



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

**ESTUDIO DEL CONCEPTO DE SEGURIDAD DE RIEGO, SU
RELACIÓN CON REGLAS DE REGULACIÓN DE EMBALSES Y
FUNCIONES DE BENEFICIO AGRÍCOLA, CASO EMBALSE
LAS PALMAS, V REGIÓN, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

JAVIERA ALEJANDRA CÓRDOVA LOAIZA

PROFESOR GUÍA:
MARCELO OLIVARES ALVEAL

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
TANIA FERNANDEZ RUBILAR
XIMENA VARGAS MESA

SANTIAGO DE CHILE
2017

**ESTUDIO DEL CONCEPTO DE SEGURIDAD DE RIEGO, SU RELACIÓN CON
REGLAS DE REGULACIÓN DE EMBALSES Y FUNCIONES DE BENEFICIO
AGRÍCOLA, CASO EMBALSE LAS PALMAS, V REGIÓN, CHILE**

En Chile, para la planificación de un embalse de riego se realiza la modelación del proyecto con la finalidad de definir el área a cultivar dada una distribución. A esta área se le debe asegurar una 85% de seguridad de riego. La seguridad de riego es un criterio particular de confiabilidad de suministro hídrico, que posee su propia definición de falla. Las entregas del embalse, con las que se calcula la seguridad de riego, se definen por la regla de operación estándar.

El inconveniente de aplicar el indicador de seguridad de riego es que es conservador en cuanto a los déficits que permite y no se adapta a los diferentes tipos de cultivo. Es por esto que se estudia la definición de seguridad de riego como criterio, en contexto con el desempeño económico del embalse.

En el presente estudio, para evaluar la seguridad de riego se utilizan los conceptos de magnitud de falla, frecuencia de falla y daño asociado considerado como el beneficio no obtenido. A las entregas del embalse se les asigna un beneficio económico, ligado a los cultivos en producción a partir de una curva de demanda de agua de riego. El beneficio agrícola no se comporta de manera lineal por lo que, dependiendo de la magnitud de los déficits respecto a la demanda hídrica de los cultivos, se obtienen diferentes beneficios.

Para evaluar cómo se relaciona la seguridad de riego con la distribución de los beneficios se simulan series sintéticas de caudales mensuales en un modelo operacional. Se opera el modelo para dos situaciones, una con regla de operación estándar y otra bajo una regla con Hedging de dos puntos, la cual induce déficits pequeños en el tiempo presente para evitar déficits más severos en el futuro. Posteriormente, se evalúan las series de entregas resultantes del modelo según indicadores de desempeño y se estiman el daño económico asociados.

Se aplica el modelo al embalse en proceso de licitación, Las Palmas, ubicado en la Región de Valparaíso. Se proyecta que este embalse sea lateral por lo que también se consideran nodos de balance fuera de éste.

Finalmente, se concluye que la seguridad de riego no es un criterio que pueda ligarse directamente con el parámetro económico, ya que para un valor dado de seguridad de riego se presentan diferentes niveles de daño. También, se concluye que los factores que influyen son la frecuencia de falla, la magnitud de falla y la definición de falla utilizada. Distintas configuraciones entre frecuencias de déficits y magnitud de éstos logran equiparar el efecto económico. La seguridad de riego no contempla este efecto y busca asegurar casi la totalidad de la demanda hídrica con una frecuencia fija. Se concluye que una mejora a la definición sería flexibilizarla.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia: padres, abuelos, hermanos, tíos y primos por todo su amor y contención durante mi época universitaria. Fueron la motivación principal para seguir en los momentos más difíciles.

Agradezco a mis padres por todo su apoyo y cariño. Por siempre creer en mí y por impulsarme a seguir mis metas.

Quiero dar gracias a mis abuelos por existir, por encargarse de que los domingos de estudio en su casa fuesen menos estresantes con comidas ricas y su música antigua, pero por sobre todo les agradezco pelearse mi amor.

Debo mencionar también a mis hermanos, Nicolás y Felipe, quienes me ayudaron con apoyo moral y momentos de dispersión.

También quiero agradecer a mis amigas del colegio por su amistad, por sus palabras de ánimo y por las salidas anti estrés. Bárbara, Koda, Vanessa, Carito, Chantal y Javi. Mis carmelianas favoritas.

Doy gracias también a quienes hicieron más grato el proceso universitario, Cony, Nico, Pauli, Meli, Matías, René, Felipe-Toro, Natu, Diego, Toro y Mei. Nos topamos en diferentes semestres, pero todos alegraron mis días en Beauchef.

Finalmente, quiero agradecer a los profesores de mi comisión, Marcelo Olivares, Tania Fernández y Ximena Vargas por sus comentarios y disposición. En especial agradezco a mi profesor guía, Marcelo Olivares por su dedicación y entusiasmo.

Tabla de contenido

Capítulo 1 : Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
General	2
Específicos	2
Capítulo 2 : Revisión bibliográfica.....	3
2.1 Reglas de operación de embalses	3
2.1.1 Criterios de desempeño operacional	6
2.1.2 Beneficios de la operación de embalses de riego	7
Capítulo 3 Metodología	9
3.1 Curvas de beneficio agrícola de las entregas de agua	10
3.2 Modelo de simulación de operación.....	11
3.2.1 Reglas de operación	13
Regla de operación estándar (SOP).....	13
Regla de operación con Hedging.....	13
3.3 Series sintéticas de caudales.....	13
3.4 Indicadores a considerar	15
Capítulo 4 : Antecedentes caso de estudio	16
4.1 Topología.....	18
4.2 Caudales	19
4.3 Caudal ecológico	23
4.4 Evaporación e infiltración.....	24
4.5 Curva del embalse	25
4.6 Derechos de agua.....	26
4.7 Cultivos.....	27
4.8 Consideraciones para el modelo	29
Capítulo 5 Resultados y análisis.....	31
5.1 Curvas de beneficio	31
5.2 Caudales generados	34
5.3 Simulación	36
5.3.1 Daño	36
5.3.2 Déficit acumulado	42
5.3.3 Curvas de frecuencia acumulada	43

5.3.4 . Análisis de casos específicos	45
5.3.5 Comparación de resultados según regla de operación.....	53
Capítulo 6 Conclusiones.....	57
Bibliografía.....	59
Anexos	62
Anexo A: Series hidrológicas	63
Anexo B: Información series de caudales generadas.....	68
Anexo C: Resultados de simulación.....	73

Índice de tablas

Tabla 4-1. Zonas de riego.	17
Tabla 4-2. Promedio de caudales medios mensuales de Río Pedernal.	19
Tabla 4-3. Promedio de caudales medios mensuales de Estero Sobrante.	20
Tabla 4-4. Promedio de caudales medios mensuales de Estero Las Palmas.	21
Tabla 4-5. Promedio de caudales medios mensuales de Estero Ossandón.	22
Tabla 4-6. Caudales ecológicos a considerar.	23
Tabla 4-7. Tasas de evaporación.	24
Tabla 4-8. Curva de embalse.	25
Tabla 4-9. Derechos de agua.	26
Tabla 4-10. Coeficientes de cultivos.	28
Tabla 4-11. Eto potencial de Petorca.	28
Tabla 4-12. Cultivos característicos de la zona.	29
Tabla 5-1. Demanda hídrica unitaria de cultivos.	31
Tabla 5-2. Demanda hídrica.	31
Tabla 5-3. Comparación entre series de igual seguridad de riego. SOP.	45
Tabla 5-4. Comparación entre series de igual seguridad de riego. Hedging.	47
Tabla 5-5. Comparación series con igual daño acumulado. SOP.	49
Tabla 5-6. Comparación series con igual daño acumulado. Hedging.	51
Tabla 0-1. Serie hidrológica de Estero Sobrante.	63
Tabla 0-2. Serie hidrológica Río Pedernal.	64
Tabla 0-3. Serie hidrológica Estero Las Palmas.	65
Tabla 0-4. Serie hidrológica Estero Ossandón.	66
Tabla 0-5. Coeficientes de correlación entre meses para Afluente (suma de Río Pedernal y Estero Sobrante).	68
Tabla 0-6. Coeficientes de correlación entre afluentes y Esteros.	68
Tabla 0-7. Parámetros de la suma de las series hidrológicas de Estero Sobrante y Río Pedernal.	69
Tabla 0-8. Parámetros de la serie hidrológica del Estero Ossandón.	69
Tabla 0-9. Parámetros de la serie hidrológica del Estero Las Palmas.	70
Tabla 0-10. Suma de los 64 años de los 3 caudales generados.	70
Tabla 0-11. Resultados simulaciones con SOP.	73
Tabla 0-12. Resultados simulación con Hedging.	75

Índice de ilustraciones

Figura. 2-1.Regla de operación estándar.	3
Figura. 2-2.Regla de operación con Hedging de un punto.	4
Figura. 2-3.Regla con Hedging de dos puntos.	5
Figura. 2-4.Curva de beneficio agrícola.	8
Figura. 3-1.Esquema de la metodología.	9
Figura. 3-2.Esquema del modelo operacional.	11
Figura. 4-1.Ubicación embalse las Palmas.	16
Figura. 4-2.Sectorización de la cuenca.	17
Figura. 4-3.Configuración del embalse.	18
Figura. 4-4.Curva de variación estacional de Río Pedernal.	20
Figura. 4-5 Curva de variación estacional de Estero Sobrante.	21
Figura. 4-6 Curva de variación estacional de Estero Las Palmas.	22
Figura. 4-7 Curva de variación estacional de Estero Ossandón.	23
Figura. 4-8.Porcentaje de área cubierta según cultivo.	27
Figura. 5-1.Curva de beneficio de la temporada.	32
Figura. 5-2.Curva de daño por temporada de riego.	33
Figura. 5-3.Distribución del recurso hídrico según disponibilidad de caudal.	33
Figura. 5-4.Beneficio desagregado mensualmente.	34
Figura. 5-5.Daño desagregado mensualmente.	34
Figura. 5-6. Suma de caudales mensuales generados.	35
Figura. 5-7. Daño obtenido según disponibilidad de caudal para ambas reglas de operación.	36
Figura. 5-8. Suma de caudales generados a nivel mensual de casos estudiados.	37
Figura. 5-9. Déficit mensuales de casos estudiados.	37
Figura. 5-10. Daño acumulado según seguridad de riego para entregas definidas por SOP y Hedging.	38
Figura. 5-11.Series Húmedas para caso SOP y Hedging.	39
Figura. 5-12.Series Normales para caso SOP y Hedging.	39
Figura. 5-13. Series Secas para caso SOP y Hedging.	39
Figura. 5-14.Daño considerando diferentes umbrales de falla. Caso con SOP.	40
Figura. 5-15. Daño considerando diferentes umbrales de falla. Caso con Hedging.	40
Figura. 5-16. Daño acumulado según desviación del déficit. Caso SOP y Hedging.	41
Figura. 5-17. Déficit acumulado según Seguridad de riego. Caso SOP y Hedging.	42
Figura. 5-18. Daño acumulado según déficit acumulado. Caso SOP y Hedging.	43
Figura. 5-19.Curva de frecuencia acumulada de seguridad de riego según regla de operación.	43
Figura. 5-20. Curva de frecuencia acumulada del daño según regla de operación.	44
Figura. 5-21.Curva de frecuencia acumulada del beneficio según regla de operación.	44
Figura. 5-22.Déficit mensuales como porcentaje de la demanda de series con igual seguridad de riego. SOP.	46
Figura. 5-23.Déficit mensuales de series con igual seguridad de riego. SOP.	46
Figura. 5-24.Comparación distribución del daño mensual para series con igual seguridad de riego. SOP.	47
Figura. 5-25. Déficit mensuales como porcentaje de la demanda de series con igual seguridad de riego. Hedging.	48
Figura. 5-26. Déficit mensuales de series con igual seguridad de riego. Hedging.	48
Figura. 5-27. Comparación distribución del daño mensual para series con igual seguridad de riego. Hedging.	49

Figura. 5-28. Déficit mensuales como porcentaje de la demanda de series con igual daño acumulado. SOP.	50
Figura. 5-29. Déficit mensuales de series con igual daño acumulado. SOP.....	50
Figura. 5-30. Comparación daño mensual para series con igual daño acumulado. SOP.	51
Figura. 5-31. Déficit mensuales como porcentaje de la demanda. Hedging.....	52
Figura. 5-32. Déficit mensuales de series con igual daño acumulado. Hedging.	52
Figura. 5-33. Comparación daño mensual para series con igual daño acumulado. Hedging.	53
Figura. 5-34. Comparación de daño acumulado según regla de operación.	54
Figura. 5-35. Déficit mensual operando SOP y Hedging. a).....	54
Figura. 5-36. Daño mensual operando con SOP y Hedging. a).....	55
Figura. 5-37. Déficit mensual operando SOP y Hedging. b).....	56
Figura. 5-38. Daño mensual operando con SOP y Hedging. b).	56

Capítulo 1 : Introducción

1.1 Motivación

La operación de embalses consiste principalmente en decidir cuánta agua entregar respecto a la disponibilidad y la demanda de ésta. La decisión de cuánta agua distribuir afecta a los beneficios inmediatos de las entregas y al valor del agua almacenada. Dicha decisión se modela con reglas de operación. La regla más simple es la regla de operación estándar (You and Cai 2008). Esta regla apunta a entregar inmediatamente la totalidad de la demanda sin considerar una proyección a largo plazo (Draper y Lund 2004).

Conservar el agua almacenada mediante la inducción de déficits respecto a la demanda máxima, aunque se posea la capacidad de entregarla, se denomina Hedging. Permite mantener el agua para posteriores usos, disminuyendo el riesgo de déficits severos en el futuro (You y Cai 2008). De estudios anteriores respecto a la operación de embalses se conoce que la política óptima de Hedging depende del balance entre los beneficios de las entregas y el valor del agua almacenada (Draper y Lund 2004). Dado que las curvas de demanda de agua se suelen modelar como curvas lineales por tramo o cuadráticas (Harou et al. 2009), los beneficios económicos obtenidos respecto a las entregas de agua del embalse se pueden modelar como curvas no lineales. El beneficio asociado corresponde al área bajo la curva de demanda. Es por esto que el daño económico (o el beneficio no obtenido) causado depende del nivel de déficit observado. En palabras simples, la distribución del déficit total en los periodos estudiados incide en los beneficios a percibir. Dada la forma de la curva de beneficios, los déficits más severos generan mayores pérdidas. De esto se deduce que permitir déficits pequeños en el presente para evitar déficits severos en el futuro, logra disminuir el daño económico acumulado.

Por otra parte, en la planificación de embalses de riego en Chile, se utiliza el concepto de seguridad de riego para definir la confiabilidad de suministro a los regantes. La estadística se realiza respecto a la simulación del registro histórico de caudales, considerando un año fallo cuando el suministro es menor o igual al 90% de la demanda objetivo en dos meses consecutivos. También se considera falla cuando en un mes se realiza una entrega inferior o igual al 85% de la demanda objetivo. La seguridad exigida es de un 85%. La confiabilidad del suministro es importante de considerar ya que un aumento en éste puede elevar la probabilidad de mayores retornos económicos y promover un uso más efectivo del agua para cultivos permanentes (Marques et al. 2005).

Actualmente, debido a la escasez de agua en el país, ha cobrado vital importancia la gestión del recurso, dándole énfasis al sector agrícola (ODEPA 2015). Estos acontecimientos motivan a la creación de este trabajo, ya que se busca evaluar la definición del concepto de seguridad de riego como criterio de confianza respecto a la disponibilidad, relacionándolo con conceptos económicos como los beneficios o al daño proyectado al no recibir el beneficio máximo considerando diferentes reglas de operación. Se busca estudiar si logra captar el efecto económico de las curvas de beneficio y daño ya que es una definición estricta en cuanto a los déficits que permite y la frecuencia de ellos.

Como aplicación del trabajo se implementa el modelo al embalse Las Palmas, proyectado en Petorca. Se opta por éste debido a que es un embalse nuevo en proceso de licitación por lo que es posible aplicar la definición de seguridad de riego.

1.2 Objetivos

General

Estudiar la incidencia de las reglas de operación de embalses sobre el beneficio agrícola considerando la escasez del recurso hídrico y la definición de la seguridad de riego.

Específicos

- Representar las decisiones de los regantes mediante curvas de demanda de agua de riego.
- Obtener una herramienta de simulación de la operación de embalses de riego bajo incertidumbre hidrológica, que permita evaluar la confiabilidad de suministro y el desempeño económico bajo reglas de operación alternativas.
- Evaluar la seguridad de riego en consideración de indicadores de desempeño y económicos.

Capítulo 2 : Revisión bibliográfica

El manejo de los recursos hídricos ha tomado gran relevancia a nivel global. Esto se debe al cambio climático, aumento en la demanda debido al crecimiento poblacional y la degradación de los sistemas (Brown et al. 2015).

Para la planificación y gestión del agua se han enfocado estudios en el área de la operación de embalses. Estos estudios buscan políticas de operación más eficientes a modo de mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico.

2.1 Reglas de operación de embalses

Como se mencionó anteriormente, las reglas de operación son las que definen cuanto recurso va a ser entregado por el embalse. En la Figura. 2-1 se observa en mayor detalle la forma de la regla de operación estándar, donde se definen claramente los límites en cuanto a volumen disponible que define las entregas. La regla dice que, si la disponibilidad es menor que la demanda máxima se entrega todo el recurso disponible, es decir, se posee una pendiente de 1:1 de la entrega respecto a la disponibilidad, si la disponibilidad es mayor que la demanda objetivo, pero menor que la capacidad total del embalse, se entrega el volumen correspondiente a la demanda y finalmente, si el almacenamiento más las entradas es mayor a la capacidad del embalse más el volumen requerido, se entrega la demanda objetivo y se comienza a verter.

La regla de operación estándar (SOP) se encarga de satisfacer la demanda, almacenando sólo el excedente de ésta, no considera los posibles déficits de los periodos posteriores (You y Cai 2008).

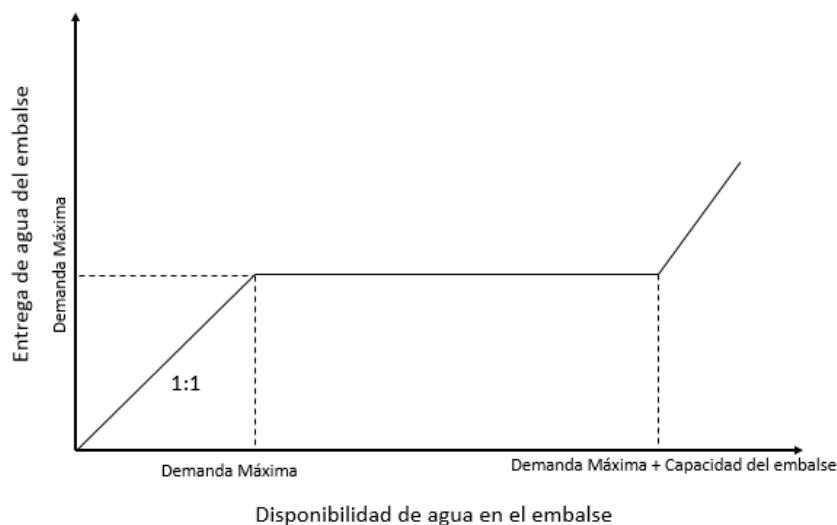


Figura. 2-1.Regla de operación estándar.

Fuente: Modificación de imagen de (Kjeldsen y Rosbjerg 2004).

Por otro lado, las reglas de operación con Hedging son las que permiten almacenar el agua aceptando un déficit en la entrega respecto a la demanda hídrica, este déficit puede ser adicional a uno ya existente o inducido, aunque se posea la capacidad para entregarlo. La finalidad de esto es prevenir una situación de escasez de agua en el futuro, aumentando la disponibilidad para las etapas posteriores, atenuando la posibilidad de déficits más severos. (Bower et al.1962 citado por You y Cai 2008). Existen numerosos estudios que las consideran ((Shih y Revelle 1994), (Tu et al. 2003), (Bayazit y Ünal 1990)), de los cuales se destaca que las reglas pueden obtenerse principalmente con dos metodologías: Optimización y Simulación.

Para obtener reglas de operación mediante optimización se requiere la modelación del sistema, definir la forma de la regla sobre la cual se quiere trabajar y un criterio de evaluación sobre el cual optimizar. El criterio puede ser de desempeño o económico. Existen numerosos trabajos en los que se obtienen reglas de operación mediante optimización. Uno de ellos es el de Shih y Revelle (1994) quienes obtienen la Regla continua de Hedging o regla de Hedging de un punto. La forma de esta regla, como se aprecia en la Figura. 2-2, es definida por una pendiente inicial menor que 1 la cual se mantiene hasta que se intercepta con la demanda máxima. En la Figura. 2-2 también se aprecia el volumen almacenado el cual se traduce en el déficit inducido por el Hedging. Este volumen almacenado aumenta la disponibilidad del embalse a largo plazo. El criterio que se utilizó para obtener la regla fue el máximo déficit mensual y mediante la optimización se busca una pendiente que lo minimice.

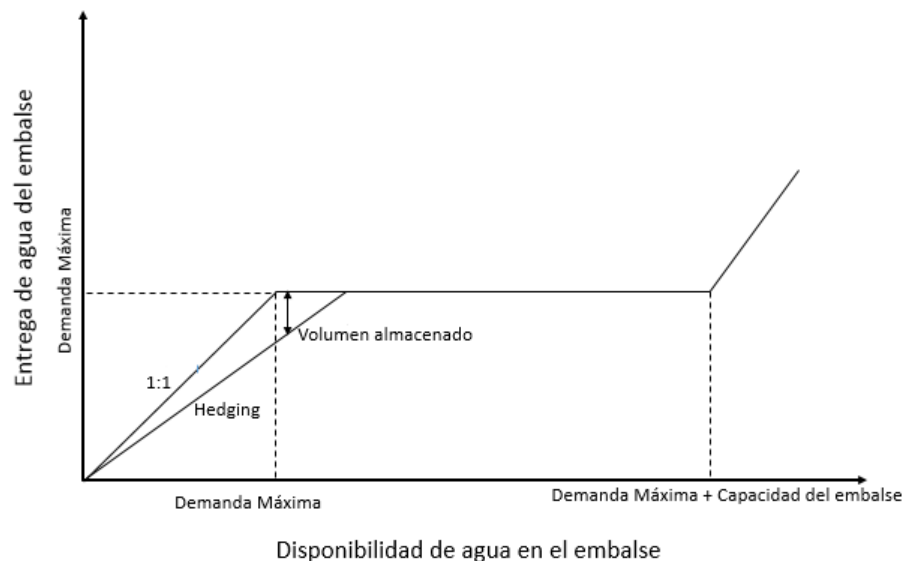


Figura. 2-2.Regla de operación con Hedging de un punto.

Fuente: Modificación de imagen (Shih y Revelle, 1994).

Shih y ReVelle (1995), bajo la misma línea de estudio basado en optimización, obtienen una regla discreta por zonas. Esta regla determina el Hedging dependiendo del intervalo en la que se encuentre el agua disponible, el Hedging es desencadenado por volúmenes objetivos de

almacenamiento. Dichos volúmenes detonantes se obtienen de un problema de optimización, cuya función objetivo está ligado al desempeño del embalse.

También, de los estudios de optimización con criterios de evaluación ligados al ámbito económico, destaca el trabajo de Askew (1974) donde la regla modelada busca la maximización de los beneficios esperados mediante un método de programación dinámica estocástica. También, bajo la misma línea, You y Cai (2008) desarrollaron un modelo cuyo objetivo era maximizar los beneficios de las entregas de dos períodos, donde la función del segundo período correspondía a su valor esperado. Su investigación se basa en las conclusiones de Draper y Lund (2004), quienes comenzaron con la premisa de maximizar tanto los beneficios de las entregas como el valor del agua que se mantenía almacenada.

Por otra parte, con el método de simulación, las reglas de operación son obtenidas al probar diferentes combinaciones de algún parámetro y evaluar las respuestas. El método se sostiene en analizar la gama de resultados logrados. Un ejemplo de la aplicación de esta metodología se ve en el trabajo de Bayazit y Ünal (1990). Ellos aplican una regla de operación con Hedging de dos puntos, el primer punto define el inicio del Hedging (A) y el segundo el término (B). Como se aprecia en la Figura. 2-3, la regla incluye un tramo desde la parte con pendiente 1:1 hasta la pendiente horizontal. En este caso, se simula el sistema con diferentes coeficientes de volúmenes detonantes del Hedging y se obtienen los efectos en cuanto a resiliencia, vulnerabilidad y fiabilidad.

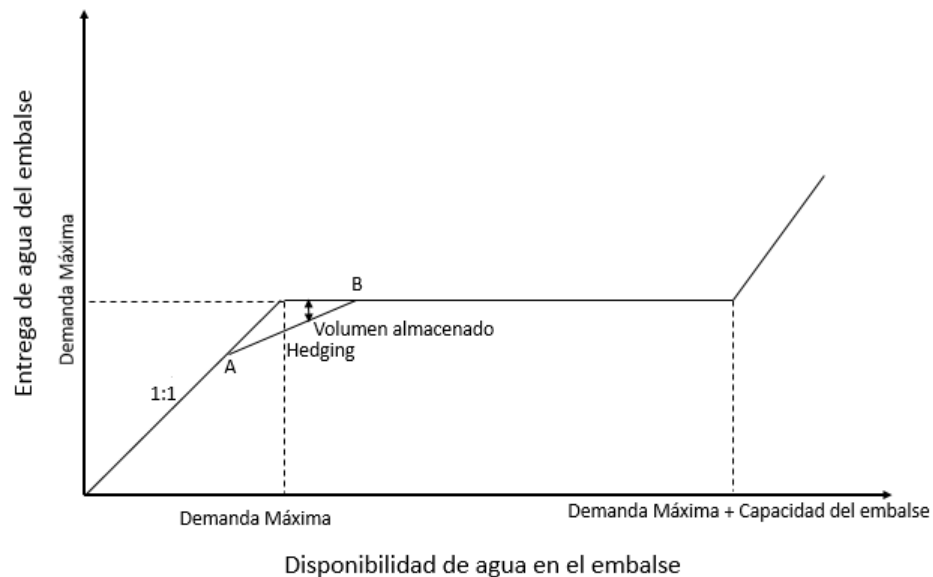


Figura. 2-3.Regla con Hedging de dos puntos.

Fuente: Modificación de imagen de (Bayazit y Ünal 1990).

2.1.1 Criterios de desempeño operacional

Para evaluar el desempeño de un embalse se analizan estadísticamente las entregas. El estudio se hace a partir de si éstas alcanzan o no la demanda máxima, en caso de no hacerlo, se define una falla (Kjeldsen y Rosbjerg 2004). También existen otras definiciones de falla, como es el caso de la seguridad de riego.

Los tres criterios de desempeño ampliamente aceptados son: la confiabilidad, la resiliencia y vulnerabilidad. Los criterios mencionados anteriormente, según Hashimoto et al. (1982) se definen de la siguiente manera: La confiabilidad se determina como la probabilidad de falla del sistema, la resiliencia se refiere a la rapidez con la que el sistema se recupera de la falla, cuántos periodos consecutivos falla el sistema, y la vulnerabilidad se refiere a la magnitud de la falla en cuanto al déficit entre la entrega y la demanda máxima. Estas definiciones tratan principalmente de estadísticas o promedios obtenidos de simulaciones. En el trabajo de Hashimoto et al. (1982), se estudian los criterios al realizar un análisis de simulaciones de reglas de operación con Hedging, obteniendo que un alto índice de confiabilidad está ligado a un mayor grado de vulnerabilidad, es decir, el sistema falla con poca frecuencia, pero las fallas que ocurren son severas.

Existen numerosos estudios respecto a la evaluación de reglas de operación según los criterios. Uno de ellos es el trabajo de Moy et al. (1986) cuya regla de operación se obtiene al minimizar la suma del máximo déficit y la suma mensual de los déficits y tiene como restricción un límite de periodos consecutivos de falla. Se evalúan sus entregas según los indicadores y se analizan los trade-offs entre ellos, encontrando que a medida que la confiabilidad aumenta o a medida que se presentan fallas consecutivas más frecuentes, la vulnerabilidad del sistema aumenta.

Kjeldsen y Rosbjerg (2004) presentan un resumen de los estimadores de resiliencia, vulnerabilidad y confiabilidad utilizados en la bibliografía y, además, estudian la combinación de los criterios, de modo de encontrar la mejor configuración para la evaluación de riesgo de un sistema. Se destaca el resumen de los indicadores debido a que en las investigaciones se utiliza la misma acepción del criterio, pero se usan diferentes métodos de cálculo. Ejemplo de esto son los casos de estimación de la vulnerabilidad según Hashimoto et al. (1982), donde se calcula como el valor promedio de los eventos de déficits, y de Moy et al. (1986) donde la vulnerabilidad se estima como el máximo evento de déficit. Finalmente, Kjeldsen y Rosbjerg (2004) concluyen que la resiliencia y la vulnerabilidad están correlacionadas.

Debido a que las sequías son fenómenos relevantes en cuanto a la gestión hídrica, también se han realizado estudios que consideran la severidad de las sequías hidrológicas con los índices de desempeño. Cancelliere et al. (1998) grafica los criterios de desempeño respecto a las características de la sequía, índice de déficit e intensidad promedio, y en algunos es posible encontrar un patrón, aún en casos que consideran Hedging. Con la relación encontrada se podría evaluar la habilidad de mitigación de los efectos de la sequía de reglas con Hedging.

Otro indicador es el denominado índice de sostenibilidad. Jain (2010) define este índice como una composición entre la vulnerabilidad y la confiabilidad, además del almacenamiento anual promedio de escorrentía. En este estudio también se destaca la importancia de considerar las pérdidas por evaporación en la etapa de planificación, especialmente si el reservorio se ubica en zonas áridas, ya que en caso de ignorarla se sobreestimaría la confiabilidad del embalse.

Un indicador que incorpora aspectos de los criterios mencionados anteriormente es la seguridad de riego. En Chile, por la ley 18.450, se utiliza el concepto de seguridad de riego como criterio de desempeño en la etapa de planificación de embalses. El criterio se basa principalmente en la estadística de fallas al suministro, de modo que se debe asegurar con un 85% de probabilidad el abastecimiento.

$$P (X= \text{No Falla}) = (T-F) / T \cdot 100$$

Donde T es el total de años simulados y F la cantidad de años fallos.

A su vez, se define un año fallo cuando:

- La entrega es menor o igual al 90% de la demanda objetivo en dos meses consecutivos.
- En un mes se realiza una entrega inferior o igual al 85% de la demanda objetivo.

En la definición expresada anteriormente se aprecia que la seguridad de riego considera la confiabilidad al estudiar la estadística de los años fallos. Además, considera la resiliencia, al hacer referencia de periodos consecutivos de falla y finalmente, contiene el concepto de vulnerabilidad al utilizar un umbral de falla que relaciona la falla con un porcentaje de déficit.

2.1.2 Beneficios de la operación de embalses de riego

El agua destinada a la agricultura es uno de los usos del recurso que requiere planificación y manejo. Es el mayor uso consuntivo de nuestro país, representando un 82% del uso (DGA, 2016). Debido a la creciente demanda del recurso hídrico entre las diferentes usos y usuarios, una forma de estudiar la asignación del recurso es mediante la valorización económica del agua.

La curva de demanda de agua de riego es la que indica el beneficio marginal de la producción agrícola asociado a una unidad extra de agua. Las curvas de demandas de agua de riego no son directas, ya que el agua es un insumo para el proceso de producción. Se diferencia de la demanda hídrica ya que está última es el agua que requieren los cultivos. El área bajo la curva de demanda de agua es el beneficio total, por tanto la integral de la curva de demanda es la curva de beneficios (Harou et al. 2009).

En la Figura. 2-4 se muestra la forma de una curva de beneficio para una curva de demanda lineal. Como se aprecia, cuando se entrega el máximo caudal demandado, correspondiente al requerimiento hídrico de la configuración de cultivos en el área total a cultivar, se alcanza el máximo beneficio, pero cuando se permiten pequeños déficits, la pérdida de beneficios es mucho menor que para déficits mayores. Esto se debe a la no linealidad de la curva de beneficios. Si se piensa en el largo plazo, permitir déficits pequeños en los periodos en que se posee la capacidad de entregar toda la demanda se acepta una pérdida de beneficios pequeña, pero se disminuye la posibilidad de déficits más severos que causen mayores daños

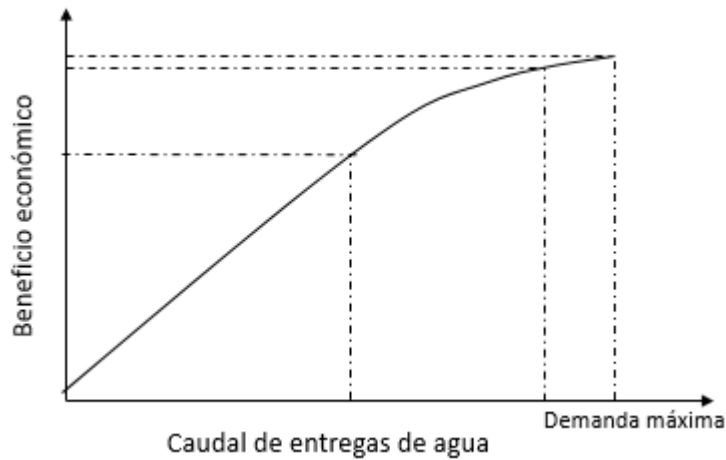


Figura. 2-4. Curva de beneficio agrícola.

Fuente: Modificación de imagen de (Harou et al. 2009).

La curva de demanda de agua de riego se puede obtener mediante dos metodologías, utilizando econometría u optimización. En el caso de la econometría, el método se basa en el análisis estadístico de los datos observados en la agricultura y de estudios empíricos (Harou et al. 2009). Programación matemática positiva (PMP) es el otro enfoque para obtener las curvas de demanda de agua de riego, se centra en reproducir las decisiones del agricultor, tomando supuestos, por ejemplo, que éste busca maximizar sus ganancias. Debido a que este método se basa en ciertas premisas no realistas, como que los agricultores maximizan sus beneficios, se debe ajustar o calibrar mediante los resultados observados y suponiendo que lo observado corresponde al óptimo dada la información del agricultor (Howitt 1995).

En el trabajo de Medellín-Azuara et al. (2010), se estima la demanda de agua de riego a pequeña y gran escala (a nivel regional) para un caso de estudio en México, utilizando el método de PMP, bajo diferentes escenarios.

Scheierling et al. (2006), realizaron un estudio basado en 24 investigaciones anteriores, obtenidos mediante simulación y optimización, referentes a la elasticidad de la demanda del agua. Se comparan los valores de elasticidad obtenidos por los diferentes métodos y se concluye que los valores obtenidos por econometría y programación son más elásticos que los obtenidos de trabajos de campo experimentales. También se concluye que la demanda se comporta de manera más inelástica para cultivos de alto valor. La elasticidad de la demanda indica el impacto en la cantidad de agua demandada según el precio. Mientras más elástica la demanda, un cambio en el precio provoca mayores efectos en la cantidad demandada.

En Chile, Gonzalez et al. (2016), obtienen curvas de demanda de agua de riego para evaluar trade offs con hidroelectricidad, el método usado para obtener la curva, se basa en programación matemática positiva (PMP). También, Toro (2017) obtiene curvas de demanda de agua para las zonas del Laja y del Maule.

Capítulo 3 Metodología

El procedimiento por seguir se esquematiza en la Figura. 3-1.El trabajo consiste en realizar un modelo de simulación que sea capaz de emular el sistema del embalse, sus entradas y salidas en consideración de la topología. Dichas entregas del embalse son procesadas de modo de evaluar su rendimiento en términos de criterios de desempeño.

El objetivo principal es evaluar el criterio de la seguridad de riego. Según la definición chilena, se calcula el indicador para la simulación del modelo operacional con regla de operación estándar y el registro histórico de caudales. En el presente trabajo, además, se considera una regla de operación con Hedging y simulaciones con series de caudales sintéticos.

Como entrada al modelo de simulación se necesitan los caudales afluentes al embalse y los caudales aportantes afluentes a las zonas de riego, los cuales son generados en base al registro histórico.

También, al modelo se le deben implementar las curvas de beneficio y daño agrícola, las cuales le asocian una valoración económica a las entregas del embalse. Estas curvas se calculan mediante la resolución del problema del productor agrícola con programación matemática positiva (PMP).

Finalmente, como salida del modelo de simulación, se obtienen series de entregas de caudales del embalse. Con estas series de caudales de riego se realizan estadísticas comparando las entregas con la demanda máxima (demanda hídrica de los cultivos).

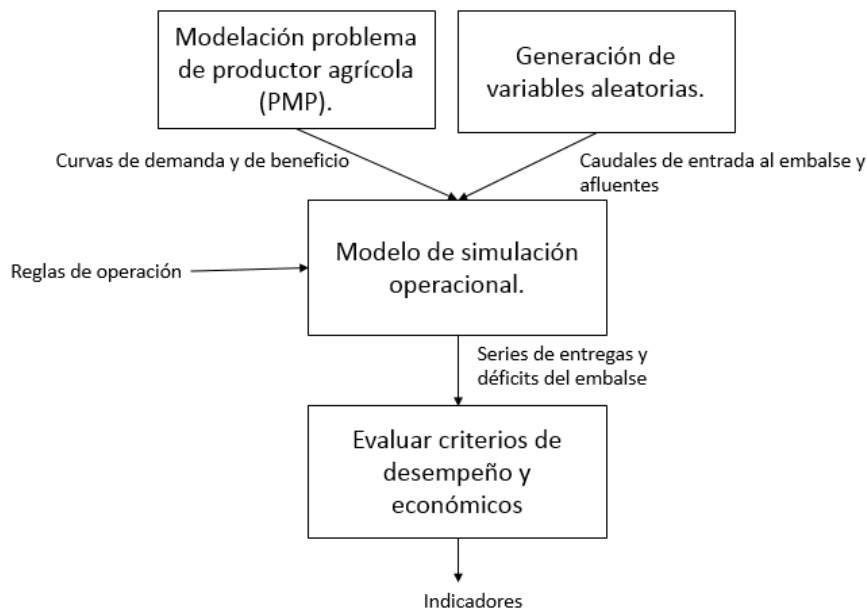


Figura. 3-1.Esquema de la metodología.

3.1 Curvas de beneficio agrícola de las entregas de agua

En el presente trabajo se utiliza el método de programación matemática positiva para obtener las curvas de beneficio. La metodología por seguir es la utilizada en (Medellín-Azuara, 2006). El método consiste en la calibración de una función de costos no lineal con valores observados de insumos de la producción agrícola.

El método requiere como inputs los siguientes parámetros:

- Demanda hídrica de cada cultivo.
- Tierra y agua disponible.
- Costos asociados a cada cultivo por hectárea.
- Rendimientos regionales de los cultivos considerados.
- Precios por unidad de producto de los cultivos producidos.

Con los parámetros mencionados, dada una determinada cantidad de agua y tierra (área), es posible calcular el beneficio total y marginal asociado, escogiendo la mejor configuración de los cultivos disponibles.

Debido a que el producto o los cultivos se obtienen como resultado de la temporada de riego, la curva de beneficios generada corresponderá a ese periodo.

En la práctica, para formar la curva de beneficio de temporada de riego se debe variar la restricción del recurso hídrico, de modo que para cada caudal se obtiene un valor de beneficio. El caudal máximo demandado corresponde a la suma de la demanda hídrica del patrón de cultivos característico.

Posteriormente, se desagrega la curva de temporada a mensual debido a que el balance en el embalse se realiza de manera mensual, al igual que la estadística realizada por la definición de la seguridad de riego. Se supone que se mantiene la proporción de uso del caudal respecto al total en cada mes, de modo que el beneficio (o daño si se trabaja con el beneficio perdido) se distribuye en los meses de manera proporcional al caudal máximo demandado por los cultivos.

3.2 Modelo de simulación de operación

Se presenta el modelo de simulación de operación que corresponde a recrear el sistema con sus entradas y salidas. En este caso se plantea para un embalse lateral por lo que también se deben considerar los nodos de los cauces asociados.

En la Figura. 3-2 se presenta el esquema de un modelo genérico de simulación para un embalse lateral que posee un canal alimentador que se suple desde un cauce que también provee a una zona de riego. Además, la zona de riego que alimenta el embalse también recibe aportes naturales.

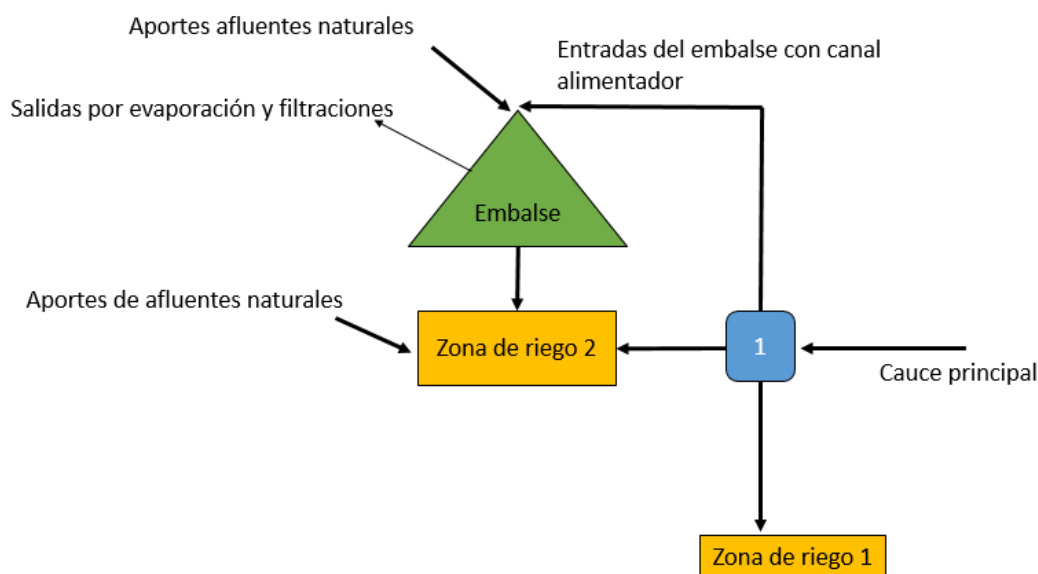


Figura. 3-2. Esquema del modelo operacional.

Fuente: Elaboración propia.

El balance del embalse se puede traducir en lo siguiente:

$$S_t + I_t - E_t - R_t - PI_t = S_{t+1} \quad \text{Ec. (i)}$$

Donde S_t es el agua almacenada en el periodo t , I_t son las entradas que corresponden a los aportes del canal alimentador y de los aportes de los afluentes naturales, E_t son las pérdidas evaporativas, R_t es la entrega de agua que en este caso corresponden a las entregas de riego y a cubrir el déficit del caudal ecológico, en caso de que sea exigido, PI_t son las pérdidas por infiltración y S_{t+1} es el almacenamiento en el periodo $t + 1$. Las restricciones del problema son la capacidad del embalse de modo que, si el volumen disponible es mayor que la capacidad, el embalse comienza a verter, al volumen vertido se denomina Rebase. En este trabajo se consideran las pérdidas por infiltración a diferencia de estudios anteriores (Jain, 2010).

En cuanto a los valores que toman las variables, R_t queda definido por la regla de operación a utilizar, E_t depende del área superficial del lago del embalse y de la tasa de evaporación en el mes

t, PI_t depende de la curva del embalse y finalmente, I_t son series sintéticas de caudales de entrada del canal alimentador y del afluente natural.

Luego, el nodo de balance fuera del embalse considera 1 entrada y 3 salidas, la demanda de la zona de riego 1, el caudal para el canal alimentador y el caudal que continua por el cauce principal. A continuación, se expresa en mayor detalle el cálculo del caudal dirigido al embalse por el canal alimentador:

- Aportes de canal alimentador:

El canal alimentador del embalse es el que extrae el caudal desde el cauce principal luego de las extracciones de la zona de riego. La extracción correspondiente al canal alimentador puede considerar el caudal ecológico en el tramo aguas abajo del cauce.

Se determina el caudal del canal alimentador con la siguiente expresión:

$$Q_{Canal} = \text{Min}(\text{Capacidad del canal}, Q_o, \text{Derechos de agua ZR}(2)) \quad \text{Ec. (ii)}$$

Donde

Capacidad del canal en m^3/s .

$$Q_o = \text{Max}(0, Q_{cauce} - Q_{eco} - Q_{entZR1} - DN_{ZR2}) \quad \text{Ec. (iii)}$$

Derechos de agua ZR(2) = Derechos de agua correspondientes a las zonas de riego 2.

Donde:

Q_o = Caudal disponible para captar por canal alimentador.

Q_{entZR1} = Caudal captado por riego en la zona de riego 1 (a prorrata).

Q_{eco} = Caudal ecológico aguas abajo del nodo.

DN_{ZR2} = Demanda neta total de las zonas de riego 2.

Además, dado que la zona de riego beneficiada por el embalse también recibe aportes por afluentes naturales, la demanda máxima considerada se calcula de la siguiente forma:

- Demanda de riego en m^3 .

La demanda que debe cubrir el embalse corresponde al déficit entre la demanda hídrica de los cultivos y los aportes del cauce. Esta es la demanda máxima que se toma como referencia en la regla de operación.

$$D_{riego} = (Tasa_{ZR2} \cdot a_{ZR2} - V_{afluentes} - V_{rpNodo1}) / (1 - F_{inf}) \quad \text{Ec. (iv)}$$

Donde:

$Tasa_{ZR2}$ = Tasa requerida por la zona de riego 2.

a_{ZR2} = Área de la zona de riego 2.

$V_{afluentes}$ = Volumen aportado por afluentes a la zona de riego.

$V_{rpNodo1}$ = Volumen aportado por Cauce posterior al Nodo 1.

F_{inf} = Factor de infiltración en cauces.

3.2.1 Reglas de operación

Regla de operación estándar (SOP)

Considerando que S_{MAX} es la capacidad del embalse, las salidas definidas según esta regla se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\text{Si } S_t \leq D_t, R_t = S_t$$

$$\text{Si } D_t < S_t < S_{MAX} + D_t, R_t = D_t$$

$$\text{Si } S_t > S_{MAX} + D_t, R_t = S_t - S_{MAX}$$

Donde D_t es la demanda de agua, R_t es la entrega de agua y S_t es el volumen disponible en el embalse. Además, las entregas están sujetas a la continuidad del embalse.

Regla de operación con Hedging

En el presente trabajo, se considera una regla de operación con Hedging de dos puntos. Es decir, el Hedging comienza a aplicarse cuando el volumen disponible en el embalse es igual a un porcentaje α de la demanda máxima y se mantiene el almacenamiento del recurso hasta que el volumen en el embalse es igual a un porcentaje β de la capacidad máxima del embalse descontando la demanda.

3.3 Series sintéticas de caudales

Se utiliza el método de Montecarlo para estudiar la definición de la seguridad de riego mediante simulaciones. Para esto se generan variables aleatorias correlacionadas como caudales afluentes. Esto se realiza para estudiar la gama de posibles salidas del embalse. Para generar las variables se toma como supuesto que se posee una serie principal en régimen natural con la cual se correlacionan espacialmente los afluentes que se encuentran aguas abajo.

Se deben generar series de caudales dependiendo de los afluentes aportantes, las que se usan como set por simulación.

El procedimiento por realizar consiste en generar la serie correspondiente a la serie principal y a partir de ella generar las series de aguas abajo con el supuesto de que sus caudales se relacionan espacialmente. Para generar las series se utiliza la estadística mensual, por tanto, se usan las medias, coeficientes de correlación y desviaciones estándar mensuales. Para generar la serie principal se utiliza la correlación entre los meses consecutivos del registro del afluente mientras que para generar las series de los afluentes de aguas abajo se considera la correlación de caudales para el mismo mes del afluente con el principal.

Debido a que las estadísticas mensuales de los afluentes se ajustan a una distribución log-normal, para utilizar la metodología señalada por Loucks et al. (2005) se debe utilizar las ecuaciones (vii) y (viii) para relacionar los estadísticos de las muestras con una distribución normal.

$$\mu = \ln\left(\frac{m^2}{\sqrt{v+m^2}}\right) \text{ Ec. (vii)}$$

$$\sigma = \sqrt{\ln\left(\frac{v}{m^2} + 1\right)} \text{ (viii)}$$

Donde m es la media y v es la varianza para la distribución log-normal, μ es la media y σ la desviación estándar para una distribución normal.

Para generar los caudales, primero se generan variables aleatorias uniformes (0,1). Luego, se utilizan las ecuaciones (ix) y (x) para obtener variables aleatorias normales independientes.

$$z_1 = \cos\left(2\pi u_1 \sqrt{-2 \ln(u_2)}\right) \text{ Ec.(ix)}$$

$$z_2 = \sin(2\pi u_1 \sqrt{-\ln(u_2)}) \text{ Ec.(x)}$$

Donde u_1 y u_2 son variables aleatorias uniformes, z_1 y z_2 son las variables aleatorias normales independientes.

Finalmente, con las ecuaciones (xi) y (xii) se obtienen las variables aleatorias normales correlacionadas, donde ρ_i , σ_i y μ_i son respectivamente la correlación, desviación estándar y la media para una distribución normal, los que se poseen por el registro histórico de caudales, los cuales fueron obtenidos gracias a las ecuaciones (vii) y (viii). Primero se debe generar la variable aleatoria x_1 que sigue la distribución señalada en la ecuación (xi), utilizando los parámetros correspondientes al mes inicial; y luego a partir de ésta, se calcula x_2 , que sigue una distribución normal con los parámetros señalados en la ecuación (xii). Los sub-índices de las ecuaciones se refieren al orden de precedencia.

$$x_1 \approx N(\mu_1, \sigma_1) \text{ Ec.(xi)}$$

$$x_2 \approx N\left(\mu_2 + \rho_{1,2}(x_1 - \mu_1) \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \sqrt{1 - \rho_{1,2}^2} \sigma_2\right) \text{ Ec.(xii)}$$

Posteriormente, para obtener los caudales, se debe utilizar la ecuación (xiii).

$$q_i = \exp(x_i) \text{ Ec. (xiii).}$$

Al finalizar, se asegura que las series generadas sean de la misma población mediante un test de hipótesis.

3.4 Indicadores a considerar

En el presente trabajo se consideran los siguientes indicadores:

- **Déficit acumulado**
Se define un déficit como la diferencia entre la demanda máxima mensual y la entrega. El déficit acumulado es la suma de todos los déficits mensuales.
- **Seguridad de riego**
Es el criterio a evaluar en contraposición a los otros indicadores. Se utiliza la definición chilena mencionada anteriormente.
- **Confiabilidad**
Se define como la frecuencia de no falla y se calcula como lo indica la ecuación (xiv).

$$P(X = \text{No Falla}) = \frac{(T-F)}{T} \cdot 100 \quad \text{Ec. (xiv)}$$

Donde T es el número total de meses y F es la cantidad de meses fallados, considerando falla para diferentes umbrales respecto a la demanda máxima mensual.

- **Desviación estándar del déficit**
Medida de dispersión de los déficits mensuales respecto a la media.
- **Daño acumulado**
Se define como la suma de los daños mensuales calculados con las curvas de daño. También se puede plantear el daño mensual como la diferencia entre el beneficio máximo mensual y el beneficio logrado.

El presente trabajo se centra principalmente entre la relación del daño y el déficit con la seguridad de riego.

Capítulo 4 : Antecedentes caso de estudio

El caso de estudio para este trabajo es el proyecto del embalse Las Palmas. El embalse Las Palmas forma parte del plan de obras mayores de la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP, el cual consta de embalses multipropósitos los cuáles podrían ser concesionados. El embalse se proyecta en la Región de Valparaíso, sobre el Estero Las Palmas, en las cercanías de la Provincia de Petorca (DOH, 2017).

En la Figura. 4-1 se presenta la ubicación del embalse Las Palmas.

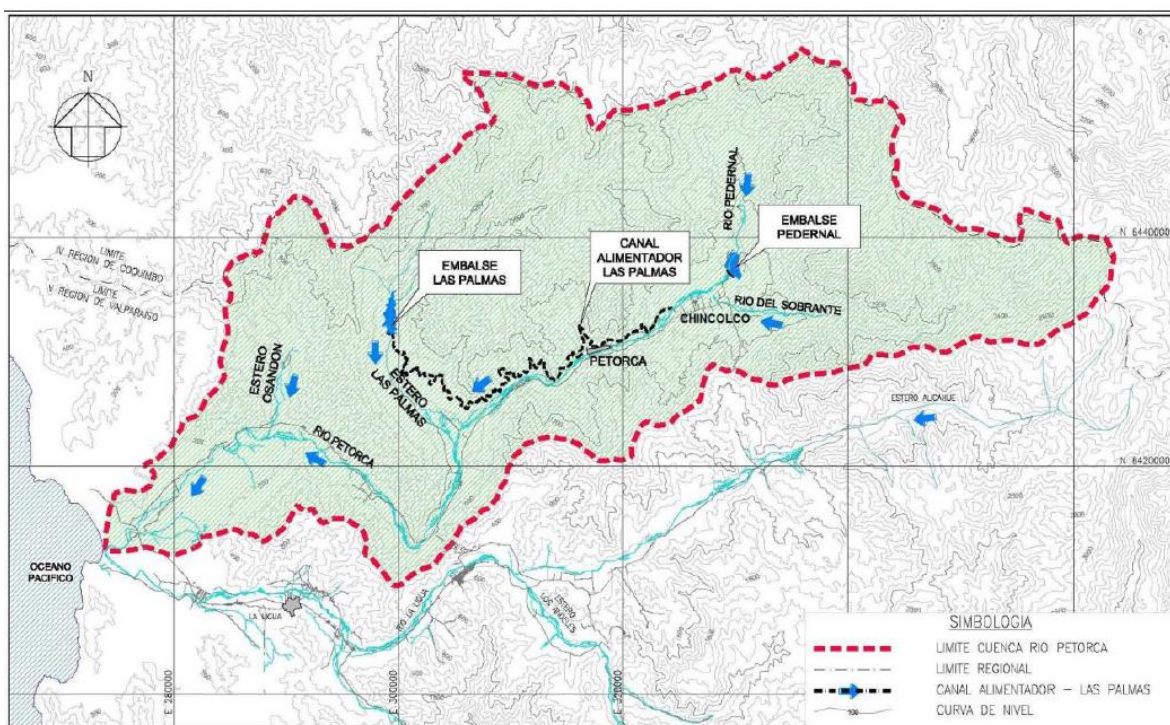


Figura. 4-1.Ubicación embalse las Palmas.

Fuente: (DOH 2016).

El embalse contaría con entradas tanto del Estero las Palmas como de un canal alimentador con los aportes del río Petorca. En la siguiente sección se explica con mayor detalle la configuración del embalse.

La finalidad del embalse es asegurar con un 85% de seguridad de riego un área de 2859 há, además de cubrir el déficit del caudal ecológico en el estero Las Palmas y suplir la demanda de consumo humano de la zona.

Para efectos del proyecto realizado por la DOH, la zona en estudio es sectorizada en 12 zonas de riego, las cuales se toman como referencia. En la Figura. 4-2 se muestra la división del territorio, la cual, para efectos del presente trabajo, se agrupan en 4 zonas de riego, las cuales se definen en la Tabla 4-1.



Figura. 4-2. Sectorización de la cuenca.

Fuente: (DOH 2003)

Tabla 4-1. Zonas de riego.

Sector de riego	Zona de riego
P01	-
P02	-
P03	ZR1
P04	
P05	
P06	
P07	ZR2
P08	ZR3
P09	
P10	
P11	-
P12	ZR4

4.1 Topología

La topología presentada en la Figura. 4-3, es la utilizada en un modelo de simulación realizado anteriormente por la DOH (2017) y la que se utiliza a continuación. Esta topología es una simplificación de otro estudio también realizado por la DOH (2003). Dicha simplificación consiste en la agrupación de zonas de riego de modo de considerar menos nodos de balance.

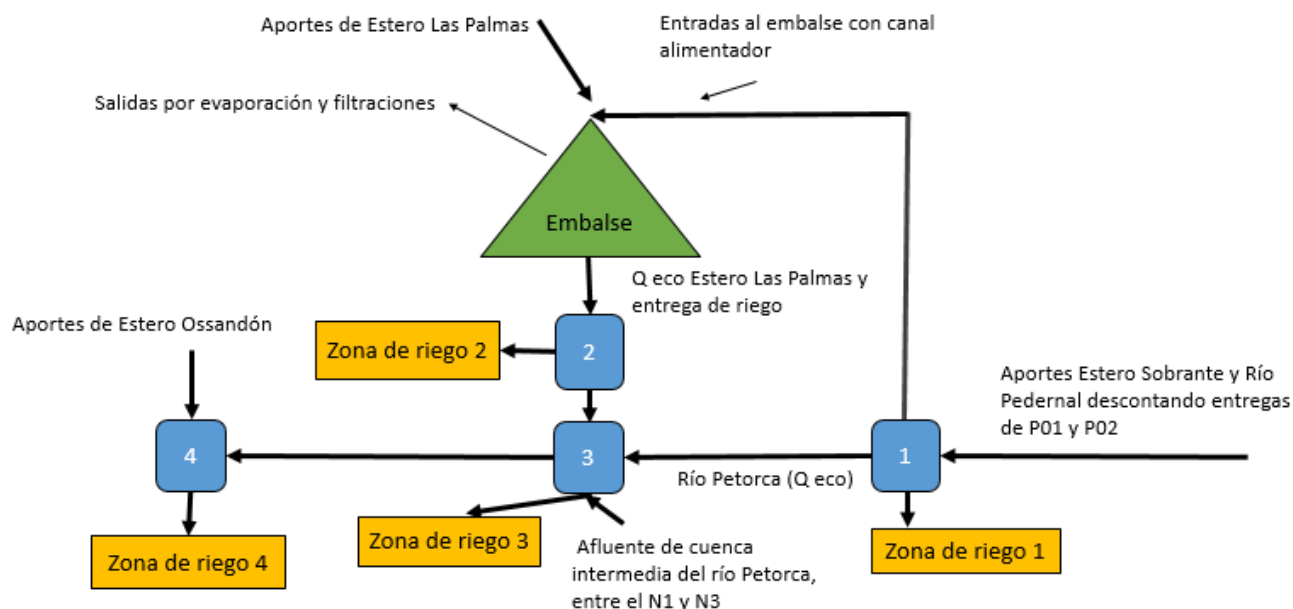


Figura. 4-3. Configuración del embalse.

Fuente: Adaptación (DOH 2017)

La topología considera que el embalse es alimentado por un canal que suministra aguas desde el río Petorca, además de los aportes realizados por el estero Las Palmas. Los recursos del río Petorca son repartidos entre el embalse y una zona de riego, cuyos regantes poseen derechos de agua. Esto se representa en el nodo 1, donde, además, se debe considerar el caudal ecológico del río Petorca. Aguas arriba del canal alimentador y de la zona de riego se ubican dos sectores de riego las cuales obtienen sus demandas de los Ríos Pedernal y del Estero Sobrante, los cuales confluyen posteriormente, convirtiéndose en el río Petorca.

Luego, en el embalse, se deben considerar las pérdidas por evaporación y filtración, en el balance hídrico. El embalse considera, las entradas de los aportes mencionados anteriormente y las salidas de riego y caudal ecológico.

En el nodo 2, se reciben las entregas del embalse, las cuales deben considerar el caudal ecológico del Estero las Palmas. Además, en este nodo se proyecta la entrega de riego de la zona 2.

En el nodo 3, se recibe el recurso proveniente del nodo 2 y se suma con el aporte del río Petorca proveniente del nodo 1, que en el tramo 1-3 contempla un caudal ecológico. Se extrae la demanda hídrica de la zona de riego 3.

Finalmente, en el nodo 4 se provee agua a la zona de riego 4, se reciben los aportes del Estero Ossandón y los recursos provenientes del nodo 3.

4.2 Caudales

Del estudio realizado por DOH (2016), se dispone de las series de datos correspondientes a los años 1950/1951 a 2013/2014 del Estero Sobrante, del Río Pedernal, Estero Las Palmas y del Estero Ossandón. En la cuenca hay 7 estaciones fluviométricas, de las cuales 2 se encuentran suspendidas. De la información provista por la DOH se recopila que la estadística del Estero Las Palmas fue generada por el método MPL.

Cabe destacar que el caudal que circula por el canal alimentador depende tanto de los caudales del Estero Sobrante, Río Pedernal como de los volúmenes captados por las zonas de aguas arriba del embalse (ZR1, P01 y P02).

En la Tabla 4-2 se muestran los promedios de los caudales medios mensuales correspondientes al Río Pedernal. Posteriormente, en la Figura. 4-4 se presenta la curva de variación estacional del Río Pedernal. En este gráfico se presentan los caudales para el 10%,20%,50% y 85% de probabilidad de excedencia.

Tabla 4-2.Promedio de caudales medios mensuales de Río Pedernal.

Río Pedernal	
Mes	Caudales medios mensuales (m³/s)
Abril	0,06
Mayo	0,08
Junio	0,19
Julio	0,31
Agosto	0,46
Septiembre	0,53
Octubre	0,72
Noviembre	0,70
Diciembre	0,25
Enero	0,09
Febrero	0,05
Marzo	0,04

Fuente: Elaboración propia a partir de los antecedentes de (DOH, 2016).

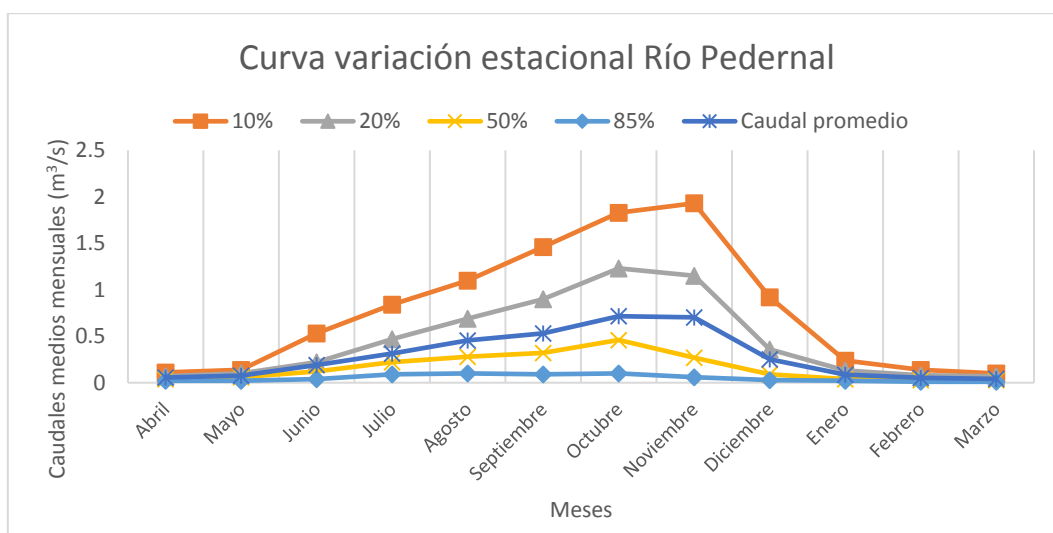


Figura. 4-4. Curva de variación estacional de Río Pedernal.

Fuente: Elaboración propia a partir de los antecedentes de (DOH, 2016).

En la Tabla 4-3 se muestran los datos de los aportes del Estero Sobrante. En la Figura. 4-5 se señala su curva estacional.

Tabla 4-3. Promedio de caudales medios mensuales de Estero Sobrante.

Estero Sobrante	
Mes	Caudales medios mensuales (m ³ /s)
Abril	0,27
Mayo	0,36
Junio	0,88
Julio	1,47
Agosto	2,13
Septiembre	2,49
Octubre	3,34
Noviembre	3,29
Diciembre	1,18
Enero	0,40
Febrero	0,25
Marzo	0,19

Fuente: Elaboración propia a partir de los antecedentes de (DOH, 2016).

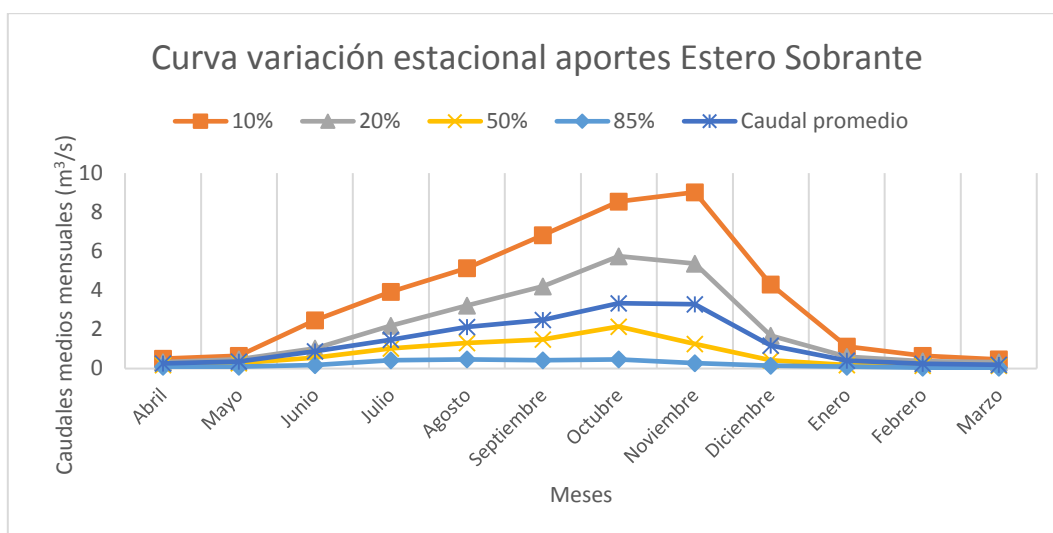


Figura. 4-5 Curva de variación estacional de Estero Sobrante.

Fuente: Elaboración propia a partir de los antecedentes de (DOH, 2016).

Finalmente, las Tabla 4-4 y Tabla 4-5 muestran los promedios de los caudales medios mensuales de los Esteros Las Palmas y Ossandón respectivamente. En la Figura. 4-6 y Figura. 4-7 se presentan las curvas estacionales de los Esteros.

Tabla 4-4. Promedio de caudales medios mensuales de Estero Las Palmas.

Estero Las Palmas	
Mes	Caudales medios mensuales (m³/s)
Abril	0,20
Mayo	0,58
Junio	0,88
Julio	1,20
Agosto	1,03
Septiembre	0,70
Octubre	0,29
Noviembre	0,16
Diciembre	0,05
Enero	0,02
Febrero	0,03
Marzo	0,06

Fuente: Elaboración propia a partir de los antecedentes de (DOH, 2016).

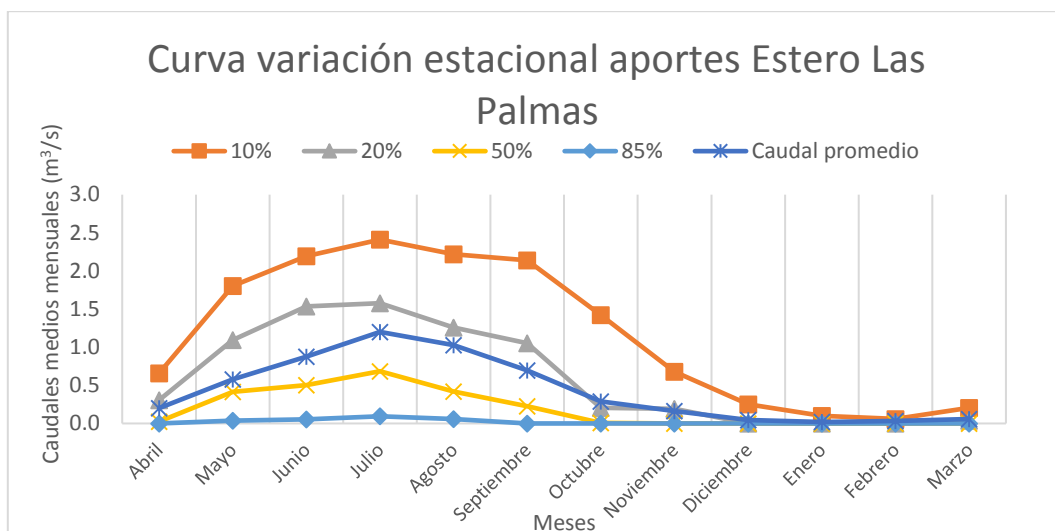


Figura. 4-6 Curva de variación estacional de Estero Las Palmas.

Fuente: Elaboración propia a partir de los antecedentes de (DOH, 2016).

Tabla 4-5. Promedio de caudales medios mensuales de Estero Ossandón.

Estero Ossandón	
Mes	Caudales medios mensuales (m³/s)
Abril	0,08
Mayo	0,22
Junio	0,34
Julio	0,46
Agosto	0,40
Septiembre	0,27
Octubre	0,11
Noviembre	0,06
Diciembre	0,02
Enero	0,01
Febrero	0,01
Marzo	0,02

Fuente: Elaboración propia a partir de los antecedentes de (DOH, 2016).

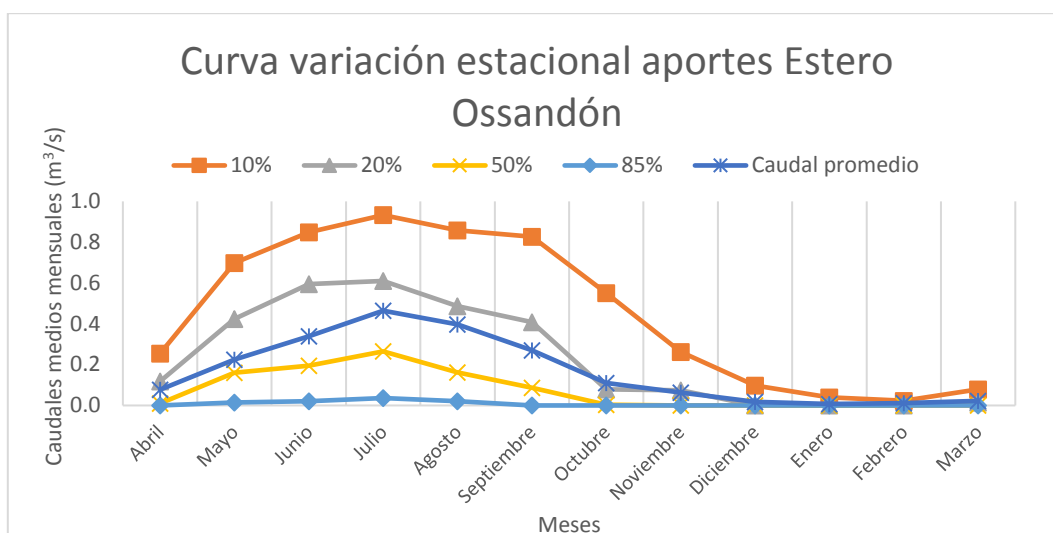


Figura. 4-7 Curva de variación estacional de Estero Ossandón.

Fuente: Elaboración propia a partir de los antecedentes de (DOH, 2016).

4.3 Caudal ecológico

Se presentan en la Tabla 4-6 los caudales ecológicos considerados en la operación. El proyecto busca asegurar los caudales ecológicos del Estero las Palmas.

Tabla 4-6. Caudales ecológicos a considerar.

Mes	Q _{eco} Río Petorca en bocatoma (m ³ /s)	Q _{eco} Aguas abajo embalse Las Palmas (m ³ /s)
Abril	0,006	0,0124
Mayo	0,0084	0,0547
Junio	0,0202	0,0859
Julio	0,0346	0,122
Agosto	0,0477	0,1032
Septiembre	0,0544	0,0661
Octubre	0,0742	0,0291
Noviembre	0,0753	0,0146
Diciembre	0,0274	0,0052
Enero	0,0093	0,0022
Febrero	0,0056	0,0009
Marzo	0,0043	0,0027

Fuente: (DOH 2014).

4.4 Evaporación e infiltración

Del estudio realizado por DOH (2016) se obtienen las tasas de evaporación señaladas en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7. Tasas de evaporación.

Tasas de evaporación (mm/mes)	
Abril	162,6
Mayo	140,4
Junio	114,6
Julio	76,9
Agosto	44,0
Septiembre	37,5
Octubre	32,9
Noviembre	48,0
Diciembre	73,8
Enero	98,6
Febrero	125,2
Marzo	157,8

Fuente: (DOH 2016).

En cuanto a la infiltración, se considera una permeabilidad de 0,01 m/día para el sector del embalse (DOH,2016).

4.5 Curva del embalse

A continuación, en la Tabla 4-8 se presenta la curva de embalse considerada.

Tabla 4-8. Curva de embalse.

Carga (m)	Cota (m.s.n.m)	Superficie (km²)	Volumen (Millones de m³)
0	460,8	0,0	0,0
0,2	461	0,0	0,0
4,2	465	0,0	0,0
9,2	470	0,0	0,1
14,2	475	0,1	0,5
19,2	480	0,2	1,3
24,2	485	0,3	2,6
29,2	490	0,5	4,6
34,2	495	0,7	7,6
39,2	500	0,9	11,6
44,2	505	1,2	16,9
49,2	510	1,5	23,7
54,2	515	1,9	32,1
59,2	520	2,2	42,3
62,2	523	2,5	49,4
64,2	525	2,7	54,6
65,2	526	2,8	57,3

Fuente: Elaboración propia a partir de (DOH 2011).

4.6 Derechos de agua

Se presentan en la Tabla 4-9 los derechos de agua asociados a los sectores definidos en el estudio realizado por DOH (2016). Estos derechos, se utilizan en la modelación de modo que los correspondientes a las zonas P01, P02 y ZR1 se entregan a prorrato, es decir, se entrega el porcentaje correspondiente de la suma de todos los aportes. Como se mencionó anteriormente, se mantiene la distribución del modelo propuesto para las zonas P01 y P02 del modelo por la DOH (2003), mientras que para las zonas P04-P12, se utiliza la notación ZR_i para la agrupación de sectores.

Tabla 4-9. Derechos de agua

Sector de riego (Base de modelo DOH)	Zona de riego (Adoptación modelo presente)	Derechos (acciones)	Caudal de derecho (m ³ /s)	Porcentaje de derecho (%)
P01	-	1922,63	1,92	35,59
P02	-	229,67	0,23	4,25
P03	ZR1	451,22	0,45	15,08
P04		161,18	0,16	
P05		73,43	0,07	
P06		129,09	0,13	
P07	ZR2	295,91	0,30	5,48
P08	ZR3	561,80	0,56	24,38
P09		298,10	0,30	
P10		457,50	0,46	
P11	-	-	-	-
P12	ZR4	822,10	0,82	15,22
	Total	5402,63	5,40	100

Fuente: (DGA 2016b).

4.7 Cultivos

Los cultivos característicos de la zona se muestran en la Figura. 4-8. Estos cultivos fueron seleccionados según tipo, porcentaje de área cubierta y valorización económica. En la selección de cultivos se tiene en consideración la disponibilidad de la información asociada a costos de producción y precio de venta en la zona ya que ésta es relevante para la obtención de las curvas de beneficio. Por esto que se requiere calcular la demanda hídrica de Petorca en base a los cultivos escogidos y no utilizar las demandas de estudios anteriores.

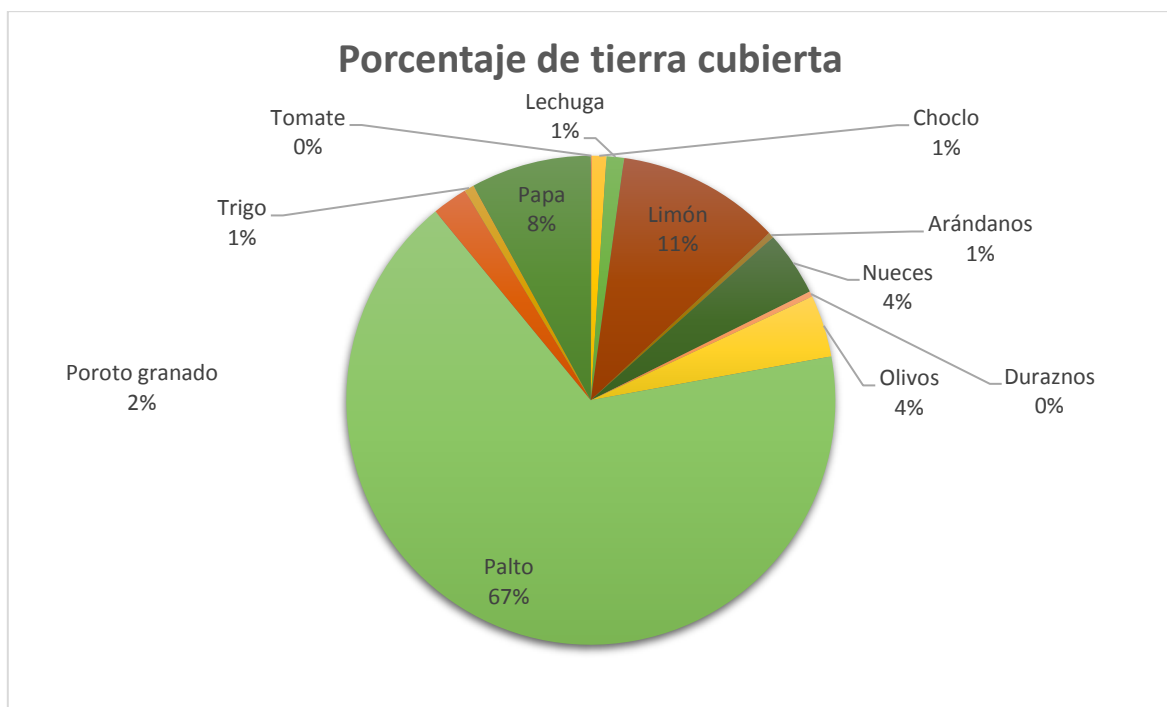


Figura. 4-8. Porcentaje de área cubierta según cultivo.

Fuente: Elaboración propia a partir de (INE 2007).

En la Tabla 4-10 se presentan los coeficientes K_c de los cultivos. Además, en la Tabla 4-11 se presenta la evapotranspiración potencial de la zona. Esta fue obtenida con datos climáticos de Petorca.

Tabla 4-10. Coeficientes de cultivos.

Coeficiente Kc de cultivos												
Cultivo	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril
Tomate				0,68	0,92	1,15	1,15	0,98	0,8			
Choclo					0,45	0,80	1,15	1,15	1,05			
Lechuga				0,15	0,80	0,90	0,90	0,90				
Limón	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,62	0,60	0,60	0,62	0,64	0,65
Arándanos	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,35	0,50	0,49	0,49	0,36	0,2
Nueces					0,50	0,70	0,90	1,10	1,10	1,10	0,87	0,65
Duraznos						0,4	0,55	0,75	0,9	0,9	0,7	0,65
Olivos	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Palto	0,75	0,75	0,60	0,60	0,60	0,65	0,75	0,85	0,85	0,85	0,82	0,78
Poroto granado			0,50	0,68	0,86	1,05	0,9					
Trigo	0,64	0,65	0,83	1,06	1,11	1,11	1,04	0,64				
Papa				0,30	0,73	1,15	0,75					

Fuente: (DOH 2012).

Tabla 4-11. Eto potencial de Petorca.

Mes	Evapotranspiración potencial (mm/mes)
Mayo	64,0
Junio	37,2
Julio	27,4
Agosto	37,2
Septiembre	64,1
Octubre	100,7
Noviembre	137,4
Diciembre	164,2
Enero	174,0
Febrero	164,2
Marzo	137,3
Abril	100,7

Fuente: (DOH, 2012).

Finalmente, en la Tabla 4-12 se muestra la información económica asociada a cada cultivo. Esta información corresponde al precio de venta, rendimientos de los cultivos respecto a hectáreas y los costos asociados a la producción. En la columna costos variables, se presentan dos divisiones, tierra y agua, donde al ítem tierra se le asocia el precio de la tierra, los costos de insumos y de mano de obra. Por otra parte, al ítem agua se le asocia el precio de compra del recurso hídrico como insumo.

Tabla 4-12. Cultivos característicos de la zona.

Cultivo	Rendimiento	Precio	Costos asociados al recurso	
	qgm/ha	USD/qgm	Tierra USD/ha	Agua USD/(m ³ /s)
Tomate	540,0	22,3	8010	163836
Choclo	450,0	14,8	2928	163836
Lechuga	400,0	19,3	3547	163836
Limón	337,0	20,8	4315	163836
Arándanos	74,0	311,6	10892	163836
Nueces	32,0	252,2	4175	163836
Duraznos	317,0	23,7	3257	163836
Olivos	51,0	89,0	3177	163836
Palto	100,0	89,0	4272	163836
Poroto	72,0	59,3	2540	163836
Trigo	74,8	26,0	686	163836
Papa	129,5	28,2	3230	163836

Fuente: (ODEPA 2016),(DGA 2017).

4.8 Consideraciones para el modelo

Como se define en la sección de metodología el modelo depende tanto del embalse como de los nodos de balance específicos de la topología. A continuación, se presentan las expresiones de la metodología ajustadas al caso de estudio.

- Canal alimentador:
El canal alimentador del embalse es el que extrae el caudal desde el río Petorca luego de las extracciones de la zona ZR1 y de los sectores P01 y P02. La extracción correspondiente al canal alimentador debe considerar el caudal ecológico en el tramo entre el N1 y N3.

Se determina el caudal alimentador con la siguiente expresión:

$$Q_{canal} = \text{Min}(\text{Capacidad del canal}, Q_0, \text{Derechos de agua ZR}(2,3 \text{ y } 4)) \quad \text{Ec. (xv)}$$

Donde

Capacidad del canal=1,5 m³/s.

$$Q_0 = \text{Max}(0, (1 - F_{inf})(Q_{E.Sobrante} - Q_{enP2}) - Q_{entZR1} - Q_{eco \text{ Petorca}} - DN_{ZR3-4} + (1 - F_{inf})(Q_{Pedernal} - Q_{enP1})) \quad \text{Ec. (xvi)}$$

Derechos de agua ZR(2,3 y4)= Derechos de agua correspondientes a las zonas de riego 2,3 y 4.

Donde:

Q_0 =Caudal disponible para captar por canal alimentador.

Q_{entZR1} = Caudal captado por sectores de riego ZR1 (a prorrata).

Q_{enP2} = Caudal captado por sector de riego P02 (a prorrata).

Q_{enP1} =Caudal captado por sector de riego P01 (a prorrata).

$DN_{ZR3-ZR4}$ =Demanda neta total de las zonas de riego 3 y 4.

F_{inf} =Factor de infiltración en cauces (14%).

- Demanda de riego en m³.
La demanda que debe cubrir el embalse corresponde al déficit entre la demanda hídrica de los cultivos y los aportes del río Petorca en el nodo 3 y el volumen del Estero Ossandón. Esta es la demanda máxima que se toma como referencia en la regla de operación.

$$D_{riego} = (Tasa_{ZR2} \cdot a_{ZR2} + Tasa_{ZR3} \cdot a_{ZR3} + Tasa_{ZR4} \cdot a_{ZR4} - V_{Ossandón} - V_{rpNodo3}) / (1 - F_{inf}) \quad \text{Ec. (xvii)}$$

Donde:

$Tasa_{ZRI}$ = Tasa requerida por la zona de riego ZR_i .

a_{ZRI} = Área de la zona de riego ZR_i .

$V_{Ossandón}$ = Volumen aportado por el Estero Ossandón.

$V_{rpNodo3}$ = Volumen aportado por Río Petorca entre el N1 y el N3.

F_{inf} = Factor de infiltración en cauces (14%).

- Regla de operación con Hedging de dos puntos:
La regla escogida es una adaptación de la utilizada en el estudio DOH (2017). La regla por utilizar considera $\alpha=85\%$ y $\beta=6,25\%$ donde α es el porcentaje de la demanda desde que comienza el Hedging y β el porcentaje de la capacidad del embalse correspondiente al fin del Hedging.
- Series de caudales sintéticos:
Para el caso de estudio se considera la serie principal como la suma de los caudales del Estero sobrante y del río Pedernal. Los afluentes correlacionados espacialmente son el Estero Las Palmas y el Estero Ossandón. Para la suma de los caudales del Estero sobrante y del río Pedernal los coeficientes de correlación se calculan entre los meses consecutivos, mientras que para las series que emulan a los esteros, los coeficientes de correlación se calculan para cada mes entre los esteros y la suma del Estero Sobrante y del río Pedernal.

Capítulo 5 Resultados y análisis

5.1 Curvas de beneficio

El primer paso para obtener la curva de beneficio es calcular la demanda hídrica de la configuración de los cultivos. Con los datos presentados en los antecedentes se calculan las demandas mensuales del recurso, las cuales se muestran en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Demanda hídrica unitaria de cultivos.

Demandas Prediales	l/s/ha
Abril	0,24
Mayo	0,00
Junio	0,00
Julio	0,00
Agosto	0,00
Septiembre	0,20
Octubre	0,36
Noviembre	0,51
Diciembre	0,45
Enero	0,45
Febrero	0,46
Marzo	0,34

Posteriormente, se simulan los 64 años de registro histórico del embalse con regla de operación estándar y se obtiene el área para el cual se asegura el riego con un 85% de seguridad. El área obtenida tiene un valor de 1701 hectáreas, las cuales no consideran la zona de riego 1 ya que no es beneficiada directamente por el embalse. Se requiere calcular el área para tener una referencia sobre el terreno a abastecer y a esto asociarles los beneficios correspondientes a las entregas de agua.

Debido a que la información necesaria respecto a precios y costos de producción de los cultivos en Petorca es acotada, se trabaja con un área tipo con una cierta proporción de cultivos, con los cultivos que disponen de información.

Finalmente, Se pondera el área a la demanda unitaria mostrada en la Tabla 5-1 y se obtiene el caudal a utilizar en el cálculo de las curvas de beneficios y de daño. En la Tabla 5-2 se muestran los caudales mensuales requeridos por los cultivos o la demanda máxima.

Tabla 5-2. Demanda hídrica.

Mes	Demanda (m³/s)
Mayo	0,00
Junio	0,00
Julio	0,00
Agosto	0,00

Mes	Demanda (m ³ /s)
Septiembre	0,35
Octubre	0,62
Noviembre	0,86
Diciembre	0,76
Enero	0,77
Febrero	0,79
Marzo	0,57
Abril	0,41
Total	5,13

Luego, utilizando los datos mencionados en antecedentes y procediendo de la manera estipulada en la metodología, se obtiene la curva de beneficio de temporada de riego la cual se presenta en la Figura. 5-1.

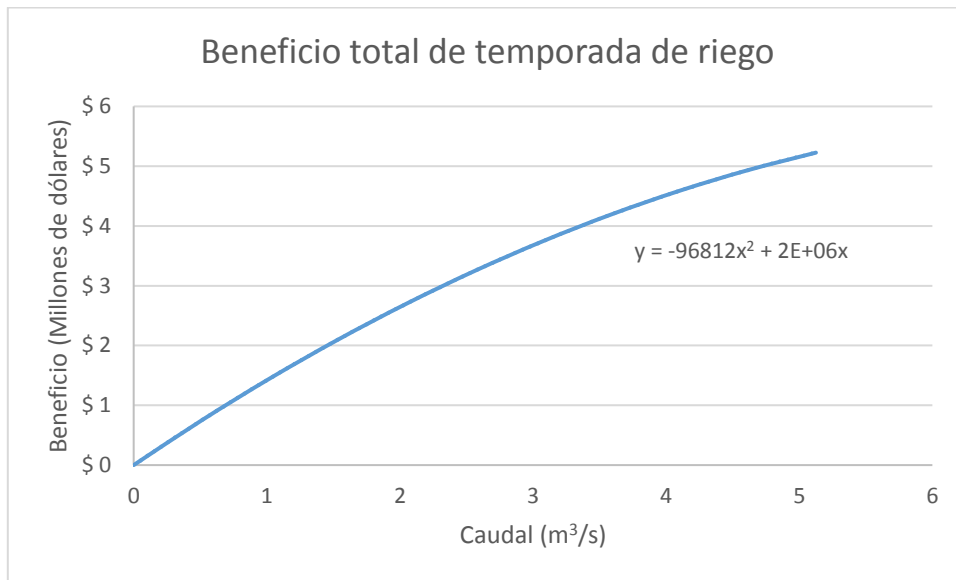


Figura. 5-1. Curva de beneficio de la temporada.

Luego, considerando el daño como los beneficios que no se percibirían por el déficit del caudal respecto al caudal máximo se puede obtener la curva señalada en la Figura. 5-2.

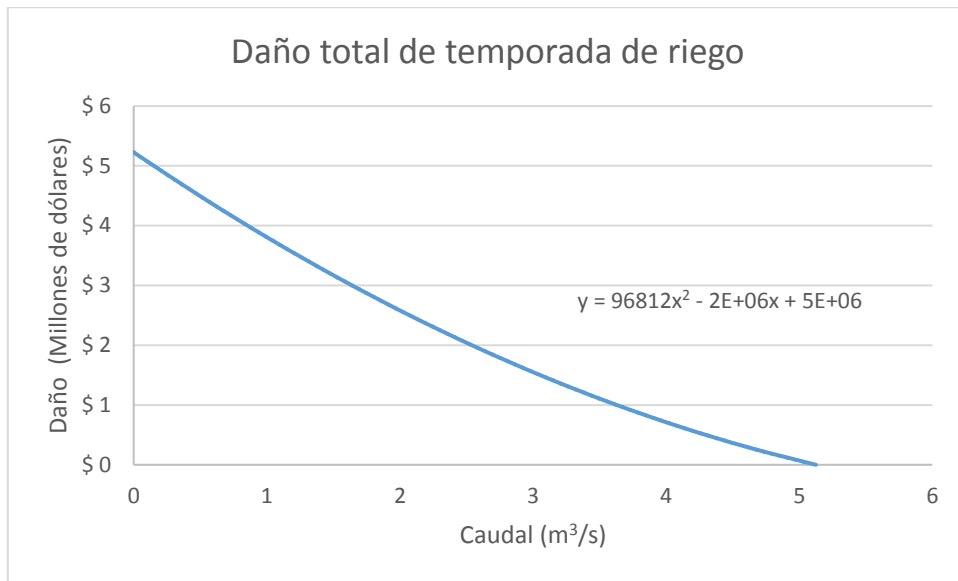


Figura. 5-2. Curva de daño por temporada de riego.

Debido a que las entradas de caudal al embalse modelado son mensuales, se desagregan las curvas de temporada. Para esto se supone que la distribución del caudal se mantiene respecto a las demandas máximas mensuales.

En la figura 5-3 se muestra la distribución del caudal requerido por los cultivos en temporada de riego para las diferentes disponibilidades del recurso.

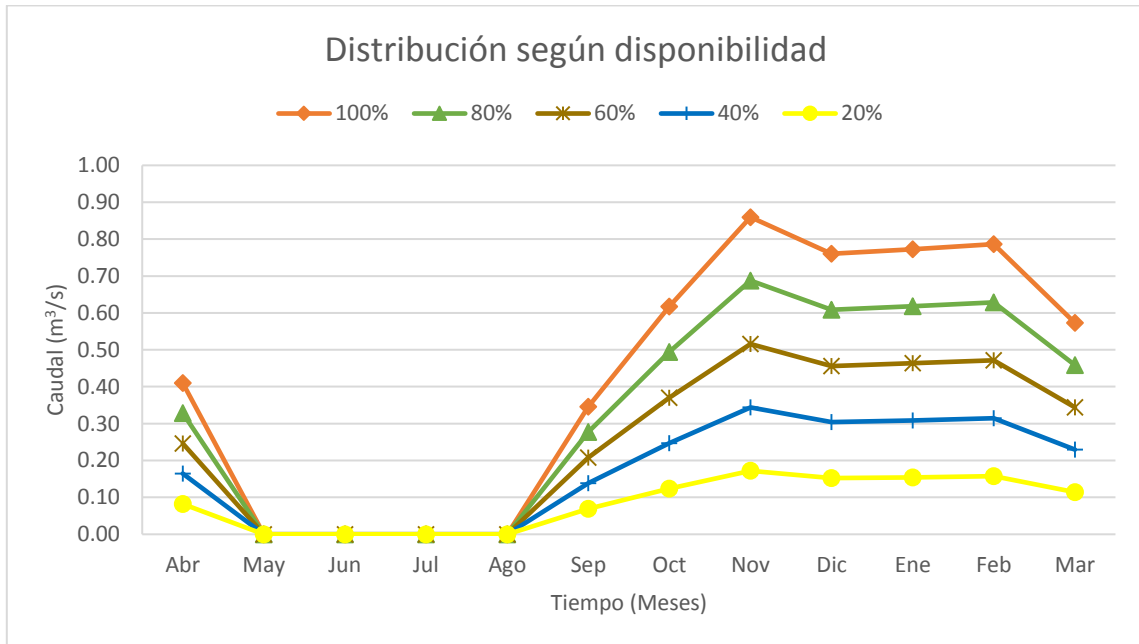


Figura. 5-3. Distribución del recurso hídrico según disponibilidad de caudal.

Finalmente, en la Figura 5-4 se observan las curvas de beneficio mensuales desagregadas y en la Figura. 5-5 se muestran las curvas de daño desagregadas.

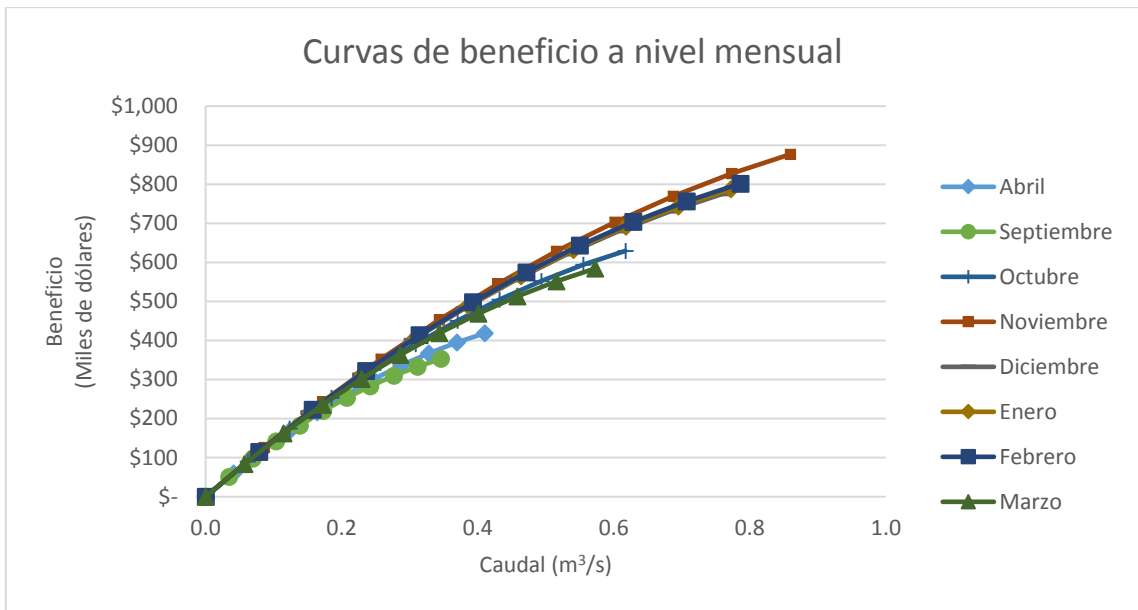


Figura. 5-4. Beneficio desagregado mensualmente.

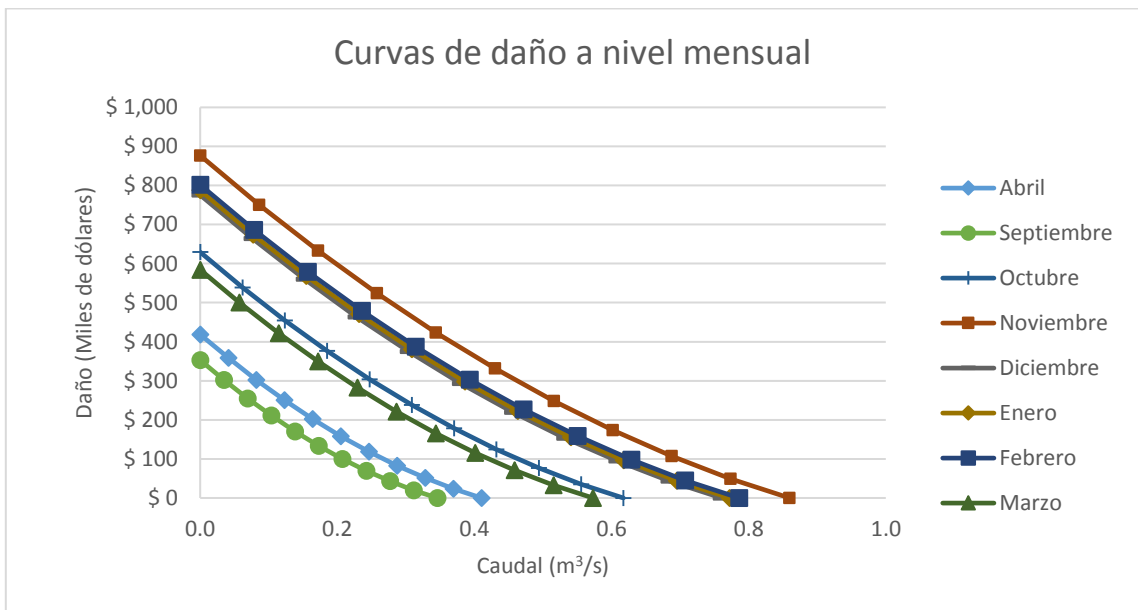


Figura. 5-5. Daño desagregado mensualmente.

5.2 Caudales generados

Se generaron series de caudales para 100 simulaciones. Se generaron 100 series de caudales correspondientes a la suma del Río Pedernal y del Estero Sobrante, 100 series correspondientes al Estero Las Palmas y 100 series para el estero Ossandón. Cada serie de 64 años.

A continuación, en la Figura. 5-6 se muestra la suma de los caudales mensuales generados. Esto plantea una estimación del caudal disponible mes a mes.

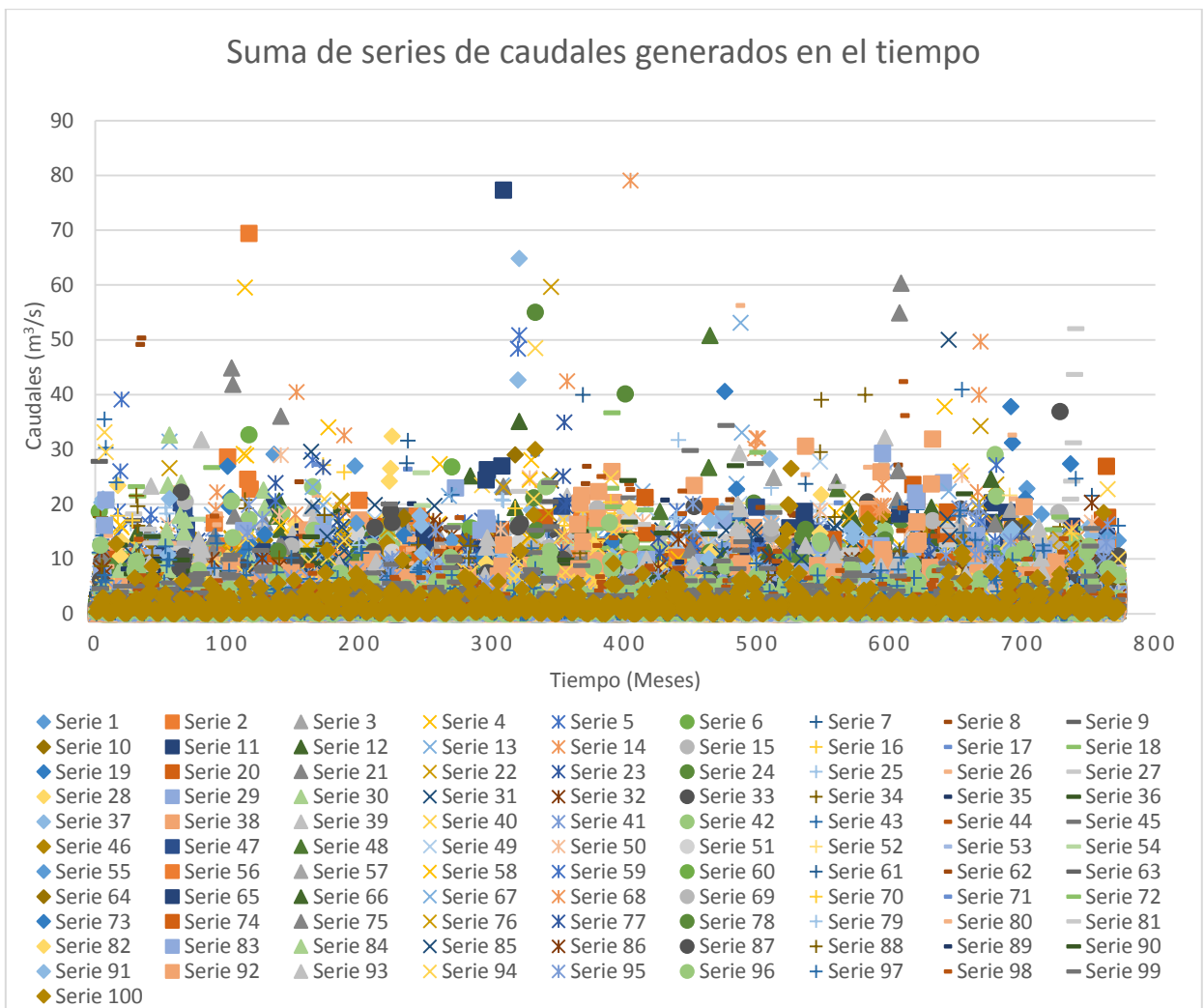


Figura. 5-6. Suma de caudales mensuales generados.

5.3 Simulación

Para cada simulación se utilizan 3 caudales generados, una correspondiente a la suma de los aportes del Río Pedernal y del Estero Sobrante y las otras dos correspondientes a los Esteros Ossandón y Las Palmas. Cada caudal generado pertenece a la misma población que su muestra histórica.

Como resultado de la simulación de cada set de series sintéticas de 64 años de caudales se obtiene una serie de entregas o salidas de agua desde el embalse. A cada entrega del embalse se le asocia un nivel de déficit mensual, al compararlas con las demandas correspondientes. También se les asocia un nivel de beneficio, daño y desempeño según los indicadores mencionados anteriormente. A continuación, se presentan los resultados asociados a las series de entregas.

5.3.1 Daño

El daño, como se menciona anteriormente, es el beneficio que no se obtiene debido al déficit del recurso respecto a la demanda máxima. El daño acumulado se refiere al daño asociado a cada serie de entregas de 64 años de extensión, es la suma de los daños mensuales obtenidos en la simulación. Se simulan 100 sets de series de caudales y se obtienen 100 series de entregas. Cada punto corresponde a los resultados asociados a una serie de entregas.

En la Figura. 5-7 se observa el gráfico entre una serie de entradas del modelo, el caudal de los afluentes, y una serie de salida, el daño. El caudal graficado corresponde a la suma de los 64 años de los 3 caudales generados. De la imagen se desprende que la serie más seca no es la que genera el mayor daño. Además, se observa una serie con uno de los mayores daños, pero con mayor caudal.

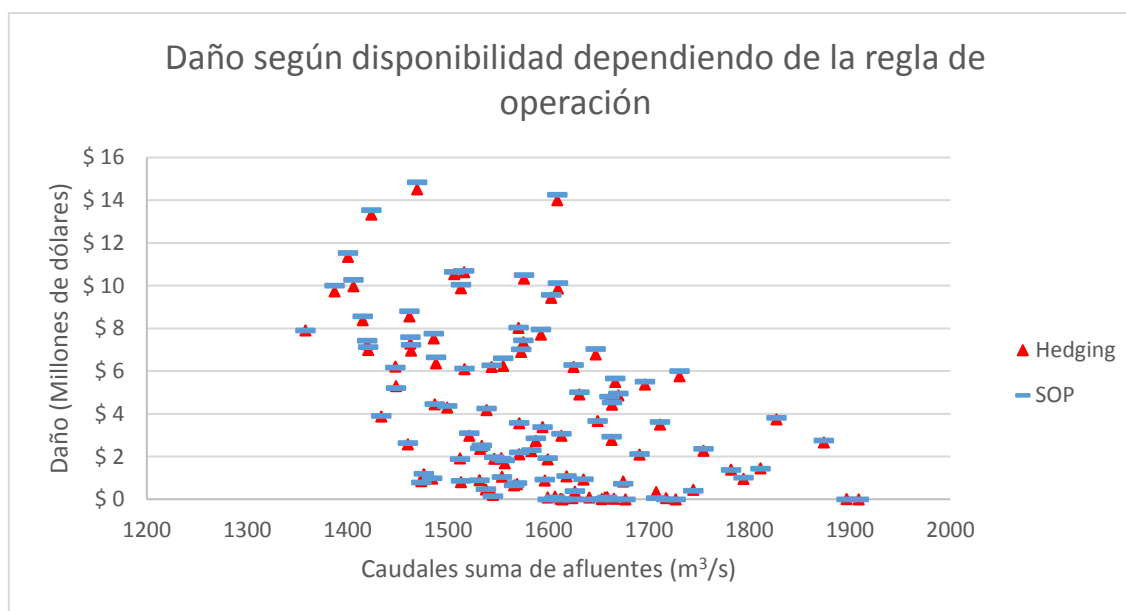


Figura. 5-7. Daño obtenido según disponibilidad de caudal para ambas reglas de operación.

Esto se explica con la distribución de la suma de los afluentes. En el caso de la serie con mayor daño (\$14 millones de dólares aprox. para SOP y Hedging) se aprecia en la Figura. 5-8 que sus caudales poseen mayor dispersión, por lo que hay periodos muy húmedos, pero otros muy secos, aunque la suma total de caudales de la serie sigue siendo alta. Relacionando esto con el daño

acumulado y los déficits mensuales, se observa en la Figura. 5-9 que se presentan muchos déficits de gran magnitud debido a la no disponibilidad lo que se traduce en un alto nivel de daño.

En el caso de la serie más seca con un bajo nivel de daño ($Q = 1358 \text{ m}^3/\text{s}$ y Daño (SOP y Hedging) aprox.= \$8 millones de dólares) se observa que la suma de los caudales se distribuye de manera homogénea y con una magnitud suficiente, por lo que se presentan pocos déficits lo que se traduce en un nivel bajo de daño.

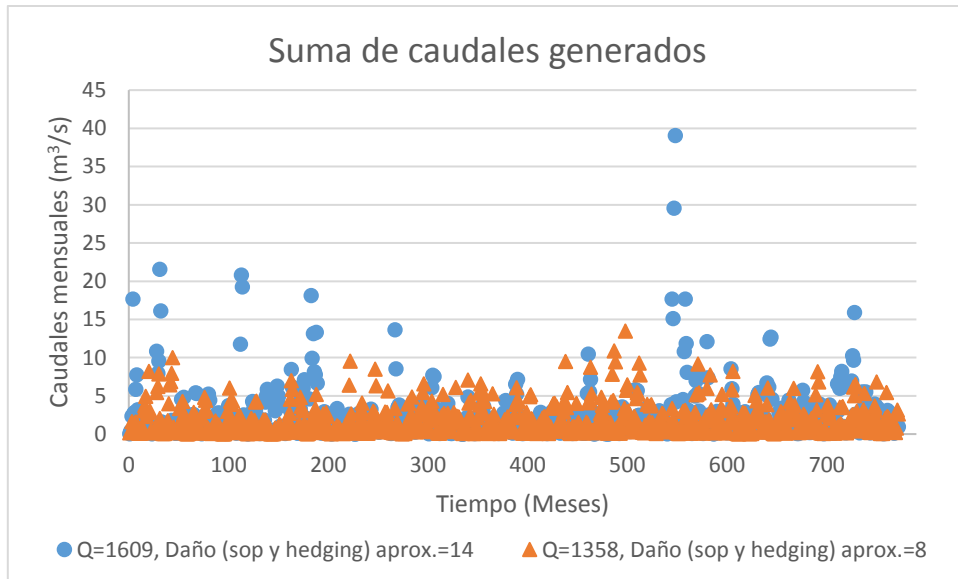


Figura. 5-8. Suma de caudales generados a nivel mensual de casos estudiados.

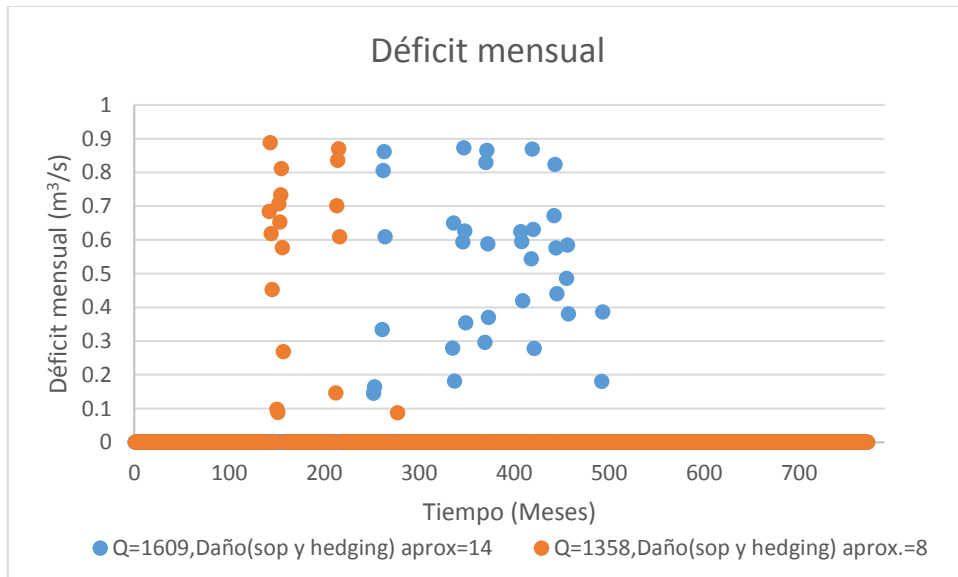


Figura. 5-9. Déficit mensual de casos estudiados.

De esto se concluye que no sólo afecta la magnitud de los caudales afluentes al daño si no que también la distribución.

- Seguridad de riego

Se busca estudiar la relación entre la seguridad de riego con el daño y de esa forma evaluar si el criterio puede asegurar un buen desempeño económico.

Para las simulaciones con regla de operación estándar y Hedging se obtiene la Figura. 5-10. En el gráfico se presenta el daño acumulado asociado a cada serie según su seguridad de riego (según la definición chilena).

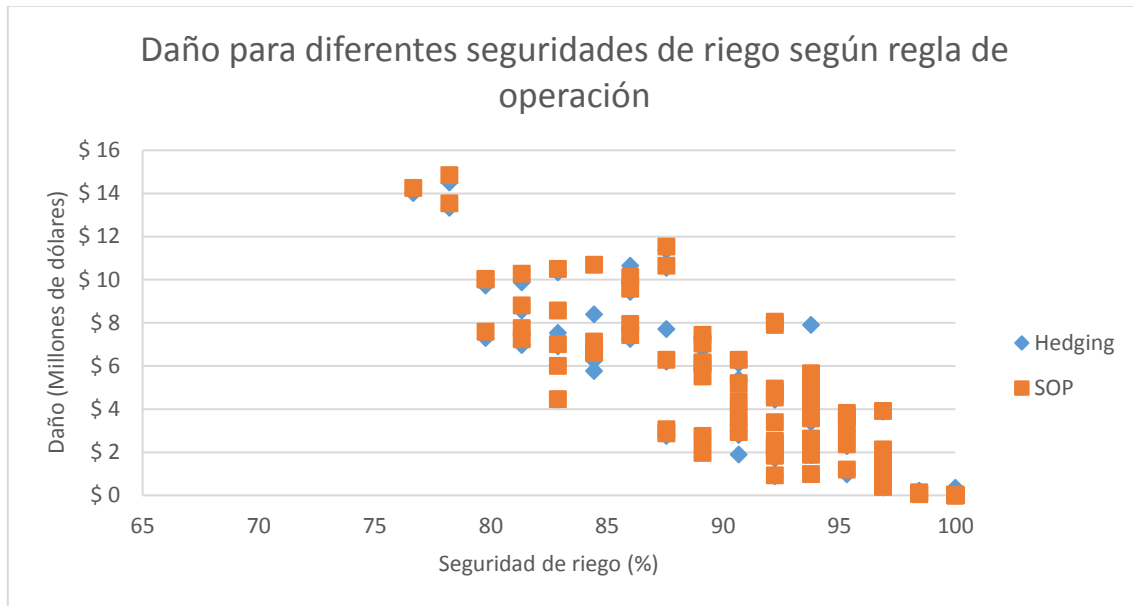


Figura. 5-10. Daño acumulado según seguridad de riego para entregas definidas por SOP y Hedging.

De las Figura. 5-10 se aprecia gran dispersión entre los puntos. Para iguales seguridades de riego se observan diferentes magnitudes de daño, o desde otra perspectiva, para un nivel de daño se observan diferentes seguridades de riego.

Se busca definir una tendencia con menor dispersión diferenciando las series de entregas como húmedas, normales o secas, según la suma de su set de series de caudales de 64 años. Para diferenciar las series de entregas, se realiza un análisis de frecuencia de las sumas de los sets de caudales generados, donde se distinguen los tipos según su probabilidad de excedencia. El rango de la suma de los caudales oscila entre 1350 y 1900 m³/s. Finalmente se considera como series de entrega secas a las series con caudales que tienen como mínimo un 80% de probabilidad de excedencia, húmedas a las series con hasta un 20% de probabilidad de excedencia y el intervalo entre estos valores es considerado normal.

En la Figura. 5-11, Figura. 5-12 y Figura. 5-13 se muestran respectivamente el daño acumulado de las series de entregas húmedas, normales y secas simuladas con SOP y Hedging.

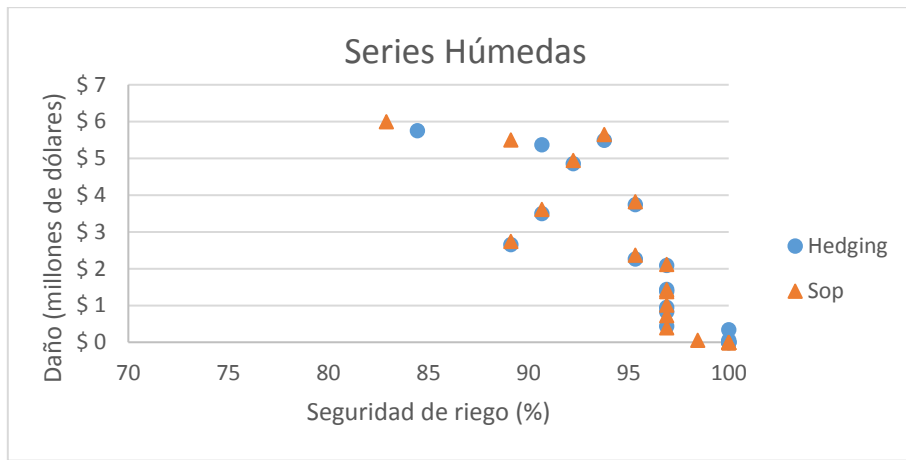


Figura. 5-11. Series Húmedas para caso SOP y Hedging.

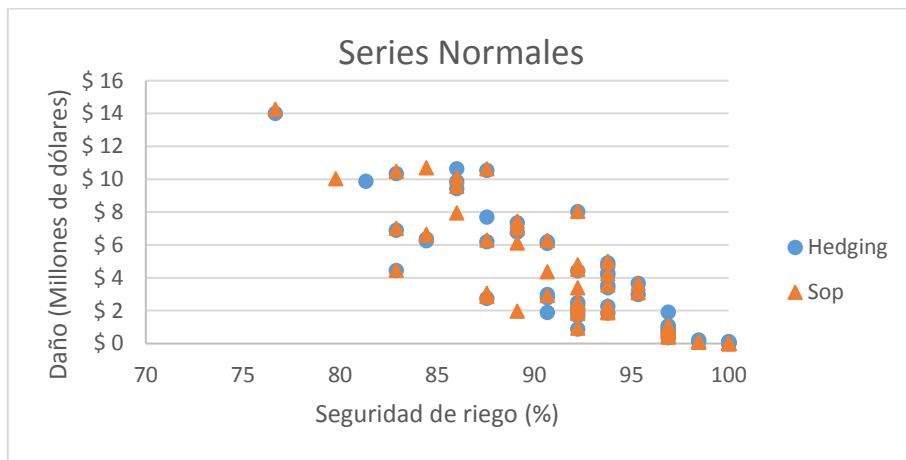


Figura. 5-12. Series Normales para caso SOP y Hedging.

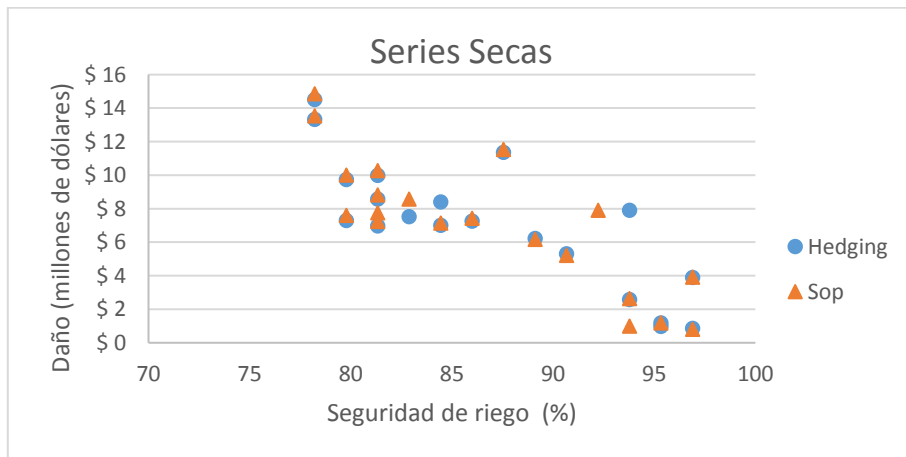


Figura. 5-13. Series Secas para caso SOP y Hedging.

La Figura. 5-11 presenta con mayor claridad que el máximo daño obtenido es menor que los máximos daños asociados a las series de entregas secas y normales graficadas en las Figura. 5-12 y Figura. 5-13. Para los casos con Hedging se aprecia que los máximos daños alcanzados son

levemente menores. Aun realizando la clasificación de las series, se aprecia dispersión entre los puntos por lo que se estudia en mayor detalle en la sección “. Análisis de casos específicos”.

- Confiabilidad según diferentes umbrales de falla

Para analizar el daño de las entregas según el porcentaje de demanda cubierta se realiza la estadística según diferentes umbrales de falla para las mismas series. En la Figura. 5-14 se muestran las proyecciones de daño para umbrales de falla del 65%,85%,95% y 100% para el caso con regla de operación estándar. En la Figura. 5-15 se presenta el caso de las simulaciones con Hedging. A modo de ejemplo, en ambos gráficos al señalar los puntos “85”, simbolizados por una equis, se refiere a que esos puntos consideran una falla cuando la entrega es menor al 85 % de la demanda.

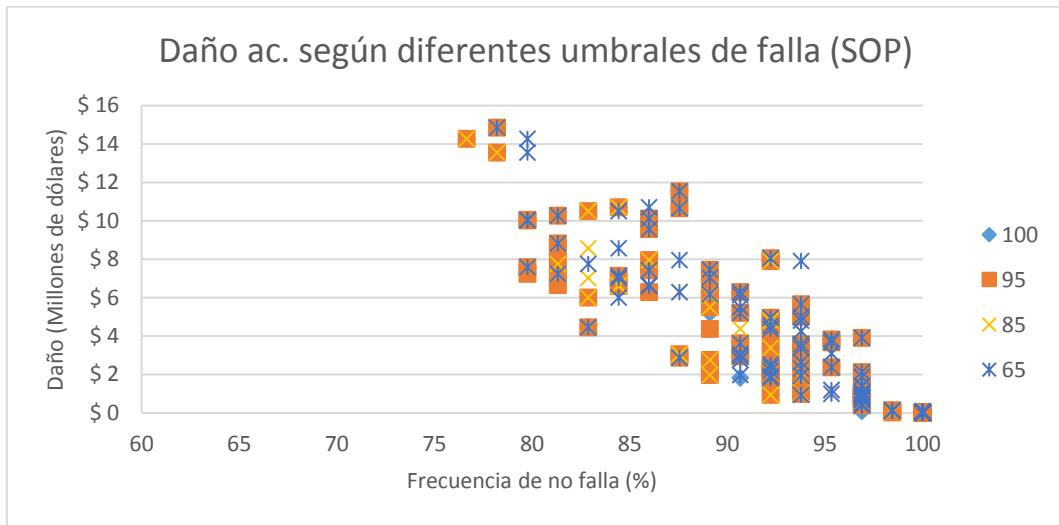


Figura. 5-14. Daño considerando diferentes umbrales de falla. Caso con SOP.

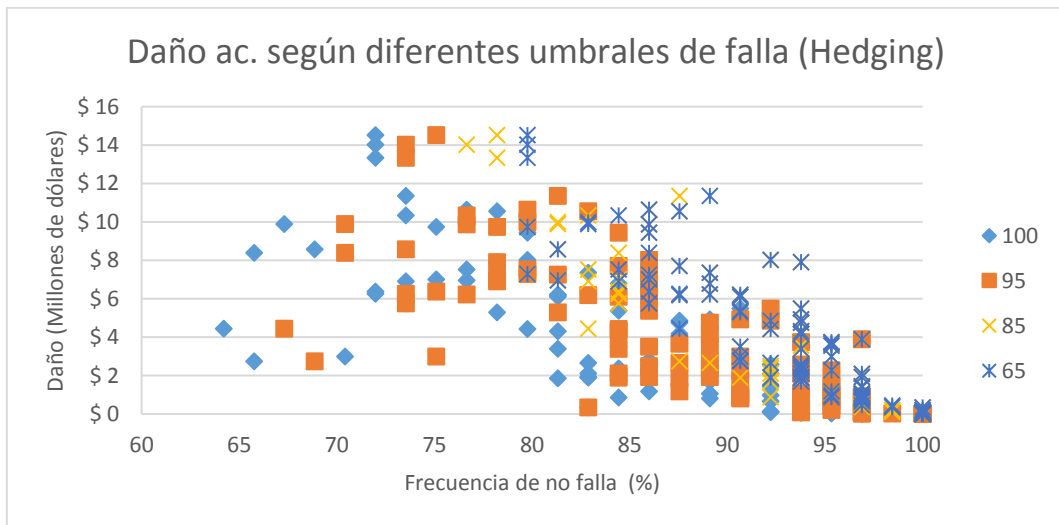


Figura. 5-15. Daño considerando diferentes umbrales de falla. Caso con Hedging.

Comparando la Figura. 5-14 y la Figura. 5-15, se aprecia que el Hedging tiene efecto en los distintos umbrales de falla ya que se diferencia en los puntos una tendencia más marcada que en el

caso SOP. En la Figura. 5-14, el efecto del cambio en la definición del umbral no es tan evidente como en el caso con Hedging debido a que se tienen déficits más severos por la regla de operación.

A modo explicativo, si se aprecia la tendencia de los puntos para el caso con Hedging, fijando un nivel de daño, se observa que para umbrales menos flexibles (los puntos “100”, que consideran fallas cuando la entrega es menor al 100% de la demanda) se requiere menor confiabilidad para sufrir el mismo nivel de daño que con un umbral más flexible (“65”). Para el mismo caso, con SOP, la confiabilidad requerida (o frecuencia de no falla) varía poco entre los umbrales de falla.

Se destaca, que tanto para SOP como Hedging, dentro de los puntos que consideran el mismo umbral de falla se encuentran casos en los que se alcanza el mismo daño para diferentes confiabilidades y también, para confiabilidades fijas se presentan diferentes daños.

- Desviación estándar de los déficits dentro de una serie

La desviación estándar del déficit se refiere a la medida de dispersión de los déficits mensuales obtenidos en una simulación. En la Figura. 5-16 se muestra el gráfico del daño acumulado en función de la desviación estándar de los déficits para los casos con SOP y Hedging.

Se aprecia una clara tendencia para las simulaciones con ambas reglas de operación, a mayor desviación estándar, mayor es el daño. Esto indica que las series que poseen mayor variación en sus déficits (Déficits de gran y menor magnitud en una serie) causan mayor daño que una serie con déficits de mediana magnitud homogéneos.

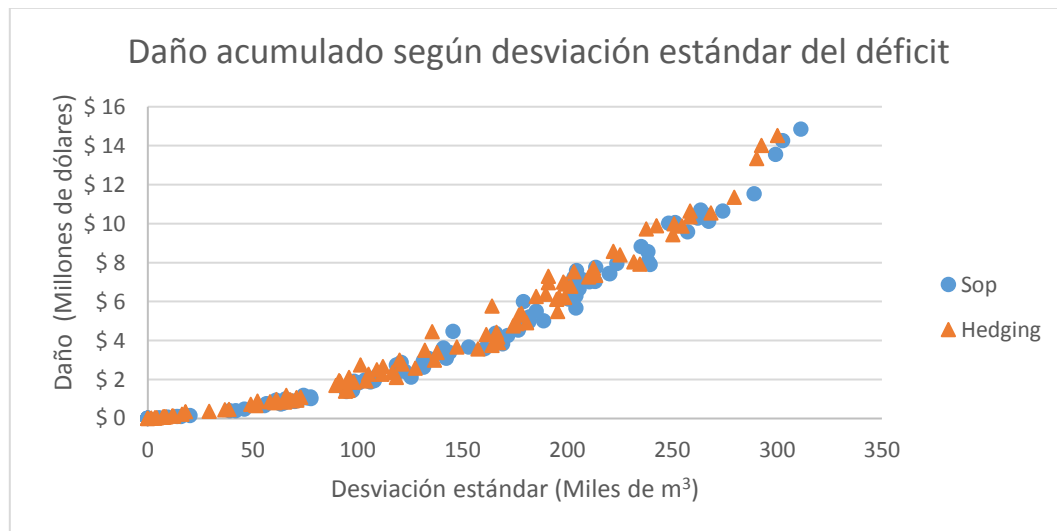


Figura. 5-16. Daño acumulado según desviación del déficit. Caso SOP y Hedging.

5.3.2 Déficit acumulado

El déficit acumulado es la suma de todos los déficits mensuales asociados a una serie de entregas.

- Seguridad de riego

En las Figura. 5-17 se presentan los gráficos del déficit acumulado según seguridad de riego para las simulaciones con regla de operación estándar y regla con Hedging. Cada punto que se observa corresponde a la simulación de una un set de series de caudales de 64 años.

Se realizan estos gráficos para buscar una relación entre la magnitud del déficit acumulado y la seguridad de riego, pero en ambos casos, se aprecia que para una seguridad de riego se pueden obtener distintos niveles de déficit, o visto de otra manera, un déficit puede representar diferentes niveles de seguridad de riego.

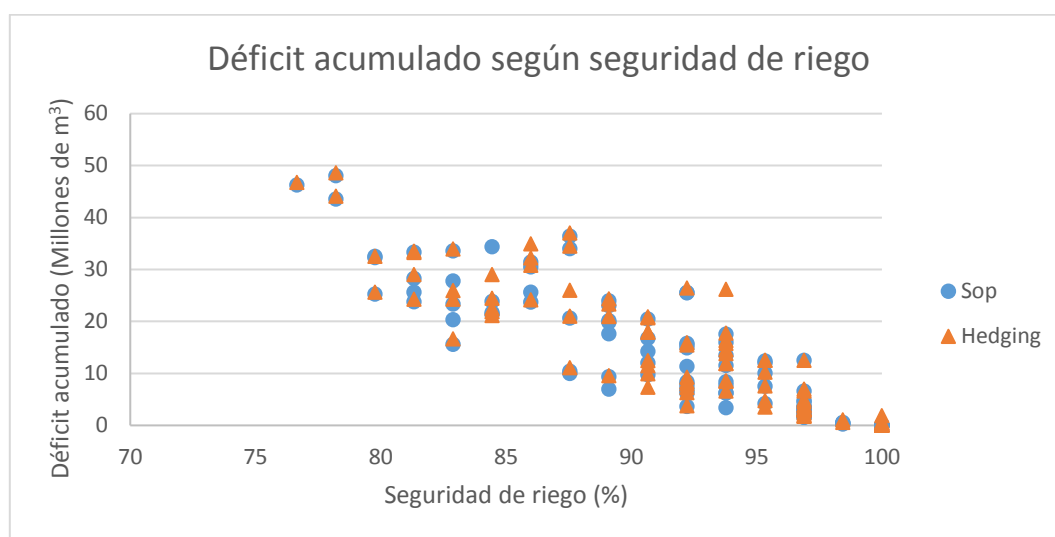


Figura. 5-17. Déficit acumulado según Seguridad de riego. Caso SOP y Hedging.

- Daño

En la Figura. 5-18 se grafica el daño acumulado de las series en función del déficit acumulado, Se aprecia una relación lineal entre estos parámetros, a mayor déficit acumulado en las series de 64 años, mayor es el daño. También, se observa para un déficit acumulado dado, el daño causado es mayor en el caso simulado con SOP que con Hedging.

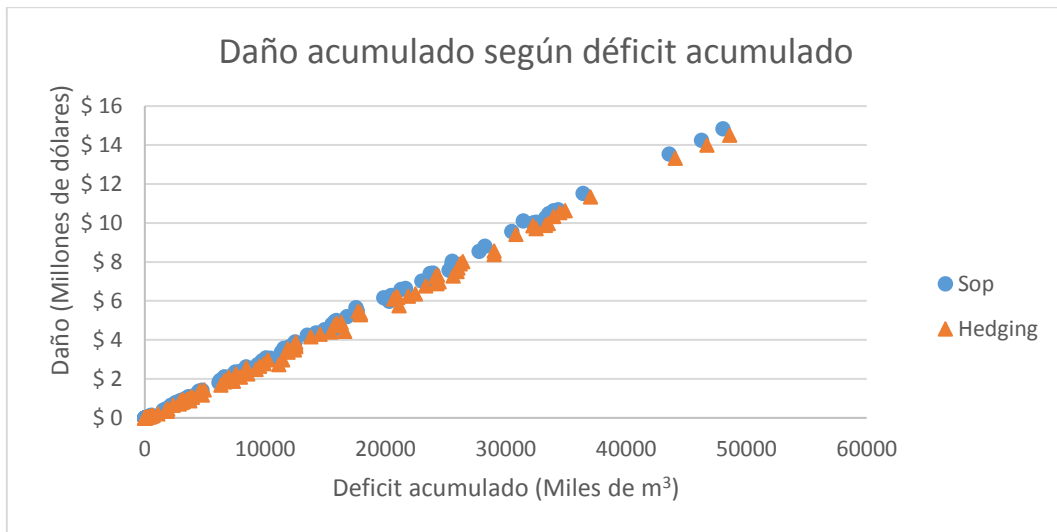


Figura. 5-18. Daño acumulado según déficit acumulado. Caso SOP y Hedging

5.3.3 Curvas de frecuencia acumulada

Se calculan las curvas de frecuencia acumulada para el daño, beneficio y seguridad de riego. Esto se realiza para tener una noción de cuál es la frecuencia con la que no se superan ciertos eventos.

En la Figura. 5-19 se presenta la frecuencia acumulada para la seguridad de riego. En este último gráfico se observa que para un 15% de frecuencia, las seguridades de riego 84,4% para Hedging y 82,8% para SOP no son superadas. Es decir, con un 85% de frecuencia sí lo son.

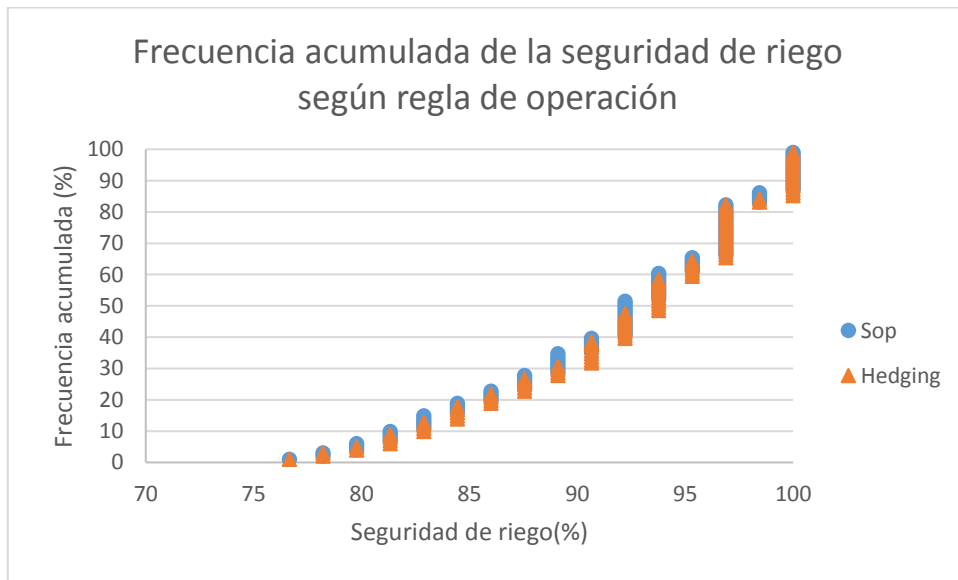


Figura. 5-19. Curva de frecuencia acumulada de seguridad de riego según regla de operación.

Las curvas de frecuencia acumulada para el daño y beneficio se muestran en la Figura. 5-20 y en Figura. 5-21 respectivamente. De ellas se desprende que, para el beneficio en el caso simulado con SOP, no son superados los \$326,88 Millones de dólares con un 15% de frecuencia. Por tanto, con

un 85% de frecuencia lo son. En el caso simulado con Hedging, para una frecuencia del 15% de no ser superado, se obtienen \$326,91 Millones de dólares.

Para el caso del daño, se obtiene que con un 85% de frecuencia no se superan los \$8,04 Millones de dólares con SOP y \$8,02 Millones de dólares con Hedging.

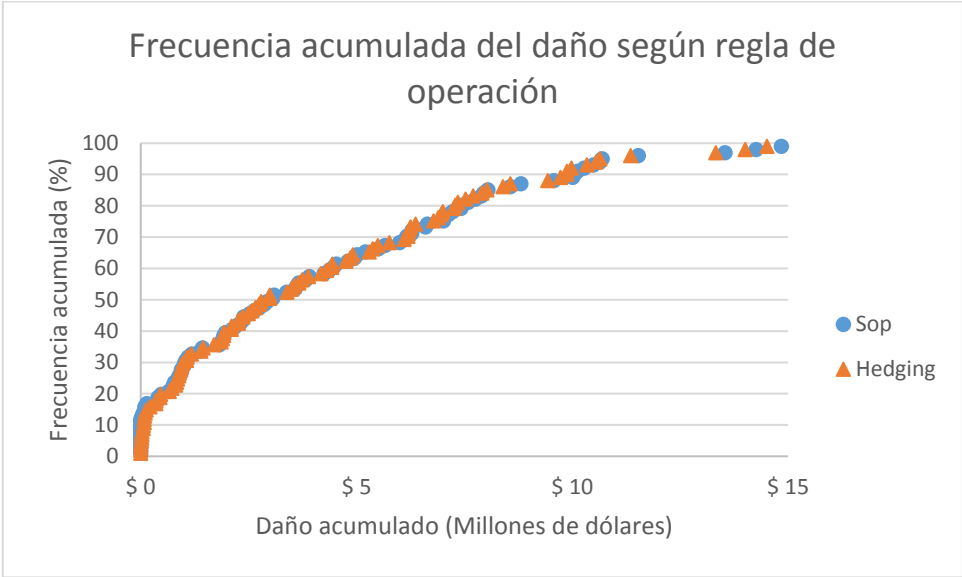


Figura. 5-20. Curva de frecuencia acumulada del daño según regla de operación.

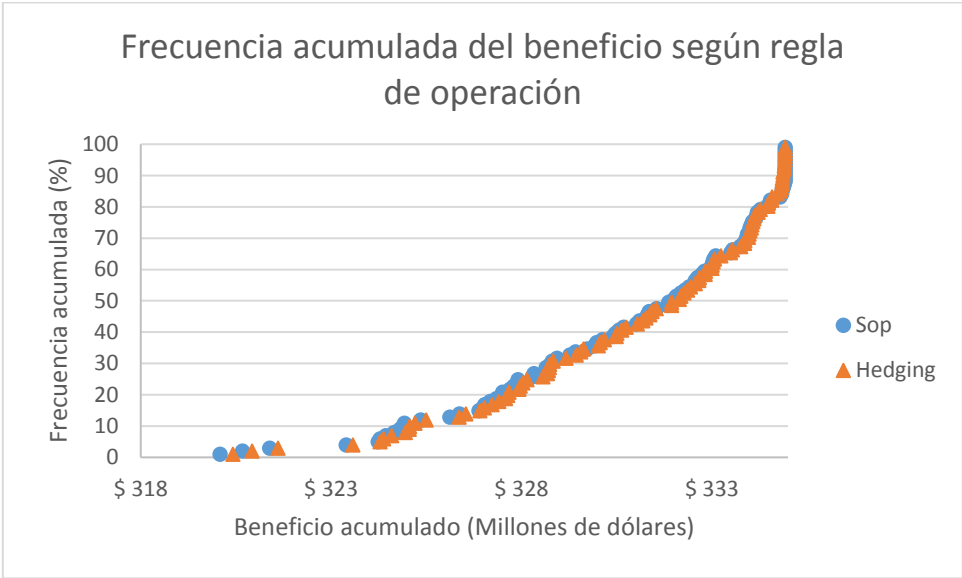


Figura. 5-21. Curva de frecuencia acumulada del beneficio según regla de operación.

5.3.4 . Análisis de casos específicos

Se observa que existen casos para los que se obtienen iguales seguridades de riego y diferentes daños. También ocurre el caso inverso, por esto que se realiza un análisis detallado para concluir cuales son los factores que tienen mayor influencia en el resultado.

Los 2 casos por considerar para el análisis son: cuando se observa igual seguridad de riego y diferentes daños acumulados e igual daño acumulado y diferentes seguridades de riego.

- Caso 1: Igual seguridad de riego obtienen diferentes niveles de daño.

a) Regla de operación estándar:

En el caso operado por regla de operación estándar, se escogen 4 series de entregas para ejemplificar la situación. Estas series cumplen con la definición de seguridad de riego, pero sufren distintos niveles de daño. En la Tabla 5-3 se presentan los indicadores de las series tales como la seguridad de riego; frecuencia de no falla para diferentes umbrales, déficit acumulado, beneficio acumulado, daño acumulado y finalmente la desviación estándar de los déficits mensuales. La frecuencia de no falla de diferentes umbrales se refiere a una estadística para la cual la definición de falla cambia en porcentajes respecto de la demanda máxima del mes. En cuanto al daño acumulado, beneficio acumulado y déficit acumulado, se refiere a la suma total mensual de la serie de esos parámetros. Finalmente, la desviación del déficit se utiliza para conocer la dispersión de los déficits mensuales.

Tabla 5-3.Comparación entre series de igual seguridad de riego. SOP.

Frecuencia de no falla para diferentes umbrales (Respecto a la demanda)						Seguridad de riego (%)	Déficit ac. (Miles de m ³)	Beneficio (Mill. de dólares)	Daño (Mill. de dólares)	Desv. Déficit (Miles de m ³)
25%	45%	65%	85%	95%	100%					
87,5	87,5	86,0	86,0	86,0	86,0	86	30491	325,4	9,6	257
87,5	87,5	87,5	86,0	86,0	86,0	86	25658	327,0	7,9	224
86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86	23720	327,5	7,4	220
87,5	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86	31447	324,8	10,1	267

Para entender con mayor claridad qué ocurre se grafican los déficits mensuales en la Figura. 5-23, el daño mensual en la Figura. 5-24 y los porcentajes de la demanda que representan los déficits en la Figura. 5-22 . Esto último se realiza debido a que la demanda del embalse depende de los aportes de los afluentes naturales.

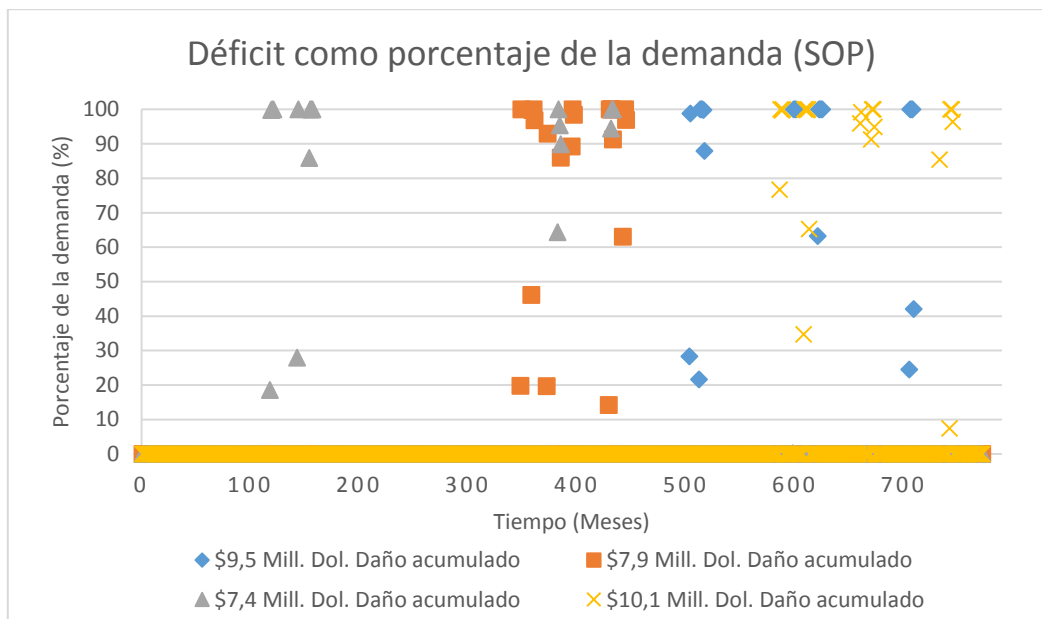


Figura. 5-22. Déficits mensuales como porcentaje de la demanda de series con igual seguridad de riego. SOP.

En la Figura. 5-22 se aprecia el efecto de la regla de operación estándar ya que en las 4 series se observan numerosos casos de fallas severas respecto a la demanda, es decir, donde la falla alcanza casi un 100% de la demanda mensual y por tanto en estos meses no se pudo entregar el recurso. En cuanto a la seguridad de riego, como las 4 series “fallan” la misma cantidad de veces, la diferencia en el daño recae en la lejanía de la falla al umbral, la magnitud de los déficits.

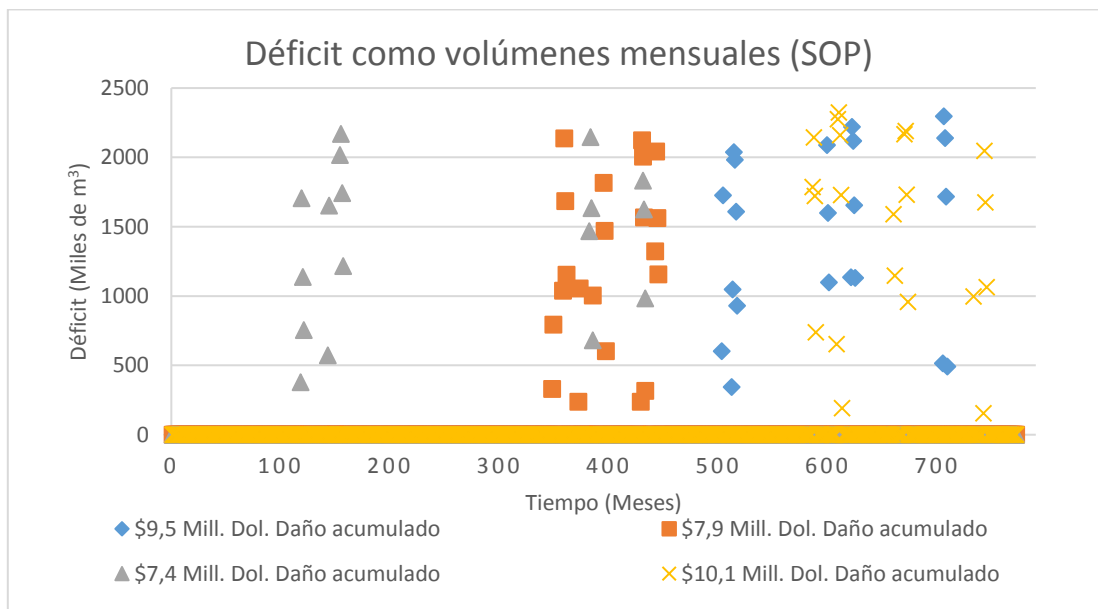


Figura. 5-23. Déficits mensuales de series con igual seguridad de riego. SOP.

En la Figura. 5-23 se observa la magnitud de los déficits mensuales. Para los casos de las series con menor daño (\$ 7,4 y 7,9 millones de dólares) se aprecian pocos déficits severos. En cuanto a la serie con mayor daño (\$10,1 millones de dólares) se aprecia que los déficits se encuentran mayoritariamente sobre los 1500 miles de m³, en la parte superior del gráfico.

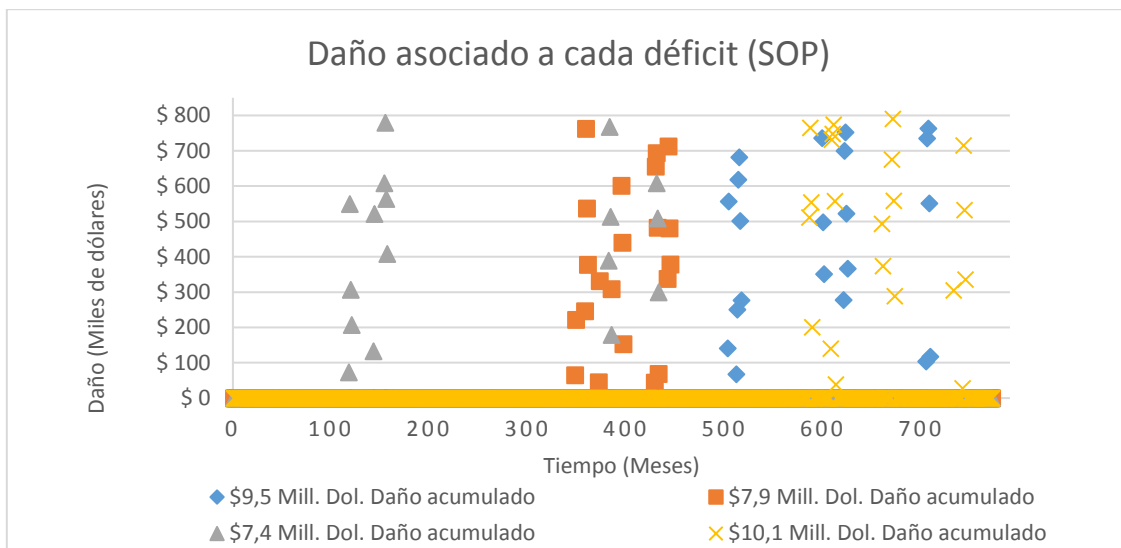


Figura. 5-24. Comparación distribución del daño mensual para series con igual seguridad de riego. SOP.

Finalmente, en la Figura. 5-24 se observa un patrón similar al del déficit mensual de la Figura. 5-23. Las series con menor daño acumulado (\$7,9 y 7,4 millones de dólares) presentan daños mensuales distribuidos mayoritariamente en la parte inferior del gráfico, mientras que las otras series poseen meses con daños más severos. Además, son los casos con menor desviación estándar.

b) Regla de operación con Hedging:

En este caso también se escogieron 4 series con seguridad de riego del 86%. Estas series son distintas a las del caso con regla de operación estándar. En la Tabla 5-4 se muestran las características de las series. Se utilizan los mismos indicadores mencionados que en el caso con SOP.

Tabla 5-4. Comparación entre series de igual seguridad de riego. Hedging.

Frecuencia de no falla para diferentes umbrales (Respecto a la demanda)						Seguridad de riego (%)	Déficit ac. (Miles de m ³)	Beneficio (Mill. de dólares)	Daño (Mill. de dólares)	Desv.est. (Miles de m ³)
25%	45%	65%	85%	95%	100%					
87,5	87,5	86,0	86,0	84,4	79,8	86	30833	325,5	9,4	250
86,0	86,0	86,0	86,0	81,3	81,3	86	24168	327,7	7,3	210
86,0	86,0	86,0	86,0	79,8	76,7	86	34942	324,3	10,6	259
87,5	86,0	86,0	86,0	76,7	76,7	86	32251	325,1	9,9	255

En la Figura. 5-25 se presentan los déficits mensuales como porcentaje de la demanda cuando se simulan las 4 series con Hedging. En la imagen se aprecia el efecto del Hedging en la zona inferior del gráfico, ya que se observan más fallas pequeñas respecto al porcentaje de la demanda.

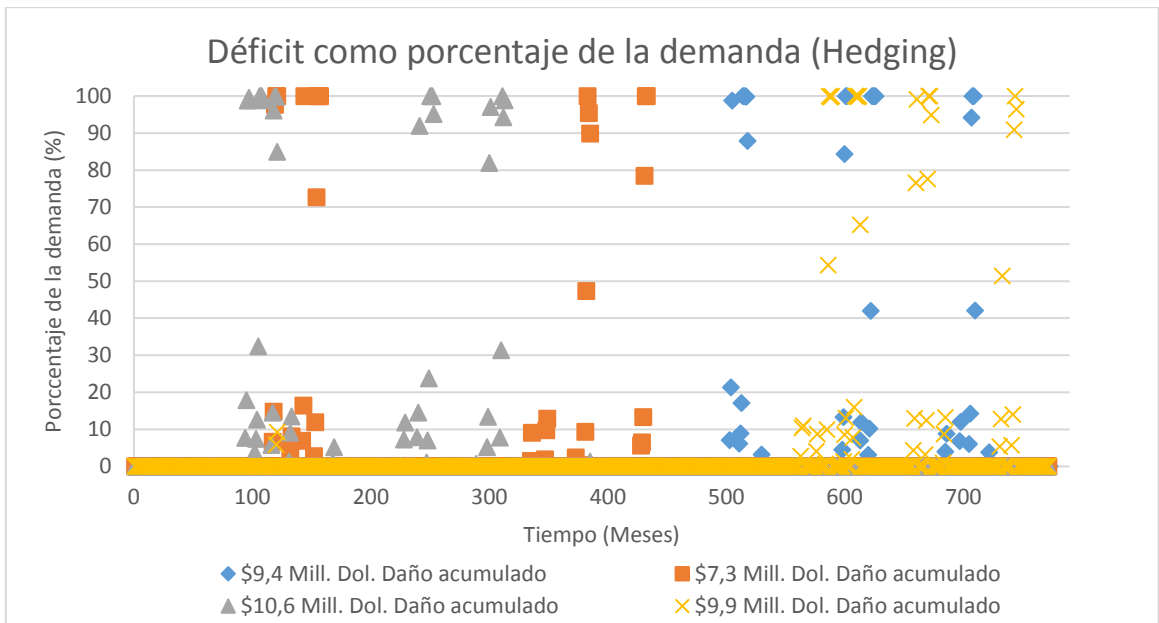


Figura. 5-25. Déficits mensuales como porcentaje de la demanda de series con igual seguridad de riego. Hedging.

En la Figura. 5-26 se presentan los déficits mensuales de las 4 series. Acá se aprecia nuevamente, que las series con mayor cantidad de déficits severos son las con mayor daño (\$10,6; \$9,9 y \$9,4 millones de dólares). En el caso de las series con menor daño acumulado, se aprecia que la mayoría de sus déficits se encuentran cerca del umbral de falla (10-15% de déficit como porcentaje de la demanda).

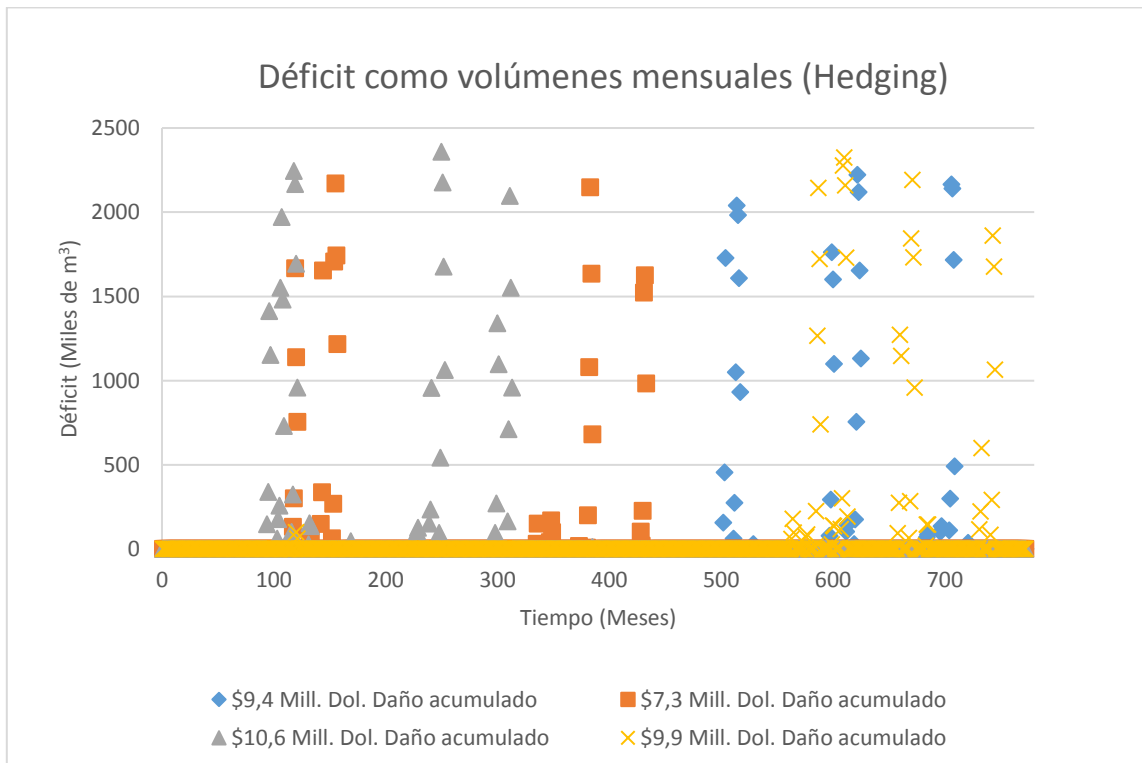


Figura. 5-26. Déficits mensuales de series con igual seguridad de riego. Hedging.

Finalmente, en la Figura. 5-27 se presentan los daños mensuales de las series. Se observa que la serie con menor daño acumulado (\$7,3 millones de dólares) posee mayoritariamente meses con daños pequeños o visto de otra manera, existen pocos meses con fallas severas de magnitud. Como posee la misma seguridad que las otras series, se observa que se debe a que las fallas ocurrirían al límite del umbral o debido a que la demanda exigida en ese mes no es tan significativa debido al aporte de los afluentes naturales.

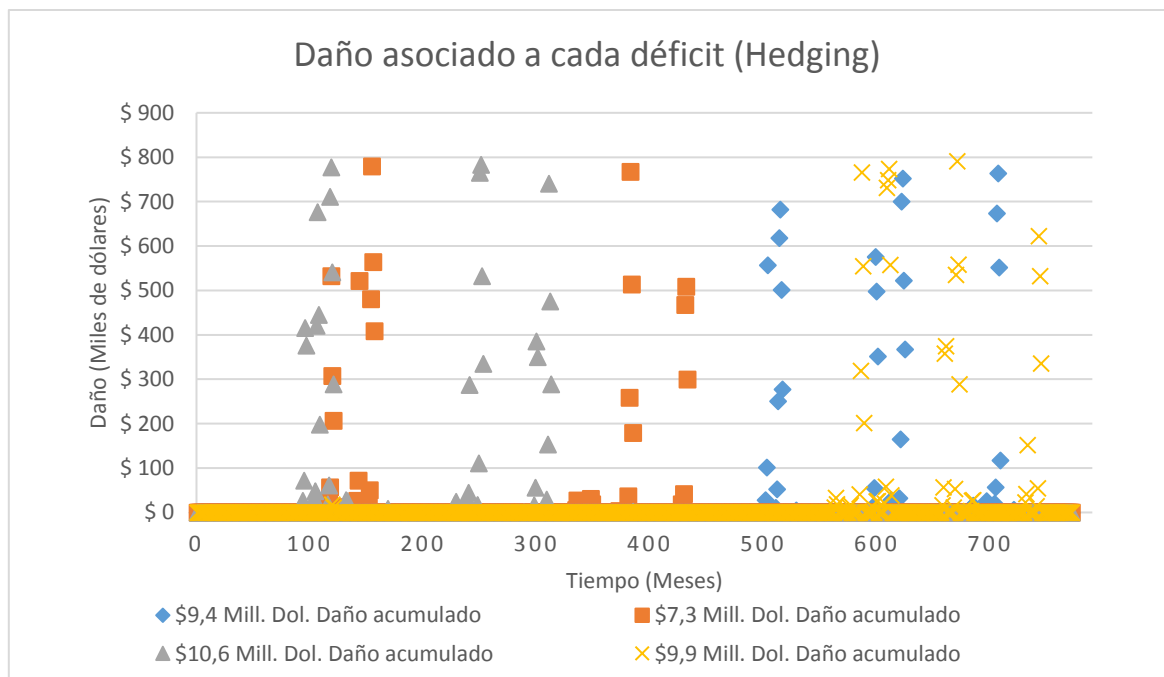


Figura. 5-27. Comparación distribución del daño mensual para series con igual seguridad de riego. Hedging.

- Caso 2: Igual daño acumulado y distinta seguridad de riego.

a) Regla de operación estándar:

Se escogen las simulaciones de dos series con regla de operación estándar, las cuales cumplen con igualdad en el daño acumulado y diferentes seguridades de riego. Una de las series escogidas cumple con el 85% del criterio de la seguridad de riego, mientras que la otra serie no. Se busca encontrar los factores que afectan a este suceso.

En la Tabla 5-5 se presentan los principales indicadores mencionados anteriormente.

Tabla 5-5. Comparación series con igual daño acumulado. SOP.

Frecuencia de no falla para diferentes umbrales (Respecto a la demanda)						Seguridad de riego (%)	Déficit ac. (Miles de m ³)	Beneficio (Mill. de dólares)	Daño (Mill. de dólares)	Desv. est. (Miles de m ³)
25%	45%	65%	85%	95%	100%					
92,2	84,4	84,4	82,9	81,3	81,3	82,9	23344	327,9	7,0	210
92,2	89,1	89,1	89,1	89,1	89,1	89,1	23031	327,9	7,0	213

En la Figura. 5-28 se muestra el déficit como porcentaje de la demanda mensual de cada serie. Se aprecia el efecto de la operación con regla de operación estándar ya que la mayoría de las fallas en ambas series son severas respecto a la demanda mensual, es decir, estos déficits alcanzan un 100% de las demandas mensuales y por tanto no se entrega agua del embalse.

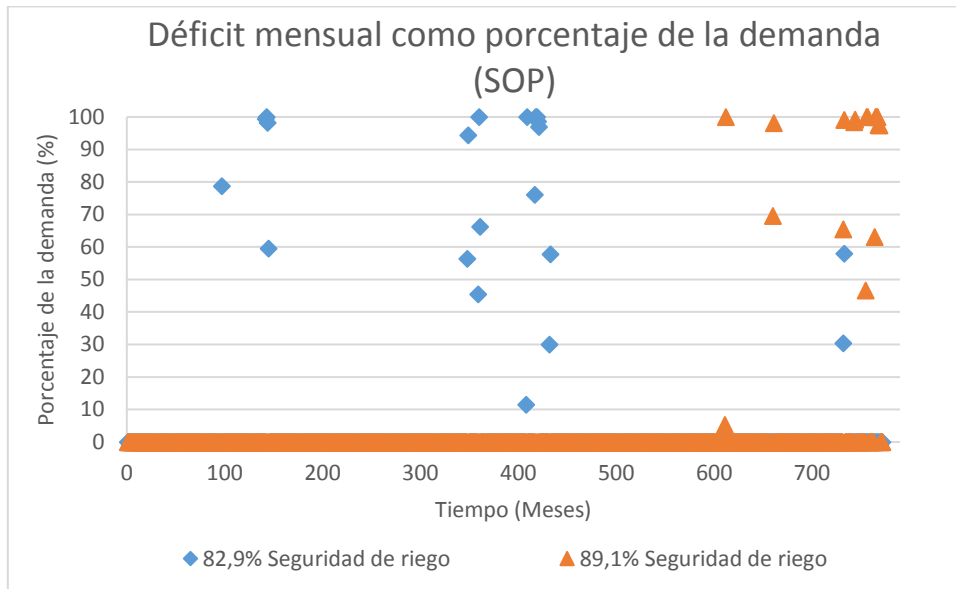


Figura. 5-28. Déficits mensuales como porcentaje de la demanda de series con igual daño acumulado. SOP.

En la Figura. 5-29 se presentan los déficits mensuales de ambas series. Se observa que, aunque la serie de menor seguridad de riego (82,9%) falle con mayor frecuencia respecto a la demanda, la magnitud de las fallas en cuanto a déficit es menor, se encuentran principalmente bajo los 1500 Miles de m³.

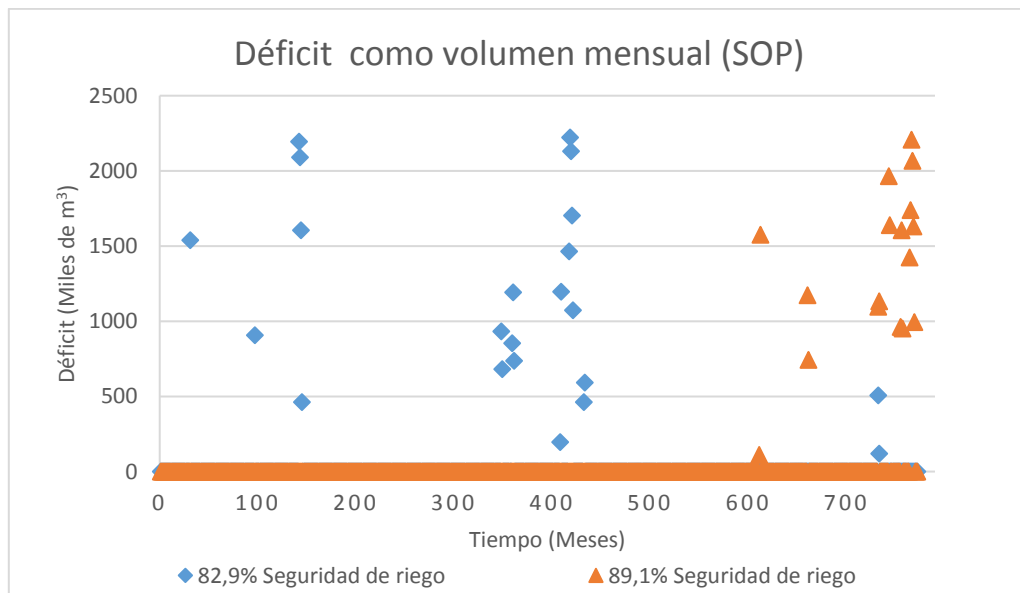


Figura. 5-29. Déficits mensuales de series con igual daño acumulado. SOP.

En la Figura. 5-30, se aprecia el daño para cada mes de las series. Se observa nuevamente que para la serie con mayor cantidad de meses fallos (82,9% de seguridad de riego), se obtienen más meses

con menor nivel de daño en comparación a la serie con mayor seguridad de riego (89,1% de seguridad). Acá entonces se observa un intercambio entre número de fallas y magnitud de los déficits que logra equiparar el daño acumulado.

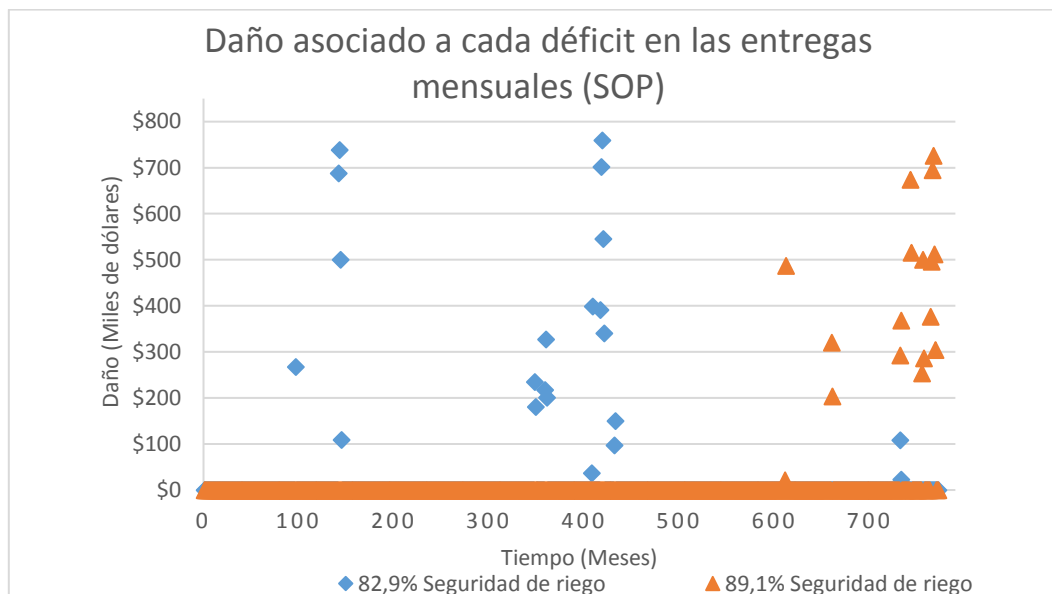


Figura. 5-30. Comparación daño mensual para series con igual daño acumulado. SOP.

b) Regla de operación con Hedging:

Se eligen 2 series cuyas simulaciones obtengan el mismo daño acumulado. Al igual que en el caso anterior con SOP, una de las series cumple con el 85% de seguridad de riego definido por el criterio y la otra no.

En la Tabla 5-6 se muestra un resumen con las características de las simulaciones de las series. Los indicadores son los mencionados anteriormente.

Tabla 5-6. Comparación series con igual daño acumulado. Hedging.

Frecuencia de no falla para diferentes umbrales (Respecto a la demanda)						Seguridad de riego (%)	Déficit ac. (Miles de m ³)	Beneficio (Mil. de dólares)	Daño (Mill. de dólares)	Desv. est. (Miles de m ³)
25%	45%	65%	85%	95%	100%					
84,4	84,4	82,9	81,3	70,4	67,3	81,4	33299	325	9,9	242
87,5	86,0	86,0	86,0	76,7	76,7	86,0	32250	325	9,9	254

En la Figura. 5-31 se aprecian los déficits mensuales representados en porcentaje de la demanda. De acá se pueden observar claramente las fallas consideradas en la estadística de la definición de la seguridad de riego. Se observan los pequeños déficits inducidos de modo de evitar déficits severos en periodos secos. También, se aprecia que los déficits de la serie con menor seguridad de riego (81,4%) corresponden a un menor porcentaje de la demanda en comparación a la otra serie (los puntos están mayoritariamente más cerca del 10% de la demanda).

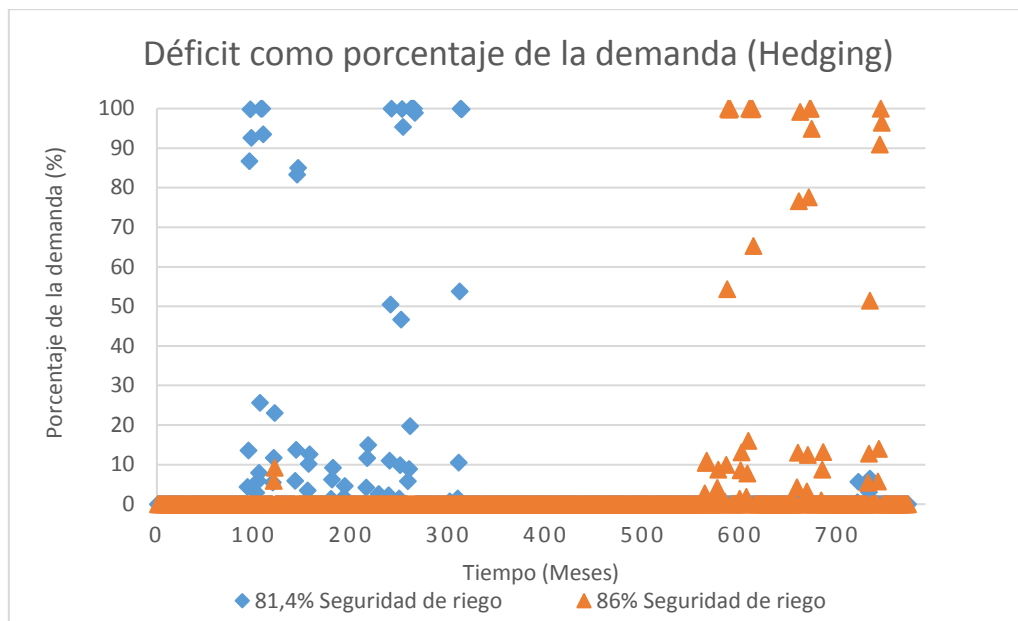


Figura. 5-31. Déficits mensuales como porcentaje de la demanda. Hedging.

En la Figura. 5-32 se presentan los déficits mensuales de las series. Se muestra que la serie con seguridad de riego del 81,4% posee mayor cantidad de déficits menos severos (<1500 miles de m³) en comparación a la serie de 86% de seguridad de riego.

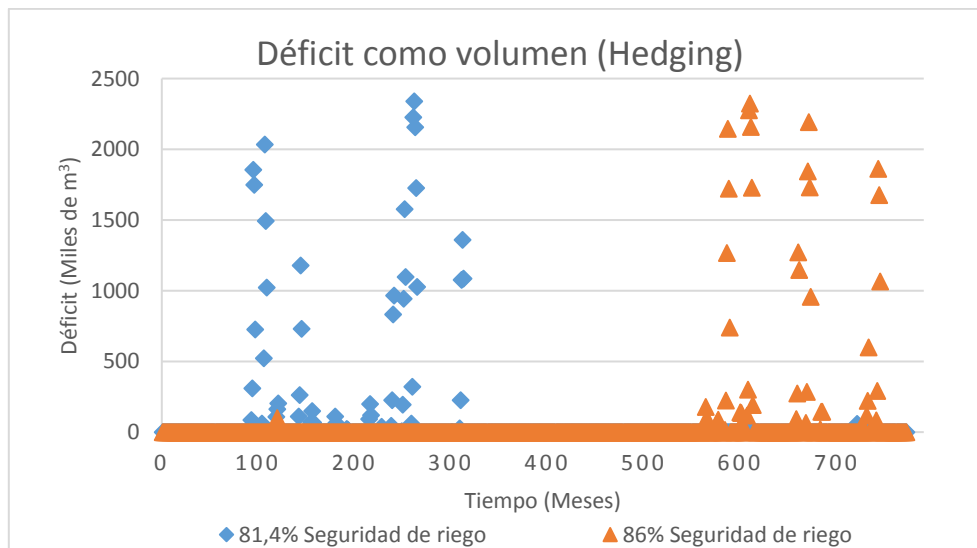


Figura. 5-32. Déficits mensuales de series con igual daño acumulado. Hedging.

Por último, en la Figura. 5-33 se muestran los daños mensuales asociados a los déficits. Al igual que en a), se observa que la mayoría de los daños mensuales de la serie con menor seguridad de riego son de pequeña magnitud por lo que se equipara al daño acumulado de la serie con mayor seguridad de riego (86%) ya que esta última, posee menos meses con daños, pero los existentes son más severos.

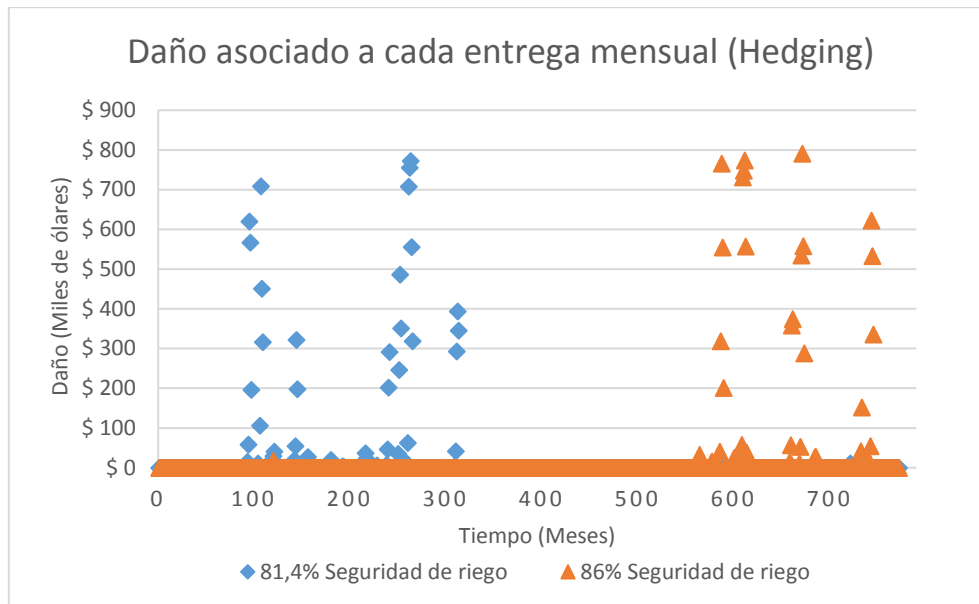


Figura. 5-33. Comparación daño mensual para series con igual daño acumulado. Hedging.

5.3.5 Comparación de resultados según regla de operación

De los resultados, analizando los daños acumulados de cada serie, para su operación con Hedging y su operación con regla de operación estándar se observa en la Figura. 5-34 la comparación del daño acumulado según cada regla de operación para las 100 series de sets de caudales generados.

En la Figura. 5-34 se aprecia que la tendencia, al usar Hedging, es de minimizar los daños (aumentar los beneficios), respecto al caso con SOP. Esto se debe a la forma no lineal de la curva de beneficios, debido a su pendiente, en déficits más severos se pierden mayores beneficios, es decir, es mayor el daño. Por otro lado, para déficits pequeños, se obtienen menores pérdidas. Esto explica los resultados obtenidos debido a que el Hedging induce déficits pequeños para evitar fallas severas en el futuro, por lo que, aunque no se entregue la totalidad de la demanda en un cierto periodo, en las etapas posteriores, los déficits serán menores y por tanto el daño será menor en comparación a la simulación con SOP.

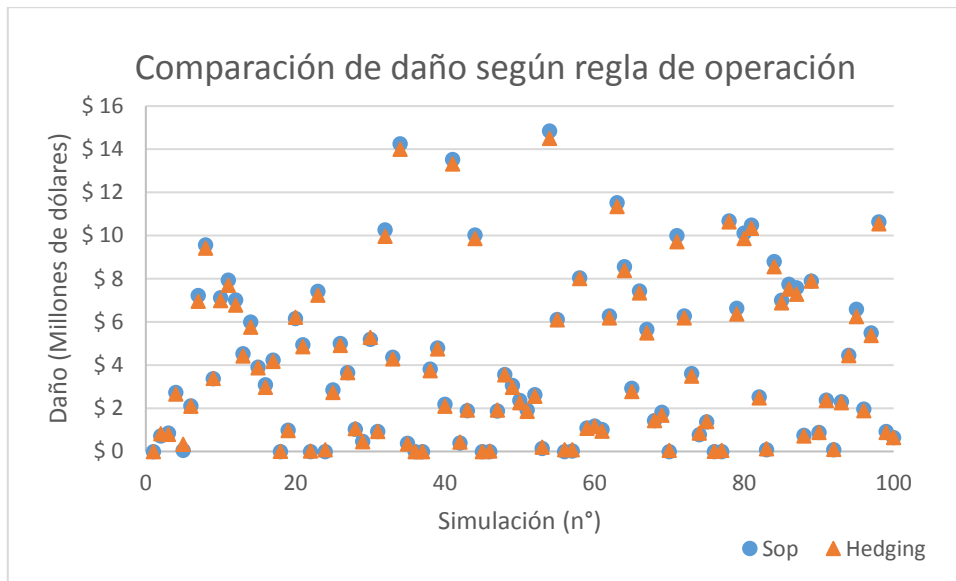


Figura. 5-34. Comparación de daño acumulado según regla de operación.

También, se observa que existen casos en los que, en comparación, el daño acumulado es mayor para el caso con Hedging dada una misma serie.

Se encuentran dos casos característicos:

- a) El daño acumulado con SOP es mucho mayor a cero.
- b) El daño acumulado con SOP es igual o cercano a cero.

Un ejemplo del caso a) se presenta en la Figura. 5-35, donde se gráfica la distribución mensual de los déficits de la serie de daño aproximado de \$5,2 millones de dólares (con SOP) para los casos SOP y Hedging.

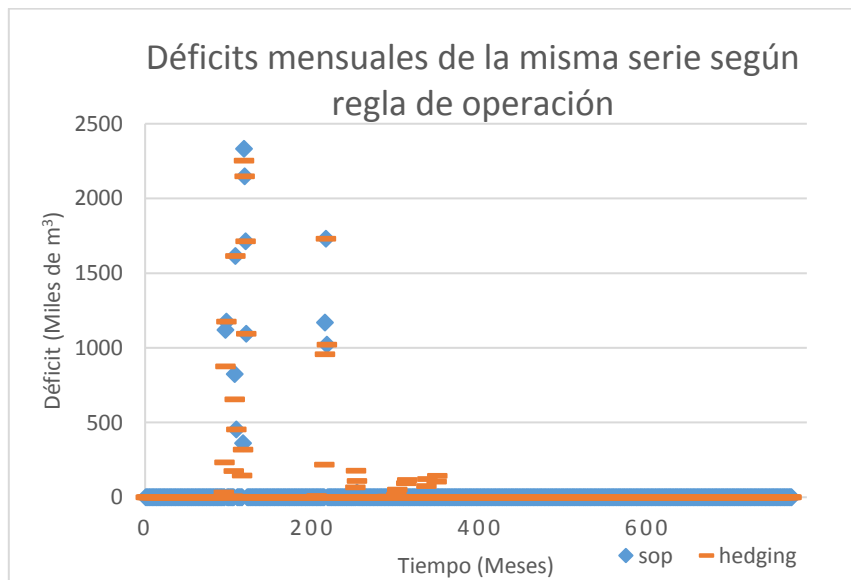


Figura. 5-35. Déficit mensual operando SOP y Hedging. a).

De la Figura. 5-35 se aprecia el efecto del Hedging en los resultados de las simulaciones ya que se observa que algunos de los déficits disminuyeron a costa de la inducción de déficits pequeños.

En la Figura. 5-36 se presentan los daños mensuales para las simulaciones con Hedging y SOP. Se aprecia que el efecto del Hedging en el daño se manifiesta de manera similar al déficit. El aumento en el daño acumulado de la serie con Hedging se explica debido a que no existen déficits por largos periodos y se continúa aplicando Hedging. Por lo que, además, se debe sumar el daño de todos los déficits inducidos, los cuales no son grandes en magnitud, pero si en cantidad.

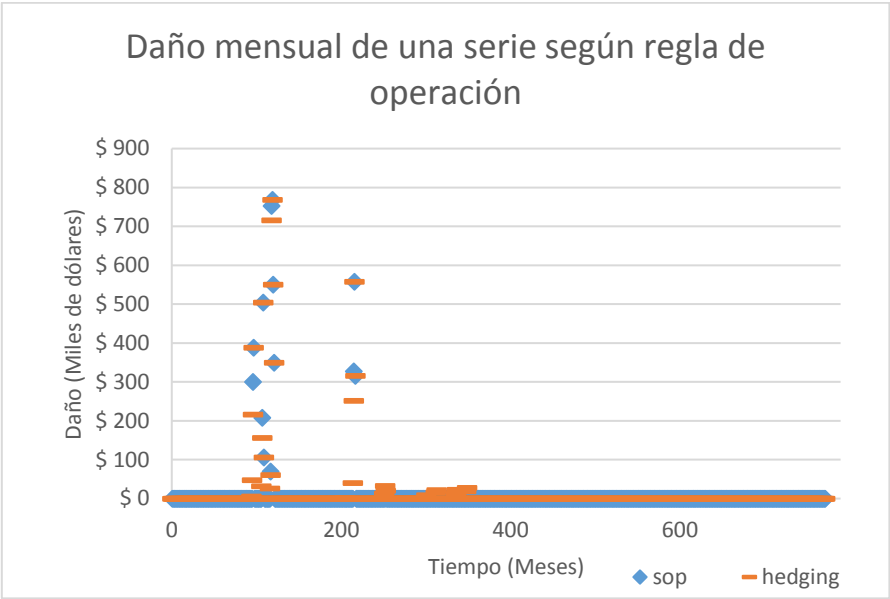


Figura. 5-36. Daño mensual operando con SOP y Hedging. a).

Para el caso b), en la Figura. 5-37 se presentan los déficits mensuales para los casos operados con SOP y Hedging, se contraponen los resultados dada una misma serie cuyo daño acumulado en SOP es cercano a cero (\$0,05 Millones de dólares). En la Figura. 5-38 se presenta el daño asociado a los déficits mensuales.

El caso b) se distingue por alcanzar casi un 100% de las veces las demandas mensuales operando con regla de operación estándar. Al aplicar el Hedging, se observa en la Figura. 5-37, que se inducen déficits, pero no hay déficit que amortiguar. Es por esto que el daño mensual generado es mayor en los meses donde se aplica el Hedging en comparación a la SOP y por tanto el daño acumulado es mayor.

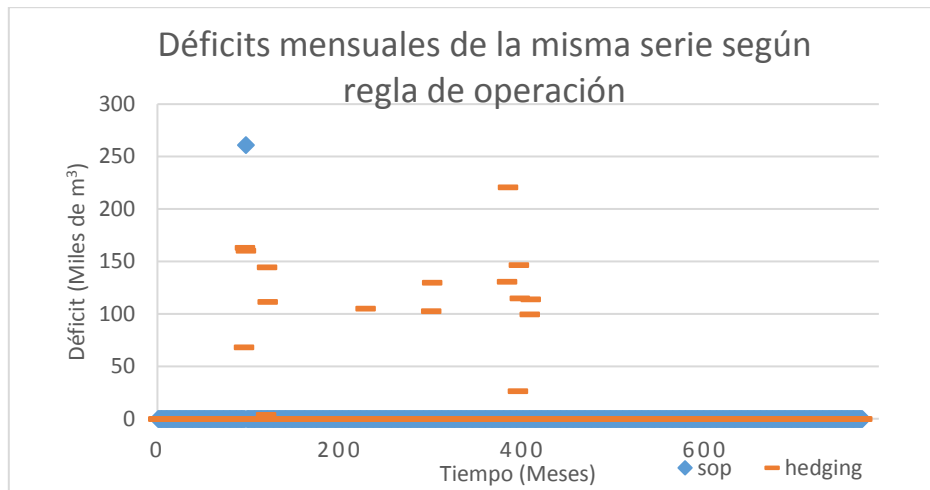


Figura. 5-37. Déficit mensual operando SOP y Hedging. b).

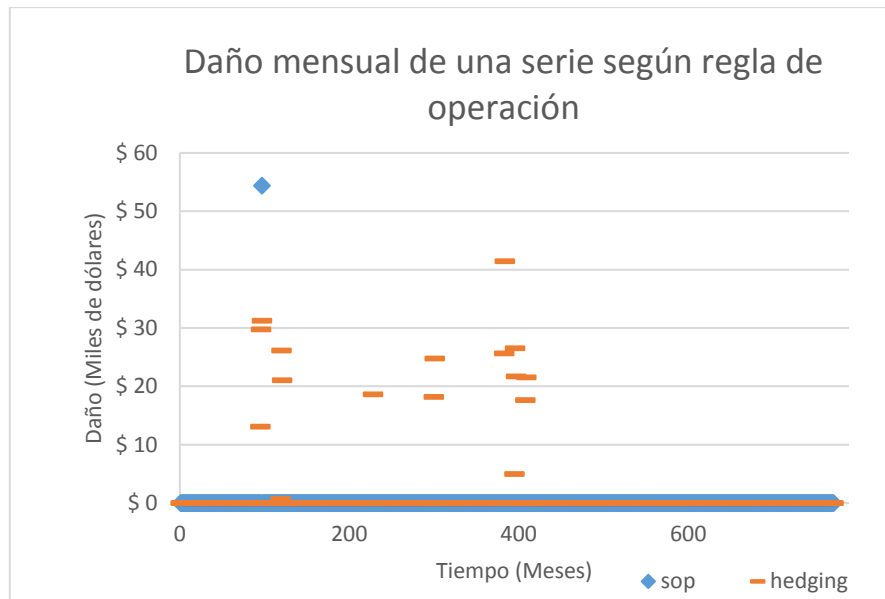


Figura. 5-38. Daño mensual operando con SOP y Hedging. b).

Capítulo 6 Conclusiones

De la simulación, se concluye que en general, operar un embalse con Hedging genera mayores beneficios económicos, en comparación a la simulación con regla de operación estándar. El beneficio obtenido por la operación con Hedging es 30.000 dólares mayor que el caso operado por SOP dada una frecuencia del 85% para el nivel de Hedging usado. Por la definición del daño, esto se traduciría a que la operación con una regla con Hedging minimizaría el daño económico. Esto se debe a que el Hedging induce déficits pequeños innecesarios que evitan déficits más severos en el futuro, distribuyendo el déficit total. Del gráfico de desviación estándar de los déficits se verifica esto ya que para mayores desviaciones se obtiene mayor daño, por lo que series con déficits menos dispersos respecto a la media, es decir, casos con déficits de magnitudes similares entre ellos, minimizan el daño.

Sin embargo, no se cumple que el Hedging obtiene mejor desempeño que la operación con SOP para casos de simulaciones donde no se presenta déficit hídrico durante muchos periodos ya que se inducen déficits que no deben amortiguar fallas más severas.

También, como es de esperar, se concluye que, a mayor déficit acumulado en la simulación, para los casos con Hedging y SOP, se obtiene mayor daño acumulado.

En cuanto a la definición de seguridad de riego, se obtuvo que con un 85% de frecuencia se supera un 82,9 % de seguridad de riego para el caso con SOP, mientras que se alcanza un 84,4% de seguridad de riego para el caso operado por Hedging.

En cuanto a la relación entre la seguridad de riego y el daño, se concluye que la relación no es directa ya que tanto para las simulaciones con regla de operación estándar y para reglas con Hedging se encontraron casos para los cuales sí se satisfacía el indicador de la seguridad de riego, pero el daño acumulado asociado variaba dependiendo del aporte de los afluentes, su distribución y de la severidad de las fallas. También se encontraron casos para los que dado un nivel de daño se obtenían diferentes niveles de seguridad.

Realizando un análisis más profundo, se deduce que existen series con igual seguridad de riego y diferente daño debido a que las series fallan la misma cantidad de veces respecto a las demandas mensuales, pero en magnitud, los déficits son más severos para los casos con mayor daño acumulado.

Para el caso en que las series poseen igual daño acumulado y distinta seguridad de riego, se concluye que los factores determinantes son la frecuencia de falla y la magnitud de las fallas. Una simulación falla más que otra respecto a las demandas mensuales, pero las magnitudes de los déficits no son tan severas, con lo que se logra equiparar el daño acumulado de una serie con pocas fallas, pero de gran magnitud.

En ambos casos mencionados, se concluye que la magnitud y frecuencia del déficit en la serie son los factores que logran equiparar los resultados de los indicadores ya que se produce un balance entre estos parámetros.

Al estudiar cómo se comportan las series al variar el umbral de falla, se observa que para las simulaciones con umbrales más permisivos (qué permiten mayores déficits respecto a la demanda) en los casos con Hedging, se requiere mayor confiabilidad (frecuencia de no falla) para alcanzar un nivel de daño determinado. Para las simulaciones con regla de operación estándar esto no se presenta claramente como en el caso anterior. Se concluye que para el caso con SOP esto ocurre debido a que la regla apunta a entregar siempre la demanda máxima mensual y como genera déficits más severos, aunque el umbral cambie, la estadística es prácticamente la misma. De esto se deduce que, para un caso hipotético, donde se utilizan reglas de operación con Hedging en la planificación de un embalse al cual se le permite cierto nivel de daño acumulado, la confiabilidad exigida depende del umbral de falla escogido.

En conclusión, al incorporar indicadores económicos a la evaluación del desempeño se deduce que la seguridad de riego es un indicador que puede correlacionarse con los beneficios y el daño, pero el intervalo en el que oscilan los resultados para un nivel de beneficio o daño es amplio. Se concluye que los factores que influyen en estas situaciones son la combinación de la frecuencia de falla, la magnitud de falla y la definición de falla utilizada. Distintas combinaciones entre frecuencias de déficits y magnitud de éstos logran equiparar el efecto económico, déficits frecuentes de un cierto tamaño pueden causar el mismo daño económico que pocos déficits severos de una determinada magnitud. Considerando los resultados con Hedging, se concluye que permitir pequeños déficits de modo de evitar grandes dispersiones entre ellos (evitar fallas severas) es una medida efectiva para mitigar los daños. Debido a que la seguridad de riego es una definición poco permisiva en cuanto a la frecuencia de fallas permitidas y a la magnitud de las fallas, no traduce totalmente el desempeño del embalse en cuanto al aspecto económico. Por tanto, la definición podría ser mejorada al flexibilizarla.

Bibliografía

- Askew, Arthur J. 1974. "Optimum Reservoir Operating Policies and the Imposition of a Reliability Constraint." *Water Resources Research* 10(1):51–56.
- Bayazit, M., Ünal, N. E. 1990. "Effect of Hedging on Reservoir Performance." *Water Resources Research* 26(4):713–19.
- Brown, Casey M. et al. 2015. "The Future of Water Resources Systems Analysis: Toward a Scientific Framework for Sustainable Water Management." *Water Resour. Res.* 51:6110–24.
- Cancelliere, Antonino, Alessandro Ancarani, and Giuseppe Rossi. 1998. "Susceptibility of Water Supply Reservoirs to Drought Conditions." *Journal of Hydrologic Engineering* 3(1994):140–48.
- DGA, Dirección general de aguas. 2016a. "Gestión Del Agua." Pp. 104–33 in *Atlas del agua*. Santiago.
- DGA, Dirección general de aguas. 2016b. *Informe Técnico DGA Región de Valparaíso DARH N°51/2016*.
- DGA, Dirección general de aguas. 2017. "Información Histórica Recibida de Conservadores de Bienes Raíces En Relación a Derechos de Aprovechamiento." (<http://www.dga.cl/FNE/CBR/Paginas/default.aspx>).
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). 2003. *Diagnóstico de Obras de Riego En Los Valles de La Ligua Y Petorca V Región*. Santiago.
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). 2011. *Actualización Y Proceso Modelos Ded Simulación de Los Valles de Ligua Y Petorca*. Santiago.
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). 2012. *Estudio de Diseño Construcción Sistema de Regadío Valle Petorca, Región de Valparaíso*.
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). 2014. *Estudio de Impacto Ambiental Embalse de Regadío Las Palmas-Estudio de Caudal Ecológico*.
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). 2016. *Trabajos Complementarios Construcción Sistema Regadío Valle de Petorca, Región de Valparaíso*.
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). 2017. *Determinación de Reglas Operacionales Para Embalses Priorizados*. Santiago.
- Draper, Andrew J. and Jay R. Lund. 2004. "Optimal Hedging and Carryover Storage Value." *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(1):83–87.
- Gonzalez, José, Marcelo Olivares, Josue Medellín-Azuara, Rodrigo Moreno, and Guilherme Marques. 2016. "Multi-Purpose Reservoir Operation: A Tradeoff Analysis between Hydropower Generation and Irrigated Agriculture Using Hydro-Economic Models." *World*

Environmental and Water Resources Congress 2016 (May):241–50.

Harou, Julien J. et al. 2009. “Hydro-Economic Models: Concepts, Design, Applications, and Future Prospects.” *Journal of Hydrology* 375(3–4):627–43.

Hashimoto, Tsuyoshi, Jerry R. Stedinger, and Daniel P. Loucks. 1982. “Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation.” *Water Resources Research* 18(1):14–20.

Howitt, Richard E. 1995. “Mathematical Programming.” *American Journal of Agricultural Economics* 77(2):329–42.

INE, Instituto nacional de estadística. 2007. *Censo Agrario*. Santiago.

Jain, Sharad K. 2010. “Investigating the Behavior of Statistical Indices for Performance Assessment of a Reservoir.” *Journal of Hydrology* 391(1–2):90–96. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.009>).

Kjeldsen, Thomas Rodding and Dan Rosbjerg. 2004. “Choice of Reliability, Resilience and Vulnerability Estimators for Risk Assessments of Water Resources Systems.” *Hydrological Sciences Journal* 49(5):755–67. Retrieved (<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.49.5.755.55136>).

Loucks, Daniel P., Eelco van Beek, Jerry R. Stedinger, Jos P. M. Dijkman, and Monique T. Villars. 2005. *Water Resources Systems Planning and Management and Applications: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Retrieved (<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=hcc346IkICAC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Water+resources+systems+planning+and+management&ots=AVDtV9T17a&sig=CxyTi23ncHhu9Djo3c1y0ifILNM>).

Marques, Guilherme F., Jay R. Lund, and Richard E. Howitt. 2005. “Modeling Irrigated Agricultural Production and Water Use Decisions under Water Supply Uncertainty.” *Water Resources Research* 41(8):1–11.

Medellín-Azuara, Josué, Julien J. Harou, and Richard E. Howitt. 2010. “Estimating Economic Value of Agricultural Water under Changing Conditions and the Effects of Spatial Aggregation.” *Science of the Total Environment* 408(23):5639–48.

Moy, Wai-See, Jared L. Cohon, and Charles S. ReVelle. 1986. “A Programming Model for Analysis of the Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water Supply Reservoir.” *Water Resources Research* 22(4):489–98. Retrieved (<http://doi.wiley.com/10.1029/WR022i004p00489>).

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2015. *El Cambio Climático Y Los Recursos Hídricos de Chile*. Santiago.

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2016. Fichas de Costos Según Regiones. Retrieved (<http://www.odepa.cl/rubro/>).

Scheierling, Susanne M., John B. Loomis, and Robert A. Young. 2006. “Irrigation Water Demand:

- A Meta-Analysis of Price Elasticities.” *Water Resources Research* 42(1):1–9.
- Shih, By Jhih-shyang and Charles Revelle. 1994. “Water-Supply Operations During Drought: Continuous Hedging Rule.” *Journal of Water Resources Planning and Management* 120(5):613–29.
- Shih, Jhih Shyang and Charles ReVelle. 1995. “Water Supply Operations during Drought: A Discrete Hedging Rule.” *European Journal of Operational Research* 82(1):163–75.
- Toro, Ignacio. 2017. “Incorporación Del Objetivo Del Uso En Riego En La Operación de Largo Plazo de Embalses Hidroeléctricos Maule Y Laja En El Sistema Eléctrico nacional,Chile.” Universidad de Chile.
- Tu, Ming-Yen, Nien-Sheng Hsu, and William W. G. Yeh. 2003. “Optimization of Reservoir Management and Operation with Hedging Rules.” *Journal of Water Resources Planning and Management* 129(2):86–97. Retrieved ([http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129%3A2\(86\)](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129%3A2(86))).
- You, Jiing Yun and Ximing Cai. 2008. “Hedging Rule for Reservoir Operations: 1. A Theoretical Analysis.” *Water Resources Research* 44(1):1–9.

Anexos

Anexo A: Series hidrológicas

Tabla 0-1.Serie hidrológica de Estero Sobrante.

Año	Abril (m ³ /s)	Mayo (m ³ /s)	Junio (m ³ /s)	Julio (m ³ /s)	Agosto (m ³ /s)	Septiembre (m ³ /s)	Octubre (m ³ /s)	Noviembre (m ³ /s)	Diciembre (m ³ /s)	Enero (m ³ /s)	Febrero (m ³ /s)	Marzo (m ³ /s)
1950	0,23	0,37	0,70	0,65	1,17	1,03	2,48	0,93	1,12	0,28	0,19	0,23
1951	0,23	0,33	0,79	2,20	1,73	1,50	1,59	1,59	0,28	0,19	0,28	0,09
1952	0,14	0,23	0,84	1,26	1,36	2,57	2,06	2,57	0,61	0,19	0,09	0,09
1953	0,14	0,28	1,03	0,93	3,23	8,09	9,11	18,60	4,35	0,84	0,70	0,33
1954	0,56	0,51	2,01	2,01	2,06	1,45	0,93	2,62	0,37	0,19	0,09	0,14
1955	0,23	0,47	0,70	1,36	0,98	3,93	2,99	4,67	0,47	0,14	0,05	0,09
1956	0,19	0,33	0,61	0,98	1,54	1,26	2,15	1,59	0,05	0,09	0,05	0,05
1957	0,19	0,47	1,59	1,03	2,20	1,68	3,97	2,90	0,70	0,19	0,05	0,14
1958	0,23	0,28	2,48	1,22	0,98	1,78	3,74	0,65	0,05	0,09	0,05	0,14
1959	0,23	0,33	0,56	2,15	1,82	3,83	2,94	0,93	0,47	0,14	0,09	0,09
1960	0,28	0,33	2,48	0,79	0,84	0,79	0,98	3,83	0,79	0,23	0,09	0,19
1961	0,19	0,19	0,61	1,64	2,52	2,71	4,91	5,38	0,98	0,19	0,23	0,14
1962	0,09	0,14	0,19	0,79	1,45	1,08	1,73	1,26	0,42	0,19	0,14	0,09
1963	0,09	0,14	0,28	1,12	0,98	3,93	5,61	7,57	5,56	1,26	0,56	0,47
1964	0,37	0,37	0,56	0,51	0,61	1,22	0,79	0,37	0,28	0,19	0,19	0,19
1965	0,23	0,28	0,33	1,03	7,53	3,83	6,36	7,39	2,20	0,84	0,37	0,37
1966	0,37	0,33	0,61	1,92	1,82	2,20	3,18	2,29	0,98	0,37	0,33	0,28
1967	0,28	0,23	0,33	0,93	0,89	0,75	0,84	0,23	0,28	0,23	0,05	0,05
1968	0,14	0,14	0,00	0,56	0,19	0,09	0,00	0,00	0,14	0,09	0,05	0,05
1969	0,14	0,14	0,23	0,23	0,28	0,23	0,19	0,00	0,09	0,14	0,09	0,05
1970	0,05	0,09	0,00	1,08	1,08	0,89	1,73	1,03	0,28	0,19	0,14	0,09
1971	0,09	0,09	0,09	0,33	0,37	0,37	0,61	0,33	0,14	0,05	0,05	0,05
1972	0,05	0,05	1,54	1,78	3,27	5,00	5,19	6,08	3,79	0,89	0,47	0,47
1973	0,28	0,47	0,89	1,59	2,10	2,10	1,54	1,17	0,42	0,28	0,19	0,14
1974	0,09	0,14	0,61	0,75	0,47	0,70	1,87	1,17	0,75	0,33	0,14	0,19
1975	0,14	0,19	0,33	0,56	0,93	0,84	1,03	0,61	0,28	0,19	0,19	0,05
1976	0,05	0,05	0,14	0,19	0,23	0,23	0,51	0,56	0,28	0,05	0,05	0,05
1977	0,05	0,09	0,23	3,97	5,14	4,86	7,76	5,80	1,50	0,56	0,28	0,23
1978	0,19	0,19	0,19	2,20	3,23	4,21	6,12	6,73	1,68	1,17	0,61	0,47
1979	0,37	0,33	0,28	0,42	0,70	1,36	0,75	0,37	0,23	0,14	0,09	0,09
1980	3,13	2,76	0,79	0,65	0,65	1,50	3,88	4,49	1,73	0,89	0,65	0,37
1981	0,33	0,42	0,84	1,31	0,84	0,75	0,75	0,47	0,28	0,14	0,05	0,09
1982	0,09	0,47	3,08	6,73	6,45	8,18	7,10	9,02	4,30	1,12	0,51	0,33
1983	0,28	0,42	0,65	2,29	3,60	2,99	8,55	4,11	1,50	0,70	0,51	0,56
1984	0,47	0,37	0,37	3,93	3,88	6,82	14,02	12,15	5,38	2,10	1,12	0,37
1985	0,33	0,65	0,42	0,42	0,51	0,65	0,51	0,33	0,37	0,19	0,14	0,09
1986	0,14	0,19	0,93	1,17	0,98	1,12	1,78	0,84	0,37	0,23	0,19	0,14
1987	0,14	0,23	0,47	6,78	13,04	8,51	17,39	27,72	9,02	2,52	1,31	0,79
1988	0,79	0,56	1,03	1,40	1,31	0,42	0,33	0,23	0,14	0,14	0,09	0,09
1989	0,09	0,28	0,19	0,23	2,15	2,52	3,18	1,45	0,51	0,23	0,14	0,23
1990	0,37	0,42	0,42	0,56	0,51	0,89	0,37	0,19	0,09	0,09	0,09	0,09
1991	0,09	0,14	1,59	2,99	1,68	4,86	3,83	2,48	1,40	0,51	0,28	0,23
1992	0,51	1,68	3,65	2,43	2,38	4,63	6,64	3,74	1,59	0,61	0,42	0,33
1993	0,56	0,89	1,36	1,17	0,89	1,31	1,26	0,61	0,33	0,23	0,14	0,14
1994	0,19	0,28	0,33	0,42	0,75	0,51	0,42	0,23	0,09	0,14	0,05	0,05
1995	0,05	0,09	0,19	0,23	0,23	0,33	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
1996	0,09	0,05	0,09	0,37	0,42	0,37	0,47	0,28	0,14	0,05	0,02	0,05
1997	0,05	0,09	3,79	4,95	10,24	6,31	5,75	16,22	6,12	1,12	0,98	0,61
1998	0,65	0,51	0,51	0,42	0,56	0,42	0,19	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05
1999	0,05	0,09	0,19	0,37	0,28	2,15	2,48	0,84	0,28	0,14	0,14	0,09
2000	0,09	0,09	0,75	2,90	2,52	4,44	8,79	4,39	1,82	0,51	0,37	0,33
2001	0,33	0,37	0,33	3,74	3,93	3,51	5,24	3,65	1,17	0,51	0,33	0,28
2002	0,33	1,96	7,53	5,61	10,14	7,99	11,31	9,11	3,65	1,40	0,70	0,47
2003	0,37	0,65	0,84	1,12	0,61	0,65	0,75	0,33	0,14	0,14	0,09	0,05

Año	Abril (m³/s)	Mayo (m³/s)	Junio (m³/s)	Julio (m³/s)	Agosto (m³/s)	Septiembre (m³/s)	Octubre (m³/s)	Noviembre (m³/s)	Diciembre (m³/s)	Enero (m³/s)	Febrero (m³/s)	Marzo (m³/s)
2004	0,05	0,23	0,33	0,47	2,38	3,51	2,20	1,31	0,47	0,28	0,14	0,14
2005	0,14	0,23	2,06	0,84	4,35	8,09	8,41	7,57	2,34	0,51	0,28	0,23
2006	0,23	0,23	0,33	1,40	1,59	1,12	2,24	0,89	0,37	0,19	0,19	0,14
2007	0,23	0,14	0,37	0,42	2,15	2,66	3,60	3,46	0,23	0,19	0,14	0,09
2008	0,14	0,19	0,51	0,42	2,62	2,29	3,51	1,59	0,47	0,28	0,19	0,19
2009	0,14	0,19	0,28	0,56	1,31	1,40	1,68	1,12	0,47	0,28	0,23	0,28
2010	0,28	0,37	0,56	0,61	0,56	0,65	0,98	0,93	0,33	0,09	0,05	0,05
2011	0,05	0,05	0,19	0,47	0,84	2,48	2,15	1,03	0,19	0,09	0,05	0,05
2012	0,09	0,09	0,19	0,19	0,19	0,23	0,19	0,09	0,09	0,05	0,05	0,05
2013	0,22	0,25	0,27	0,28	0,33	0,40	0,33	0,32	0,25	0,22	0,20	0,18

Tabla 0-2. Serie hidrológica Río Pedernal.

Año	Abril (m³/s)	Mayo (m³/s)	Junio (m³/s)	Julio (m³/s)	Agosto (m³/s)	Septiembre (m³/s)	Octubre (m³/s)	Noviembre (m³/s)	Diciembre (m³/s)	Enero (m³/s)	Febrero (m³/s)	Marzo (m³/s)
1950	0,05	0,08	0,15	0,14	0,25	0,22	0,53	0,20	0,24	0,06	0,04	0,05
1951	0,05	0,07	0,17	0,47	0,37	0,32	0,34	0,34	0,06	0,04	0,06	0,02
1952	0,03	0,05	0,18	0,27	0,29	0,55	0,44	0,55	0,13	0,04	0,02	0,02
1953	0,03	0,06	0,22	0,20	0,69	1,73	1,95	3,98	0,93	0,18	0,15	0,07
1954	0,12	0,11	0,43	0,43	0,44	0,31	0,20	0,56	0,08	0,04	0,02	0,03
1955	0,05	0,10	0,15	0,29	0,21	0,84	0,64	1,00	0,10	0,03	0,01	0,02
1956	0,04	0,07	0,13	0,21	0,33	0,27	0,46	0,34	0,01	0,02	0,01	0,01
1957	0,04	0,10	0,34	0,22	0,47	0,36	0,85	0,62	0,15	0,04	0,01	0,03
1958	0,05	0,06	0,53	0,26	0,21	0,38	0,80	0,14	0,01	0,02	0,01	0,03
1959	0,05	0,07	0,12	0,46	0,39	0,82	0,63	0,20	0,10	0,03	0,02	0,02
1960	0,06	0,07	0,53	0,17	0,18	0,17	0,21	0,82	0,17	0,05	0,02	0,04
1961	0,04	0,04	0,13	0,35	0,54	0,58	1,05	1,15	0,21	0,04	0,05	0,03
1962	0,02	0,03	0,04	0,17	0,31	0,23	0,37	0,27	0,09	0,04	0,03	0,02
1963	0,02	0,03	0,06	0,24	0,21	0,84	1,20	1,62	1,19	0,27	0,12	0,1
1964	0,08	0,08	0,12	0,11	0,13	0,26	0,17	0,08	0,06	0,04	0,04	0,04
1965	0,05	0,06	0,07	0,22	1,61	0,82	1,36	1,58	0,47	0,18	0,08	0,08
1966	0,08	0,07	0,13	0,41	0,39	0,47	0,68	0,49	0,21	0,08	0,07	0,06
1967	0,06	0,05	0,07	0,20	0,19	0,16	0,18	0,05	0,06	0,05	0,01	0,01
1968	0,03	0,03	0,00	0,12	0,04	0,02	0,00	0,00	0,03	0,02	0,01	0,01
1969	0,03	0,03	0,05	0,05	0,06	0,05	0,04	0,00	0,02	0,03	0,02	0,01
1970	0,01	0,02	0,00	0,23	0,23	0,19	0,37	0,22	0,06	0,04	0,03	0,02
1971	0,02	0,02	0,02	0,07	0,08	0,08	0,13	0,07	0,03	0,01	0,01	0,01
1972	0,01	0,01	0,33	0,38	0,70	1,07	1,11	1,30	0,81	0,19	0,10	0,1
1973	0,06	0,10	0,19	0,34	0,45	0,45	0,33	0,25	0,09	0,06	0,04	0,03
1974	0,02	0,03	0,13	0,16	0,10	0,15	0,40	0,25	0,16	0,07	0,03	0,04
1975	0,03	0,04	0,07	0,12	0,20	0,18	0,22	0,13	0,06	0,04	0,04	0,01
1976	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,05	0,11	0,12	0,06	0,01	0,01	0,01
1977	0,01	0,02	0,05	0,85	1,10	1,04	1,66	1,24	0,32	0,12	0,06	0,05
1978	0,04	0,04	0,04	0,47	0,69	0,90	1,31	1,44	0,36	0,25	0,13	0,1
1979	0,08	0,07	0,06	0,09	0,15	0,29	0,16	0,08	0,05	0,03	0,02	0,02
1980	0,67	0,59	0,17	0,14	0,14	0,32	0,83	0,96	0,37	0,19	0,14	0,08
1981	0,07	0,09	0,18	0,28	0,18	0,16	0,16	0,10	0,06	0,03	0,01	0,02
1982	0,02	0,10	0,66	1,44	1,38	1,75	1,52	1,93	0,92	0,24	0,11	0,07
1983	0,06	0,09	0,14	0,49	0,77	0,64	1,83	0,88	0,32	0,15	0,11	0,12
1984	0,10	0,08	0,08	0,84	0,83	1,46	3,00	2,60	1,15	0,45	0,24	0,08
1985	0,07	0,14	0,09	0,09	0,11	0,14	0,11	0,07	0,08	0,04	0,03	0,02
1986	0,03	0,04	0,20	0,25	0,21	0,24	0,38	0,18	0,08	0,05	0,04	0,03
1987	0,03	0,05	0,10	1,45	2,79	1,82	3,72	5,93	1,93	0,54	0,28	0,17
1988	0,17	0,12	0,22	0,30	0,28	0,09	0,07	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
1989	0,02	0,06	0,04	0,05	0,46	0,54	0,68	0,31	0,11	0,05	0,03	0,05
1990	0,08	0,09	0,09	0,12	0,11	0,19	0,08	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02

Año	Abril (m³/s)	Mayo (m³/s)	Junio (m³/s)	Julio (m³/s)	Agosto (m³/s)	Septiembre (m³/s)	Octubre (m³/s)	Noviembre (m³/s)	Diciembre (m³/s)	Enero (m³/s)	Febrero (m³/s)	Marzo (m³/s)
1991	0,02	0,03	0,34	0,64	0,36	1,04	0,82	0,53	0,30	0,11	0,06	0,05
1992	0,11	0,36	0,78	0,52	0,51	0,99	1,42	0,80	0,34	0,13	0,09	0,07
1993	0,12	0,19	0,29	0,25	0,19	0,28	0,27	0,13	0,07	0,05	0,03	0,03
1994	0,04	0,06	0,07	0,09	0,16	0,11	0,09	0,05	0,02	0,03	0,01	0,01
1995	0,01	0,02	0,04	0,05	0,05	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,002
1996	0,02	0,01	0,02	0,08	0,09	0,08	0,10	0,06	0,03	0,01	0,00	0,01
1997	0,01	0,02	0,81	1,06	2,19	1,35	1,23	3,47	1,31	0,24	0,21	0,13
1998	0,14	0,11	0,11	0,09	0,12	0,09	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
1999	0,01	0,02	0,04	0,08	0,06	0,46	0,53	0,18	0,06	0,03	0,03	0,02
2000	0,02	0,02	0,16	0,62	0,54	0,95	1,88	0,94	0,39	0,11	0,08	0,07
2001	0,07	0,08	0,07	0,80	0,84	0,75	1,12	0,78	0,25	0,11	0,07	0,06
2002	0,07	0,42	1,61	1,20	2,17	1,71	2,42	1,95	0,78	0,30	0,15	0,1
2003	0,08	0,14	0,18	0,24	0,13	0,14	0,16	0,07	0,03	0,03	0,02	0,01
2004	0,01	0,05	0,07	0,10	0,51	0,75	0,47	0,28	0,10	0,06	0,03	0,03
2005	0,03	0,05	0,44	0,18	0,93	1,73	1,80	1,62	0,50	0,11	0,06	0,05
2006	0,05	0,05	0,07	0,30	0,34	0,24	0,48	0,19	0,08	0,04	0,04	0,03
2007	0,05	0,03	0,08	0,09	0,46	0,57	0,77	0,74	0,05	0,04	0,03	0,02
2008	0,03	0,04	0,11	0,09	0,56	0,49	0,75	0,34	0,10	0,06	0,04	0,04
2009	0,03	0,04	0,06	0,12	0,28	0,30	0,36	0,24	0,10	0,06	0,05	0,06
2010	0,06	0,08	0,12	0,13	0,12	0,14	0,21	0,20	0,07	0,02	0,01	0,01
2011	0,01	0,01	0,04	0,10	0,18	0,53	0,46	0,22	0,04	0,02	0,01	0,01
2012	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
2013	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04

Tabla 0-3.Serie hidrológica Estero Las Palmas.

Año	Abril (m³/s)	Mayo (m³/s)	Junio (m³/s)	Julio (m³/s)	Agosto (m³/s)	Septiembre (m³/s)	Octubre (m³/s)	Noviembre (m³/s)	Diciembre (m³/s)	Enero (m³/s)	Febrero (m³/s)	Marzo (m³/s)
1950	0,73	1,50	0,05	0,00	0,33	0,26	0,18	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00
1951	0,34	0,91	0,98	1,15	0,04	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1952	0,00	0,49	1,44	0,71	0,23	0,23	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1953	0,31	1,21	0,13	0,78	2,77	2,87	0,92	0,42	0,19	0,09	0,04	0,02
1954	0,66	0,58	1,12	0,24	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1955	0,12	0,61	0,21	0,14	0,26	0,02	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29
1956	0,12	0,61	0,21	0,14	0,26	0,02	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29
1957	0,00	2,58	0,14	0,78	0,28	0,34	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
1958	0,00	1,18	1,35	0,16	0,76	0,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1959	0,11	0,41	0,84	0,56	0,41	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1960	0,00	0,33	1,03	0,41	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1961	0,00	0,10	1,54	0,21	0,99	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1962	0,00	0,06	1,44	0,14	0,06	0,04	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1963	0,00	0,50	0,38	1,40	1,67	2,14	1,42	0,65	0,29	0,13	0,06	0,03
1964	0,01	0,01	0,50	0,28	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1965	0,04	0,59	0,19	2,35	4,70	4,50	2,08	0,93	0,43	0,19	0,09	0,04
1966	0,76	0,05	1,96	1,58	1,00	0,32	0,15	0,14	0,20	0,01	0,01	0,00
1967	0,02	0,19	0,46	0,53	0,21	0,47	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1968	0,02	0,00	0,09	0,03	0,25	0,23	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
1969	0,00	0,25	0,67	0,09	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1970	0,00	1,10	0,21	1,66	0,05	0,03	0,37	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
1971	0,20	0,00	1,05	0,07	0,37	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1972	0,00	0,18	1,85	0,56	1,20	0,64	0,03	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
1973	0,00	0,51	0,39	0,65	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1974	0,00	0,79	1,78	0,34	0,10	0,24	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00
1975	0,11	0,47	0,14	1,37	0,53	0,01	0,03	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
1976	0,00	0,00	0,42	0,04	0,31	0,16	0,67	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00

Año	Abril (m³/s)	Mayo (m³/s)	Junio (m³/s)	Julio (m³/s)	Agosto (m³/s)	Septiembre (m³/s)	Octubre (m³/s)	Noviembre (m³/s)	Diciembre (m³/s)	Enero (m³/s)	Febrero (m³/s)	Marzo (m³/s)
1977	0,00	0,16	0,59	2,10	0,54	0,00	0,34	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
1978	0,00	0,09	0,37	2,41	0,08	0,49	0,00	0,72	0,00	0,00	0,00	0,00
1979	0,28	0,04	0,00	0,60	0,15	0,25	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
1980	0,57	0,17	0,56	1,41	0,19	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1981	0,00	2,12	0,74	0,11	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
1982	0,01	0,99	1,55	0,93	0,76	0,36	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1983	0,04	0,26	1,07	1,29	0,68	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
1984	0,00	0,58	0,14	3,40	2,22	1,29	0,36	0,16	0,07	0,03	0,02	0,13
1985	0,00	0,17	0,05	0,69	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1986	0,06	1,80	0,77	0,00	0,88	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
1987	0,02	0,57	0,22	9,74	10,85	7,28	3,59	1,49	0,68	0,31	0,14	0,12
1988	0,03	0,01	0,31	0,31	0,49	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
1989	0,03	0,28	0,04	1,28	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1990	0,00	0,09	0,00	0,32	0,21	0,24	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1991	0,02	0,21	2,11	0,53	0,01	0,45	0,16	0,00	0,01	0,00	0,00	0,22
1992	0,12	1,54	2,81	2,22	1,77	0,67	0,21	0,12	0,04	0,02	0,01	0,00
1993	0,46	0,52	0,18	0,36	0,40	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1994	0,01	0,45	0,17	0,74	0,11	0,18	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00
1995	0,14	0,00	0,58	0,81	0,60	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1996	0,13	0,07	0,20	0,62	0,28	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1997	0,00	2,04	5,50	7,39	6,97	4,80	2,64	0,88	0,39	0,18	0,08	0,04
1998	0,11	0,13	0,22	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
1999	0,03	0,20	0,60	0,20	0,88	1,13	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2000	0,04	0,14	2,84	0,07	0,00	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2001	0,06	0,46	0,02	2,15	0,47	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
2002	0,02	1,61	4,36	8,94	7,08	3,37	1,49	0,68	0,31	0,14	0,06	0,03
2003	0,01	0,59	0,38	0,50	0,07	0,01	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,21
2004	0,37	0,06	0,46	1,08	0,93	0,07	0,02	0,24	0,00	0,00	0,00	0,09
2005	2,67	2,29	2,60	1,42	1,13	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2006	2,09	1,28	1,11	1,65	1,39	1,98	2,25	2,48	0,00	0,00	1,51	1,93
2007	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2008	0,00	0,49	2,19	2,42	1,89	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2009	0,00	0,00	0,00	1,57	1,26	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2010	0,38	0,00	0,00	0,88	1,31	1,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2011	0,00	0,29	0,00	1,43	0,85	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2012	0,00	0,11	1,03	0,00	0,38	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2013	0,97	2,10	1,80	0,91	1,51	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 0-4.Serie hidrológica Estero Ossandón.

Año	Abril (m³/s)	Mayo (m³/s)	Junio (m³/s)	Julio (m³/s)	Agosto (m³/s)	Septiembre (m³/s)	Octubre (m³/s)	Noviembre (m³/s)	Diciembre (m³/s)	Enero (m³/s)	Febrero (m³/s)	Marzo (m³/s)
1950	0,28	0,58	0,02	0,00	0,13	0,10	0,07	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
1951	0,13	0,35	0,38	0,45	0,02	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1952	0,00	0,19	0,56	0,27	0,09	0,09	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1953	0,12	0,47	0,05	0,30	1,07	1,11	0,35	0,16	0,07	0,03	0,02	0,01
1954	0,25	0,22	0,43	0,09	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1955	0,05	0,24	0,08	0,05	0,10	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11
1956	0,05	0,24	0,08	0,05	0,10	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11
1957	0,00	1,00	0,05	0,30	0,11	0,13	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00
1958	0,00	0,46	0,52	0,06	0,30	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1959	0,04	0,16	0,33	0,22	0,16	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1960	0,00	0,13	0,40	0,16	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1961	0,00	0,04	0,59	0,08	0,38	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Año	Abril (m³/s)	Mayo (m³/s)	Junio (m³/s)	Julio (m³/s)	Agosto (m³/s)	Septiembre (m³/s)	Octubre (m³/s)	Noviembre (m³/s)	Diciembre (m³/s)	Enero (m³/s)	Febrero (m³/s)	Marzo (m³/s)
1962	0,00	0,02	0,56	0,05	0,02	0,02	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1963	0,00	0,19	0,15	0,54	0,64	0,83	0,55	0,25	0,11	0,05	0,02	0,01
1964	0,01	0,00	0,19	0,11	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1965	0,01	0,23	0,07	0,91	1,82	1,74	0,81	0,36	0,17	0,07	0,03	0,02
1966	0,29	0,02	0,76	0,61	0,39	0,12	0,06	0,05	0,08	0,01	0,00	0,00
1967	0,01	0,07	0,18	0,20	0,08	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1968	0,01	0,00	0,03	0,01	0,10	0,09	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1969	0,00	0,10	0,26	0,04	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1970	0,00	0,42	0,08	0,64	0,02	0,01	0,14	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
1971	0,08	0,00	0,41	0,03	0,14	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1972	0,00	0,07	0,72	0,22	0,47	0,25	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
1973	0,00	0,20	0,15	0,25	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1974	0,00	0,30	0,69	0,13	0,04	0,09	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
1975	0,04	0,18	0,05	0,53	0,21	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
1976	0,00	0,00	0,16	0,02	0,12	0,06	0,26	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
1977	0,00	0,06	0,23	0,81	0,21	0,00	0,13	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1978	0,00	0,03	0,14	0,93	0,03	0,19	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
1979	0,11	0,02	0,00	0,23	0,06	0,10	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
1980	0,22	0,06	0,22	0,55	0,07	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1981	0,00	0,82	0,29	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
1982	0,00	0,38	0,60	0,36	0,29	0,14	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1983	0,01	0,10	0,41	0,50	0,26	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
1984	0,00	0,23	0,05	1,32	0,86	0,50	0,14	0,06	0,03	0,01	0,01	0,05
1985	0,00	0,07	0,02	0,27	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1986	0,02	0,70	0,30	0,00	0,34	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
1987	0,01	0,22	0,08	3,77	4,20	2,82	1,39	0,58	0,26	0,12	0,05	0,05
1988	0,01	0,01	0,12	0,12	0,19	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
1989	0,01	0,11	0,02	0,49	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1990	0,00	0,03	0,00	0,12	0,08	0,09	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1991	0,01	0,08	0,82	0,21	0,00	0,17	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
1992	0,05	0,59	1,09	0,86	0,68	0,26	0,08	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00
1993	0,18	0,20	0,07	0,14	0,16	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1994	0,00	0,17	0,07	0,29	0,04	0,07	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
1995	0,05	0,00	0,22	0,31	0,23	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1996	0,05	0,03	0,08	0,24	0,11	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1997	0,00	0,79	2,13	2,86	2,70	1,86	1,02	0,34	0,15	0,07	0,03	0,01
1998	0,04	0,05	0,08	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
1999	0,01	0,08	0,23	0,08	0,34	0,44	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2000	0,01	0,05	1,10	0,03	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2001	0,02	0,18	0,01	0,83	0,18	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
2002	0,01	0,62	1,69	3,46	2,74	1,30	0,58	0,26	0,12	0,05	0,02	0,01
2003	0,01	0,23	0,15	0,19	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,08
2004	0,14	0,02	0,18	0,42	0,36	0,03	0,01	0,09	0,00	0,00	0,00	0,03
2005	1,03	0,89	1,01	0,55	0,44	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2006	0,81	0,50	0,43	0,64	0,54	0,77	0,87	0,96	0,00	0,00	0,58	0,75
2007	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2008	0,00	0,19	0,85	0,94	0,73	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2009	0,00	0,00	0,00	0,61	0,49	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2010	0,15	0,00	0,00	0,34	0,51	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2011	0,00	0,11	0,00	0,55	0,33	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2012	0,00	0,04	0,40	0,00	0,15	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2013	0,38	0,81	0,70	0,35	0,58	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Anexo B: Información series de caudales generadas

Tabla 0-5. Coeficientes de correlación entre meses para Afluente (suma de Río Pedernal y Estero Sobrante).

Coef. correlación Estero Las Palmas	
Abril-Mayo	0,84
Mayo-Junio	0,35
Junio-Julio	0,26
Julio-Agosto	0,78
Agosto-Septiembre	0,86
Septiembre-Octubre	0,68
Octubre-Noviembre	0,88
Noviembre-Diciembre	0,66
Diciembre -Enero	0,92
Enero-Febrero	0,93
Febrero-Marzo	0,90
Marzo-Abril	0,12

Tabla 0-6. Coeficientes de correlación entre afluentes y Esteros.

Coef. Correlación		
Mes	Suma afluentes -Estero Las Palmas	Suma de afluentes-Estero Ossandón
Abril	0,30	0,30
Mayo	0,30	0,30
Junio	0,11	0,12
Julio	0,36	0,37
Agosto	0,14	0,15
Septiembre	0,26	0,27
Octubre	0,30	0,30
Noviembre	0,09	0,10
Diciembre	0,54	0,54
Enero	0,52	0,52
Febrero	0,55	0,55
Marzo	0,31	0,31

Tabla 0-7. Parámetros de la suma de las series hidrológicas de Estero Sobrante y Río Pedernal.

Suma Estero Sobrante y Río Pedernal				
Mes	Media (m³/s)	desviación est. (m³/s)	Media ajuste normal	Desviación ajuste normal
Abril	0,32	0,48	-1,72	1,08
Mayo	0,44	0,53	-1,28	0,95
Junio	1,06	1,43	-0,45	1,01
Julio	1,76	1,82	0,20	0,85
Agosto	2,59	3,05	0,52	0,93
Septiembre	3,02	2,80	0,79	0,79
Octubre	4,06	4,27	1,03	0,86
Noviembre	3,99	5,93	0,80	1,08
Diciembre	1,43	2,13	-0,23	1,08
Enero	0,49	0,58	-1,15	0,94
Febrero	0,30	0,33	-1,59	0,88
Marzo	0,23	0,20	-1,72	0,73

Tabla 0-8. Parámetros de la serie hidrológica del Estero Ossandón.

Esteros Ossandón				
Mes	Media (m³/s)	desviación est. (m³/s)	Media ajuste normal	Desviación ajuste normal
Abril	0,08	0,18	-3,38	1,32
Mayo	0,23	0,27	-1,86	0,91
Junio	0,34	0,41	-1,50	0,93
Julio	0,46	0,71	-1,37	1,10
Agosto	0,40	0,71	-1,64	1,20
Septiembre	0,27	0,51	-2,07	1,23
Octubre	0,11	0,27	-3,16	1,39
Noviembre	0,06	0,16	-3,74	1,40
Diciembre	0,02	0,05	-5,14	1,47
Enero	0,01	0,02	-6,04	1,50
Febrero	0,01	0,07	-6,22	1,90
Marzo	0,02	0,10	-5,27	1,72

Tabla 0-9. Parámetros de la serie hidrológica del Estero Las Palmas.

Esteros Las Palmas				
Mes	Media (m³/s)	desviación est. (m³/s)	Media ajuste normal	Desviación ajuste normal
Abril	0,21	0,46	-3,23	1,32
Mayo	0,61	0,69	-1,30	0,91
Junio	0,89	1,05	-0,76	0,93
Julio	1,20	1,84	-0,52	1,10
Agosto	1,03	1,84	-0,79	1,20
Septiembre	0,70	1,32	-1,30	1,23
Octubre	0,29	0,69	-2,72	1,39
Noviembre	0,16	0,41	-3,70	1,40
Diciembre	0,05	0,13	-6,21	1,47
Enero	0,02	0,06	-7,93	1,50
Febrero	0,03	0,19	-6,94	1,90
Marzo	0,06	0,25	-5,72	1,72

Tabla 0-10. Suma de los 64 años de los 3 caudales generados.

Serie	Caudal (m³/s)
1	1727
2	1674
3	1513
4	1874
5	1707
6	1690
7	1463
8	1603
9	1594
10	1420
11	1592
12	1647
13	1663
14	1730
15	1433
16	1521
17	1538
18	1653
19	1484
20	1447
21	1669
22	1612
23	1419
24	1640
25	1587
26	1631
27	1649
28	1554
29	1538
30	1448
31	1635

Serie	Caudal (m³/s)
32	1406
33	1499
34	1609
35	1626
36	1614
37	1909
38	1827
39	1660
40	1571
41	1424
42	1744
43	1553
44	1513
45	1677
46	1665
47	1512
48	1571
49	1613
50	1754
51	1599
52	1460
53	1545
54	1469
55	1516
56	1599
57	1656
58	1570
59	1618
60	1476
61	1794
62	1625
63	1400
64	1415
65	1663
66	1575
67	1666
68	1811
69	1556
70	1624
71	1387
72	1543
73	1711
74	1473
75	1782
76	1897
77	1717
78	1516
79	1488
80	1609
81	1575
82	1533
83	1607
84	1461
85	1573
86	1486
87	1462
88	1568
89	1358
90	1531
91	1532

Serie	Caudal (m³/s)
92	1658
93	1583
94	1487
95	1555
96	1546
97	1696
98	1506
99	1596
100	1566

Anexo C: Resultados de simulación

Tabla 0-11.Resultados simulaciones con SOP.

N.	Seguridad de riego (%)	Déficit ac. (Miles de m ³)	Beneficio ac. (Millones de dólares)	Daño ac. (Millones de dólares)	Desv. Déficit (Miles de m ³)	Suma Q. afl. simulados (m ³ /s)	Déficit máximo (Miles de m ³)
1	100,0	0	334,9	0,0	0	1727	0
2	96,9	2549	334,2	0,7	63	1674	1938
3	96,9	2866	334,1	0,9	70	1513	1999
4	89,1	9386	332,2	2,7	119	1874	2691
5	98,4	261	334,9	0,1	9	1707	261
6	96,9	6603	332,8	2,1	126	1690	5898
7	81,3	23809	327,7	7,2	203	1463	6235
8	86,0	30491	325,4	9,6	257	1603	7128
9	92,2	11357	331,5	3,4	144	1594	5814
10	84,4	23823	327,8	7,1	207	1420	7410
11	86,0	25658	327,0	7,9	224	1592	5933
12	89,1	23031	327,9	7,0	213	1647	10026
13	92,2	14942	330,4	4,5	177	1663	6160
14	82,9	20312	328,9	6,0	179	1730	5507
15	96,9	12498	331,0	3,9	169	1433	10461
16	95,3	10061	331,8	3,1	142	1521	8230
17	93,8	13499	330,7	4,2	172	1538	9648
18	100,0	0	334,9	0,0	0	1653	0
19	93,8	3408	333,9	1,0	66	1484	1215
20	89,1	19865	328,8	6,2	202	1447	8935
21	92,2	15785	330,0	4,9	182	1669	5815
22	100,0	0	334,9	0,0	0	1612	0
23	86,0	23720	327,5	7,4	220	1419	5930
24	100,0	0	334,9	0,0	0	1640	0
25	87,5	9983	332,1	2,9	121	1587	3227
26	93,8	15936	329,9	5,0	189	1631	6063
27	95,3	12039	331,3	3,7	153	1649	5630
28	96,9	3557	333,9	1,0	76	1554	2720
29	96,9	1784	334,5	0,5	46	1538	1035
30	90,7	16793	329,7	5,2	182	1448	7011
31	96,9	3157	334,0	0,9	72	1635	2252
32	81,3	33308	324,7	10,3	262	1406	7155
33	90,7	14215	330,6	4,4	166	1499	7915
34	76,7	46269	320,7	14,3	303	1609	7194
35	96,9	1526	334,5	0,4	42	1626	1073
36	100,0	0	334,9	0,0	0	1614	0
37	100,0	0	334,9	0,0	0	1909	0
38	95,3	12407	331,1	3,8	169	1827	10486
39	92,2	15560	330,1	4,8	178	1660	8232
40	92,2	7277	332,7	2,2	110	1571	3457
41	78,2	43574	321,4	13,5	299	1424	9934
42	96,9	1523	334,5	0,4	39	1744	860
43	92,2	6638	333,0	1,9	98	1553	2311
44	79,8	32511	324,9	10,0	251	1513	9938
45	100,0	0	334,9	0,0	0	1677	0
46	100,0	0	334,9	0,0	0	1665	0
47	93,8	6220	333,1	1,9	106	1512	4309
48	93,8	11550	331,4	3,6	161	1571	9412

N.	Seguridad de riego (%)	Déficit ac. (Miles de m³)	Beneficio ac. (Millones de dólares)	Daño ac. (Millones de dólares)	Desv. Déficit (Miles de m³)	Suma Q. afl. simulados (m³/s)	Déficit máximo (Miles de m³)
49	87,5	10440	331,9	3,1	134	1613	4336
50	95,3	7507	332,6	2,4	119	1754	4549
51	93,8	6263	333,0	1,9	108	1599	3655
52	93,8	8418	332,3	2,6	132	1460	4403
53	98,4	558	334,8	0,1	20	1545	558
54	78,2	48059	320,1	14,8	311	1469	10749
55	89,1	20161	328,8	6,1	201	1516	7312
56	100,0	0	334,9	0,0	0	1599	0
57	100,0	148	334,9	0,0	5	1656	148
58	92,2	25562	326,9	8,0	239	1570	9386
59	96,9	3645	333,8	1,1	78	1618	2590
60	95,3	4191	333,7	1,2	74	1476	2046
61	96,9	3471	333,9	1,0	78	1794	3080
62	87,5	20646	328,6	6,3	203	1625	7640
63	87,5	36421	323,4	11,5	289	1400	10010
64	82,9	27775	326,4	8,6	238	1415	10504
65	90,7	9753	332,0	2,9	131	1663	3423
66	89,1	23959	327,5	7,4	220	1575	7406
67	93,8	17558	329,3	5,7	204	1666	8869
68	96,9	4744	333,5	1,4	98	1811	4422
69	92,2	6153	333,1	1,8	101	1556	3360
70	100,0	0	334,9	0,0	0	1624	0
71	79,8	32274	324,9	10,0	248	1387	8203
72	90,7	20474	328,6	6,3	204	1543	9565
73	90,7	12019	331,3	3,6	141	1711	4240
74	96,9	2542	334,1	0,8	65	1473	1338
75	96,9	4482	333,5	1,4	95	1782	4035
76	100,0	0	334,9	0,0	0	1897	0
77	100,0	0	334,9	0,0	0	1717	0
78	84,4	34349	324,2	10,7	264	1516	7890
79	84,4	21664	328,3	6,6	206	1488	7499
80	86,0	31447	324,8	10,1	267	1609	9140
81	82,9	33583	324,4	10,5	265	1575	7266
82	92,2	8407	332,4	2,5	121	1533	3224
83	98,4	400	334,8	0,1	14	1607	390
84	81,3	28260	326,1	8,8	235	1461	7835
85	82,9	23344	327,9	7,0	210	1573	8723
86	81,3	25662	327,2	7,8	214	1486	6368
87	79,8	25273	327,3	7,6	204	1462	3672
88	96,9	2682	334,2	0,8	57	1568	1084
89	92,2	25512	327,0	7,9	239	1358	10718
90	96,9	3003	334,0	0,9	70	1531	2065
91	92,2	7950	332,5	2,4	123	1532	5370
92	98,4	439	334,8	0,1	16	1658	439
93	93,8	7733	332,6	2,3	118	1583	4277
94	82,9	15586	330,5	4,5	145	1487	2914
95	84,4	21306	328,3	6,6	202	1555	7002
96	89,1	6942	333,0	2,0	103	1546	3099
97	89,1	17647	329,4	5,5	185	1696	4976
98	87,5	33991	324,3	10,6	274	1506	10828
99	92,2	3621	334,0	0,9	61	1596	1169
100	96,9	2169	334,3	0,6	56	1566	1218

Tabla 0-12.Resultados simulación con Hedging.

N.	Seguridad de riego (%)	Déficit ac. (Miles de m ³)	Beneficio ac. (Millones de dólares)	Daño ac. (Millones de dólares)	Desv. Déficit (Miles de m ³)	Suma de Q. afl. Simulados (m ³ /s)	Déficit máximo (Miles de m ³)
1	100,0	0	334,9	0,0	0	1727	0
2	96,9	2926	334,1	0,8	65	1674	2053
3	96,9	3109	334,1	0,8	61	1513	1955
4	89,1	9541	332,3	2,7	112	1874	2689
5	100,0	1842	334,6	0,3	18	1707	351
6	96,9	6958	332,8	2,1	119	1690	5883
7	81,3	24283	328,0	7,0	191	1463	5966
8	86,0	30833	325,5	9,4	250	1603	7093
9	93,8	11911	331,5	3,4	138	1594	5822
10	84,4	24470	327,9	7,0	198	1420	7150
11	87,5	26020	327,2	7,7	213	1592	5827
12	89,1	23356	328,1	6,8	202	1647	10030
13	92,2	15473	330,5	4,4	166	1663	6112
14	84,4	21149	329,2	5,8	164	1730	5539
15	96,9	12536	331,0	3,9	167	1433	10466
16	95,3	10222	331,9	3,0	137	1521	8085
17	93,8	13809	330,8	4,2	167	1538	9384
18	100,0	63	334,9	0,0	2	1653	33
19	95,3	3508	334,0	1,0	61	1484	1215
20	89,1	20947	328,7	6,2	196	1447	8951
21	92,2	15915	330,1	4,9	176	1669	5822
22	100,0	146	334,9	0,0	4	1612	86
23	86,0	24168	327,7	7,3	210	1419	5951
24	100,0	453	334,8	0,1	8	1640	223
25	87,5	11124	332,2	2,7	101	1587	3237
26	93,8	16325	330,0	4,9	181	1631	6102
27	95,3	12538	331,3	3,7	147	1649	5645
28	96,9	3945	333,9	1,1	71	1554	2604
29	96,9	1897	334,5	0,5	39	1538	1070
30	90,7	17912	329,6	5,3	177	1448	7034
31	96,9	3165	334,0	0,9	71	1635	2260
32	81,3	33525	324,9	10,0	251	1406	7164
33	93,8	14571	330,6	4,3	161	1499	7920
34	76,7	46733	320,9	14,0	293	1609	7200
35	96,9	1717	334,6	0,4	29	1626	970
36	100,0	0	334,9	0,0	0	1614	0
37	100,0	0	334,9	0,0	0	1909	0
38	95,3	12535	331,2	3,7	164	1827	10490
39	93,8	15776	330,2	4,8	174	1660	8241
40	92,2	7932	332,8	2,1	96	1571	3339
41	78,2	44079	321,6	13,3	290	1424	9959
42	96,9	1815	334,5	0,4	37	1744	860
43	92,2	7302	333,0	1,9	91	1553	2319
44	81,3	33300	325,0	9,9	242	1513	9940
45	100,0	0	334,9	0,0	0	1677	0
46	100,0	146	334,9	0,0	4	1665	110
47	96,9	6626	333,0	1,9	104	1512	4315
48	93,8	11874	331,4	3,6	157	1571	9175
49	90,7	11455	331,9	3,0	120	1613	4364
50	95,3	7575	332,7	2,3	112	1754	4578
51	93,8	6631	333,1	1,9	98	1599	3691
52	93,8	8451	332,4	2,6	127	1460	4409
53	98,4	1080	334,7	0,2	16	1545	574
54	78,2	48612	320,4	14,5	300	1469	10754

N.	Seguridad de riego (%)	Déficit ac. (Miles de m³)	Beneficio ac. (Millones de dólares)	Daño ac. (Millones de dólares)	Desv. Déficit (Miles de m³)	Suma de Q. afl. Simulados (m³/s)	Déficit máximo (Miles de m³)
55	90,7	20682	328,8	6,1	195	1516	7315
56	100,0	459	334,8	0,1	8	1599	172
57	100,0	425	334,8	0,1	9	1656	271
58	92,2	26423	326,9	8,0	232	1570	9388
59	96,9	3827	333,9	1,1	73	1618	2391
60	95,3	4767	333,8	1,2	66	1476	2030
61	96,9	3651	334,0	1,0	68	1794	2977
62	87,5	21040	328,7	6,2	196	1625	7643
63	87,5	37046	323,6	11,4	280	1400	9875
64	84,4	29031	326,5	8,4	225	1415	10305
65	90,7	9902	332,1	2,8	121	1663	3449
66	89,1	24333	327,6	7,3	214	1575	7411
67	93,8	17734	329,4	5,5	195	1666	8877
68	96,9	4932	333,5	1,4	95	1811	4430
69	92,2	6322	333,2	1,7	90	1556	3384
70	100,0	312	334,9	0,1	7	1624	260
71	79,8	32513	325,2	9,7	238	1387	8208
72	90,7	20896	328,7	6,2	199	1543	9283
73	90,7	12453	331,4	3,5	132	1711	3955
74	96,9	3205	334,1	0,9	58	1473	1336
75	96,9	4568	333,5	1,4	94	1782	4040
76	100,0	99	334,9	0,0	3	1897	92
77	100,0	326	334,9	0,1	7	1717	141
78	86,0	34942	324,3	10,6	259	1516	7809
79	84,4	22486	328,6	6,4	190	1488	7370
80	86,0	32251	325,1	9,9	255	1609	9045
81	82,9	33971	324,6	10,3	259	1575	7009
82	92,2	9238	332,4	2,5	109	1533	3016
83	100,0	675	334,8	0,1	12	1607	364
84	81,3	29040	326,4	8,6	222	1461	7732
85	82,9	24274	328,0	6,9	199	1573	8599
86	82,9	25957	327,4	7,5	203	1486	6371
87	79,8	25629	327,6	7,3	191	1462	3707
88	96,9	2852	334,2	0,7	49	1568	1434
89	93,8	26208	327,0	7,9	235	1358	10718
90	96,9	3068	334,0	0,9	69	1531	2095
91	92,2	8370	332,6	2,4	117	1532	5384
92	98,4	542	334,8	0,1	12	1658	451
93	93,8	8549	332,7	2,3	105	1583	4309
94	82,9	16622	330,5	4,4	136	1487	2924
95	84,4	21897	328,7	6,2	185	1555	6773
96	90,7	7370	333,0	1,9	92	1546	3089
97	90,7	17930	329,5	5,4	178	1696	4967
98	87,5	34476	324,4	10,5	269	1506	10833
99	92,2	3746	334,0	0,9	52	1596	1194
100	96,9	2358	334,3	0,7	52	1566	1218