 1.2 m³/s dependiendo el escenario.

- El embalse (CODELCO) paga por el agua prestada el costo de oportunidad, que corresponde a la generación de energía de 3 centrales en cadena. Aconcagua, Los Quilos y Chacabuquito.

Se evalúan diversos escenarios, con el objetivo de tener un abanico de resultados que sean útiles para la propuesta de medidas de gestión y la toma de decisiones. Entre ellos se destaca:

- Variación de los Volúmenes de Embalse.
- Intercambios entre Codelco y Central Blanco (Prestamos, Devoluciones y Entregas)
- Generación de energía a pie de presa.

La tarifa se ha definido ampliamente a lo largo del trabajo, es importante recalcar el tema de la seguridad, ésta se calcula sumando toda el agua que recibe Codelco a lo largo de los 40 años, dividida por el agua que debiera recibir si es que el caudal es siempre el mismo y constante.

IX.1 Escenarios de Simulación

Se han definido, para efectos de este trabajo un total de 12 escenarios de simulación. El modelo puede ser utilizado para simular muchos otros escenarios. Estos parecen razonables para el proyecto TSA y se presentarán como resultados la distribución de probabilidad de la tarifa implícita así como la distribución de probabilidad de la seguridad de abastecimiento. EL factor de entrega es entrega mensual del embalse a la central hidroeléctrica Aconcagua S.A, y representa un porcentaje de su capacidad subutilizada. Se presenta un resumen de los escenarios en la Tabla IX.1.1 de la página siguiente.

Más adelante de presentan los resultados obtenidos los 12 escenarios, para cada uno de los cuales se generaron 20 series sintéticas, lo cual dio lugar a un distribución de frecuencias de la tarifa implícita y la seguridad, ambos conceptos ya definidos concretamente en capítulos previos.

Escenario	Volumen Embalse (MM de m3)	Intercambio	Factor Entrega	Caudal (m3/s)
E1	30	Préstamo	0%	1
E2	40	Préstamo	0%	1
E3	50	Préstamo	0%	1
E4	30	Préstamo	0%	1,2
E5	40	Préstamo	0%	1,2
E6	50	Préstamo	0%	1,2
E7	30	Préstamo y Entrega	10%	1
E8	40	Préstamo y Entrega	10%	1
E9	50	Préstamo y Entrega	10%	1
E10	30	Préstamo y Entrega	10%	1,2
E11	40	Préstamo y Entrega	10%	1,2
E12	50	Préstamo y Entrega	10%	1,2

Tabla IX.1.1 Escenarios a evaluar para efectos de este trabajo (pueden haber muchos)

IX.2 Resultados por Escenario

IX.2.1. Escenario 1

- Volumen Embalse: 30 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 0%
- Caudal: 1 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 1	
	Tarifa US\$/m ³	Seguridad %
1	0,34	94%
2	0,33	91%
3	0,33	94%
4	0,34	94%
5	0,36	88%
6	0,41	90%
7	0,38	92%
8	0,42	89%
9	0,33	95%
10	0,37	87%
11	0,33	92%
12	0,33	91%
13	0,39	88%
14	0,34	92%
15	0,35	91%
16	0,37	88%
17	0,35	91%
18	0,37	91%
19	0,39	88%
20	0,36	91%
Promedio	0,36	91%
Desviación	0,03	2%

Tabla IX.2.1.1 Resultados simulación Escenario 1

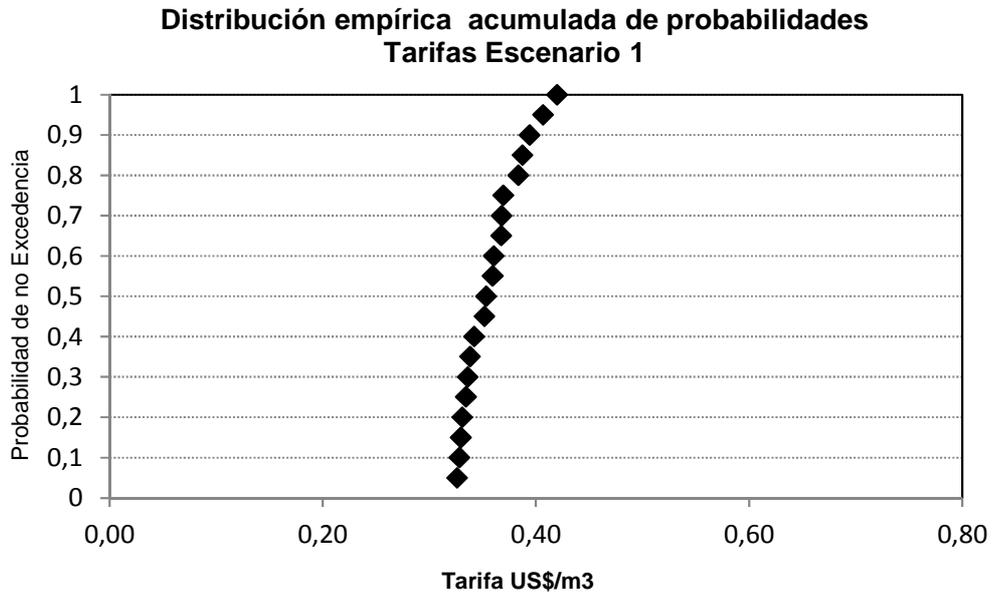


Figura IX.2.1.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 1

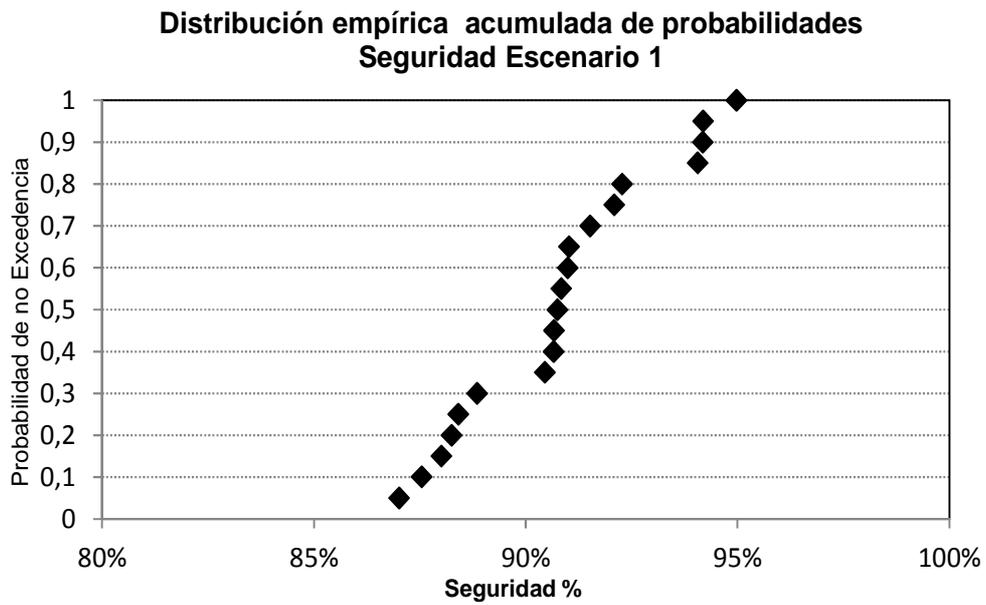


Figura IX.2.1.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 1

IX.2.2. Escenario 2

- Volumen Embalse: 40 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 0%
- Caudal: 1 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 2	
	TARIFA	SEGURIDAD
1	0,40	94%
2	0,42	89%
3	0,42	92%
4	0,48	90%
5	0,46	87%
6	0,43	92%
7	0,56	82%
8	0,43	93%
9	0,45	95%
10	0,44	87%
11	0,42	95%
12	0,50	85%
13	0,43	94%
14	0,44	96%
15	0,40	95%
16	0,50	89%
17	0,47	90%
18	0,45	90%
19	0,41	96%
20	0,45	91%
Promedio	0,45	91%
Desviación	0,04	4%

Tabla IX.2.2.1 Resultados simulación Escenario 1

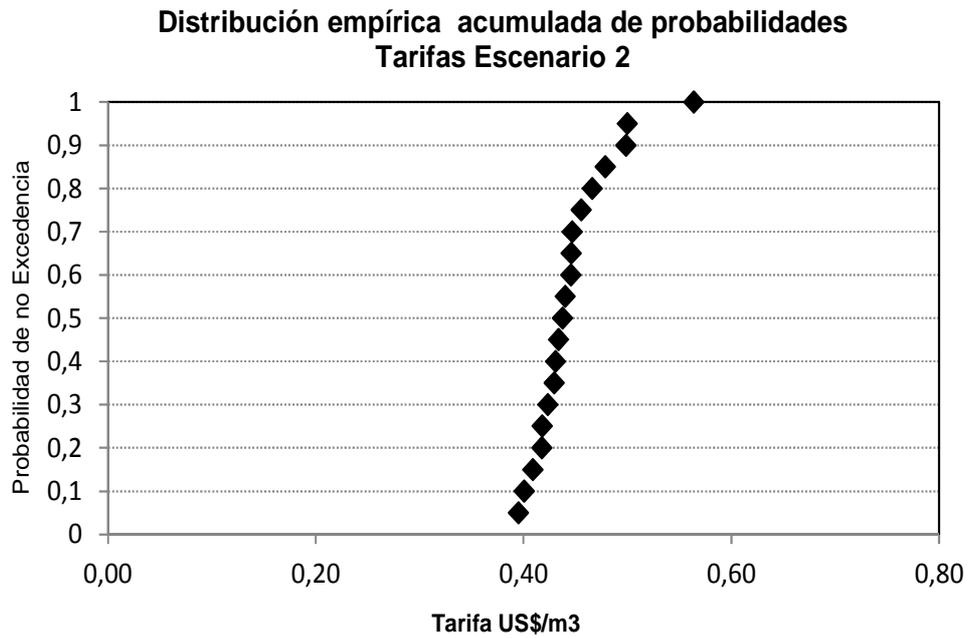


Figura IX.2.2.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 2

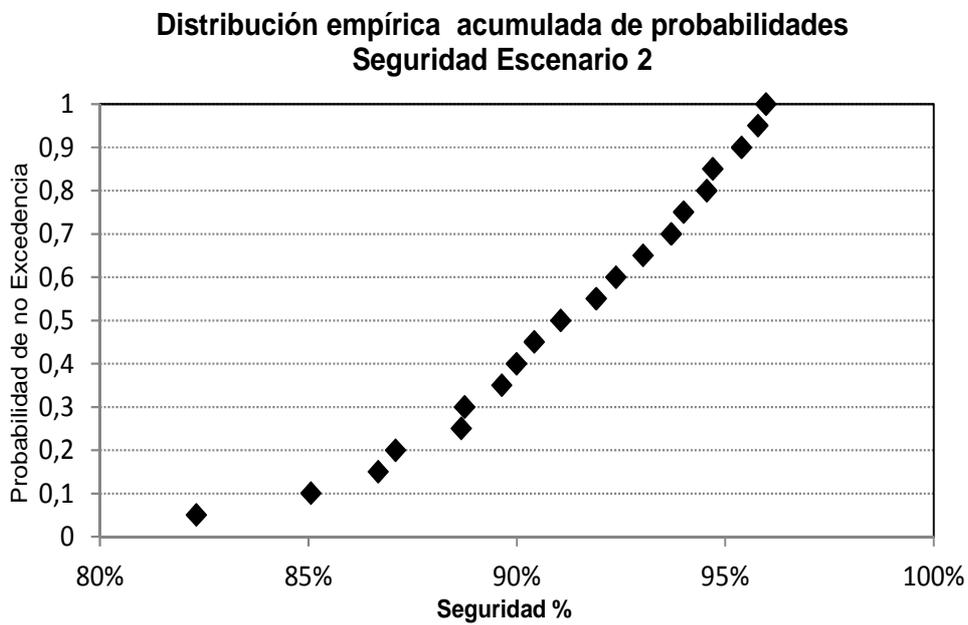


Figura IX.2.2.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 2

IX.2.3. Escenario 3

- Volumen Embalse: 50 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 0%
- Caudal: 1 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 3	
	TARIFA (US\$/m ³)	SEGURIDAD
1	0,53	95%
2	0,54	92%
3	0,52	93%
4	0,56	82%
5	0,50	98%
6	0,51	96%
7	0,58	91%
8	0,43	94%
9	0,52	91%
10	0,50	89%
11	0,54	95%
12	0,41	96%
13	0,53	93%
14	0,52	94%
15	0,55	91%
16	0,52	92%
17	0,53	94%
18	0,54	95%
19	0,53	91%
20	0,52	93%
Promedio	0,52	93%
Desviación	0,04	3%

Tabla IX.2.3.1 Resultados simulación Escenario 3

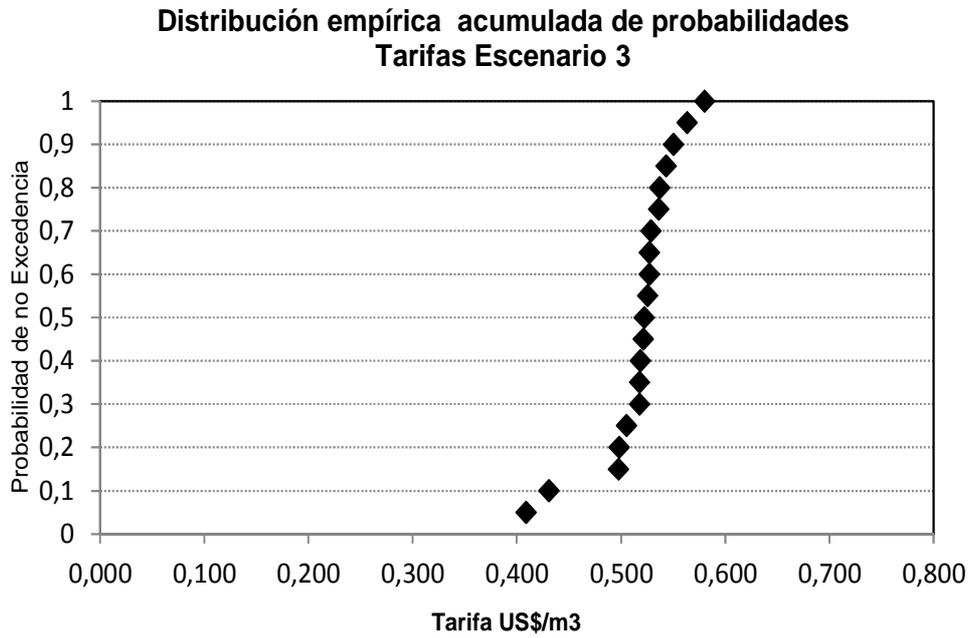


Figura IX.2.3.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 3

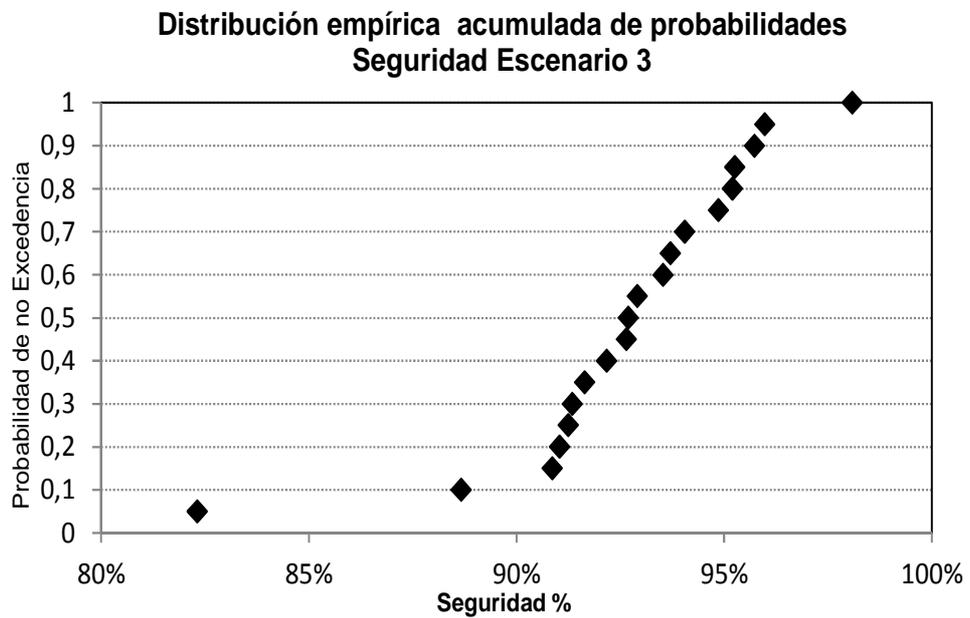


Figura IX.2.3.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 3

IX.2.4. Escenario 4

- Volumen Embalse: 30 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 0%
- Caudal: 1.2 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 4	
	TARIFA (US\$/m ³)	SEGURIDAD
1	0,31	89%
2	0,33	83%
3	0,34	85%
4	0,56	69%
5	0,35	84%
6	0,29	91%
7	0,34	81%
8	0,43	78%
9	0,29	89%
10	0,50	74%
11	0,31	87%
12	0,41	80%
13	0,30	91%
14	0,29	88%
15	0,29	90%
16	0,31	87%
17	0,28	92%
18	0,34	85%
19	0,30	89%
20	0,35	0,85
Promedio	0,35	85%
Desviación	0,08	6%

Tabla IX.2.4.1 Resultados simulación Escenario 4

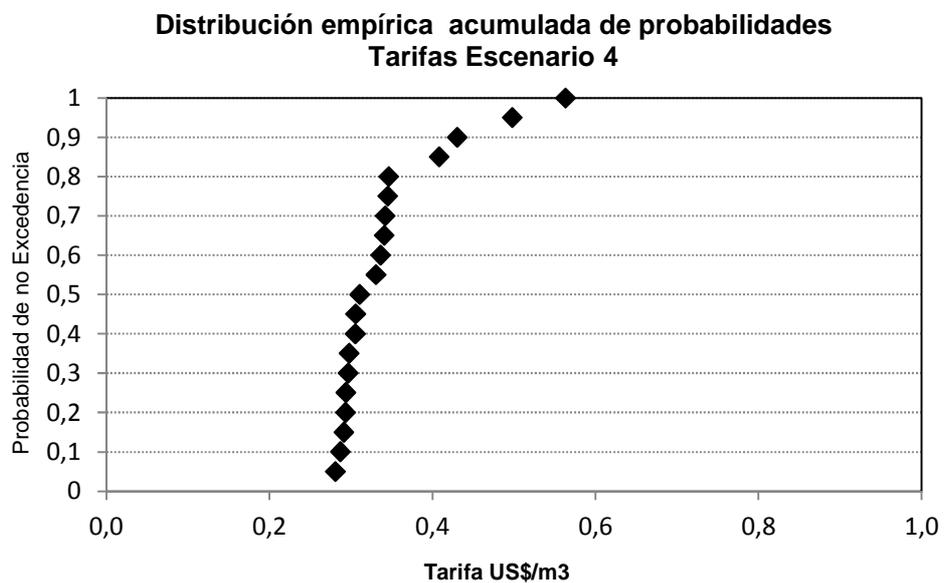


Figura IX.2.4.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 4

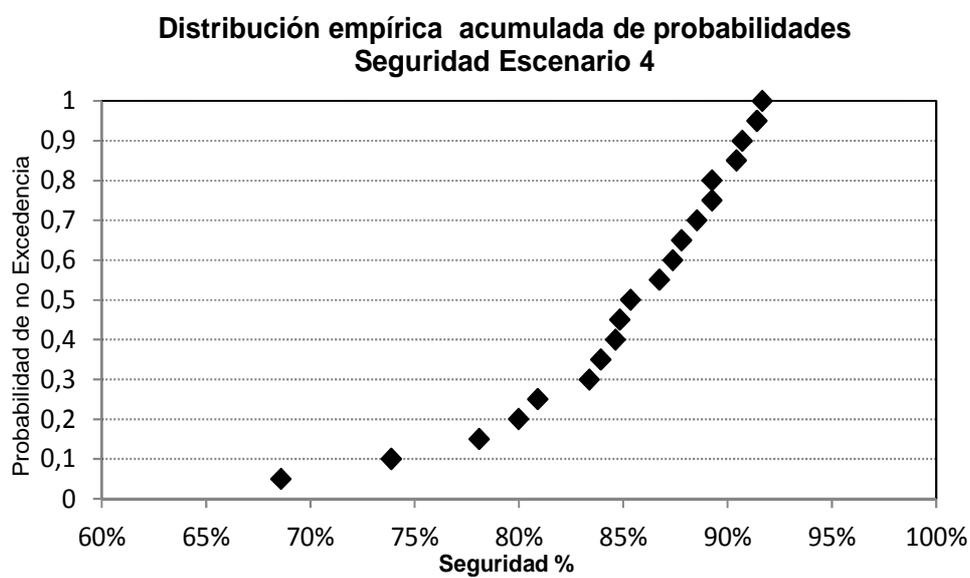


Figura IX.2.4.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 4

IX.2.5. Escenario 5

- Volumen Embalse: 40 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 0%
- Caudal: 1.2 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 5	
	TARIFA (US\$/m ³)	SEGURIDAD
1	0,42	87%
2	0,41	83%
3	0,38	88%
4	0,56	69%
5	0,41	86%
6	0,38	94%
7	0,37	89%
8	0,43	78%
9	0,40	88%
10	0,50	74%
11	0,41	87%
12	0,41	80%
13	0,40	87%
14	0,35	94%
15	0,38	89%
16	0,39	86%
17	0,41	88%
18	0,36	93%
19	0,36	92%
20	0,41	0,86
Promedio	0,41	86%
Desviación	0,05	7%

Tabla IX.2.5.1 Resultados simulación Escenario 5

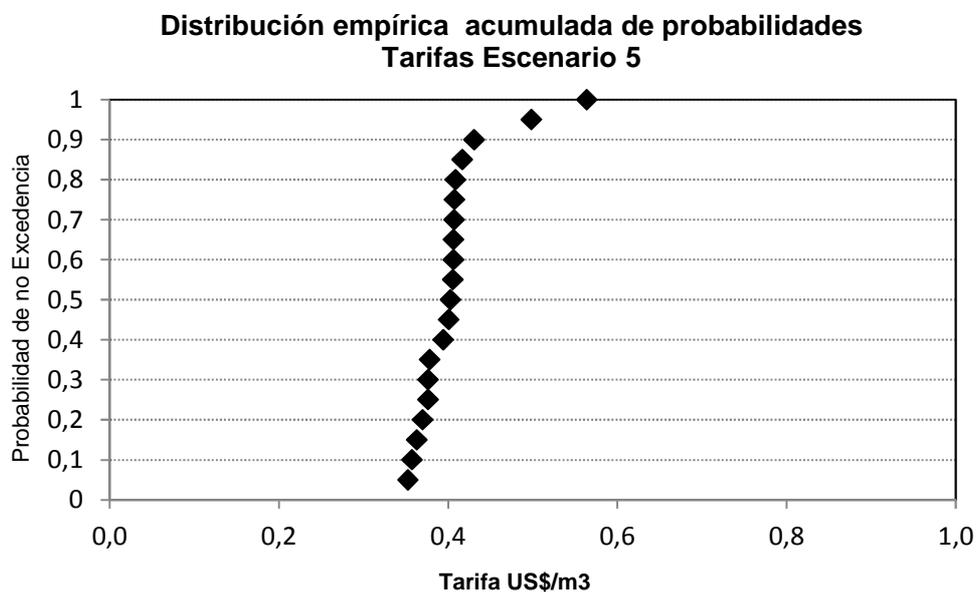


Figura IX.2.5.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 5

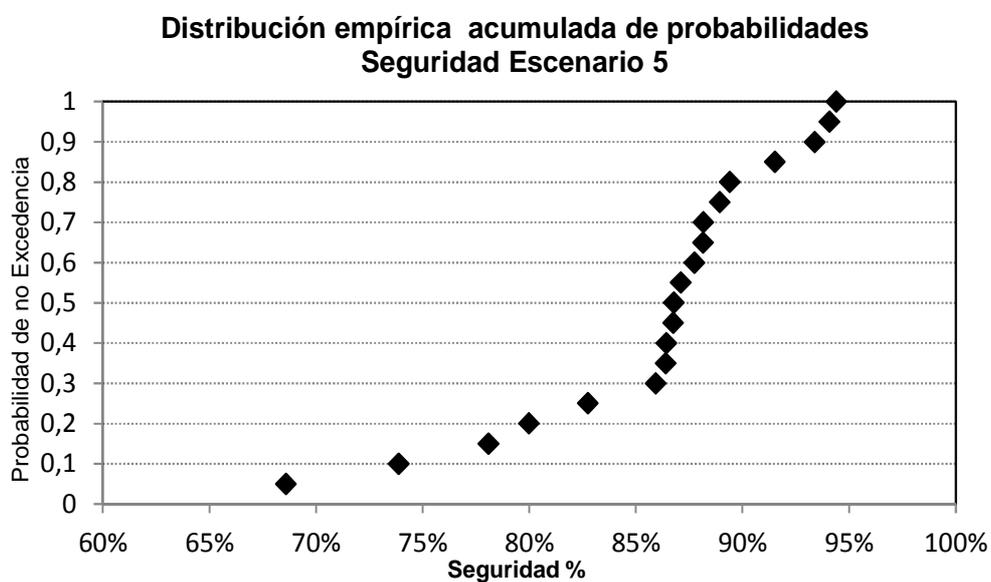


Figura IX.2.5.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 5

IX.2.6. Escenario 6

- Volumen Embalse: 50 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 0%
- Caudal: 1.2 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 6	
	TARIFA (US\$/m ³)	SEGURIDAD
1	0,52	87%
2	0,47	90%
3	0,48	92%
4	0,56	69%
5	0,49	87%
6	0,52	86%
7	0,50	86%
8	0,43	78%
9	0,47	91%
10	0,50	74%
11	0,48	91%
12	0,41	80%
13	0,50	92%
14	0,46	94%
15	0,43	91%
16	0,52	89%
17	0,48	89%
18	0,46	86%
19	0,48	92%
20	0,48	87%
Promedio	0,48	87%
Desviación	0,04	7%

Tabla IX.2.6.1 Resultados simulación Escenario 6

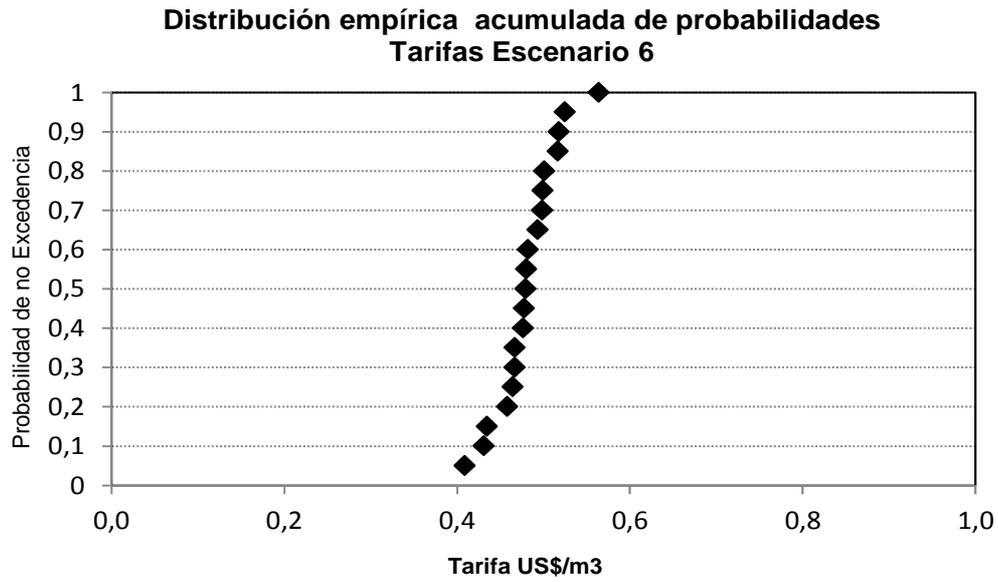


Figura IX.2.6.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 6

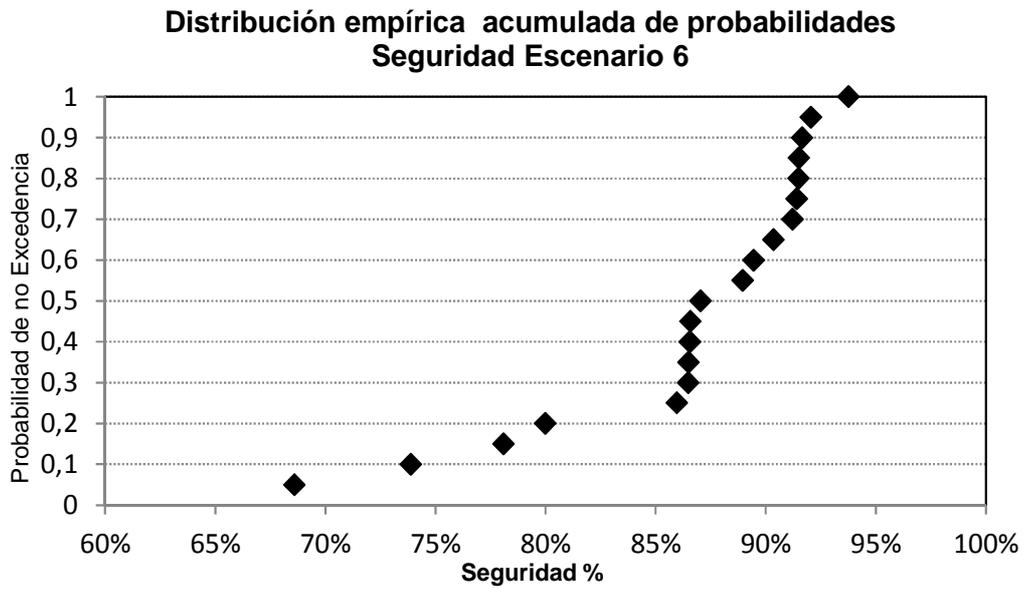


Figura IX.2.6.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 6

IX.2.7. Escenario 7

- Volumen Embalse: 30 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 10%
- Caudal: 1 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 7	
	TARIFA (US\$/m ³)	SEGURIDAD
1	0,37	87%
2	0,39	82%
3	0,36	86%
4	0,56	82%
5	0,40	85%
6	0,37	86%
7	0,35	87%
8	0,43	94%
9	0,35	90%
10	0,50	89%
11	0,34	87%
12	0,41	96%
13	0,45	82%
14	0,39	80%
15	0,41	86%
16	0,39	85%
17	0,36	87%
18	0,32	93%
19	0,40	86%
20	0,40	87%
Promedio	0,40	87%
Desviación	0,06	4%

Tabla IX.2.7.1 Resultados simulación Escenario 7

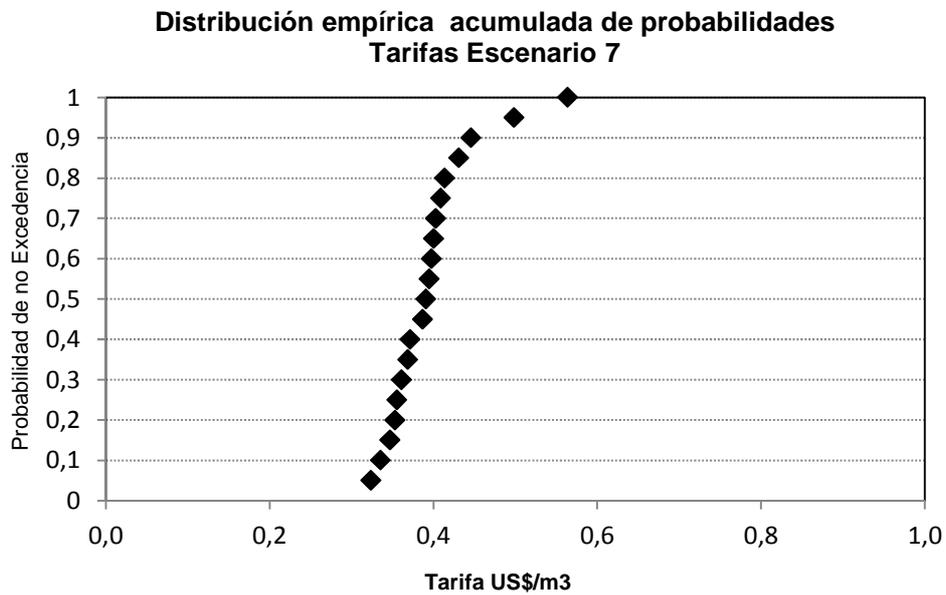


Figura IX.2.7.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 7

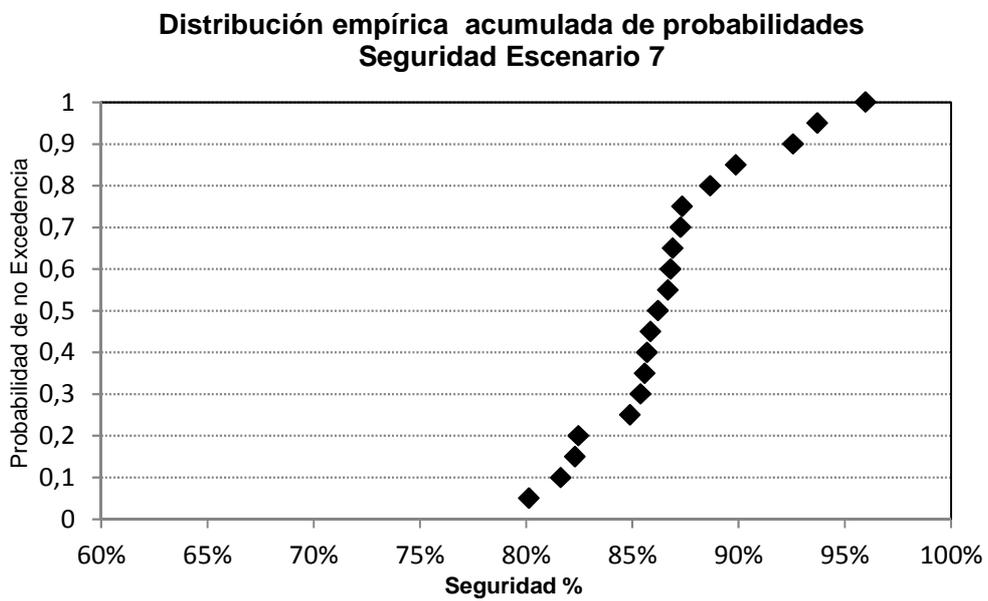


Figura IX.2.7.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 7

IX.2.8. Escenario 8

- Volumen Embalse: 40 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 10%
- Caudal: 1 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 8	
	TARIFA (US\$/m ³)	SEGURIDAD
1	0,53	84%
2	0,47	84%
3	0,49	86%
4	0,56	82%
5	0,47	84%
6	0,48	84%
7	0,44	88%
8	0,43	94%
9	0,46	88%
10	0,50	89%
11	0,45	89%
12	0,41	96%
13	0,51	83%
14	0,47	84%
15	0,43	89%
16	0,40	91%
17	0,47	85%
18	0,39	87%
19	0,55	83%
20	0,47	87%
Promedio	0,47	87%
Desviación	0,05	4%

Tabla IX.2.8.1 Resultados simulación Escenario 8

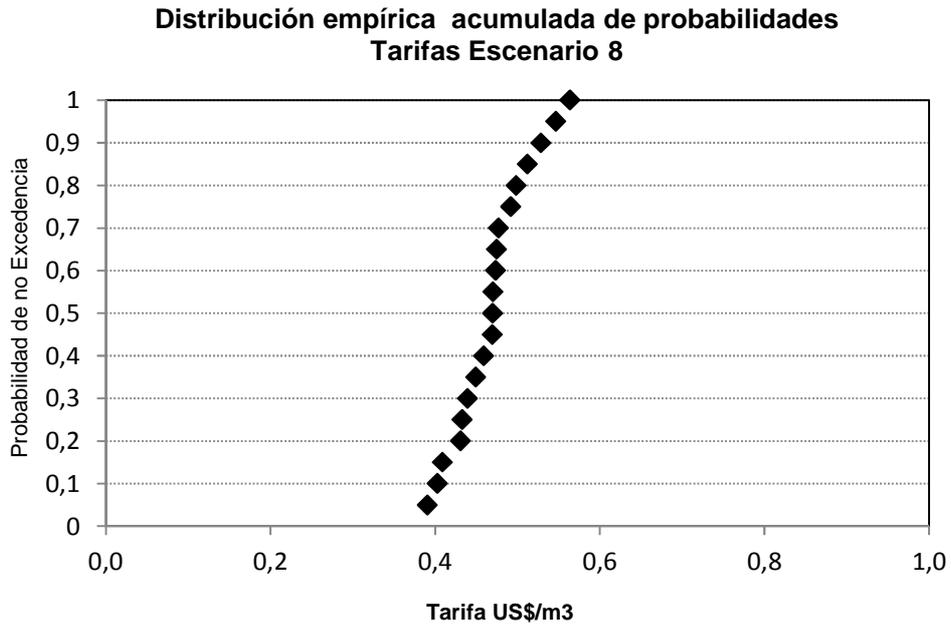


Figura IX.2.8.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 8

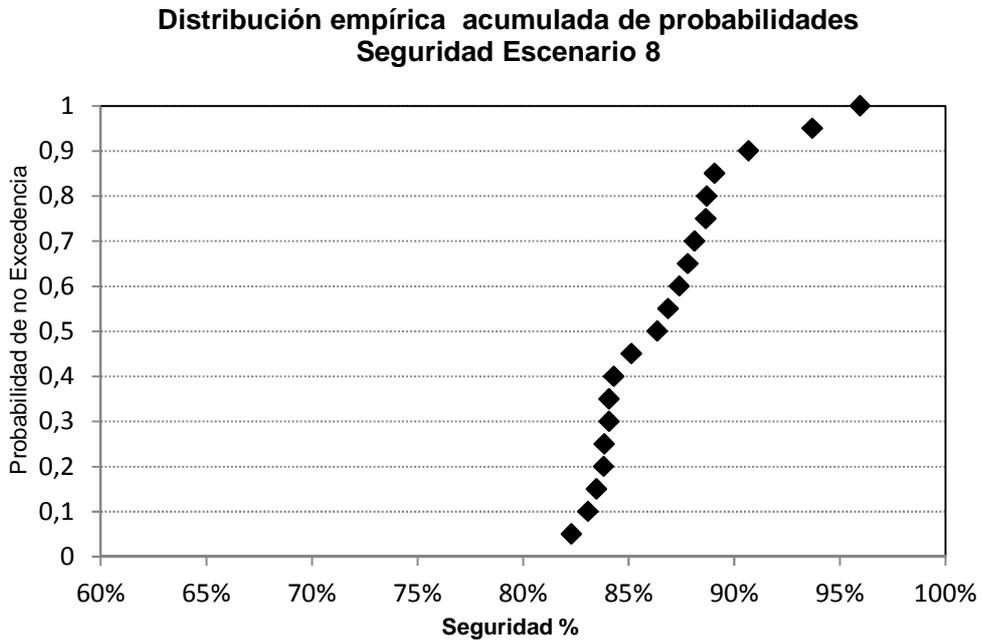


Figura IX.2.8.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 8

IX.2.9. Escenario 9

- Volumen Embalse: 50 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 10%
- Caudal: 1 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 9	
	TARIFA (US\$/m ³)	SEGURIDAD
1	0,57	89%
2	0,65	82%
3	0,61	87%
4	0,56	82%
5	0,60	89%
6	0,59	89%
7	0,55	87%
8	0,43	94%
9	0,55	90%
10	0,50	89%
11	0,61	85%
12	0,41	96%
13	0,54	87%
14	0,61	84%
15	0,56	89%
16	0,55	85%
17	0,53	90%
18	0,61	85%
19	0,58	87%
20	0,56	88%
Promedio	0,56	88%
Desviación	0,06	3%

Tabla IX.2.9.1 Resultados simulación Escenario 9

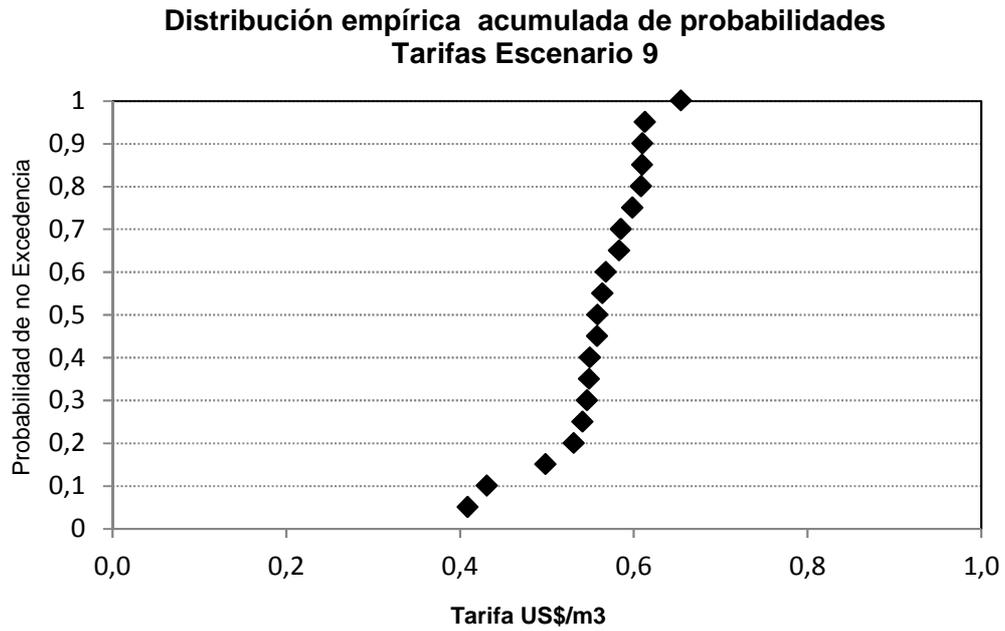


Figura IX.2.9.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 9

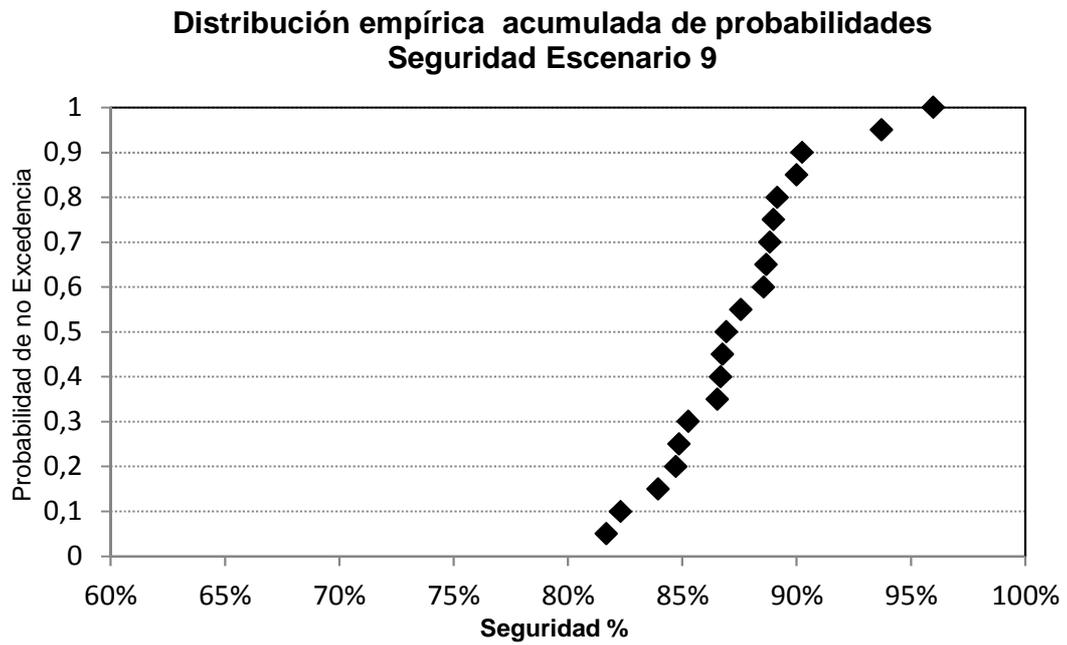


Figura IX.2.9.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 9

IX.2.10. Escenario 10

- Volumen Embalse: 30 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 10%
- Caudal: 1.2 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 10	
	TARIFA (US\$/m ³)	SEGURIDAD
1	0,36	86%
2	0,37	75%
3	0,35	81%
4	0,56	69%
5	0,35	85%
6	0,34	83%
7	0,37	82%
8	0,43	78%
9	0,32	82%
10	0,50	74%
11	0,30	86%
12	0,25	80%
13	0,33	82%
14	0,35	79%
15	0,34	82%
16	0,34	81%
17	0,34	80%
18	0,37	80%
19	0,33	83%
20	0,36	80%
Promedio	0,36	80%
Desviación	0,07	4%

Tabla IX.2.10.1 Resultados simulación Escenario 10

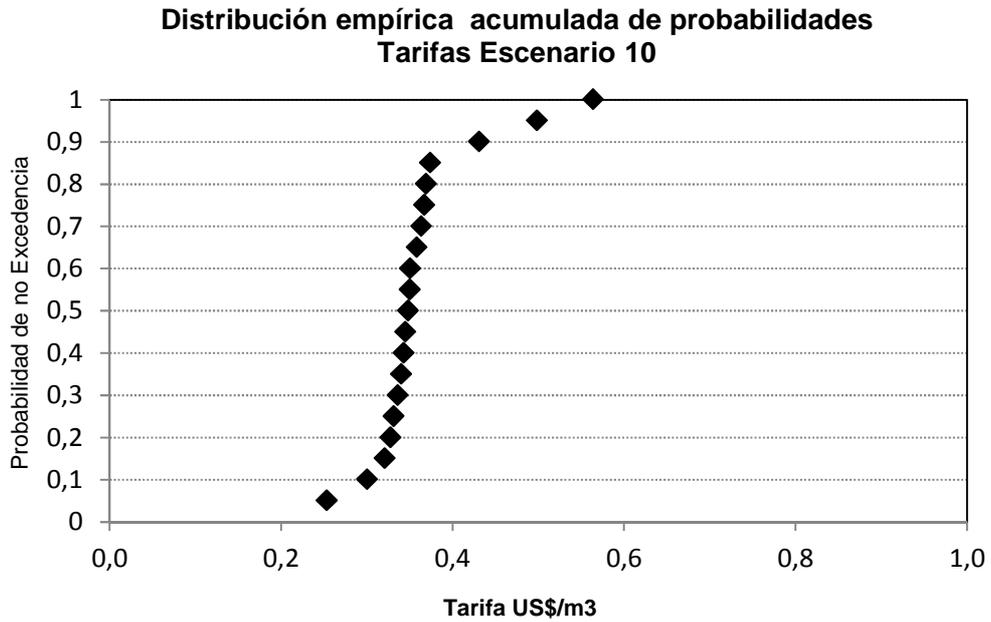


Figura IX.2.10.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 10

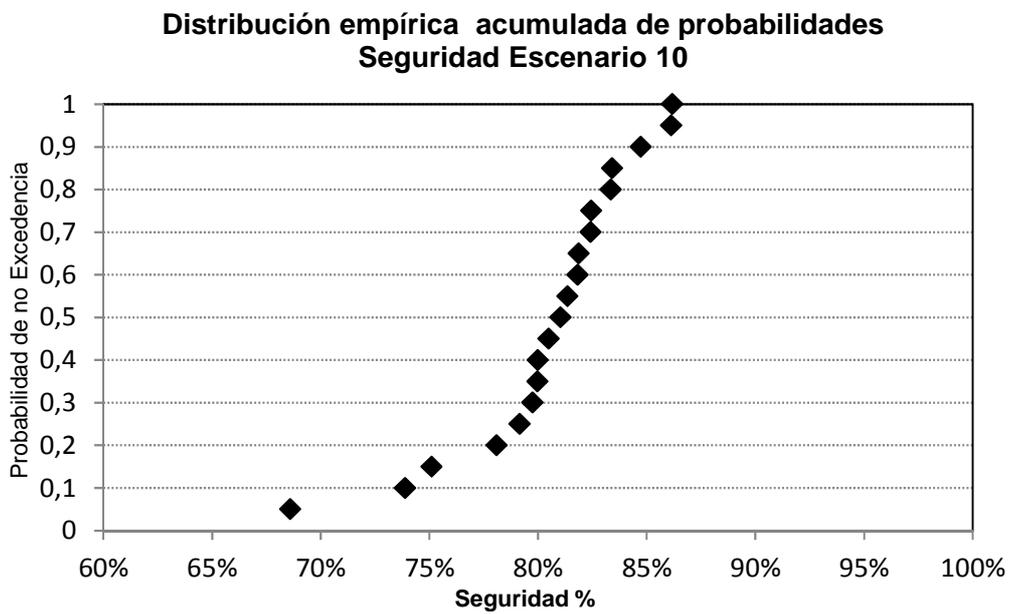


Figura IX.2.10.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 10

IX.2.11. Escenario 11

- Volumen Embalse: 40 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 10%
- Caudal: 1.2 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 11	
	TARIFA (US\$/m ³)	SEGURIDAD
1	0,43	83%
2	0,42	85%
3	0,42	86%
4	0,56	69%
5	0,42	82%
6	0,35	90%
7	0,40	83%
8	0,43	78%
9	0,45	83%
10	0,50	74%
11	0,42	83%
12	0,41	80%
13	0,42	85%
14	0,43	84%
15	0,41	87%
16	0,35	87%
17	0,37	89%
18	0,41	82%
19	0,37	83%
20	0,42	83%
Promedio	0,42	83%
Desviación	0,05	5%

Tabla IX.2.11.1 Resultados simulación Escenario 11

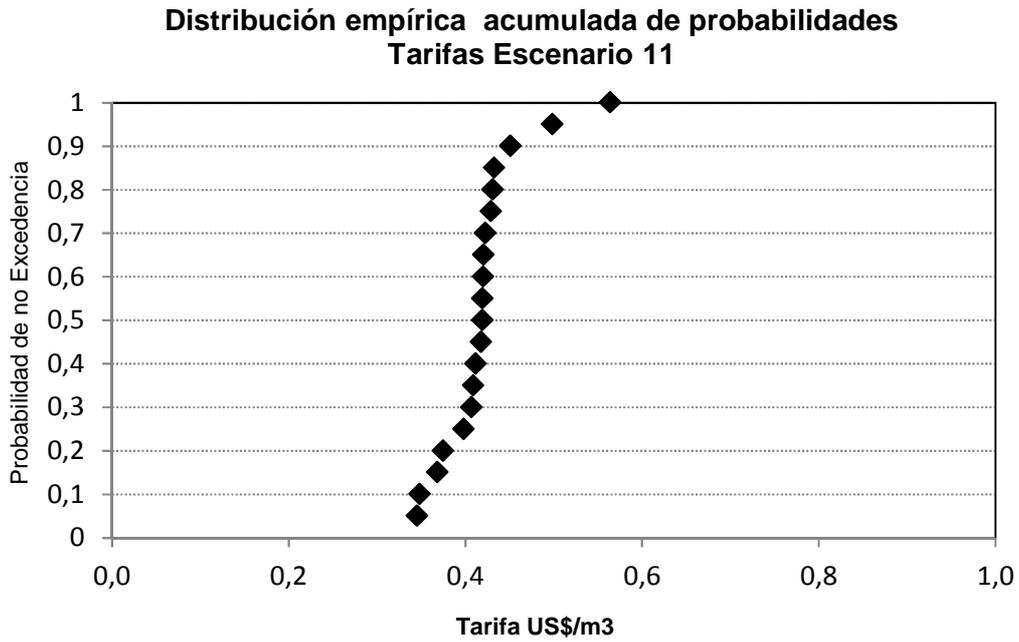


Figura IX.2.11.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 11

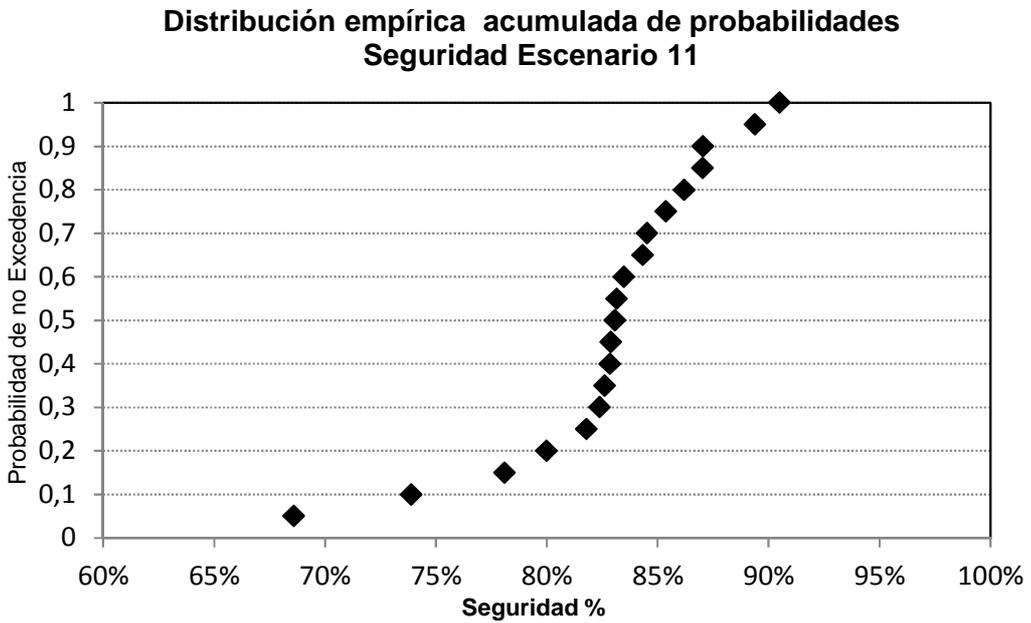


Figura IX.2.11.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 11

IX.2.12. Escenario 12

- Volumen Embalse: 50 Millones de m³
- Sólo Préstamo, Factor Entrega 10%
- Caudal: 1.2 m³/s

Simulación/Caso	Escenario 12	
	TARIFA (US\$/m ³)	SEGURIDAD
1	0,55	80%
2	0,49	85%
3	0,50	88%
4	0,56	69%
5	0,47	88%
6	0,50	85%
7	0,47	91%
8	0,43	78%
9	0,48	89%
10	0,50	74%
11	0,47	85%
12	0,41	80%
13	0,48	85%
14	0,49	87%
15	0,58	82%
16	0,54	81%
17	0,54	82%
18	0,51	82%
19	0,46	83%
20	0,50	83%
Promedio	0,50	83%
Desviación	0,04	5%

Tabla IX.2.12.1 Resultados simulación Escenario 12

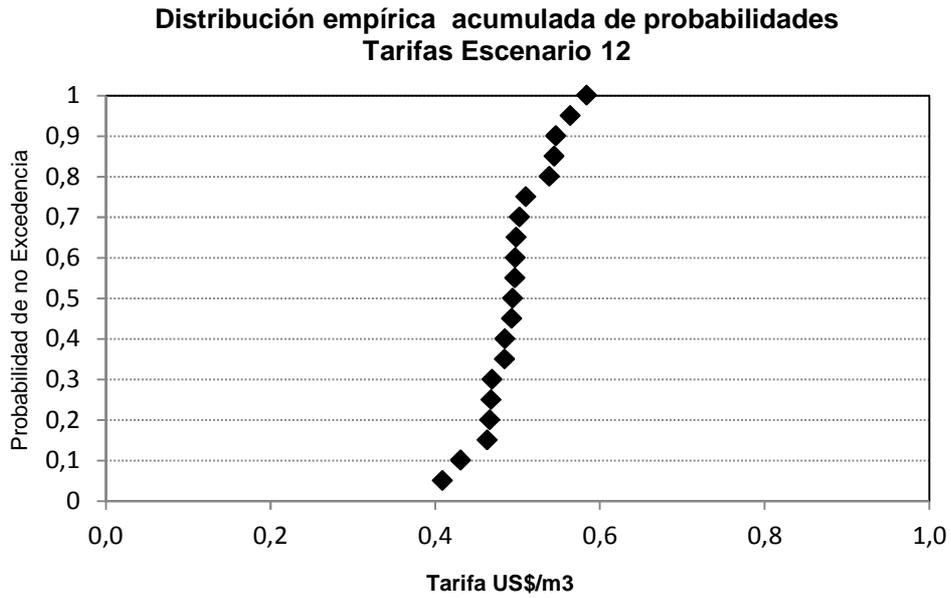


Figura IX.2.12.1 Curva Frecuencia empírica Acumulada Tarifa Implícita Escenario 12

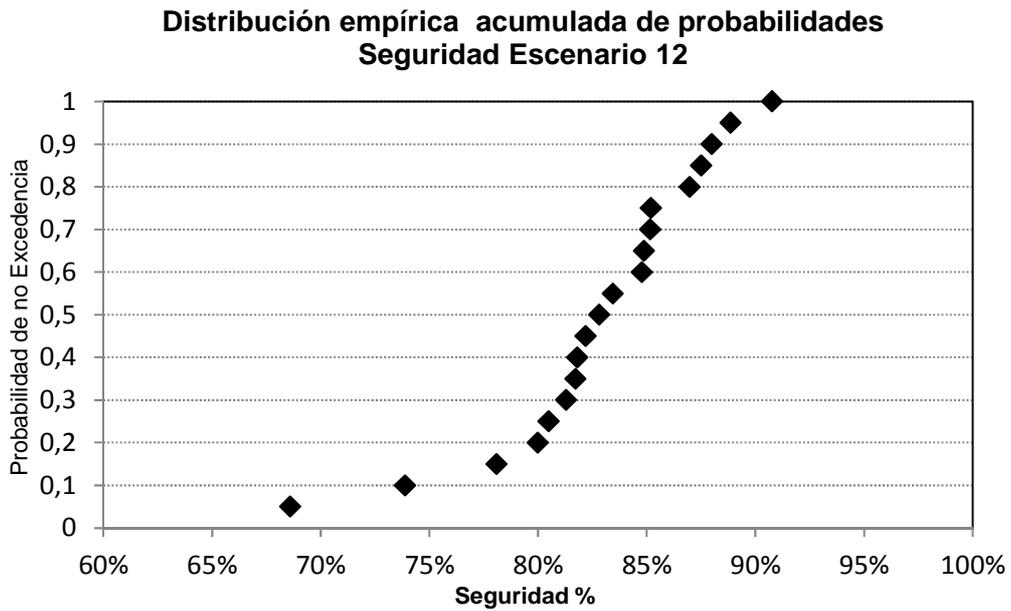


Figura IX.2.12.2 Curva Frecuencia empírica Acumulada de la Seguridad de Abastecimiento Escenario 12

IX.3 Estado del Embalse y Traspasos entre CODELCO y CH Aconcagua

A modo de ejemplo se presenta una de las 20 simulaciones (con hidrologías sintéticas) asociadas a cada escenario. Se muestra la variable de estado Volumen de embalse y Traspasos entre CODELCO y Central Aconcagua S.A. Es necesario recalcar nuevamente que los traspasos son valorados al costo de oportunidad del agua (Generación en cadena de energía, cada metro cúbico recorre verticalmente aproximadamente 1200 metros). No son simples préstamos de agua se valoran como se mencionó y se descuentan a una tasa del 10% en el flujo de caja.

Se presentan estas variables de estado para los escenarios 1, 2 y 3. Estos 3 escenarios consideran un caudal de 1 m³/s y volúmenes de 30, 40 y 50 Millones de metros cúbicos. Además de la posibilidad de sólo préstamos (compra de agua) con las centrales hidroeléctricas. Como se explica más adelante, éstos 3 escenarios, de los 12 planteados (podrían ser muchos más), son los más favorables.

En los gráficos de Volumen, cuando toca fondo la curva inmediatamente se compra agua a la central Aconcagua S.A. Esto mejora absolutamente la seguridad en vez de aumentar el volumen del embalse, donde no existirían estos beneficios de transacción.

El gráfico de la línea de préstamos o compras Figura IX.3.1.2, coincide claramente con el nivel cero de del gráfico de volumen embalsado Figura IX.3.1.1 y representa cuánto es lo que se prestó. Todo en términos anuales, pese a que la resolución es mensual.

IX.3.1 Escenario 1

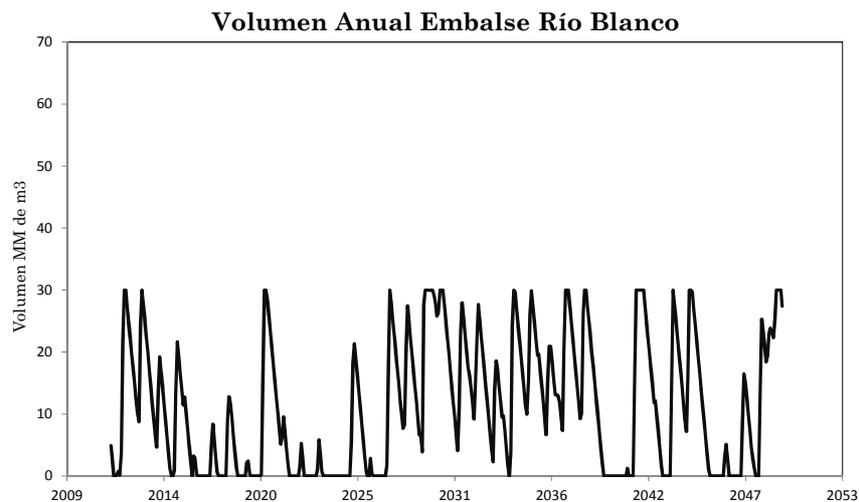


Figura IX.3.1.1 Estado embalse para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 1

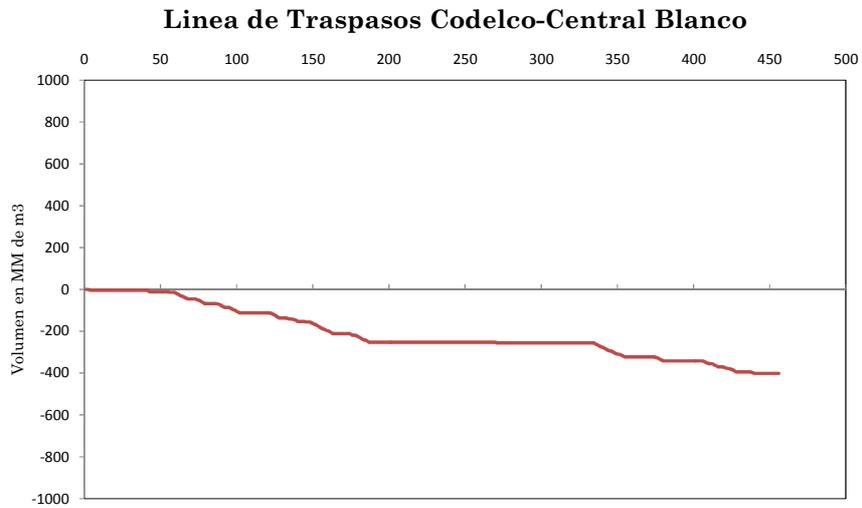


Figura IX.3.1.2 Estado de traspasos con CH Aconcagua para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 1. El eje X corresponde a los meses.

IX.3.2 Escenario 2

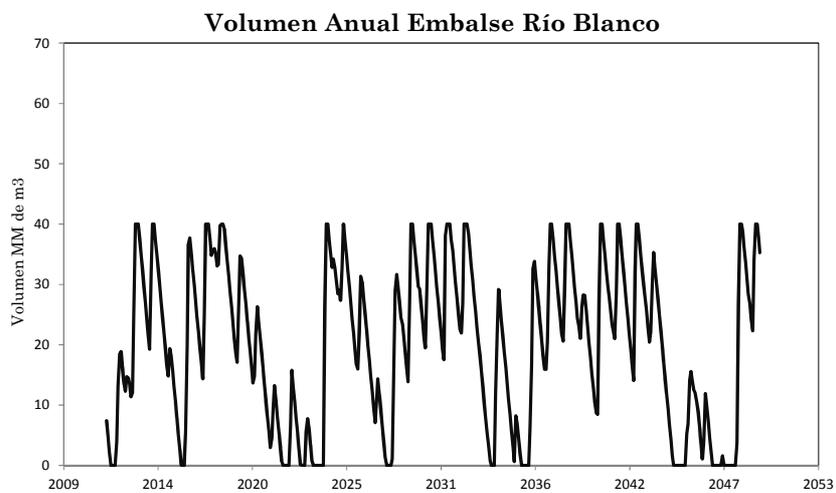


Figura IX.3.2.1 Estado embalse para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 2

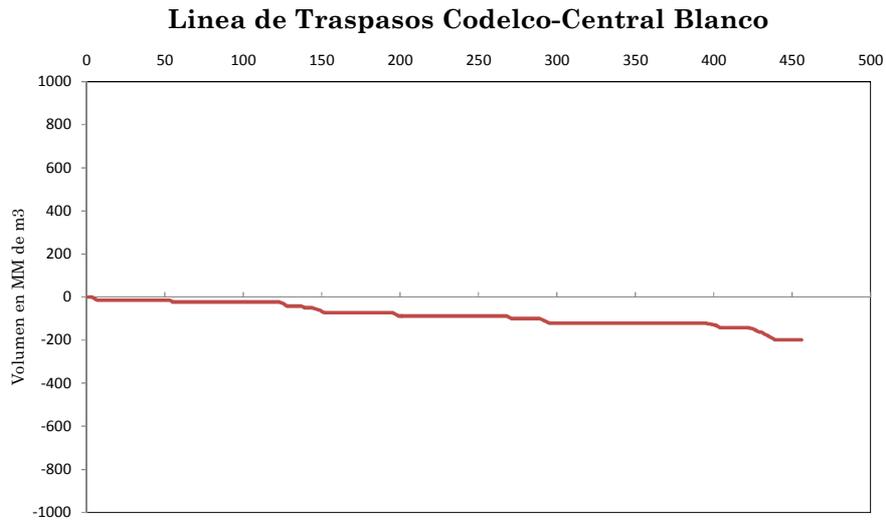


Figura IX.3.2.2 Estado de traspasos con CH Aconcagua embalse para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 2. El eje X corresponde a los meses.

IX.3.3 Escenario 3

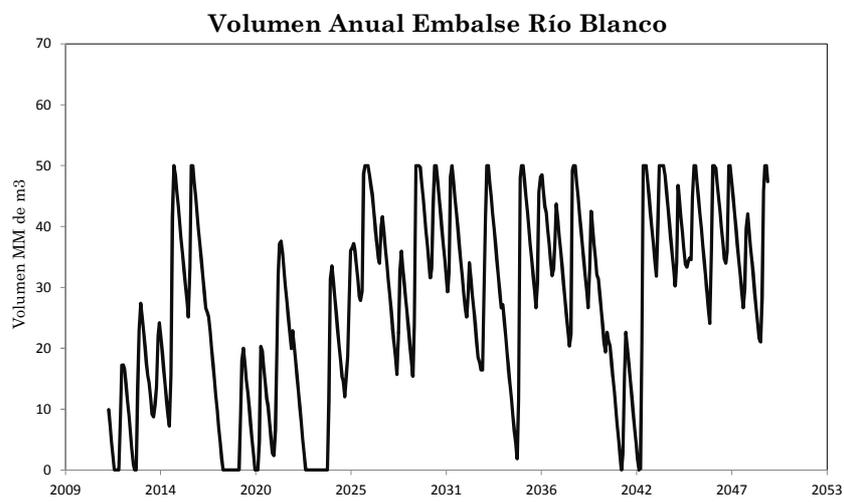


Figura IX.3.3.1 Estado embalse para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 3

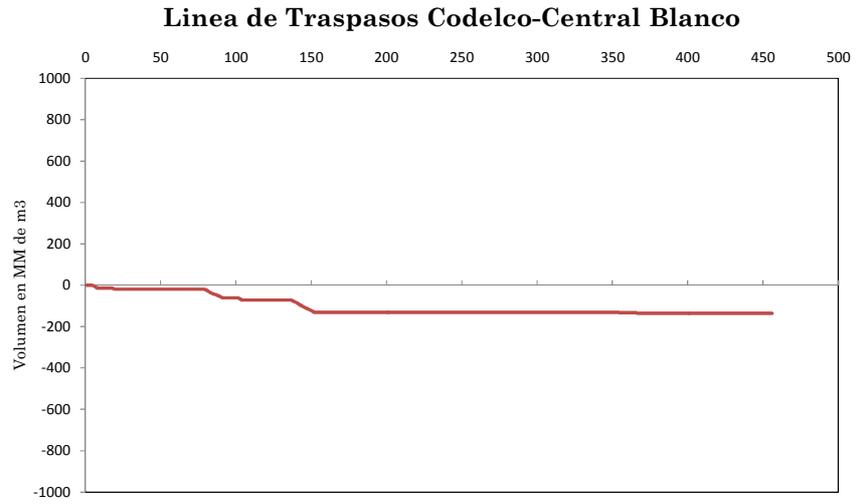


Figura IX.3.3.2 Estado de traspasos con CH Aconcagua embalse para 40 años, en base a una de las 20 series hidrológicas por escenario. Escenario 3. El eje X corresponde a los meses.

X.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

X.1. Cuadro resumen y Análisis Resultados

X.1.1 Cuadro Resumen

Se muestra un cuadro resumen, Tabla X.1.1.1, con el promedio y desviación estándar de la tarifa implícita y la seguridad. (Conceptos ya explicados abundantemente en capítulos previos).

ESCENARIO	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12
TARIFA US/M3												
Promedio	0,36	0,45	0,52	0,35	0,41	0,48	0,40	0,47	0,56	0,36	0,42	0,50
Desviación	0,03	0,04	0,04	0,08	0,05	0,04	0,06	0,05	0,06	0,07	0,05	0,04
SEGURIDAD %												
Promedio	91%	91%	93%	85%	86%	87%	87%	87%	88%	80%	83%	83%
Desviación	2%	4%	3%	6%	7%	7%	4%	4%	3%	4%	5%	5%

Tabla X.1.1.1 Cuadro Resumen Tarifa-Seguridad por Escenario

X.1.2 Análisis de resultados

El gráfico que se muestra en este sub-capítulo, Figura X.1.1.1, es esencial para entender los resultados y además para comprender por qué este trabajo de título tiene importancia para el proyecto TSA, al momento de definir el tamaño del embalse, el caudal de abastecimiento y la posibilidad de préstamo o entregas.

- Se aprecia claramente que al realizar entregas del 10% (entregar cada mes el 10% de la capacidad sub-utilizada por la central Aconcagua), aumenta los costos y disminuye la seguridad de abastecimiento, sobre todo para el caudal de 1.2 m³/s mayor a 1 m³/s. Esto tiene su fundamento en la disponibilidad de recursos en la cuenca, que es aproximadamente o cercano a 1 m³/s y además lo poco significativo del ingreso por venta de energía, más aun considerando la superior productividad marginal del factor productivo agua en la minería que en el rubro hidroeléctrico.
- Por otro lado los primeros 3 escenarios (de los 12, que no son todos los casos posibles), que consideran caudal de 1 m³/s, 30-40-50 Millones de metros cúbicos de embalse y sólo préstamos (o compra de agua a las centrales), se aprecian considerablemente mejores. Esto pues las seguridades de abastecimiento son

superiores al 90%. Los costos son mayores para el escenario 3, pero por otra parte ofrece mayor seguridad. El escenario 1 presenta costos más bajos sin embargo también decrece la seguridad. Quien debe establecer una curva (subjetiva) donde se pueda comparar Costo v/s Seguridad, debe ser CODELCO. El trabajo realizado en esta memoria constituye una herramienta para tomar la decisión que tiene una componente subjetiva no abordada aquí.

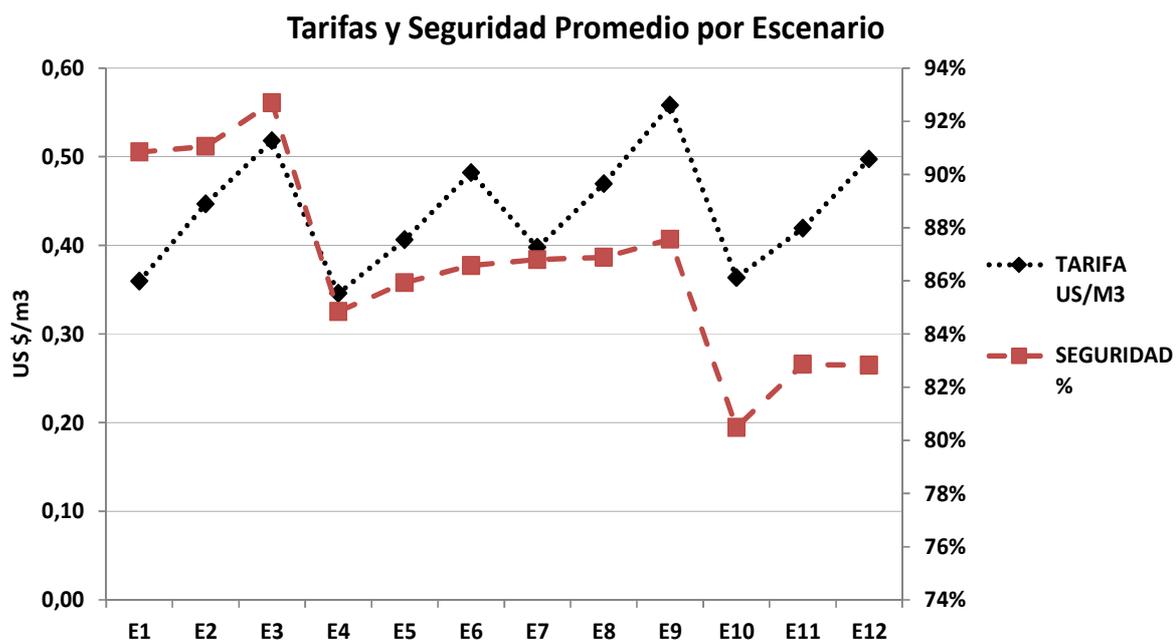


Figura X.1.1.1 Tarifa y Seguridad Promedio por Escenario, luego de simulaciones bajo incertidumbre

Las variabilidades presentadas en el cuadro resumen, junto con las distribuciones de probabilidad empírica de la Tarifa y la Seguridad son un gran aporte, pues permiten trabajar con probabilidades, ya no se habla de una tarifa sino de la función de distribución de la tarifa, lo mismo para la seguridad. Este es un aporte del trabajo que tendrá consecuencias en una mejor evaluación en la toma de decisiones, al incorporar la variabilidad o incertidumbre hidrológica, que es crucial.

Con el objetivo de visualizar de mejor los escenarios y el análisis hecho en función de los beneficios de cada uno de ellos y la subjetividad de la valorización tarifa-seguridad, se presenta un gráfico Tarifa implícita v/s Seguridad, donde cada uno de los 12 escenarios es un punto. En este gráfico se puede apreciar que hay escenarios que sin duda no son óptimos y otros dependerán de la valoración que haga la Minera de la Seguridad, calculada acá como el cociente entre volumen entregado durante los 40 años y el volumen que debió ser entregado dado el caudal fijado. Se presenta la Figura X.1.1.2.

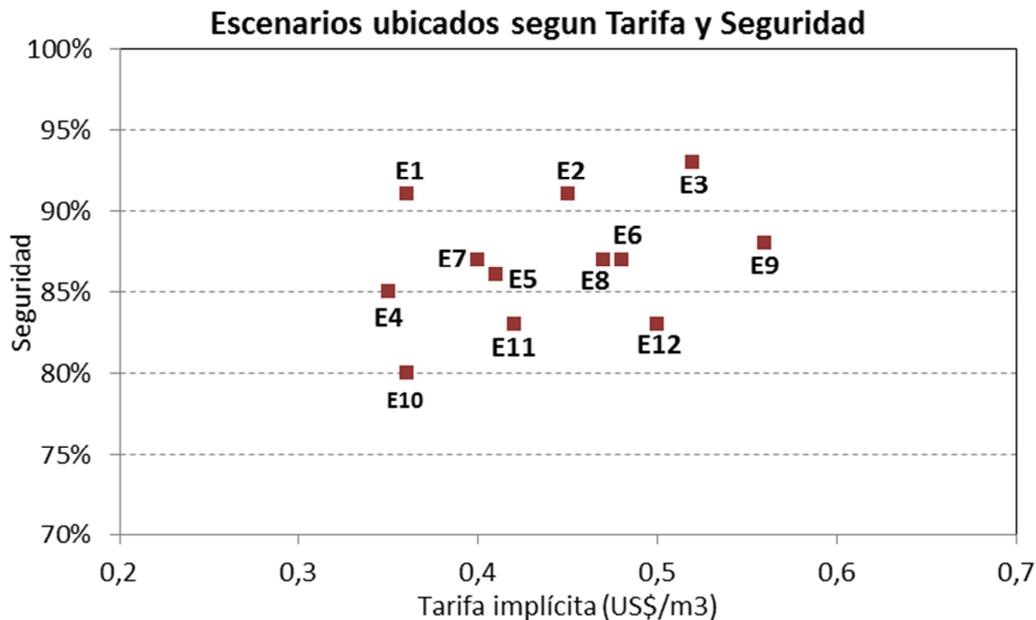


Figura X.1.1.2 Escenarios ubicados en función de su tarifa implícita y seguridad.

X.2. Seguridad de Abastecimiento, Costos de Embalse y Central a Pie de Presa

La seguridad de Abastecimiento se ha definido de forma simple, como ya se mencionó: El total de agua recibida por CODELCO durante el periodo de operación del Embalse. Se podrían formular indicadores que recojan por ejemplo efectos de sequías o aumentos importantes de la demanda por la misma empresa. Esto debe quedar muy claro.

Los costos de embalse y central hidroeléctrica a pie de presa fueron estimados en función de otros proyectos, que se muestran en el Capítulo del Modelo de Embalse propiamente tal y realizando estimaciones. Para el Embalse además se consideraron las características propias del valle, que están contenidas en las curvas de embalse mostradas en el capítulo correspondiente. Para efectos de calcular de mejor manera los costos se requiere tiempo y recursos, pero puede tener un impacto quizás importante sobre los resultados de futuras simulaciones. Respecto a la central, al ser un sub-producto de este proyecto (no se diseñará óptimamente como si fuera un embalse hidroeléctrico), el nivel de energía generada y un valor de planta razonable permiten establecer la potencia instalada en MW, y el valor, al no construir muchas obras anexas que ya estaría es de alrededor de 0.8 MM US\$/MW, en este caso afinar los cálculos no tiene sentido, sí podría tenerlo el costo del embalse, lo cual debe hacerse antes de tomar la decisión final.

El indicador de seguridad utilizado es bastante simple, para profundizar y dejar planteada la posibilidad de utilizar indicadores más robustos que consideren la varianza por ejemplo u otros elementos, se presentan a continuación otras formas de calcular la seguridad de abastecimiento de la demanda, que se pueden incorporar al modelo en siguientes aplicaciones prácticas y según las necesidades de quienes administran y se ven beneficiados por el sistema hidráulico, en este caso, un embalse.

En el libro: Conceptos y métodos para la planificación hidrológica ⁶² se mencionan con más detalle conceptos para evaluar la satisfacción de un sistema hidráulica, “En el análisis de un sistema hidráulico, se emplean normalmente medidas del grado de adecuación del planeamiento a las necesidades. Estas medidas, nos permiten evaluar hasta qué punto es satisfactoria la situación actual o futura. Existen multitud de medidas directas de un sistema hidráulico, que evalúan su capacidad física o económica. Ejemplos de ello serían caudal regulado, valores esperados de recursos, beneficios económicos, ratios económicos como relación beneficio-coste, etc.

Sin embargo existen otras medidas alternativas que son defectivas en el sentido que analizan el fallo del sistema, es decir las características del incumplimiento de los objetivos perseguidos o deseados. Estas medidas son el objeto de nuestro interés. Se emplean fundamentalmente cuatro:

- Riesgo
- Garantía
- Resiliencia
- Vulnerabilidad

De ellas, el Riesgo es la más importante usada internacionalmente. Garantía es un concepto netamente español. E. Becerril en 1945 ya propuso el concepto, adelantándose en más de 20 años a su uso en otros países, en los que hoy se aplica esta medida con base científica. Sin embargo, en España, el concepto de garantía, se ha degradado por falta de evolución teórica científica y exceso de normativa administrativa. El concepto de Garantía en mucho más general”

En este trabajo se utilizó el concepto de garantía entendiéndolo como la satisfacción de largo plazo de la demanda por agua fresca para el proceso minero, sin perjuicio que puede ser mejorado incorporando los demás conceptos que pueden recoger períodos de insatisfacción de corto plazo u otros elementos.

⁶² Andreu, Joaquín. (1993). “Conceptos y métodos para la planificación hidrológica”. Editorial CINME, Barcelona, España. Pág. 49.

XI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

XI.1 De los resultados arrojados por las simulaciones: Interpretación y trabajo futuros de relevancia

Como se mencionó en el subcapítulo X.1.1 “Análisis de Resultados”, el análisis está hecho en base a escenarios generados por el autor junto a los asesores del proyecto. Sin perjuicio de esto es posible generar otros escenarios a evaluar de la misma forma para tener un espectro mayor para tomar decisiones iniciales. De todas formas es razonable concluir que, dados los recursos hídricos, su cantidad, variabilidad, estructura de probabilidad y de dependencia, los caudales a entregar a CODELCO deben de ser del orden de 1 m³/s, un poco más a lo mejor y los volúmenes de embalse entre 30-40-50 Millones de metros cúbicos. No se evaluaron embalses de tamaño mayor dada las características de la cuenca, aumentar el volumen significa subir mucho los costos. De todas maneras son elementos a tomar en cuenta que deben ser evaluados en etapas posteriores para tener mayor certeza y convicción en las decisiones. Respecto al tema de los préstamos este es fundamental, podría evaluarse la situación sin préstamo pero evidentemente los costos serán mayores dada la gran magnitud de embalse que se requeriría, además que el producto marginal del agua en la minería es muchas veces mayor que en la hidroelectricidad.

Es de mucha relevancia dejar claro que hay beneficios no considerados en la evaluación económica del proyecto Embalse, entre ellos cabe destacar algunos fundamentales:

- Considerar Control de Crecidas
- Regulación para Agricultura
- Función de los Glaciares

El control de crecidas actualmente se valora y no sería ninguna novedad, sólo asignar valor generado en base a ahorros por daños producto de crecidas pluviales o aluvionales. La regulación para la agricultura debe ser evaluada, dada la cantidad de agua y que ya se demostró que los recursos disponibles como excedentes son del orden de 1 m³/s o un poco más, el efecto o beneficio a priori, no sería tan relevante. Sí que es, y muy relevante tema de los glaciares. La destrucción de los glaciares va a ser un costo indudablemente para cualquier empresa, en este caso minera, y el embalse genera una de las funciones fundamentales de los glaciares, razón por la cual es una de las formas de compensar el daño. O sea parte del royalty a cobrar por la destrucción de glaciares, podría ser pagado como inversión en un embalse. Este tema será tratado en profundidad por el autor de este trabajo de título en su tesis de magister en derecho ambiental: “El royalty al Agua en Chile”.

Finalmente dentro del trabajo futuro, aunque ya se mencionó en el capítulo de alcances, es necesario indicar algunos elementos importantes:

- Realización de un modelo de base física para representar las alteraciones futuras de CODELCO en su expansión y abordar el cambio climático con los procedimientos científicos validados por la comunidad internacional. En la FCFM, se han guiado varios trabajos de título con modelos de este tipo, dirigidos principalmente por la profesora Ximena Vargas M.⁶³
- Evaluación de mejor manera del valle donde se emplazaría el embalse y la posibilidad de traer recursos de la cuenca aledaña, Los Leones, mediante un ducto, lo cual podría cambiar considerablemente las condiciones del proyecto haciéndolo más ventajoso de todas maneras.
- Realizar un estudio de los derechos de aprovechamiento de aguas en la zona y dar un sustento administrativo y legal al uso de estos excedentes que se han evaluado en el trabajo de título.
- Estudiar el transporte de sedimentos en esta cuenca que es muy importante, viendo medidas de mitigación que no afecten el volumen útil del embalse. Se deben incorporar en futuras simulaciones, los costos por ejemplo de obras para controlar la entrada de sedimentos o directamente dragar.

XI.3 Lineamientos en torno a la gestión del agua, su valor social y uso minero.

El tema hoy está en boga, el proyecto Andina 244 promete ser el primer gran proyecto en pasar por los nuevos Tribunales Ambientales, se está conociendo información, el tema de los glaciares es algo muy sensible porque todo sabemos que no son solamente agua, sino que cumplen la función de acumulación estacional e interanual, junto a la nieve acumulada, pero más aún son claves para eventos de sequías. Todo esto sumado a su importancia ecosistémica. Nadie podría dudar de que esto es patrimonio de la ciudadanía, y cualquier merma de este patrimonio debe ser compensada como corresponde. Citando una columna del quincenal Le Monde Diplomatique Chileno:

“Codelco, División Andina, contamina las aguas y destruye glaciares en la cuenca del río Aconcagua, región de Valparaíso: Las faenas de la mina Sur Sur han contaminado gravemente las aguas del Río Blanco y Aconcagua, poniendo en riesgo la trazabilidad de

⁶³ CARTES, MAURICIO Y OTROS. *Investigación de nieves y escorrentía de deshielo en la cuenca alta del río Aconcagua. Aplicación de modelos de simulación nival y de pronóstico de volúmenes de Deshielo.* Estudio elaborado por Universidad de QUEZADA, M. *Caracterización de los procesos hidrológicos relevantes en la cuenca del río Juncal, mediante un modelo hidrológico distribuido*. Profesor guía: Ximena Vargas. Memoria para optar al grado de Ingeniero Civil. Universidad De Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. (Entre otros)

la producción agrícola de varias comunas de la región de Valparaíso y fuertes tensiones con la junta de vigilancia del Río Aconcagua. Adicionalmente Codelco Andina ha destruido, entre 1998 y 2008, más de 2 kilómetros cuadrados de glaciares perdiéndose irreversiblemente 22 millones de metros cúbicos de agua. En enero de 2013 Codelco ingresó a evaluación ambiental una expansión de faenas que implica la destrucción de 20 glaciares en la cordillera de Valparaíso y Santiago⁶⁴.

- ✓ Generar una coordinación de los actores de la Cuenca del Río Aconcagua, liderada por CODELCO (Propuesta Transfer S.A.), es imprescindible para generar soluciones lo antes posible. Por supuesto con el objetivo de avanzar hacia una gestión integrada de cuencas sustentada en una legislación de base ciudadana, respetuosa de las personas y de los recursos naturales. Esto toma mayor relevancia en tanto que nuestra economía depende crucialmente del medio ambiente y los recursos naturales, Tan crucialmente, que el sistema que soporta la vida misma depende de los recursos naturales.

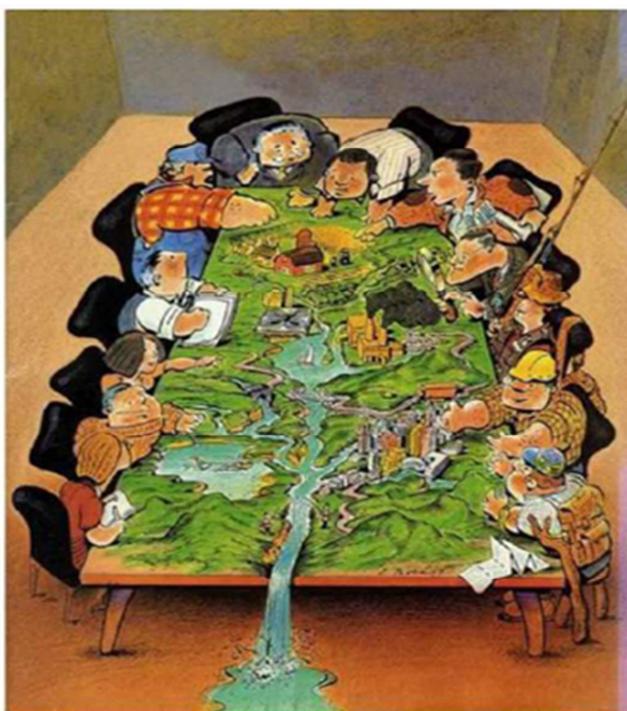


Figura IX.3.1 La coordinación de los actores es fundamental: iniciativas privadas ayudan significativamente pero también se debe legislar desde la ciudadanía y exigir el cumplimiento razonable de las normas, sino desaprovechamos nuestros recursos y nuestra potencial mejor calidad de vida material y espiritual.

⁶⁴ LE MONDE DIPLOMATIQUE, *20 importantes conflictos por el agua en Chile*, Santiago: Chile Sustentable, 2013, p. 7.

XII.- REFERENCIAS

1. 4C Ingenieros Consultores. (2007) **“Estimación de Caudales Medio Mensuales Cuenca Alta Río Blanco”**. Estudio realizado para División Andina de Codelco. Chile.
2. Andreu, Joaquín. (1993). **“Conceptos y métodos para la planificación hidrológica”**. Editorial CINME, Barcelona, España.
3. Arcadis Geotecnia. (2011). **“Evaluación impacto ambiental, proyecto expansión Andina 244”**. SEIA. SEA. Chile.
4. Ayala, Cabrera y Asociados. (2001). **“Plan director para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Aconcagua”**. Elaborado para DGA. MOP. Chile.
5. Bauer, Carl J. (2002). **“Contra la corriente. Privatización, mercados de agua y el Estado en Chile”**. Editorial LOM y Fundación Terram. Chile.
6. Beyá, Ignacio. (2010). **“Optimización de la operación del sistema embalse Puclaro incorporando el objetivo de generación hidroeléctrica”**. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. FCFM. Universidad de Chile.
7. Bown, Francisca. (2008). **“Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes”**. Annals of Glaciology. Vol. 48, pp.43-48.
8. Box y Jenkins. (1976). **“Time Series Analysis. Forecasting and Control”**. Holden Day. Edición n°2.
9. Bras, R.L. (1985). **“Random Functions and Hydrology”**. Addison Wesley Pub. Co.
10. Cade-idepe (2004). **“Diagnóstico y clasificación de los cuerpos y cursos de agua según objetivos de calidad”**. Estudio para DGA. MOP. Chile.
11. Cartes, Mauricio y otros. (2008). **“Investigación de nieves y escorrentía de deshielo en la cuenca alta del río Aconcagua. Aplicación de modelos de simulación nival y de pronóstico de volúmenes de Deshielo”**. _Estudio elaborado por Universidad de Chile para DGA. MOP. Chile.
12. CDEC-SIC (2012). **“www.cdec-sic.cl”**. Página del centro de despacho económico de carga. Chile.
13. Chile Sustentable. (2013). **“Reformas Constitucionales en materia de aguas y reforma al código de aguas”**. Documento de Trabajo. Santiago de Chile.
14. Claude, Marcel (1996). **“Una vez más la Miseria. ¿Es Chile un país sustentable?”**. LOM Ediciones. Chile.
15. DARH, DGA. (2004). **“Evaluación de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Aconcagua”**. Informe técnico. DGA. MOP. Chile.
16. DeWalle, David. (2008). **“Principles of Snow Hydrology”**. Cambridge University.

17. DGA, MOP. (1978). **“Caudales medios mensuales de los ríos de Chile”**. Publicación Ministerio de Obras Públicas. Chile. Vol. I.
18. Espíldora, Basilio y otros. (1975). **“Elementos de hidrología”**. Centro de recursos hidráulicos. Universidad de Chile.
19. Fernández, Bonifacio. (1985). **“Análisis de la periodicidad en series hidrológicas”**. Anales de la Universidad de Chile. Estudios en honor de Francisco Javier Domínguez. Vol. 8, pp. 634-653.
20. Fernández, Bonifacio. (1990). **“Modelos estocásticos en hidrología”**. Revista chilena de ingeniería hidráulica. Vol. 5, pp. 9-20.
21. Fernández, Bonifacio. (2012). **“Apuntes Hidrología Estocástica”**. Apuntes del curso ICH3264. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.
22. Hernández, Álvaro. (2001) **“Valoración del negocio recursos hídricos”**. Memoria para optar al grado de Magister en administración de empresas. FCFM. Universidad de Chile.
23. Instituto de Ingenieros de Chile (2011). **“Temas prioritarios para una política nacional de recurso hídricos”**. Comisión de Aguas del Instituto. Santiago de Chile.
24. Lavandero Illanes, Jorge. (2003). **“Royalty, Regalía o Renta Minera. Lo que sólo Chile no Cobra”**. Ediciones Lafken. Santiago de Chile.
25. Le Monde Diplomatique (2013). **“20 Conflictos por el agua en Chile”**. Edición del 7 de Mayo.
26. López, René. (1991). **“Estudio de recursos hídricos sector alto hoya Río Blanco: abastecimiento y drenaje”**. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. FCFM. Universidad de Chile.
27. Ministerio de Justicia de Chile. (1981). **“Código de Aguas”** Editorial Albedo Perrot. Edición 2012.
28. Ministerio de Justicia de Chile. (2012) **“Ley de Bases del Medio Ambiente”**. Lexx Editores. 2° Edición. Chile.
29. Miranda, Julio (1989). **“Experimentación con Modelos ARMA en la generación de Estocástica de Caudales”**. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. FCFM. Universidad de Chile.
30. Quezada, M. (2010). **“Caracterización de los procesos hidrológicos relevantes en la cuenca del río Juncal, mediante un modelo hidrológico distribuido”**. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. FCFM. Universidad de Chile.
31. Rivera, Pedro. (2008). **“Un modelo estocástico espacial para la precipitación mensual en la cuenca del río Maipo: Aplicación para relleno estocástico condicionado y simulación de series sintéticas espaciales”**. DGA. MOP. Chile.

32. Rivera, Pedro. (2011). **“Apuntes Regulación del Agua: Conceptos y casos de Estudio”**. Apuntes curso CI5107. FCFM. Universidad de Chile.
33. Samuelson, Paul A. (2012). **“Microeconomía con aplicaciones a Latinoamérica”**. Mc Graw Hill. 19ª Edición. México.
34. Transfer S.A. (2012). **“Proyecto TSA-Codelco”**. Estrategia para mejorar la gestión del agua en la cuenca del río Aconcagua. Informe técnico.
35. Varas G., Eduardo. (1998). **“Hidrología Probabilística”**. Publicación Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.
36. Vargas, Ximena. (2008). **“Apuntes Hidrología”**. Apuntes de Clases curso CI41C. FCFM. Universidad de Chile.

XIII.- APÉNDICE

XIII.1. Test Chi-Cuadrado por mes para ajuste de función de probabilidad Gamma

(Ver CD Adjunto)

XIII.2. Test Medias Adimensionales y Coeficiente de Variación para supuestos de Desagregación Espacial

Año Hidrológico Estación Blanco	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1991/1992												
1992/1993	4,34	3,74	4,06	3,55	3,46	4,60	9,89	16,52	22,76	23,59	16,70	11,04
1993/1994	5,74	6,15	3,75	3,22	3,12	4,22	5,14	12,89	19,89	18,10	10,17	8,33
1994/1995	3,51	2,87	2,80	2,66	3,63	3,66	5,90	16,32	24,48	16,16	9,88	6,35
1995/1996												
1996/1997												
1997/1998	2,95	1,67	3,15	2,86	3,79	6,89	7,21	15,89	31,26	35,56	12,35	10,58
1998/1999	7,14	3,91	2,98	2,31	1,97	1,88	4,31	7,75	10,53	9,59	8,86	5,64
1999/2000	2,81	1,85	1,65	1,77	2,12	3,65	6,43	13,03	14,90	12,25	7,82	6,19
2000/2001												
Q mes PROMEDIO	4,41	3,37	3,06	2,73	3,02	4,15	6,48	13,73	20,64	19,21	10,96	8,02
Q mes PROMEDIO/Qaño	0,97	0,74	0,67	0,60	0,66	0,91	1,42	3,01	4,52	4,21	2,40	1,76
Q mes DESVIACION	1,72	1,65	0,84	0,64	0,78	1,64	1,95	3,35	7,32	9,36	3,19	2,35
Q mes DESVIACION/Q mes PROMEDIO	0,39	0,49	0,28	0,23	0,26	0,39	0,30	0,24	0,35	0,49	0,29	0,29

Año Hidrológico Km 15-16	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1991/1992												
1992/1993	1,43	2,30	3,18	1,59	1,91	3,49	8,65	12,70	13,66	13,26	8,57	2,14
1993/1994	2,14	2,14	1,91	1,67	1,59	1,59	3,65	10,08	12,15	6,83	4,45	3,57
1994/1995	1,83	1,67	1,83	1,67	2,06	3,41	4,76	11,75	16,67	9,69	4,45	2,70
1995/1996												
1996/1997												
1997/1998	1,67	1,59	1,83	1,83	2,06	2,70	3,18	5,72	5,72	25,56	7,54	4,13
1998/1999	2,62	2,54	2,22	1,75	1,43	1,51	3,10	4,05	4,84	4,05	3,49	2,46
1999/2000	1,75	1,59	1,43	1,51	1,75	2,46	3,41	9,45	9,45	6,03	3,10	2,06
2000/2001												
Q mes PROMEDIO	1,91	1,97	2,06	1,67	1,80	2,53	4,46	8,96	10,41	10,90	5,27	2,84
Q mes PROMEDIO/Qaño	0,42	0,43	0,45	0,37	0,39	0,55	0,98	1,96	2,28	2,39	1,15	0,62
Q mes DESVIACION	0,42	0,41	0,60	0,11	0,26	0,86	2,14	3,40	4,62	7,86	2,25	0,83
Q mes DESVIACION/Q mes PROMEDIO	0,22	0,21	0,29	0,07	0,14	0,34	0,48	0,38	0,44	0,72	0,43	0,29

TEST T-STUDENT PROMEDIOS												
S	0,32	0,38	0,28	0,17	0,21	0,37	0,40	0,32	0,40	0,62	0,37	0,29
T	3,01	1,40	1,34	2,35	2,19	1,67	1,91	5,68	9,66	5,12	5,91	6,72
	2,4%	21,0%	22,9%	5,7%	7,1%	14,5%	10,4%	0,1%	0,0%	0,2%	0,1%	0,1%
TEST FISCHER-SNEDECOR VARIANZAS												
F	3,11	5,50	1,12	12,04	3,26	1,35	2,55	2,43	1,57	2,19	2,15	1,01
G1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
G2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	11,9%	4,2%	45,2%	0,8%	11,0%	37,5%	16,4%	17,6%	31,7%	20,5%	21,0%	49,7%

XIII.3. Test de Auto Correlación para justificar el traslado en la Desagregación Espacial

AUTOCORRELACION	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	
Río Blanco en Blanco	N1	50											
Autocorrelación n=1	0,89	0,74	0,63	0,96	0,71	0,76	0,54	0,73	0,85	0,90	0,63	0,89	
Media Movil n=5	0,78	0,76	0,72	0,74	0,72	0,76	0,73	0,80	0,83	0,81	0,75	0,82	
AUTOCORRELACION	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	
Río Blanco en Km 15-16	N2	6											
Autocorrelación n=1 Km 15-16	0,53	0,54	0,68	-0,04	0,09	0,87	0,69	0,71	0,94	-0,18	0,77	0,27	
Media Movil n=5	0,36	0,43	0,46	0,46	0,66	0,60	0,59	0,50	0,46	0,39	0,56	0,40	
	Zh	1,06	0,99	0,91	0,95	0,90	0,99	0,93	1,09	1,19	1,13	0,98	1,16
	Zg	0,38	0,46	0,49	0,50	0,79	0,70	0,67	0,55	0,50	0,41	0,63	0,42
	Z	0,96	0,76	0,58	0,63	0,16	0,40	0,37	0,77	0,97	1,02	0,50	1,04

XIII.4 Normalización en base a distribución Gamma

Caudales Río Blanco

Año Hidrológico	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	
1953	1954	4,75	3	3,7	3	4,75	7,2	9,6	32	76	54	40,5	15,4
1954	1955	6,7	3,85	4,05	3,05	2,75	3,45	4,25	12	14,4	20,5	6,6	7
1955	1956	3,05	2,4	2,65	2,2	2,65	3,9	4,85	20	16,2	13	11	5
1956	1957	2,2	1,96	2,35	2,15	2,1	2,55	4,4	9,8	9,1	15,7	12	8,5
1957	1958	2,75	1,96	1,8	2,05	1,94	2,4	4,2	11,8	22	22,5	11,4	6,7
1958	1959	4,35	3,05	2,8	2,95	1,9	2,35	8,6	14	18,2	13,4	12,6	7,7
1959	1960												
1960	1961												
1961	1962												
1962	1963												
1963	1964	4	2,3	1,87	3,1	2,8	4,74	6,93	8,05	32,5	35,3	19,9	12,6
1964	1965	6,09	3,39	2,82	2,74	2,28	2,9	3,75	6,43	9,51	12,7	11,4	8,76
1965	1966	4,78	3,37	3,11	2,73	4,37	5,48	10	19	22,8	24,6	15	10
1966	1967	5,11	3,57	3,29	3,76	3,87	5,44	8,08	12,7	15,5	18,6	17,3	9,64
1967	1968	5,73	2,45	1,9	1,55	1,3	1,61	3,43	7,22	15	12,9	11,2	6,5
1968	1969	3,12	2,09	1,76	1,52	1,44	1,66	1,79	6,83	9,08	11,1	10,1	6,32
1969	1970	2,73	2,25	2,5	2,17	2,6	3,44	3,96	12,1	28,7	18,5	12,5	6,75
1970	1971	4,20	2,40	2,11	2,19	2,41	3,14	5,62	12,50	16,40	13,39	11,35	5,78

Año Hidrológico		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1971	1972	2,82	1,77	1,60	2,26	2,59	3,75	7,10	20,66	20,44	16,85	10,84	4,47
1972	1973	2,79	4,61	5,49	3,98	4,40	6,44	8,45	14,93	45,72	62,46	32,40	23,29
1973	1974	9,01	5,30	4,45	4,62	4,17	4,82	6,66	16,78	24,45	34,56	20,96	11,96
1974	1975	5,40	3,12	3,42	4,63	4,22	5,40	10,25	14,69	21,69	29,94	13,86	8,32
1975	1976	3,64	2,38	2,36	2,52	3,05	4,62	6,16	9,29	23,76	19,54	10,90	6,30
1976	1977	2,94	2,67	2,74	2,36	1,50	3,13	4,91	15,74	21,14	16,73	6,10	7,64
1977	1978	3,65	3,48	2,94	3,96	1,30	7,99	14,01	23,45	43,29	28,37	19,14	8,88
1978	1979	4,25	3,03	2,31	2,86	3,28	4,93	9,15	19,71	51,87	46,30	19,39	9,16
1979	1980	5,41	3,68	2,84	2,51	3,59	4,71	6,51	8,86	14,89	23,78	16,11	12,56
1980	1981	8,43	6,73	5,70	4,80	4,62	5,76	8,56	20,56	46,85	28,03	23,09	13,57
1981	1982	7,02	4,93	3,94	3,70	3,45	3,74	5,34	15,32	17,09	18,49	12,59	6,18
1982	1983	5,74	4,17	8,89	6,26	6,76	9,86	10,24	17,33	40,07	39,56	33,39	16,63
1983	1984												
1984	1985												
1985	1986	6,30	4,41	3,71	3,98	3,36	3,39	5,04	22,84	24,08	22,00	16,50	10,70
1986	1987	4,76	4,19	12,20	6,46	5,05	5,99	10,32	20,29	38,67	30,13	22,13	14,14
1987	1988	6,86	4,63	4,49	7,46	7,77	6,24	12,08	32,49	36,58	44,03	18,40	13,88
1988	1989	7,34	3,83	2,78	2,15	2,89	3,70	5,45	13,65	14,94	14,60	14,34	7,38
1989	1990	3,77	3,06	2,38	2,28	3,48	5,67	9,11	17,95	17,60	12,51	8,59	4,42
1990	1991	1,93	1,73	1,02	0,96	1,10	2,77	4,80	10,94	13,72	11,97	9,53	6,31
1991	1992	4,20	3,96	3,50	4,39	3,74	6,99	8,28	17,81	17,85	22,47	17,34	11,66
1992	1993	4,34	3,74	4,06	3,55	3,46	4,60	9,89	16,52	22,76	23,59	16,70	11,04
1993	1994	5,74	6,15	3,75	3,22	3,12	4,22	5,14	12,89	19,89	18,10	10,17	8,33
1994	1995	3,51	2,87	2,80	2,66	3,63	3,66	5,90	16,32	24,48	16,16	9,88	6,35
1995	1996	3,65	2,72	2,29	2,28	2,23	3,64	4,42	15,40	18,10	8,69	8,45	6,62
1996	1997	3,24	2,00	1,54	1,66	1,61	1,72	2,39	4,62	6,43	6,90	6,66	5,00
1997	1998	2,95	1,67	3,15	2,86	3,79	6,89	7,21	15,89	31,26	35,56	12,35	10,58
1998	1999	7,14	3,91	2,98	2,31	1,97	1,88	4,31	7,75	10,53	9,59	8,86	5,64
1999	2000	2,81	1,85	1,65	1,77	2,12	3,65	6,43	13,03	14,90	12,25	7,82	6,19
2000	2001	4,30	2,76	2,86	3,87	3,90	4,37	9,97	15,13	32,47	27,65	17,20	9,23
2001	2002	5,34	3,84	3,29	3,53	4,57	5,29	9,00	13,18	30,57	20,80	14,86	8,39
2002	2003	4,23	3,70	4,96	4,96	6,53	6,53	9,04	19,69	31,93	33,70	26,26	14,77
2003	2004	6,80	4,41	3,78	3,63	3,48	4,10	8,43	15,27	17,35	17,83	12,54	7,83
2004	2005	4,22	2,90	2,60	2,54	2,97	4,40	4,52	9,33	15,61	15,14	10,37	7,08
2005	2006	3,92	3,27	5,60	4,89	5,83	7,08	10,96	25,96	39,08	36,99	23,58	10,50
2006	2007	5,97	3,69	3,44	6,30	5,41	6,44	11,02	22,57	32,39	28,15	12,86	9,64
2007	2008												
2008	2009	4,72	5,43	5,81	4,11	4,70	5,49	9,80	26,75	29,70	18,12	12,40	9,43
2009	2010												
2010	2011	5,78	3,31	2,83	2,78	2,78	2,93	4,32	8,29	9,75	9,39	8,11	6,03

Estadígrafos Río Blanco

PARÁMETROS	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Media	4,7	3,4	3,4	3,3	3,4	4,5	7,1	15,5	24,5	22,9	15,0	9,1
Desviación	1,6	1,1	1,9	1,4	1,5	1,8	2,7	6,2	13,2	12,0	7,1	3,6
Coef. Variación	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4
Alpha	8,3	8,6	3,3	5,6	5,4	6,5	6,7	6,2	3,5	3,7	4,5	6,3
Betha	0,6	0,4	1,0	0,6	0,6	0,7	1,1	2,5	7,1	6,2	3,4	1,5

Probabilidad Gamma

Prob Gamma		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1953	1954	0,56	0,42	0,63	0,47	0,83	0,92	0,83	0,99	1,00	0,98	1,00	0,94
1954	1955	0,89	0,70	0,69	0,49	0,37	0,30	0,14	0,32	0,23	0,49	0,09	0,31
1955	1956	0,15	0,21	0,40	0,23	0,34	0,40	0,21	0,79	0,30	0,21	0,33	0,11
1956	1957	0,03	0,09	0,33	0,21	0,19	0,11	0,16	0,18	0,08	0,31	0,39	0,48
1957	1958	0,10	0,09	0,19	0,19	0,15	0,09	0,13	0,30	0,49	0,55	0,35	0,27
1958	1959	0,46	0,43	0,43	0,46	0,14	0,08	0,74	0,45	0,36	0,22	0,42	0,39
1959	1960												
1960	1961												
1961	1962												
1962	1963												
1963	1964	0,37	0,18	0,21	0,50	0,39	0,60	0,53	0,09	0,77	0,86	0,78	0,84
1964	1965	0,82	0,56	0,44	0,39	0,24	0,18	0,09	0,04	0,09	0,20	0,35	0,51
1965	1966	0,57	0,55	0,51	0,39	0,77	0,73	0,86	0,74	0,52	0,62	0,57	0,64
1966	1967	0,64	0,62	0,55	0,68	0,68	0,73	0,68	0,36	0,27	0,42	0,68	0,61
1967	1968	0,76	0,22	0,22	0,08	0,04	0,02	0,06	0,06	0,25	0,20	0,34	0,25
1968	1969	0,16	0,12	0,18	0,07	0,06	0,02	0,00	0,05	0,08	0,14	0,27	0,23
1969	1970	0,10	0,16	0,36	0,22	0,33	0,29	0,11	0,32	0,68	0,41	0,42	0,28
1970	1971	0,42	0,21	0,27	0,22	0,27	0,23	0,33	0,35	0,30	0,22	0,35	0,18
1971	1972	0,11	0,06	0,15	0,24	0,33	0,37	0,55	0,81	0,44	0,35	0,32	0,07
1972	1973	0,10	0,86	0,87	0,73	0,78	0,86	0,72	0,51	0,93	0,99	0,98	1,00
1973	1974	0,99	0,94	0,75	0,84	0,74	0,61	0,49	0,63	0,57	0,84	0,82	0,80
1974	1975	0,70	0,46	0,57	0,84	0,75	0,72	0,87	0,50	0,48	0,76	0,50	0,46
1975	1976	0,28	0,20	0,33	0,32	0,46	0,57	0,41	0,15	0,55	0,45	0,32	0,23
1976	1977	0,13	0,30	0,42	0,28	0,06	0,22	0,22	0,57	0,46	0,35	0,07	0,38
1977	1978	0,28	0,59	0,47	0,72	0,04	0,96	0,98	0,89	0,91	0,72	0,76	0,53
1978	1979	0,43	0,43	0,31	0,43	0,53	0,64	0,79	0,77	0,96	0,95	0,77	0,56
1979	1980	0,70	0,65	0,44	0,32	0,61	0,59	0,47	0,13	0,25	0,60	0,62	0,83
1980	1981	0,98	0,99	0,88	0,86	0,81	0,78	0,74	0,81	0,94	0,72	0,87	0,88
1981	1982	0,91	0,91	0,67	0,67	0,57	0,36	0,28	0,54	0,33	0,41	0,42	0,22

Prob Gamma		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1982	1983	0,76	0,78	0,99	0,97	0,97	0,99	0,87	0,66	0,88	0,91	0,98	0,96
1983	1984												
1984	1985												
1985	1986	0,84	0,83	0,63	0,73	0,55	0,28	0,24	0,88	0,56	0,54	0,64	0,70
1986	1987	0,56	0,78	1,00	0,97	0,87	0,81	0,88	0,80	0,86	0,76	0,85	0,90
1987	1988	0,90	0,87	0,76	0,99	0,99	0,84	0,95	0,99	0,83	0,94	0,73	0,90
1988	1989	0,93	0,69	0,43	0,21	0,41	0,36	0,30	0,43	0,25	0,27	0,53	0,35
1989	1990	0,31	0,44	0,33	0,25	0,58	0,76	0,79	0,69	0,34	0,19	0,18	0,07
1990	1991	0,02	0,05	0,05	0,01	0,02	0,15	0,21	0,25	0,21	0,17	0,24	0,23
1991	1992	0,42	0,73	0,59	0,81	0,65	0,91	0,70	0,69	0,35	0,55	0,68	0,78
1992	1993	0,46	0,67	0,69	0,63	0,58	0,57	0,85	0,61	0,52	0,59	0,65	0,73
1993	1994	0,76	0,98	0,64	0,54	0,48	0,48	0,26	0,38	0,42	0,40	0,27	0,46
1994	1995	0,25	0,37	0,43	0,37	0,62	0,34	0,37	0,60	0,57	0,32	0,26	0,23
1995	1996	0,28	0,31	0,31	0,25	0,22	0,34	0,16	0,55	0,36	0,08	0,17	0,26
1996	1997	0,19	0,10	0,14	0,09	0,08	0,02	0,01	0,01	0,03	0,04	0,09	0,11
1997	1998	0,13	0,04	0,52	0,43	0,66	0,90	0,57	0,58	0,74	0,86	0,41	0,70
1998	1999	0,92	0,72	0,48	0,26	0,16	0,03	0,15	0,08	0,12	0,10	0,20	0,16
1999	2000	0,11	0,07	0,16	0,12	0,20	0,34	0,45	0,39	0,25	0,18	0,14	0,22
2000	2001	0,45	0,33	0,45	0,71	0,68	0,51	0,85	0,53	0,76	0,71	0,68	0,56
2001	2002	0,69	0,70	0,55	0,62	0,81	0,70	0,78	0,40	0,73	0,50	0,56	0,47
2002	2003	0,43	0,65	0,82	0,88	0,97	0,87	0,78	0,77	0,75	0,83	0,93	0,92
2003	2004	0,89	0,83	0,64	0,65	0,58	0,45	0,72	0,54	0,34	0,39	0,42	0,40
2004	2005	0,43	0,38	0,39	0,33	0,44	0,52	0,17	0,15	0,28	0,29	0,29	0,32
2005	2006	0,35	0,51	0,88	0,87	0,94	0,91	0,91	0,94	0,87	0,88	0,88	0,69
2006	2007	0,80	0,65	0,58	0,97	0,91	0,86	0,91	0,87	0,76	0,72	0,44	0,61
2007	2008												
2008	2009	0,55	0,95	0,89	0,76	0,83	0,74	0,84	0,95	0,71	0,40	0,41	0,58
2009	2010												
2010	2011	0,77	0,53	0,44	0,40	0,38	0,18	0,15	0,10	0,10	0,10	0,16	0,20

Normalización Estándar

Norm-Estand		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1953	1954	0,2	-0,2	0,3	-0,1	1,0	1,4	0,9	2,2	2,7	2,1	2,7	1,6
1954	1955	1,2	0,5	0,5	0,0	-0,3	-0,5	-1,1	-0,5	-0,7	0,0	-1,4	-0,5
1955	1956	-1,0	-0,8	-0,3	-0,7	-0,4	-0,2	-0,8	0,8	-0,5	-0,8	-0,5	-1,2
1956	1957	-1,8	-1,3	-0,5	-0,8	-0,9	-1,2	-1,0	-0,9	-1,4	-0,5	-0,3	0,0
1957	1958	-1,3	-1,3	-0,9	-0,9	-1,0	-1,3	-1,1	-0,5	0,0	0,1	-0,4	-0,6
1958	1959	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-1,1	-1,4	0,6	-0,1	-0,3	-0,8	-0,2	-0,3
1959	1960												
1960	1961												
1961	1962												
1962	1963												
1963	1964	-0,3	-0,9	-0,8	0,0	-0,3	0,2	0,1	-1,3	0,7	1,1	0,8	1,0
1964	1965	0,9	0,1	-0,2	-0,3	-0,7	-0,9	-1,4	-1,8	-1,3	-0,9	-0,4	0,0
1965	1966	0,2	0,1	0,0	-0,3	0,8	0,6	1,1	0,7	0,0	0,3	0,2	0,4
1966	1967	0,4	0,3	0,1	0,5	0,5	0,6	0,5	-0,4	-0,6	-0,2	0,5	0,3
1967	1968	0,7	-0,8	-0,8	-1,4	-1,8	-2,1	-1,5	-1,6	-0,7	-0,8	-0,4	-0,7
1968	1969	-1,0	-1,2	-0,9	-1,5	-1,6	-2,1	-2,8	-1,7	-1,4	-1,1	-0,6	-0,7
1969	1970	-1,3	-1,0	-0,4	-0,8	-0,4	-0,5	-1,2	-0,5	0,5	-0,2	-0,2	-0,6
1970	1971	-0,2	-0,8	-0,6	-0,8	-0,6	-0,8	-0,4	-0,4	-0,5	-0,8	-0,4	-0,9
1971	1972	-1,2	-1,6	-1,0	-0,7	-0,4	-0,3	0,1	0,9	-0,1	-0,4	-0,5	-1,5
1972	1973	-1,3	1,1	1,1	0,6	0,8	1,1	0,6	0,0	1,5	2,5	2,0	2,9
1973	1974	2,2	1,6	0,7	1,0	0,6	0,3	0,0	0,3	0,2	1,0	0,9	0,8
1974	1975	0,5	-0,1	0,2	1,0	0,7	0,6	1,1	0,0	0,0	0,7	0,0	-0,1
1975	1976	-0,6	-0,8	-0,4	-0,5	-0,1	0,2	-0,2	-1,0	0,1	-0,1	-0,5	-0,7
1976	1977	-1,1	-0,5	-0,2	-0,6	-1,5	-0,8	-0,8	0,2	-0,1	-0,4	-1,5	-0,3
1977	1978	-0,6	0,2	-0,1	0,6	-1,8	1,7	2,1	1,2	1,3	0,6	0,7	0,1
1978	1979	-0,2	-0,2	-0,5	-0,2	0,1	0,3	0,8	0,8	1,8	1,7	0,7	0,1
1979	1980	0,5	0,4	-0,1	-0,5	0,3	0,2	-0,1	-1,1	-0,7	0,2	0,3	1,0
1980	1981	2,0	2,4	1,2	1,1	0,9	0,8	0,6	0,9	1,5	0,6	1,1	1,2
1981	1982	1,4	1,3	0,4	0,4	0,2	-0,3	-0,6	0,1	-0,4	-0,2	-0,2	-0,8
1982	1983	0,7	0,8	2,2	1,8	1,9	2,4	1,1	0,4	1,2	1,3	2,1	1,8
1983	1984												
1984	1985												
1985	1986	1,0	0,9	0,3	0,6	0,1	-0,6	-0,7	1,2	0,1	0,1	0,4	0,5
1986	1987	0,2	0,8	3,1	1,9	1,1	0,9	1,2	0,8	1,1	0,7	1,0	1,3
1987	1988	1,3	1,1	0,7	2,4	2,4	1,0	1,6	2,2	1,0	1,6	0,6	1,3
1988	1989	1,5	0,5	-0,2	-0,8	-0,2	-0,4	-0,5	-0,2	-0,7	-0,6	0,1	-0,4
1989	1990	-0,5	-0,2	-0,4	-0,7	0,2	0,7	0,8	0,5	-0,4	-0,9	-0,9	-1,5
1990	1991	-2,1	-1,6	-1,6	-2,3	-2,0	-1,0	-0,8	-0,7	-0,8	-0,9	-0,7	-0,7
1991	1992	-0,2	0,6	0,2	0,9	0,4	1,3	0,5	0,5	-0,4	0,1	0,5	0,8
1992	1993	-0,1	0,4	0,5	0,3	0,2	0,2	1,0	0,3	0,0	0,2	0,4	0,6

Norm-Estand		Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1993	1994	0,7	2,1	0,4	0,1	0,0	-0,1	-0,7	-0,3	-0,2	-0,3	-0,6	-0,1
1994	1995	-0,7	-0,3	-0,2	-0,3	0,3	-0,4	-0,3	0,3	0,2	-0,5	-0,7	-0,7
1995	1996	-0,6	-0,5	-0,5	-0,7	-0,8	-0,4	-1,0	0,1	-0,4	-1,4	-0,9	-0,6
1996	1997	-0,9	-1,3	-1,1	-1,3	-1,4	-2,0	-2,2	-2,4	-1,8	-1,7	-1,3	-1,2
1997	1998	-1,1	-1,7	0,0	-0,2	0,4	1,3	0,2	0,2	0,6	1,1	-0,2	0,5
1998	1999	1,4	0,6	-0,1	-0,6	-1,0	-1,8	-1,1	-1,4	-1,2	-1,3	-0,9	-1,0
1999	2000	-1,2	-1,5	-1,0	-1,2	-0,9	-0,4	-0,1	-0,3	-0,7	-0,9	-1,1	-0,8
2000	2001	-0,1	-0,4	-0,1	0,5	0,5	0,0	1,1	0,1	0,7	0,5	0,5	0,2
2001	2002	0,5	0,5	0,1	0,3	0,9	0,5	0,8	-0,3	0,6	0,0	0,1	-0,1
2002	2003	-0,2	0,4	0,9	1,2	1,8	1,1	0,8	0,8	0,7	1,0	1,5	1,4
2003	2004	1,3	0,9	0,4	0,4	0,2	-0,1	0,6	0,1	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2
2004	2005	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,2	0,1	-0,9	-1,0	-0,6	-0,6	-0,6	-0,5
2005	2006	-0,4	0,0	1,2	1,2	1,5	1,4	1,3	1,5	1,1	1,2	1,2	0,5
2006	2007	0,8	0,4	0,2	1,9	1,3	1,1	1,4	1,1	0,7	0,6	-0,1	0,3
2007	2008												
2008	2009	0,1	1,6	1,2	0,7	0,9	0,6	1,0	1,6	0,5	-0,3	-0,2	0,2
2009	2010												
2010	2011	0,7	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,9	-1,0	-1,3	-1,3	-1,3	-1,0	-0,8

XIII.5. Parámetros en base a las ecuaciones de cada modelo mensual y su orden, dado por el criterio de información de Akaike

Parámetro / mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Phi 1	0,78	0,44	0,74	0,74	1,25	0,57	0,55	0,60	0,54	1,07	0,71	1,05
Phi 2	0,05	0,29	-0,10	0,01	-0,45	0,26	0,30	0,18	0,25	-0,30	0,13	-0,21
Desv. Residuo	0,336	0,565	0,540	0,438	0,203	0,388	0,355	0,443	0,444	0,297	0,336	0,229
AIC (Akaike) Min	-	31,44	-	-	94,86	54,72	60,19	46,41	46,38	71,28	63,59	87,49

XIII.6. Estacionariedad de los parámetros de los modelos PAR (1) y PAR (2)

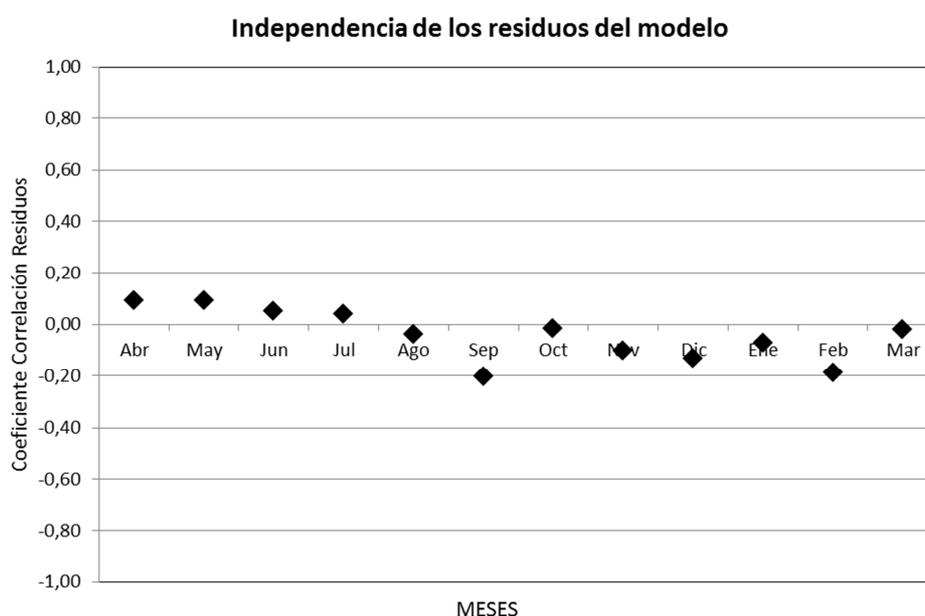
AR (1) $\sigma_{\varepsilon}^2 > 0 \Leftrightarrow \phi_1^2 < 1$

AR (2) $0 < \sigma_{\varepsilon}^2 < \sigma_z^2$

Para el caso de los modelos con PAR (2), la desviación del residuo elevada al cuadrado debe ser inferior a 1, ya que se trabajó con normal estándar.

Criterio / mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Phi 1^2	0,60		0,54	0,54							0,50	
Desviación Residuo ^2		0,31			0,04	0,15	0,12	0,19	0,19	0,08		0,05

XIII.7. Independencia (iid) y Normalidad de los residuos de los Modelos PAR (1) y PAR (2)



Test de Normalidad de los residuos

(Ver CD Adjunto)

XIII.8. Capacidad del modelo para replicar propiedades de la serie histórica original

(Ver CD Adjunto)

XIII.9. Resolución del modelo para un caso particular, incluyendo la evaporación y demás variables

(Ver CD Adjunto)

