

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**OPERACIÓN EFICIENTE DE UN EMBALSE MULTIPROPÓSITO EN CHILE:
TRADEOFFS ENTRE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA E HIDROELECTRICIDAD**

JOSÉ M. GONZÁLEZ¹
MARCELO A. OLIVARES²³

RESUMEN

En el presente estudio se desarrolla un modelo de optimización hidro-económico, el cual permite evaluar la operación óptima de un sistema de embalse multipropósito, donde los principales usos del agua son la hidroelectricidad y la agricultura. Estos usos presentan conflictos en la utilización del recurso debido a que tienen demandas estacionales opuestas, los cuales se intensifican en función de la disminución de la disponibilidad del agua en las cuencas hidrográficas en Chile. Históricamente, las entregas desde embalses para estos dos usos ha estado controlada por un operador central del sistema eléctrico interconectado y sujeta a convenios de riego, los cuales pueden seguir vigentes por años, independiente de la evolución de los usos del agua en la cuenca. Este trabajo plantea una propuesta de planificación de las entregas que considere el valor económico de los usos del agua, integrando funciones de beneficio marginal mensual para el sector agrícola dentro de la cuenca con funciones de costo marginal de la generación hidroeléctrica inserta en un sistema eléctrico interconectado. El modelo encuentra una operación óptima, la cual tiene un mayor beneficio total asociado al uso del agua en el sistema en comparación con un esquema de operación basado en un convenio con reglas fijas para definir las entregas. Además, este trabajo avanza en la cuantificación del costo de oportunidad del agua para los dos usos en conflicto, lo cual permite evaluar un posible plan de compensación por transferencias de agua entre sectores en los años secos, con el fin de amortiguar las pérdidas del sector racionalizado y obtener una gestión óptima del agua en la cuenca.

¹ Estudiante de Magister, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile - jose.gonzalez@ing.uchile.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile - maroliva@ing.uchile.cl

³ Académico Asociado, Centro de Energía, Facultad de Ciencias Física y Matemáticas, Universidad de Chile - maroliva@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), surge con el objetivo de contrarrestar los problemas de escasez hídrica, aumento de demandas de agua, conflictos entre usuarios y contaminación de fuentes hídricas, siendo un factor determinante para el crecimiento económico, conservación ambiental y el bienestar social de una nación (OECD, 2011). Esta gestión debe contener, como aspectos esenciales, la coordinación y resolución de conflictos asociados al uso del agua, la internalización de las externalidades económicas y ambientales, la definición de asignaciones óptimas, y la supervisión y validación de normas a largo plazo (Bauer, 2004).

En busca de abordar los desafíos de la GIRH, en las últimas dos décadas han emergido los modelos de optimización hidro-económicos como una de las herramientas más comunes para analizar los sistemas de recursos hídricos (RH) (Tilmant *et al.*, 2014). Tales modelos representan una valiosa integración entre la economía y la ingeniería de los RH, con el fin de enfatizar el uso de principios económicos para apoyar los procesos de toma de decisión, diseño y evaluación de la operación de sistemas hídricos e integración de los diferentes usuarios del agua en una cuenca (Harou *et al.*, 2009).

La principal importancia de la utilización de modelos hidro-económicos está dada no sólo porque estos brindan decisiones óptimas relativas a la operación de los sistemas, sino que revelan el costo de oportunidad del agua en situaciones de escasez, proporcionando bases para la toma de decisiones e internalización de las externalidades a diferentes niveles (Medellín-Azuara, 2006; Tilmant *et al.*, 2008, 2009; Harou *et al.*, 2009; Medellín-Azuara *et al.*, 2010). Tilmant *et al.*, (2014) recalca la importancia de revelar el costo de oportunidad debido a que: i) la escasez de agua exige una buena comprensión de los flujos de agua, usos y valores económicos para la gestión eficaz, ii) el costo de oportunidad del recurso es, en la ausencia de mercados, el mejor indicador del precio o la disponibilidad a pagar por una cantidad de agua para mitigar la escasez.

En el presente texto se presenta un modelo de optimización hidro-económico a escala de cuenca, con el cual se analiza la operación de un embalse multipropósito, para uso en riego y generación hidroeléctrica, los cuales cuentan con demandas de agua estacionales conflictivas. El modelo permite revelar el costo de oportunidad del agua en los años secos, esencial para la gestión del agua en la cuenca y para los dos usos en conflicto. Se presentan resultados de la operación óptima del embalse a una escala mensual en un horizonte de tiempo anual, para diferentes hidrologías (húmeda, normal y seca) y a diferentes estados iniciales del sistema.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Tradicionalmente la operación y diseño de los sistemas de RH se realizaba mediante modelos no económicos, los cuales comúnmente cumplían con demandas de agua fijas para los diferentes usuarios, provocando frecuentemente un sobre dimensionamiento de la infraestructura y una lenta adaptación a las condiciones cambiantes. Según Harou *et al.*, (2009), un concepto clave que hay que tener en cuenta para enfrentar la escasez y los conflictos del agua, es que las demandas de agua no son requerimientos fijos sino funciones, donde las cantidades de agua utilizadas por los diferentes usuarios difieren en el tiempo y el espacio en función del beneficio marginal que obtienen del uso del recurso.

Para fines de prueba de concepto, se definió un sistema tipo, que consiste en un embalse que abastece al riego y la generación hidroeléctrica (Figura 1). En esta figura se puede observar que la generación hidroeléctrica vincula dos escalas de estudio a saber: escala de cuenca, donde interactúan los usos del agua (riego e hidroelectricidad) y escala de sistema eléctrico donde la generación hidroeléctrica contribuye a satisfacer una demanda energética junto con un conjunto de generadoras térmicas.

Con el objetivo de modelar la operación del embalse a escala de cuenca, se implementaron los siguientes modelos de optimización: Modelo agro-económico, el cual representa el riego en la cuenca, del cual se obtuvieron funciones de demandas mensuales de agua para dicho uso mediante el método de Programación Matemática Positiva (PMP), propuesto por Howitt, (1995a; b), el cual calibra un modelo de optimización, incorporando parámetros basados en observaciones empíricas de un año base, construyendo una conexión continua entre información de modelos econométricos con modelos de programación matemática con restricciones (Howitt, 2002, 2005). Modelo de coordinación hidrotérmica del sistema eléctrico propuesto (tres centrales de generación: una hidroeléctrica, una térmica a carbón, y una térmica a diésel), del cual se obtiene el costo marginal de la energía, los cuales representan el precio al cual se paga la energía que genera la central hidroeléctrica. Los resultados de ambas representaciones son integrados en un modelo de optimización hidro-económica intra-cuenca que se describe a continuación.

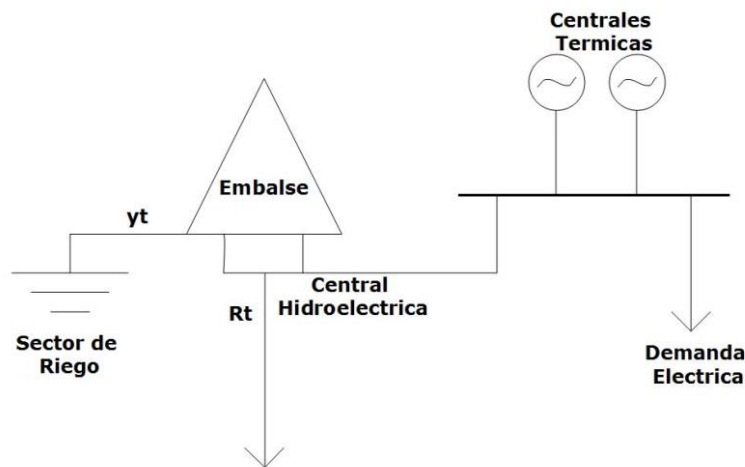


Figura 1. Esquema del Sistema en Estudio

Modelo hidro-económico

La operación de un sistema de embalse multipropósito se puede considerar como un problema de toma de decisión de múltiples etapas, donde la secuencia de decisiones de entregas (y_t, R_t riego e hidroelectricidad, respectivamente) desde el embalse debe ser determinada para maximizar el beneficio conjunto total de la operación del embalse para un horizonte (T) de planificación. En este caso, como los usos son consuntivo (riego) y no consuntivo (hidroelectricidad), el caudal turbinado (R_t) puede ser utilizado por el sector agrícola (y_t).

$$\mathbf{Z} = \max_{r_t, y_t} \left[\sum_{t=1}^T f_t(S_t, q_t, g_t, y_t) + v(S_{T+1}) \right] \quad (1)$$

Sujeto a

$$S_{t+1} = S_t + q_t - e_t(S_t) - R_t - Sp_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (2)$$

$$g_t = \varphi R_t \tau \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (3)$$

$$y_t \leq R_t + Sp_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$\underline{S}_t \leq S_t \leq \bar{S}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$\underline{R}_t \leq R_t \leq \bar{R}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$\underline{g}_t \leq g_t \leq \bar{g}_t \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (7)$$

Donde f_t es el beneficio inmediato de la operación del sistema para los dos sectores (riego e hidroelectricidad) durante el periodo t , q_t ($m^3 s^{-1}$) es el vector de afluentes al embalse durante el periodo t , S_t (Hm^3) es el vector de volumen almacenado en el embalse que describe el estado al inicio del periodo t , y_t y R_t ($m^3 s^{-1}$) es el vector de entregas de agua a los sectores agrícola e hidroeléctrico respectivamente, durante el periodo t , e_t (mm) es la evaporación desde el embalse, la cual es función del volumen almacenado, Sp_t ($m^3 s^{-1}$) es el vertimiento por rebose desde el vertedero del embalse, g_t (MWh) es la generación de energía de la central hidroeléctrica en el periodo t , φ ($MW s m^{-3}$) es el coeficiente de generación asociado a la central hidroeléctrica, τ (*horas*) número de horas en el mes en las cuales la central hidroeléctrica genera y finalmente $v(S_{T+1})$ es la función de valor final de dejar agua en el embalse para periodos futuros después del horizonte de planeación.

La función de beneficio inmediato incluye el beneficio inmediato de generar energía hidroeléctrica, la función de beneficio agrícola para cada periodo $v_t(y_t)$ y, además un costo de penalización por vertimiento en cualquier periodo del horizonte.

$$f_t(S_t, q_t, g_t, y_t) = p'_t g_t + v_t(y_t) + \xi'_t Sp_t \quad (8)$$

Donde ξ ($USD s m^{-3}$) es el coeficiente de penalidad por demanda vertimiento y p'_t ($USD MWh^{-1}$) es el precio esperado de la energía en el periodo t . El precio de la energía para cada periodo se obtiene como el costo marginal en el modelo de despacho, correspondiente a la variable dual de la restricción de balance de energía en el nodo donde la central hidroeléctrica inyecta la energía al sistema eléctrico. Esta información constituye el nexo entre dos escalas de planificación del RH a saber: sistema eléctrico y cuenca hidrográfica, permitiendo una integración óptima en la gestión del agua para sus diferentes usos.

Para efectos de la modelación, mediante un modelo ARMA (4,2) se generaron 75 series sintéticas afluentes al embalse, divididas en series húmedas, normales y secas. En la Figura 2. se presentan los promedios mensuales de cada escenario de afluentes, junto con el promedio mensual de las series históricas afluentes al embalse. En esta figura se puede observar que el promedio de las

series sintéticas, siguen la estacionalidad del promedio de las series históricas lo cual se buscaba replicar en la modelación.

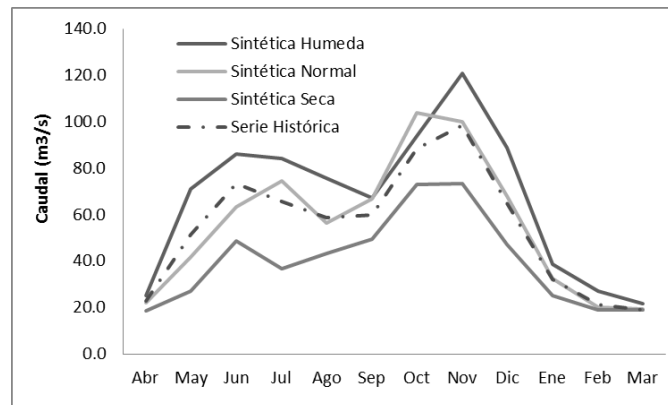


Figura 1. Promedio Series Sintéticas e Histórica

El modelo de optimización hidro-económico de planificación conjunta, se ejecutó para cada escenario de las series y para diferentes volúmenes iniciales del embalse, 25, 50 y 75 % del volumen útil de la Laguna,

Caso de Estudio

El caso de estudio corresponde a un sistema que utiliza algunos parámetros del sistema de la Laguna del Laja, ubicada en la región del Bio-Bio en Chile. Este sistema es de gran importancia para el país, debido a que la Laguna es la principal reserva energética del sistema interconectado central (principal red de conexión de energía eléctrica en Chile) y además brinda seguridad de riego a más de 90.000 ha en la región (Ayala, 2011).

En la actualidad, la gestión entre los dos usos, es realizada mediante un convenio que suscribieron la Empresa Nacional de Electricidad (ENDESA) y la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) en 1959. Los objetivos principales de tal convenio son generar energía eléctrica, asegurar y aumentar las áreas con regadío en la zona, además de establecer principios y normas que enmarquen las decisiones operacionales en el sistema, en función del agua embalsada en la Laguna.

La disminución de los RH en la zona, el aumento de demandas de agua y la disminución de los niveles de la laguna multipropósito, genera problemas entre los usuarios del agua en la cuenca debido a que la generación hidroeléctrica y el riego poseen requerimientos estacionales conflictivos. Esto hace necesario proponer una nueva metodología de gestión que incorpore la dinámica cambiante del agua en la cuenca, asegurando una asignación eficiente del recurso.

Para efectos del estudio se agruparon todos los sistemas de regadío en la zona en una única área de riego. En la Tabla 1 se puede observar los niveles de producción agrícola en la cuenca de los principales cultivos y los precios de estos según cifras del censo agropecuario del 2007 y las estadísticas agropecuarias de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), los cuales sirvieron como base de calibración del modelo agroeconómico de la región, siguiendo la metodología propuesta por Medellín-Azuara (2006).

Tabla 1. Estadísticas Agrícolas de la Región

Región	Producto	Superficie Laja (ha)	Producción Total (qqm)	Rendimiento (qqm/ha)	Precio al Productor \$USD/qqm
Laja	Maíz	22,028,38	3,304,257,40	150,0	\$ 19,99
	Avena	37,520,24	1,800,971,60	48,0	\$ 20,76
	Papa	10,486,87	3,146,062,50	300,0	\$ 29,22
	Poroto	5,400,16	69,662,10	12,9	\$ 261,44
	Trigo	102,391,03	6,143,461,80	60,0	\$ 27,68

Fuente: Censo Agropecuario (2007)

En relación con la generación hidroeléctrica, sólo se contempló la central El Toro, por ser la única que realiza una regulación directa de la Laguna. Las otras cuatro centrales hidroeléctricas en la cuenca (Abanico, Antuco, Quilleco y Rucúe) son de pasada y se limitan a extraer sus derechos de agua de los ríos del sistema, los cuales dependen de fenómenos naturales, como las precipitaciones y el derretimiento de nieve, además de factores regulados artificialmente como el caudal turbinado por la central El Toro y las filtraciones naturales de la laguna (Ayala, 2011).

3. MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Del modelo agro-económico de la cuenca, se obtuvieron funciones de beneficio marginal para el sector agrícola para los meses de temporada de riego, bajo tres diferentes eficiencias de riego promedio en la cuenca (40, 50 y 60 %). En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 3. se muestra la curva de beneficio marginal para las tres eficiencias de riego, donde a mayor eficiencia de riego los agricultores obtienen un mayor beneficio marginal.

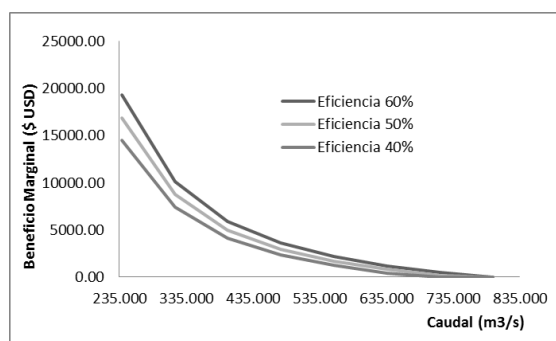


Figura 3. Función de Beneficio Marginal

Mientras que del modelo de optimización hidro-económico de planificación conjunta, se obtuvo la siguiente operación (y para riego y R para generación hidroeléctrica) para los diferentes escenarios (Figura 4a-d). En las siguientes figuras se puede observar que no todo lo turbinado (R) en un periodo, contribuye al beneficio agrícola (líneas continuas), esto se debe a que existe una demanda máxima para el uso agrícola y un caudal mayor a este no incrementa el beneficio para este sector.

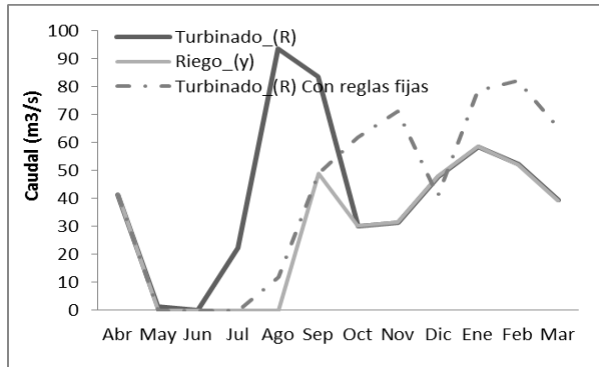


Figura 4a. Operación Hidrología Seca, Volumen 25%

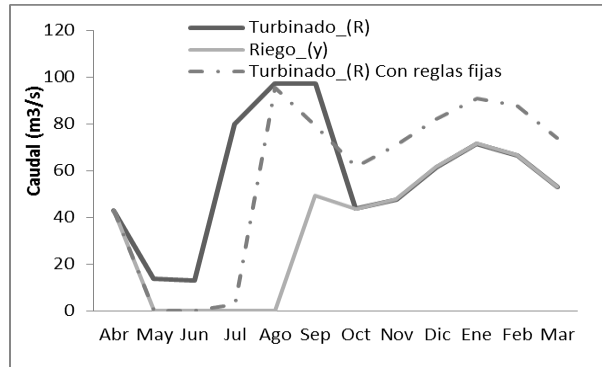


Figura 4b. Operación Hidrología Normal, Volumen 25%

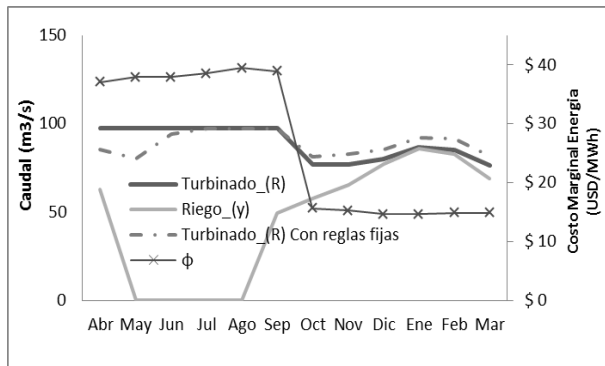


Figura 4c. Operación Hidrología Seca, Volumen 50%

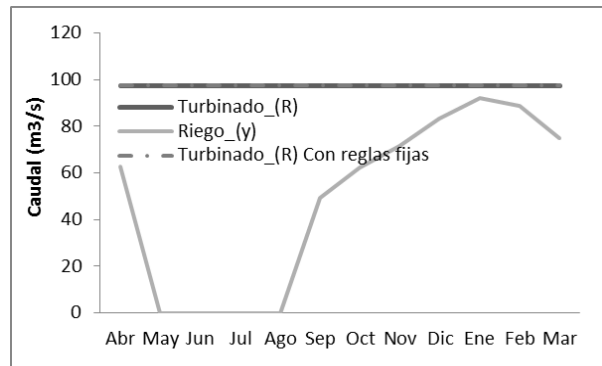


Figura 4d. Operación Hidrología Normal, Volumen 50%

Se observa que las demandas de agua para los diferentes usos no se ven afectadas si el volumen inicial del embalse está por encima del 50% del volumen útil y la hidrología es normal. La operación del embalse para un volumen inicial del 75% muestra el mismo comportamiento de la figura 4d, para todos los escenarios hidrológicos. Esto se debe a que hay disponibilidad del recurso para cumplir con las demandas de agua en la cuenca. En escenarios menos favorables que este, los usuarios del agua en la cuenca se verán afectados con menores asignaciones a sus demandas. Cuando la demanda agrícola sigue una regla fija, el modelo entrega agua principalmente en función de la demanda de riego, reduciendo la generación hidroeléctrica en los meses donde los precios de la energía son mayores (primeros dos trimestres del año hidrológico), lo cual genera un menor beneficio total por el uso del recurso en la cuenca del 9% en comparación con la metodología propuesta, en el peor de los escenarios. La repartición de los beneficios y las pérdidas para cada sector son: 25,2% de mayor beneficio para el sector hidroeléctrico y 11,8 % en pérdidas para el sector agrícola (Figura 5), lo cual puede ser amortiguado proponiendo un plan de compensación.

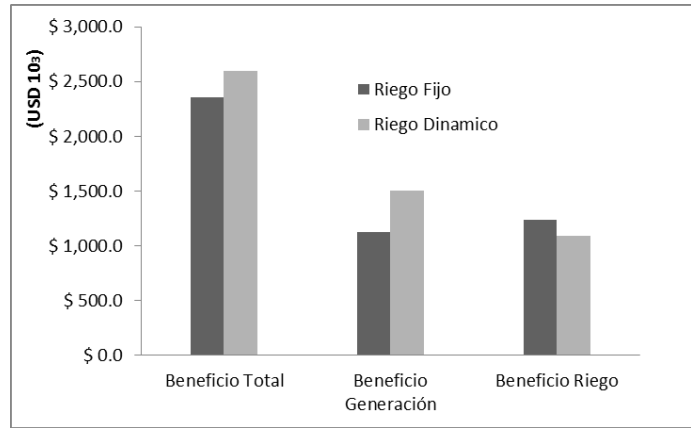


Figura 5. Beneficio asociado al uso del agua en la cuenca

Otro de los resultados principales está relacionado con el costo de oportunidad del agua para los dos sectores (Figuras 6a-d). Se observa que a menor disponibilidad de agua el costo de oportunidad del agua para riego es mayor, revelando el costo de escasez del agua, lo que quiere decir que un metro cúbico de agua es más valioso en la operación del sistema. Además, se observa que este costo de oportunidad es también mayor a una mayor eficiencia de riego debido a que con una unidad más de agua los beneficios para el sector son mayores. Este último comportamiento se explica porque, en el modelo agroeconómico a medida que se aumentaba la eficiencia de riego, el sector disponía de la misma cantidad de agua pero aumentaba el área sembrada en la zona generando mayores beneficios. En los meses de mayo a septiembre el sector agrícola no tiene demandas de agua por tal motivo en estos meses el costo de oportunidad del agua para este sector es nulo.

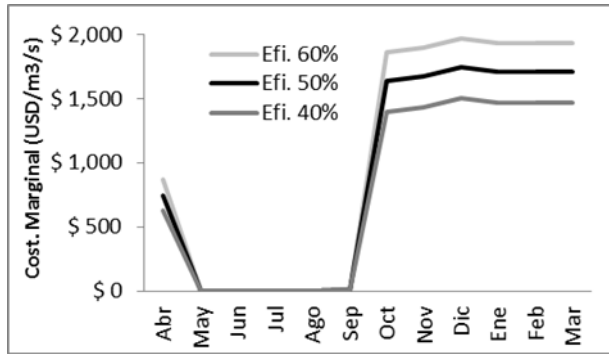


Figura 6a. Costo Marginal Hidrología Seca Volumen 25%

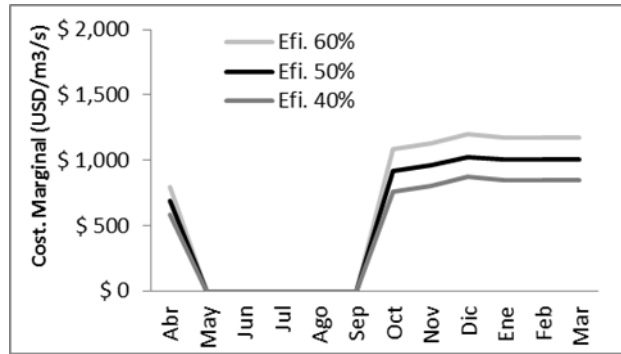


Figura 6b. Costo Marginal Hidrología Normal Volumen 25%

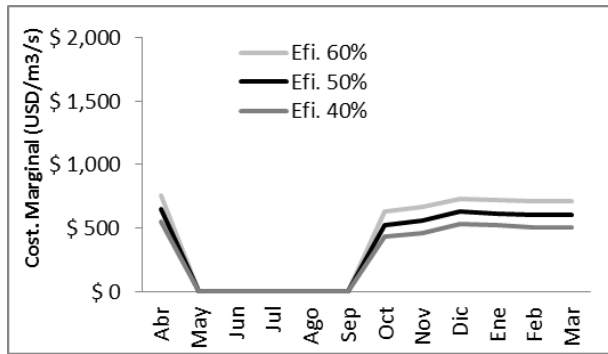


Figura 6c. Costo Marginal Hidrología Húmeda Volumen 25%

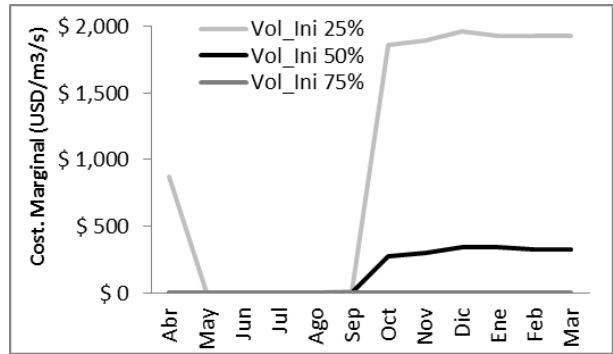


Figura 6d. Costo Marginal Hidrología Seca

En las Figuras 7a-c. se puede ver el mismo comportamiento que en las anteriores gráficas (mayor costo de oportunidad en años más secos), pero esta vez para el costo de oportunidad del agua en el embalse. Además en la Figura 7c se muestra que en los meses donde el precio de la energía es mayor, el costo de oportunidad de contar con una unidad más de agua se incrementa, dado que en estos meses producir una unidad más de energía genera un mayor beneficio para este sector. La información presentada anteriormente, junto con la operación óptima es esencial para la planificación del recurso, debido a que puede ser utilizada por los gestores de la cuenca para elaborar planes de compensaciones por las transferencias de agua de un sector a otro buscando amortiguar las pérdidas que se incurre al transferir agua, con el objetivo de obtener una operación en donde el sector restringido no incurra en pérdidas económicas.

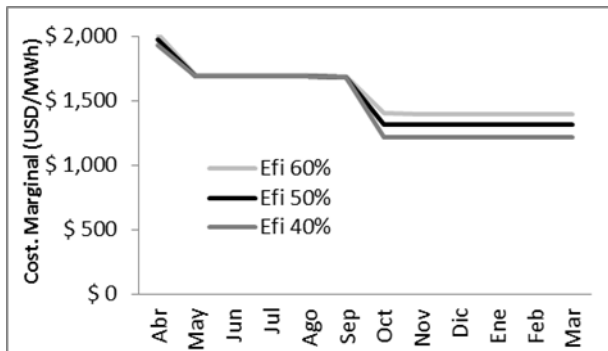


Figura 7a. Costo Marginal Hidrología Seca Vol. Inicial 25%

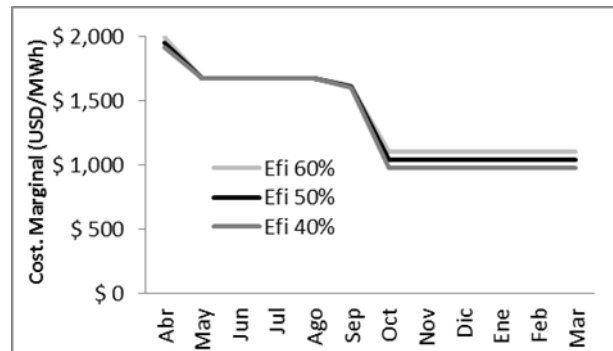


Figura 7b. Costo Marginal Hidrología Normal Vol. Inicial 25%

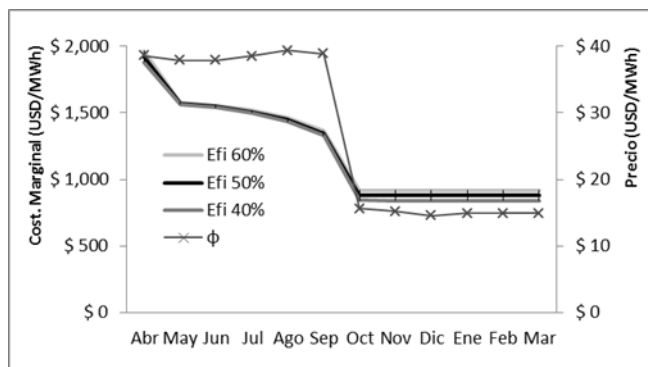


Figura 7c. Costo Marginal Hidrología Húmeda Vol. Inicial 25%

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló y aplicó un modelo hidro-económico de optimización para la operación de un sistema de embalse multipropósito. Los resultados muestran que se puede obtener un mayor beneficio en la cuenca asociado al uso del agua en comparación con un esquema de reglas fijas establecidas a partir de un convenio de riego. En ese caso, la operación del embalse está fuertemente restringida al uso agrícola, disminuyendo el beneficio total asociado al uso del agua en el sistema de estudio.

El modelo avanza primordialmente en revelar el costo de oportunidad del agua para el sector agrícola, con la inclusión de las funciones de beneficio marginal, las cuales representa el valor del uso del agua en la producción de los cultivos, dependiendo de las necesidades de agua y los precios de los cultivos.

Los resultados de la gestión dinámica del recurso hídrico, pueden ser utilizados para evaluar un plan de compensaciones de transferencias de agua, lo cual implica que el usuario que se vea racionalizado, debe ser compensado por el usuario que se vea beneficiado con la nueva asignación.

REFERENCIAS

- Ayala A. 2011. Impactos del Cambio Climático Sobre la Operación del Sistema Hídrico de la Laguna Laja. Universidad de Chile. http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2011/cf-ayala_ar/html/index-frames.html.
- Harou JJ, Pulido-Velazquez M, Rosenberg DE, Medellín-Azuara J, Lund JR, Howitt RE. 2009. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology* 375: 627–643. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.037.
- Howitt RE. 1995a. A calibration method for agricultural economic production models. *Journal of Agricultural Economics* 46: 147–159. DOI: 10.1111/j.1477-9552.1995.tb00762.x.
- Howitt RE. 1995b. Positive mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics* 77: 329–342.
- Howitt RE. 2002. Optimization model building in economics. (California, Davis)
- Howitt RE. 2005. Agricultural and Environmental Policy Models: Calibration, Estimation and Optimization. 207.
- Medellín-Azuara J, Harou JJ, Howitt RE. 2010. Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation. *The Science of the total environment* 408: 5639–5648. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.08.013.
- Medellín-Azuara J. 2006. Economic-Engineering Analysis of Water Management for Restoring the Colorado River Delta.

- Tilmant a., Goor Q, Pinte D. 2009. Agricultural-to-hydropower water transfers: sharing water and benefits in hydropower-irrigation systems. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 6: 2041–2073. DOI: 10.5194/hessd-6-2041-2009.
- Tilmant a., Marques G, Mohamed Y. 2014. A dynamic water accounting framework based on marginal resource opportunity cost. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11: 11735–11762. DOI: 10.5194/hessd-11-11735-2014.
- Tilmant a., Pinte D, Goor Q. 2008. Assessing marginal water values in multipurpose multireservoir systems via stochastic programming. *Water Resources Research* 44: 1–17. DOI: 10.1029/2008WR007024.