

MINUTA GO N°03/2019

ACTUALIZACIÓN DEL MODELO PLP  
IMPLEMENTACION CONVENIO LAJA Y OTROS  
(versión 5.0)

---

DEPARTAMENTO DE PROGRAMACIÓN

Agosto 2019



## TABLA DE CONTENIDO

<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>2 ÚLTIMOS CAMBIOS AL MODELO PLP (v5.0)</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 AJUSTES</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2 IMPLEMENTACIONES</b> .....	<b>2</b>
<b>2.3 OTROS</b> .....	<b>3</b>
<b>3 IMPLEMENTACIONES CONSIDERADAS PARA EL ACUERDO.</b> .....	<b>3</b>
<b>4 VERIFICACIÓN DEL ACUERDO</b> .....	<b>4</b>
<b>4.1 DERECHOS POR COLCHÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>4.2 CUMPLIMIENTO DE REQUERIMIENTOS DE RIEGO</b> .....	<b>6</b>
<b>4.3 OPTIMIZACIÓN DE LOS DERECHOS DE GENERACIÓN</b> .....	<b>6</b>
<b>4.3 USO DE DERECHOS ANTICIPADOS PARA RIEGO</b> .....	<b>8</b>
<b>4.4 COTAS FINALES DEL EMBALSE LAGO LAJA</b> .....	<b>8</b>
<b>5 CONCLUSIONES</b> .....	<b>10</b>
<b>6 REFERENCIAS</b> .....	<b>11</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

El **modelo PLP** ha sido la herramienta utilizada por el Coordinador Eléctrico Nacional, desde mediados del año 2004 para elaborar la programación de la operación y determinar el valor del agua en los distintos embalses del SEN, así como también, para realizar la programación mensual, estudios de abastecimiento y cálculo de peajes entre otras aplicaciones.

Desde su puesta en marcha el modelo ha sufrido una serie de modificaciones y extensiones de distinta índole. Estas mejoras han ido desde la modelación del problema del despacho hidrotérmico (PDH) hasta modificaciones en su estructura de programación de modo de aprovechar de mejor manera los avances tecnológicos en el ámbito computacional. También, han existido implementaciones anexas al modelo en sí, como es la incorporación del motor de optimización CLP con tal de permitir la ejecución del Modelo PLP haciendo uso de esas bibliotecas de optimización [1].

En este sentido, se le solicitó a un Consultor externo [2] la modificación del código actual del Modelo PLP para implementar de forma íntegra el “Acuerdo de Operación y Recuperación del Lago Laja - Complementa Convenio de 1958”, suscritos entre Enel Generación S.A. y la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, en adelante el Acuerdo. De esa manera, los resultados entregados por el programa estarán en sintonía con la operación actual del Lago Laja y responden a lo establecido en [3].

## 2 ÚLTIMOS CAMBIOS AL MODELO PLP (v5.0)

Respecto de la versión actual publicada (v3.0) se consideran los siguientes cambios realizados al software:

### 2.1 AJUSTES

- Consideración de hoya intermedia de central La Mina para la suma de caudal equivalente en Armerillo en Convenio Maule antiguo.
- Ajuste en arreglos cuando el problema consideraba distinto número de bloques en etapas.
- Ajustes en la transformación potencia-caudal de centrales hidroeléctricas cuando éstas tienen rendimientos que varían según la cota del embalse.
- Se ajustan las rutinas iniciales del algoritmo para permitir desactivar completamente los convenios antiguos del Maule y del Laja a través de los archivos plpmaule.dat y plplaja.dat, respectivamente.

### 2.2 IMPLEMENTACIONES

- General:
  - Se incluye el posible modelamiento de potencia máxima para centrales hidroeléctricas en función de la cota del embalse respectivo.
  - Se permite la posibilidad de agregar restricciones relajadas para el modelamiento de cotas mínimas para embalses, es decir, se ingresa una cota objetivo como restricción, pero en caso de no poder alcanzarla, el

modelo no arroja infactibilidad, sino que, solo le agrega una penalización equivalente a la diferencia entre la cota objetivo y la cota alcanzada en la simulación respectiva.

- Convenio del Laja:
  - Se agrega operación del Embalse Lago Laja según Acuerdo 2017 como modo 2 del Convenio del Laja. Opera correctamente al desactivar los caudales ficticios del modelo.
- Cortes de Factibilidad:
  - Al encontrar una infactibilidad, el modelo eventualmente podría generar múltiples cortes para resolverla. Anteriormente sólo se generaba un único corte al encontrar una infactibilidad.
  - Por generalización de la metodología, el algoritmo solo permitirá el uso de cortes de factibilidad según método del filtro elástico (método 3). Los métodos (1 y 2) fueron declarados obsoletos.
  - Se mejora la operación del filtro elástico al evitar generar cortes que carecen de significancia o son redundantes.
- Solver:
  - Algoritmo puede ejecutarse adicionalmente con suite de optimización CLP-CDEC v1.16m (versión modificada del original CLP v1.16). Biblioteca disponible en página web del Coordinador.

## 2.3 OTROS

- Se ajusta el archivo de entrada relativo a filtraciones para mejorar el rendimiento del modelo en cotas bajas de embalses Lago Laja y Laguna de la Invernada.
- Ajustes en archivos relativos a los parámetros del embalse Lago Laja para adecuar el problema al nuevo convenio.
- Columnas “Etapa” en archivos csv de salida se renombran como “Bloque” cuando éstas correspondan realmente a un bloque y no a una etapa del problema.
- Salida del programa escribe un nuevo archivo “plpfal.csv” relacionado a la operación de centrales de falla. Archivo plpcen.csv ya no contiene centrales de falla.
- Escritura de archivos de salida se realiza de forma paralelizada.
- Cambio en la visualización por pantalla de la operación del algoritmo.
- Mejora en la información entregada a través del archivo de registro (plpwarn.log) del algoritmo.

## 3 IMPLEMENTACIONES CONSIDERADAS PARA EL ACUERDO.

A modo general, para incluir el Acuerdo dentro del modelo PLP se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El Acuerdo se implementará para todo el período de planificación considerando únicamente su operación en régimen permanente, considerando que al 1 de diciembre de 2018 el Lago superó la cota límite del régimen transitorio.
- La implementación considera que los derechos de generación (y los mixtos desde mayo) deben someterse anualmente (de diciembre a noviembre del año siguiente) a la optimización estocástica, no así los derechos

de riego (y los anticipos) que solo se utilizarán para cumplir los requerimientos de riego en el período en donde se necesiten.

- En ningún caso, los derechos de generación se utilizarán para cubrir el déficit de riego.
- Cuando exista déficit de riego debe repartirse, en la medida de lo posible, de manera proporcional entre el canal Zañartu-Collao y Tucapel.
- La implementación permite flexibilizar el Acuerdo durante el primer período de riego (diciembre a noviembre) para, de esa manera, fijar los parámetros de operación (caudal turbinado, requerimientos de riego) según lo estime el usuario.
- Los subsecuentes períodos de riego (diciembre a noviembre) son independientes el uno del otro. El Acuerdo debe reiniciarse cada 1 de diciembre considerando las cotas finales al 30 de noviembre.
- La única central sobre la cual se aplicarán las restricciones asociadas al Acuerdo será El Toro.
- Las restricciones para el caudal turbinado requerido en cada período se aplicarán sobre las etapas y no sobre los bloques.
- La operación del Acuerdo solo tiene validez si se ejecuta el algoritmo sin caudales ficticios. Esto incluye el modelar los embalses con los archivos para las restricciones de rebalses, filtraciones y extracciones.
- Tal como ocurría con el Convenio de 1958, las extracciones de riego se realizarán para completar los 47 m<sup>3</sup>/s antes de Abanico o los 90 m<sup>3</sup>/s (por curva estacional) en Tucapel, según lo que ocurra primero.
- La implementación considera el modelamiento de todos los colchones definidos para el Lago Laja, con su respectivo nivel de derechos tanto para generación como para riego.
- Todos los valores y parámetros que rigen al Acuerdo quedan a disposición del usuario para ser modificados a conveniencia. Esto incluye al número de colchones, sus volúmenes respectivos, los volúmenes de derechos máximos a extraer, las fechas relacionados a la temporada de riego, los requerimientos de riego en cada punto de la cuenca y la posibilidad de activar o desactivar el uso mensual para cada derecho a extraer.
- Se considera el uso de penalizadores para ajustar la operación del Acuerdo según sea necesario por el usuario.

## 4 VERIFICACIÓN DEL ACUERDO

Para verificar la correcta operación del Acuerdo del Laja se ejecutó un caso de estudio utilizando el motor CPLEX. Estas pruebas se llevaron a cabo ejecutando como caso de análisis la programación a 5 años del segundo semestre 2018, considerando para ello las modificaciones necesarias en la base de datos del problema.

Dentro de las modificaciones a la programación de 5 años realizadas para la ejecución del caso de estudio se consideran:

- Cambios en las topologías de las cuencas del Maule y Laja, similar a lo presentado en [2].
- Eliminación de perfiles de operación para central El Toro.
- Desactivación de convenios antiguos.
- Activación en script de inicialización del modelo.
- Ajustes de parámetros para los nuevos convenios.
- Utilización de nuevos archivos para rebalses, vertimientos, filtraciones, potencias máximas, holguras en cotas mínimas, limitación diaria de central Ralco.

Dentro de las implementaciones para la nueva modelación del Convenio del Laja se encuentra un archivo que entrega las variables más importantes que se van calculando, por lo que varios resultados que se presentarán fueron obtenidos de esas salidas.

Para la verificar la correcta operación del Acuerdo, se analiza la operación del Lago Laja y la central El Toro para algunos escenarios hidrológicos del problema. El caso en cuestión se ejecuta con 57 escenarios o simulaciones, por lo que el Acuerdo debería respetarse en cada uno de ellos.

#### 4.1 DERECHOS POR COLCHÓN

Uno de los puntos importantes del Acuerdo es que los derechos a repartir tanto para riego como para generación dependen de la cota final que se tenga al 30 de noviembre del año en curso. La implementación realizada debería tener en cuenta las fórmulas respectivas de cada colchón para que los derechos se vean reflejados en el resultado.

A modo de ejemplo, se presenta en la Figura 1 los niveles de derechos resultantes al comienzo de cada etapa del problema para la simulación 56. En ella se aprecia que, tal como se esperaba, los derechos son renovados cada 1 de diciembre. De los cinco inicios de temporada presentados tres están en el colchón intermedio, uno en el superior y uno en el inferior. A partir segundo inicio se observa que el algoritmo determina correctamente que el lago se encuentra en el colchón inferior quedando los derechos de riego en 570 [Hm3], los mixtos en 30 [Hm3] y los de generación en un valor menor a 60 [Hm3]. También, en el cuarto inicio se determinó que el Laja se encuentra en el colchón superior (cota 1333.95 m.s.n.m.) y los derechos quedan en 952 y 468 [Hm3] para riego y generación, respectivamente.

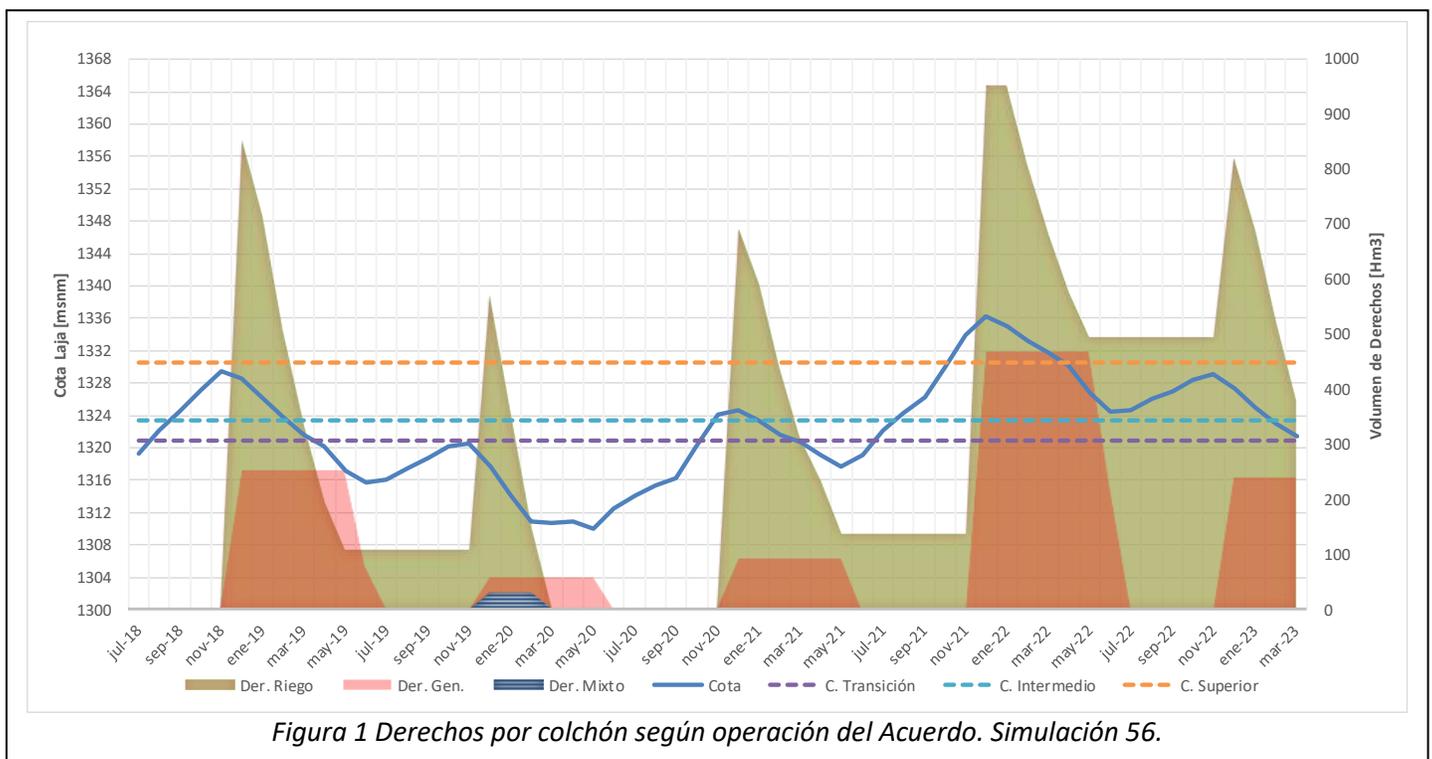


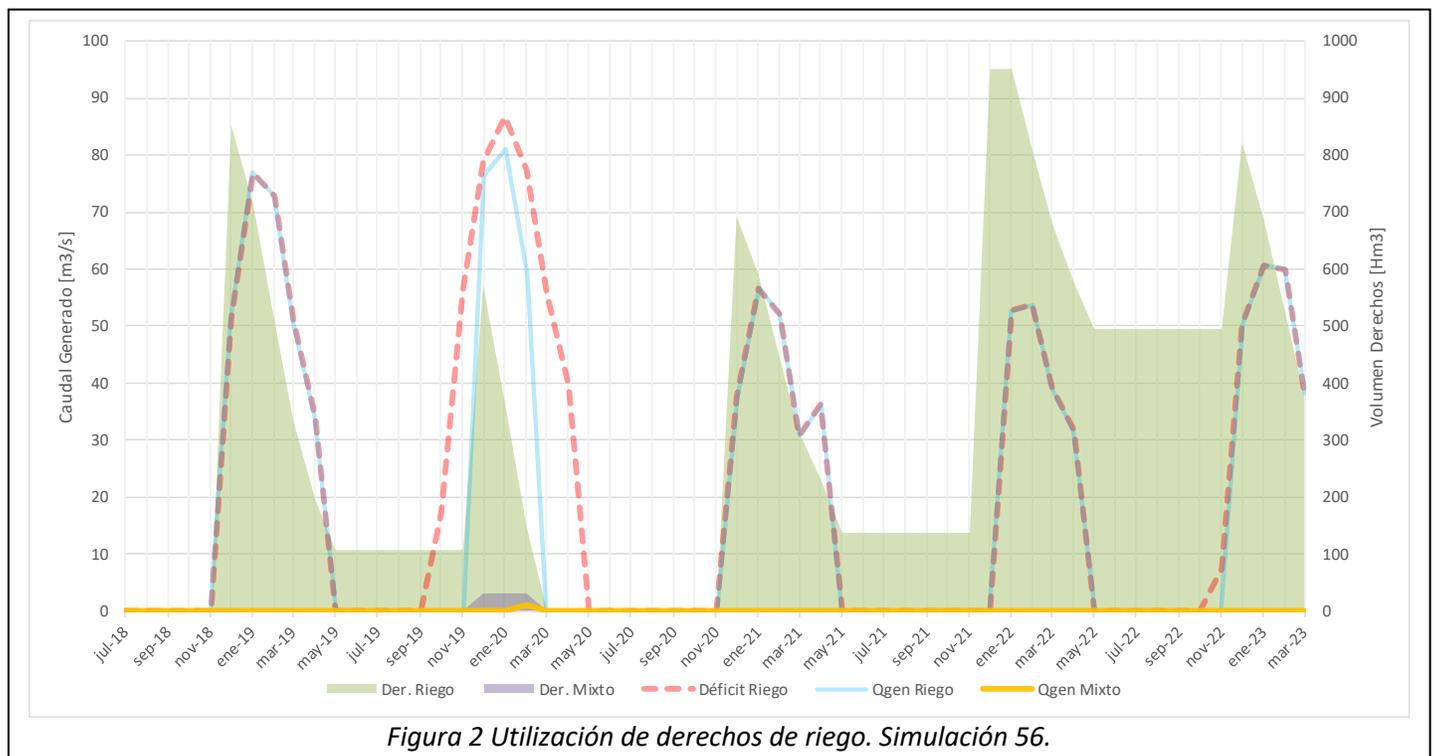
Figura 1 Derechos por colchón según operación del Acuerdo. Simulación 56.

Por un lado, se destaca el hecho de que el derecho de riego siempre se utiliza cuando se requiere ya que en muchos años no se utiliza en su totalidad dado que no hace falta. Por otro lado, se puede observar que el consumo de los derechos de generación (el cual es optimizado) siempre se realiza de manera posterior al término del uso del agua para riego.

## 4.2 CUMPLIMIENTO DE REQUERIMIENTOS DE RIEGO

Tal como se mencionó previamente, los derechos de riego solo se utilizan para satisfacer tal requerimiento, en la Figura 2 se puede observar las extracciones desde el Lago Laja para suplir esta demanda, así como también, el déficit de riego calculado y que debe satisfacerse a través del embalse. La línea segmentada roja indica el déficit que debe satisfacerse para cumplir con el riego estipulado por el Acuerdo. Del ejemplo presentado en la Figura 2 se observa que el riego se cumple a cabalidad en tres años, mientras que para los otros dos existen meses con riego no satisfecho. Se destaca la operación del segundo año en donde en ningún mes se cumple la totalidad del riego requerido y los derechos de riego y mixtos son ocupados en su totalidad.

En caso de existir déficit de riego durante un período, el modelo incorpora factores que añaden un peso a aquellos meses donde es más relevante suministrar el riego en su totalidad, dejando de lado aquellos meses en donde los regantes presentan menor requerimiento del recurso de acuerdo a información histórica.



Cabe señalar que quedó consignado en el modelo del Acuerdo que los derechos mixtos pueden ser usados igualmente para generación siempre y cuando no se hayan ocupado antes del mes de mayo, en este ejemplo se pudo observar que los derechos mixtos se ocuparon en su totalidad durante el mes de febrero, por lo que no habría remanentes para generación.

## 4.3 OPTIMIZACIÓN DE LOS DERECHOS DE GENERACIÓN

A modo de ejemplo, se presenta la Figura 3 en la cual se grafica el uso de los derechos de generación para la simulación 36. En ella se observa que el uso de los derechos se presenta principalmente a partir del mes de mayo y que su distribución dependerá de las condiciones del sistema.

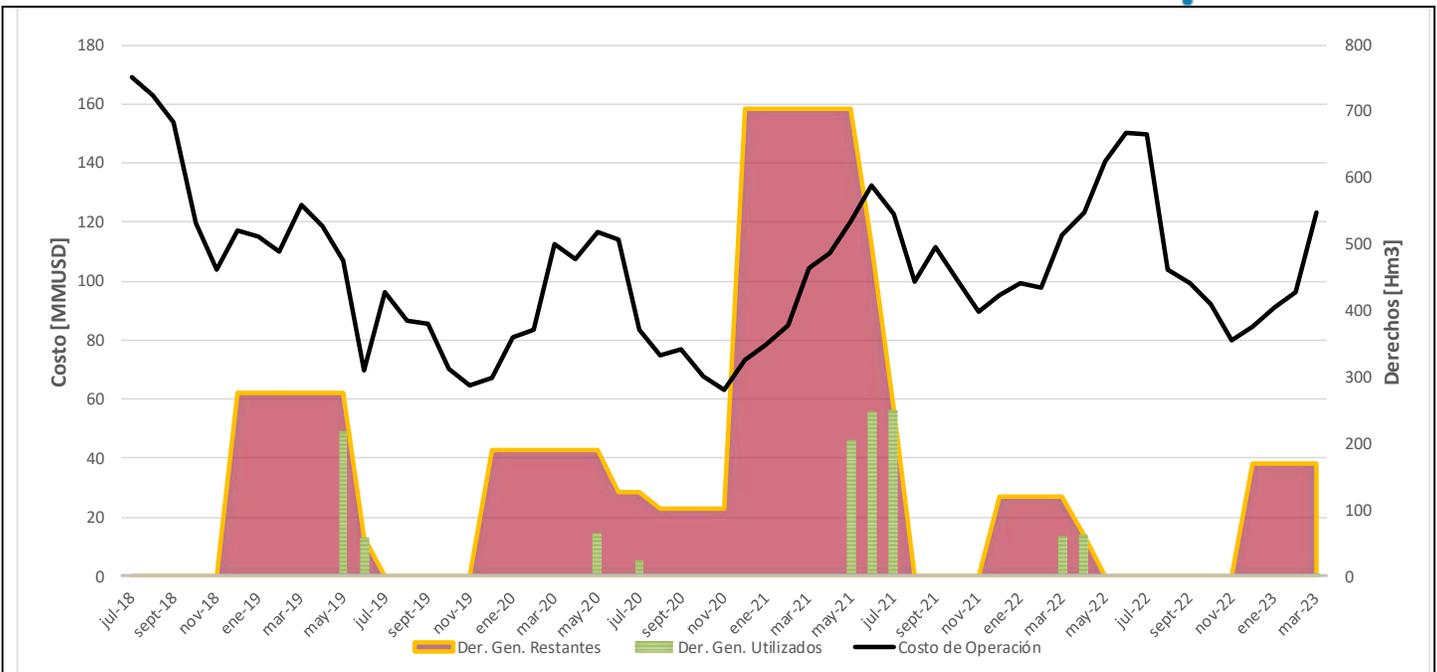


Figura 3 Uso de derechos de generación. Simulación 36.

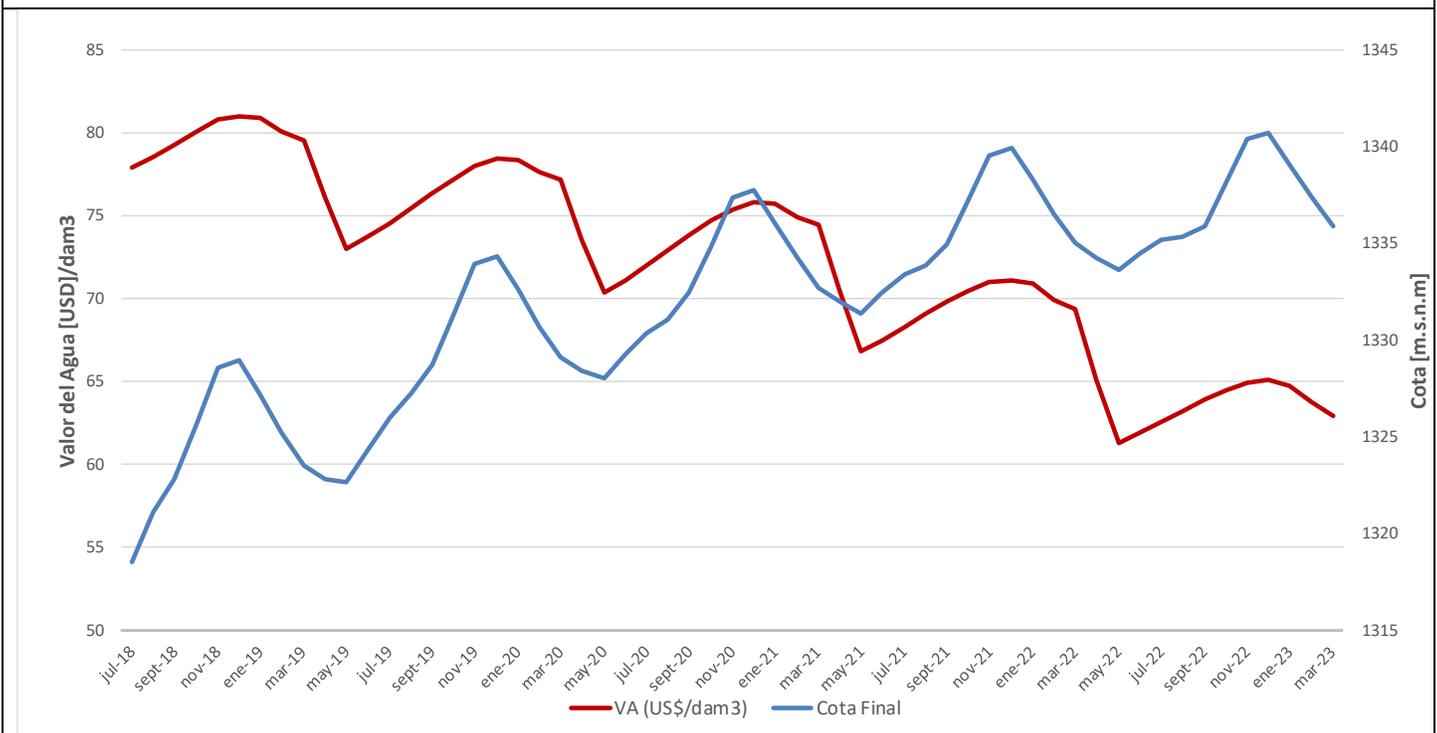
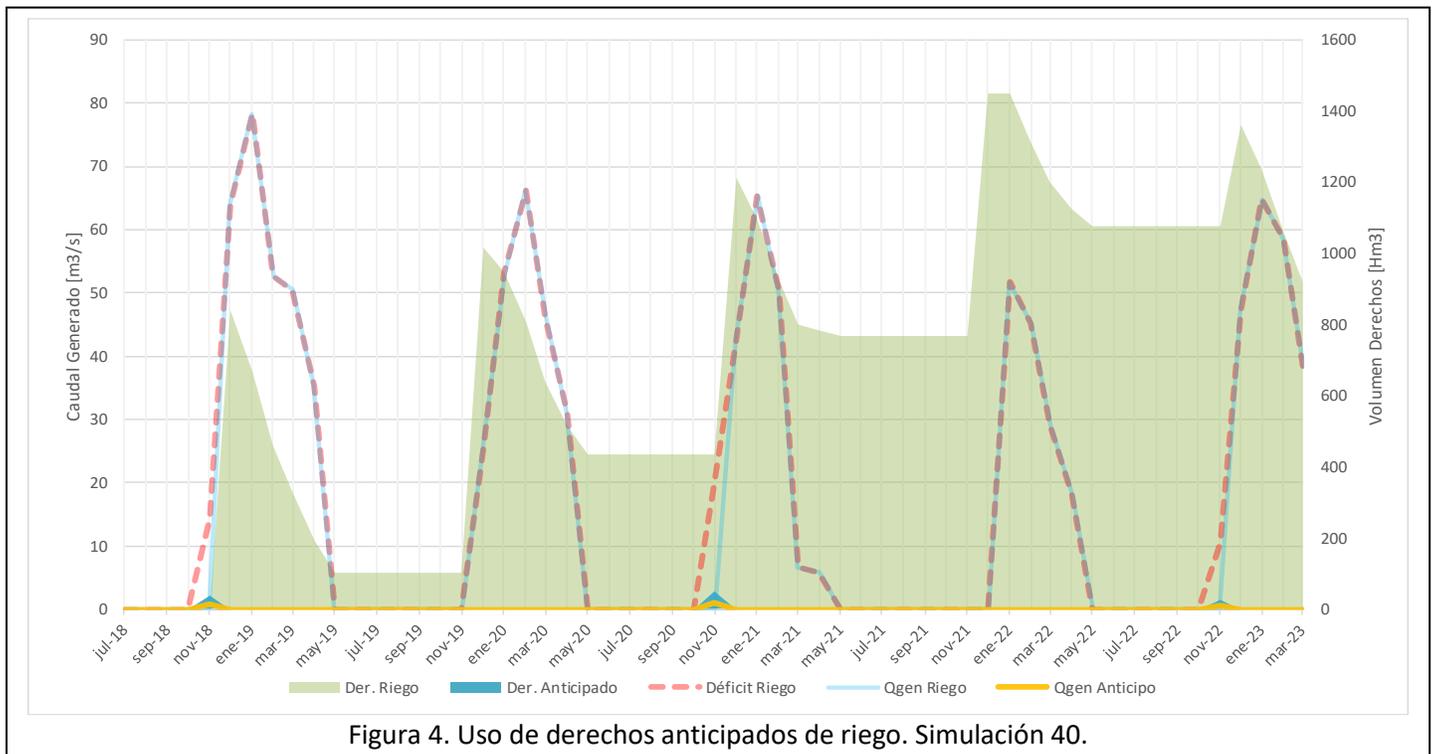


Figura 4 Valor del Agua del Lago Laja respecto de la cota del embalse. Simulación 36.

Cabe destacar el hecho que, para el tercer período de riego modelado en este ejemplo, la optimización del Acuerdo decide no ocupar la totalidad de los derechos de generación dado que el uso de ellos no mejoraría el costo de operación esperado del sistema. En efecto, se observa que para ese periodo del segundo año (otoño-invierno) el costo de operación sería más bajo que lo presentado en otros años.

### 4.3 USO DE DERECHOS ANTICIPADOS PARA RIEGO

Otra de las características que contiene el Acuerdo suscrito es que los regantes tienen la posibilidad de poder extraer derechos a cuenta de riego en el período previo al comienzo del período de riego (1 de diciembre). De esa forma, es posible que existan extracciones para riego los meses de septiembre, octubre y noviembre. Adicionalmente, al usarse estos derechos la cota al comienzo del periodo de riego debe calcularse como si no hubiesen existido tales extracciones para, posteriormente, descontar los derechos usados en el volumen real del derecho de riego. Esta regla igualmente fue modelada dentro de las modificaciones realizadas, por lo cual el modelo PLP podría requerir hacer uso de estos anticipos según sea necesario. La Figura 4 presenta los resultados para una de las simulaciones del problema, en ella se puede observar que en tres años se hacen uso de derechos anticipados durante el mes de noviembre. El ajuste de los parámetros del Acuerdo permite regular las condiciones bajo las cuales es posible extraer anticipos de riego, en este caso los anticipos extraídos no alcanzan a cubrir la totalidad del déficit presentado.



Se debe considerar que el uso o no uso de los derechos anticipados se ajustan mediante parámetros de entrada al modelo, por lo que queda a criterio del usuario el ajuste (el peso) que quiera darle.

### 4.4 COTAS FINALES DEL EMBALSE LAGO LAJA

Uno de los objetivos del Acuerdo es poder subir la cota del Lago Laja cuando éste se encuentre en un nivel bajo del embalse al momento de determinar los volúmenes disponibles para la temporada, que imposibilite la entrega del 100% de los requerimientos de riego en la cuenca, por lo que en una ejecución del modelo PLP con un horizonte extenso debería poder apreciarse este efecto “regulador” de la cota del Lago Laja. En la Figura 5 se puede observar el resultado de las cotas finales por mes para todas las simulaciones de la programación de 5 años. De la gráfica se destaca el hecho de que la cota, en promedio, sube durante los primeros años de simulación considerando una cota inicial bastante “baja” para el mes de

julio. Destacada en color rojo se encuentra el resultado de la cota promedio a lo largo del horizonte que muestra el efecto previamente descrito. También, es posible observar que cuando la cota del embalse incursiona por el colchón inferior (bajo la cota 1320.9), éste se recupera al año siguiente, por lo que se cumpliría el objetivo del acuerdo.

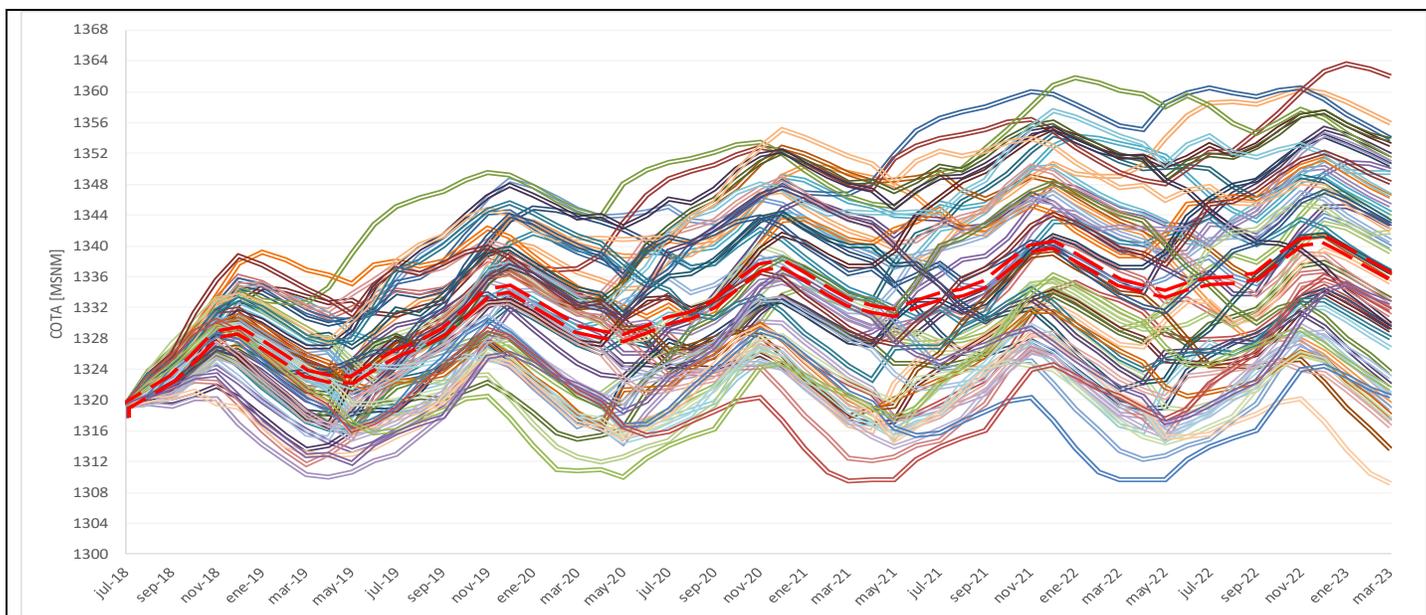


Figura 5 Cotas finales del embalse Lago Laja. Todas las simulaciones.

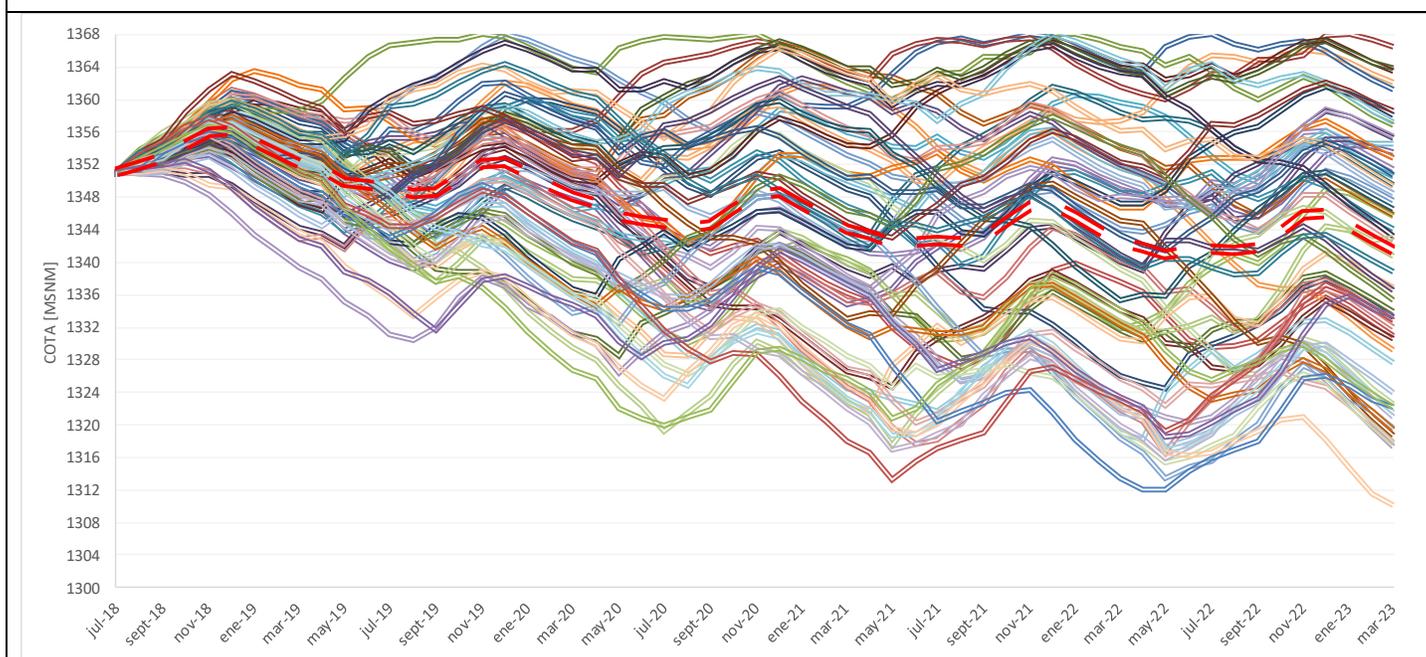


Figura 6 Cotas finales del embalse Lago Laja, iniciando la simulación en la cota 1350 m.s.n.m. Todas las simulaciones.

Además, es posible destacar que en este caso de estudio el embalse se mantiene dentro de los límites propios del embalse (cotas mínima y máxima; Figura 6). Si bien se visualiza que en algunos escenarios alcanza una cota cercana a la máxima (1368 m.s.n.m), los archivos de salida no presentan rebases/vertimientos de agua durante esos períodos.

Considerando las condiciones del Acuerdo y la optimización del algoritmo, los perfiles de cotas para las distintas simulaciones deberían “cruzarse” a través de todo el período de planificación, lo cual se puede apreciar en este caso.

## 5 CONCLUSIONES

Luego de presentar los resultados obtenidos con la implementación del Acuerdo del Lago Laja en el modelo PLP versión 5.0, se destacan los siguientes aspectos:

- El modelo del Acuerdo implementado para el software PLP responde satisfactoriamente a las condiciones y restricciones que éste tiene estipulado. Los resultados mostrados respecto de la operación del Lago Laja son razonables para el tipo de problema de optimización que se está resolviendo.
- La implementación es capaz de detectar adecuadamente los requerimientos de riego y ajustar la operación de central El Toro para satisfacerlos. También, el modelo responde adecuadamente cuando no es posible satisfacer los requerimientos de riego debido a que no existen los suficientes derechos para ello.
- Se verificó que en el modelo el uso de los derechos de generación responde a la optimización del costo esperado de operación del sistema eléctrico. Adicionalmente, se verificó que los derechos de generación son usados de manera independiente a los requerimientos de riego en la cuenca.
- Se destaca que la obtención de déficit de riego no implica una infactibilidad del problema. El uso de penalizadores que relajan esta restricción es adecuado para la respuesta observada en periodos más secos y con bajo volumen de derechos de riego.
- El modelo interpreta de manera adecuada las distintas asignaciones de derechos de acuerdo a la cota del embalse a finales de noviembre, inclusive es capaz de determinar cuándo asignar y hacer uso de derechos mixtos.
- El uso de derechos anticipados es otra de las características del Acuerdo cuyo modo de operación fue modelado dentro de la implementación. De la solución presentada se pudo observar que este atributo opera según lo previsto y que tiene la flexibilidad suficiente para poder ajustar su uso a lo que se pueda observar de la realidad.
- A grandes rasgos, se verificó que los parámetros y las restricciones formuladas para esta implementación satisfacen la operación correcta del Acuerdo del Lago Laja, en donde la central El Toro opera para cumplir los requerimientos de riego y, a su vez, optimiza el volumen de generación para minimizar el costo esperado de operación.

## 6 REFERENCIAS

- [1] Mancilla, Diego, «Modificación al motor de optimización CLP para su inclusión al modelo PLP,» 2017.
- [2] Centro de Energía, Universidad de Chile, «Actualización Convenio Laja e implementación en Modelo PLP,» 2018.
- [3] Coordinador Eléctrico Nacional, «Operación->Modelación del SEN->Convenios de Riego,» Diciembre 2017. [En línea]. Available: [https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2018/10/Acuerdo\\_Lago\\_Laja\\_2017.pdf](https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2018/10/Acuerdo_Lago_Laja_2017.pdf).