INFORME
COORDINADOR ELÉCTRICO NACIONAL

PRONÓSTICO CAUDALES - HORIZONTE 12 MESES

Diciembre 2021

CONTENIDO

1.	**OBJETIVO**	**3**
2.	**METODOLOGÍA SPC 12 MESES**	**4**
3.	**EVALUACIÓN METODOLOGÍA SPC – PERIODO ABRIL-MARZO**	**15**
4.	**EFECTOS EN LA OPERACIÓN DEL SEN**	**29**
5.	**COMENTARIOS FINALES SOBRE EFECTOS EN LA OPERACIÓN DEL SEN**	**40**
6.	**APLICACIÓN DEL SPC EN LA PROGRAMACIÓN DE LA OPERACIÓN**	**40**

1. OBJETIVO

El presente documento tiene por objetivo describir la metodología del Sistema de Pronóstico de Caudales (SPC) para representar la incertidumbre hidrológica para el periodo abril-marzo, así como su aplicación en la programación de mediano plazo de la operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) que realiza el Coordinador.

Cabe señalar que el presente desarrollo se enmarca en las atribuciones que cuenta el Coordinador para realizar la programación de la operación del SEN, según lo indicado en el Reglamento de la Coordinación y Operación del Sistema Eléctrico Nacional (DS 125/2019), el cual establece que el Coordinador deberá definir las metodologías, modelos matemáticos, esquemas de medición u otras materias técnicas necesarias para ejecutar la programación de la operación en conformidad a la normativa vigente. En lo que se refiere a proyecciones de caudales afluentes establecida en el Artículo 54 del Reglamento antes señalado, el Coordinador ha implementado la metodología SPC, según se describe en las siguientes secciones del presente documento.

2. METODOLOGÍA SPC 12 MESES

2.1 Esquema conceptual

El SPC es un sistema predictivo basado en la aplicación de un modelo hidrológico para simular caudales afluentes en las hoyas hidrográficas asociadas a los embalses o centrales hidroeléctricas del Sistema Eléctrico Nacional. Un esquema conceptual simplificado del SPC es presentado en la **Figura 3.1**. En ella se observa que los componentes principales son el **modelo hidrológico**, la **inicialización**, **pronósticos meteorológicos y escenarios meteorológicos**. El **modelo hidrológico** corresponde al modelo *Variable Infiltration Capacity* o VIC y será detallado en el capítulo del modelo hidrológico. La etapa denominada **inicialización** abarca un periodo previo al comienzo del pronóstico propiamente tal y permite que el modelo hidrológico, alimentado por información meteorológica reciente, desarrolle una simulación fidedigna del estado hidrológico actual de cada cuenca.

Respecto a los **pronósticos meteorológicos**, estos corresponden a las predicciones numéricas del tiempo ECMWF-ENS, ECMWF-DET, GFS y GEFS; y son los responsables de los caudales simulados por el SPC en el corto plazo (1 a 14 días), el cual se aplica en la programación de la operación desde inicios del año 2019[1].

Por otra parte, los **escenarios meteorológicos** que se aplican en la programación largo plazo (desde día 15 hasta término del año hidrológico actual), corresponden a una reconstrucción meteorológica histórica, basada en la posibilidad de observar caudales que ya han ocurrido en el pasado. Esta técnica para el largo plazo, que resulta en un conjunto de escenarios hidrológicos, es conocida como *Ensemble Streamflow Prediction* y ha sido utilizada en aplicaciones de pronóstico hidrológico desde hace ya varias décadas y continúa siendo utilizado hoy en día en productos operacionales de pronósticos en múltiples organizaciones.

Por último, es importante mencionar que se aplica un **post procesamiento** en los caudales de salida del modelo hidrológico con el objetivo de aumentar el desempeño en los resultados.

[1] https://www.coordinador.cl/wp-content/old-docs/2018/09/Informe-Sistema-Pron%C3%B3stico-de-Caudales.pdf

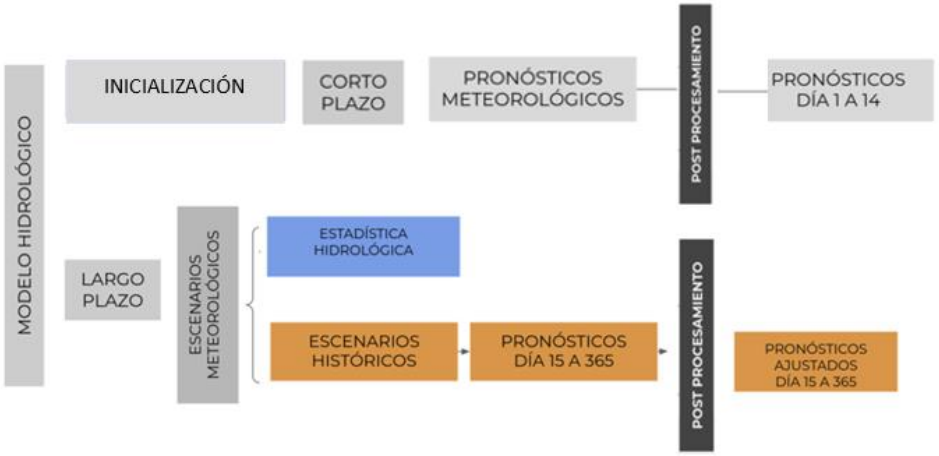


Figura 3.1: Esquema conceptual simplificado del SPC

2.2 Modelo hidrológico

La pieza fundamental del sistema de pronóstico es el modelo hidrológico físico VIC. El modelo VIC ha sido aplicado en cuencas que incluyen el río Columbia, Ohio, Arkansas y Mississippi (todos en Estados Unidos). También ha sido ampliamente usado en otras partes del mundo. En Chile ha sido aplicado en estudios de cambio climático y en la evaluación del potencial hidroeléctrico. Numerosos artículos científicos describen los fundamentos físicos del modelo VIC[2].

Los procesos hidrológicos simulados por VIC incluyen los siguientes (**Figura 3.2**):

- Acumulación y ablación (derretimiento, sublimación) del manto de nieve en distintas bandas de elevación.
- Interacción con una capa de vegetación (transpiración, retención de agua).
- Interacción atmósfera-superficie (incluyendo evaporación).
- Infiltración de agua en el suelo.
- Generación de escorrentía superficial y subsuperficial (flujo base).
- Módulo para simular el traspaso de agua hacia (y a través de) la red de cauces, basado en el concepto de un hidrógrafo unitario.

VIC representa el suelo dividido en tres capas, en una profundidad de entre 1 a 2 metros. Además, el modelo contempla una capa de vegetación desagregada en "*tiles*" o secciones para cada tipo de vegetación presente en la región espacial representada por el modelo. Finalmente, el modelo puede dividir la cuenca en bandas de diferentes alturas donde puede desarrollarse acumulación de capas de nieve.

[2] Más información técnica sobre el modelo se puede encontrar en su página http://vic.readthedocs.org/.

Los datos de entrada del modelo son series diarias de precipitación, temperatura mínima y máxima. A partir de estas variables básicas, el modelo VIC aplica procedimientos estándares para estimar los valores de otros parámetros meteorológicos que requiere, tales como la radiación, temperatura y humedad. Los datos de precipitación y temperatura pueden ser observaciones en-*situ*, análisis meteorológicos o los resultados de predicciones de modelos de pronóstico. Para muchas cuencas consideradas en el SPC, existe poca información observacional en las cotas altas de la cuenca (mayor a 2.000 metros). La falta de conocimiento de las variables meteorológicas en las zonas altas (sobre todo la precipitación) es una de las fuentes de incertidumbre más importante en el sistema.

Las salidas más relevantes del modelo VIC son el flujo base y la escorrentía superficial. Ambas son fuentes de agua que contribuyen al caudal simulado. Se generan cuando el contenido de agua en las capas superiores (escorrentía superficial) e inferiores (flujo base) del suelo se acercan a sus niveles de saturación. La escorrentía superficial normalmente se genera durante periodos de precipitación, mientras que el flujo base varía mucho más lentamente.

En el SPC el modelo VIC es configurado en modo agregado y representa la cuenca hidrológica asociada al punto de control con bandas de altura espaciadas en 250 metros. Tomando en cuenta la variación de temperatura con altura, el modelo determina si la precipitación en cada banda corresponde a lluvia o nieve y, de esta manera, puede simular la evolución del manto de nieve en las cotas altas de la cuenca, cuyo derretimiento contribuye al caudal estimado para la época de deshielo.

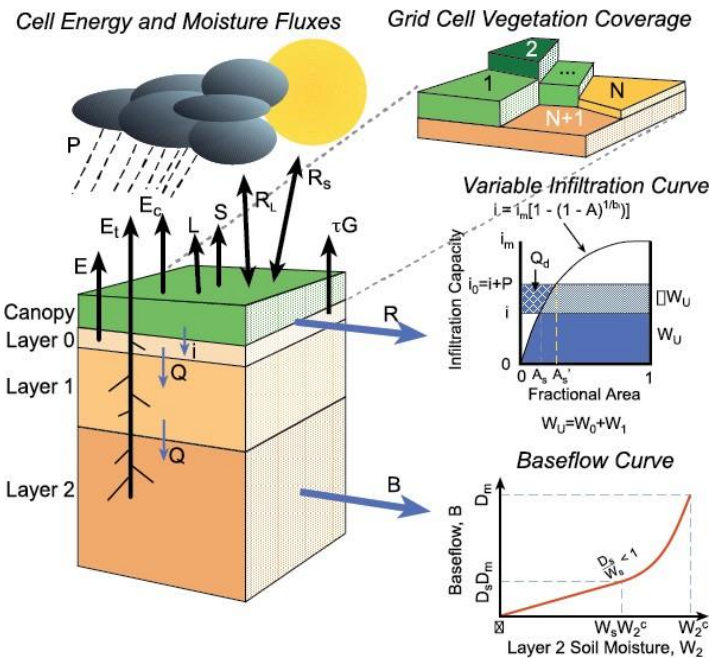


Figura 3.2. Diagrama esquemático de los componentes del modelo VIC
(Fuente: http://vic.readthedocs.org/.)

2.3 SPC de Largo Plazo (modelo conceptual)

El SPC de Largo Plazo (periodo abril-marzo) está basado en la respuesta esperada de una cuenca ante un conjunto de escenarios meteorológicos dada su condición inicial. Conceptualmente se divide en 2 etapas:

2.3.1 Etapa I (modelo conceptual Largo Plazo)

Representar de la mejor forma posible, a través de la modelación de los procesos físicos, las condiciones iniciales de una cuenca en la fecha que se desea inicializar un pronóstico. En particular, se busca que los modelos logren representar con la mayor exactitud posible el caudal observado en cada cuenca, suponiendo con esto que otras variables de estado, como la humedad presente en el suelo, o las condiciones del manto nival quedan bien representadas. Esta etapa es el resultado del buen desempeño de los procesos previos *inicialización* y *post procesamiento* de los caudales de corto plazo. La condición inicial es muy importante para obtener proyecciones que incorporen la realidad de la cuenca al momento de inicializar el pronóstico. Por ejemplo, la respuesta de una cuenca a una temporada húmeda no es la misma si es que las condiciones en el momento de la cuenca son más secas o húmedas. En el primer caso, el suelo tendrá una capacidad de almacenamiento mayor, y la respuesta hidrológica sería de menor en magnitud; en el segundo caso, al tener un suelo más saturado, las crecidas que se generarían tenderían a ser mayores.

2.3.2 Etapa II (modelo conceptual Largo Plazo)

Utilizar el modelo hidrológico para estimar cuál sería la respuesta de la cuenca bajo distintos escenarios meteorológicos. En general, estos escenarios corresponden a condiciones históricas ocurridas en el área de estudio, de forma que se simulan condiciones factibles de ocurrir. Esta técnica es conocida como *Ensemble Streamflow Prediction* y entrega como resultado un conjunto de caudales. Lo anterior significa que, para un determinado pronóstico, se tendrá una distribución de caudales que podrían esperarse. De esta forma, permite definir rangos esperables de valores, y una probabilidad asociada de que escurra al menos ese volumen en el periodo entre la fecha de inicialización y el horizonte de pronóstico. Así, valores de pronóstico bajos tendrán una alta probabilidad de excedencia (ya que existen dentro del conjunto de pronósticos muchos valores superiores a ellos), y valores altos tendrán una baja probabilidad de excedencia (existirán pocos valores que los superen en magnitud). Es importante mencionar que, para la estimación de los escenarios, resulta imprescindible contar con series extensas de caudales históricos y que cuya procedencia será detallada en el siguiente capítulo llamado homologación de caudales.

2.4 Homologación de caudales

El modelo hidrológico que utiliza el SPC fue calibrado considerando el registro de caudales observados. La longitud de registro de los caudales observados varía entre cuenca y cuenca, teniéndose en algunos casos información de hasta 20 años, mientras que en otras solo un par de años. Alternativamente, para todos los puntos de control incluidos en el SPC existen las denominadas estadísticas de caudales. Estas estadísticas tienen información de los últimos 60 años, pero a un intervalo temporal semanal. A pesar de esta menor resolución temporal, que agrega incertidumbre sobre la representación de las condiciones iniciales de la cuenca, esta información de caudales podría utilizarse tanto para inicializar los modelos hidrológicos para realizar pronósticos de largo plazo, como para evaluar los resultados de dichos pronósticos. Esto resulta particularmente útil, si se toma en cuenta la longitud de registro que tiene esta base de datos. Sin embargo, para poder utilizar la información de la estadística de caudales como complemento a los caudales observados, y extender la base de datos de información que se tiene, es necesario verificar que ambas fuentes de información responden al mismo fenómeno. Debido a que los modelos hidrológicos están calibrados con el objetivo de representar los caudales observados, no necesariamente lograrán representar adecuadamente los caudales estadísticos. Si bien, en teoría, ambas fuentes debieran ser equivalentes, pueden existir diferencias debido a los procedimientos en que los caudales son medidos o estimados. En algunos casos, los caudales observados son mediciones directas, mientras que los caudales estadísticos se obtienen en base a la generación eléctrica de la central asociada a un punto de control. En otros casos los caudales observados son obtenidos en base a ecuaciones de balance de múltiples términos hidrológicos. Considerando esto, con el fin de tener una base de datos más extensa sobre la que experimentar y estudiar metodologías para la mejora de los pronósticos de largo plazo, resulta crítico identificar entonces aquellos puntos donde los caudales observados y de la estadística efectivamente son intercambiables.

La metodología de trabajo sobre la que se comparan las series de caudales observados y estadísticos corresponde a una comparación visual y métrica de ambas series a través del sesgo porcentual (% Bias).

2.5 Series intercambiables

Se presenta en la **Tabla 3.1** las cuencas en las que efectivamente se puede usar la información de caudales estadísticos como un reemplazo de los caudales observados. Cabe destacar que, a pesar de esta similitud, en los casos donde se tenga información de caudales observados, se tenderá a utilizar esta información por sobre la información de caudales estadísticos.

Tabla 3.1. Series intercambiables

Punto de control	**Bias [%]**
Chacayes	-0,7
Sauzal*	11
Captación río Teno	4,9
Afluente a Embalse C. Rapel	3,4
El Paso	0,08
San Andrés	7
Rama Azufre	3,9
Afluentes Laguna Invernada	5,8
Afluentes Laguna Maule	-3,4
Hoya intermedia Colbún/ C.I. E.C. Colbún - Desagüe L.Invernada - L.Maule	-1,6
Hoya intermedia Pehuenche / C.I. BT Maule C.Pehuenche - L.Invernada - L.Maule*	12,6
Rucue	-0,6
C.I. BT. C.Isla - desagüe L.Maule	0,8
Captación Alto Polcura	-6
Polcura en BT C.Antuco	-2,8
Afluente L.Laja	4
Cuenca Intermedia Tucapel - Central Laja1	-70
Afluentes Embalse Ralco	1,8
Afluente río Huequecura	2,5
Cuenca intermedia Embalses Pangue – Angostura*	-3,5
Mampil	-0,1
Peuchén	12,5
Afluentes Lago Chapo	-4,7
Claro en S.Carlos + E.Las Garzas	4,6

* Cuencas con menor desempeño

A modo de ejemplo, se muestra la **Figura 3.3** que muestra la comparación de caudales observados y la estadística hidrológica para la cuenca definida por el punto de control “Afluentes Laguna Invernada”. En ella se observa el alto ajuste de los caudales observados y las series estadísticas.

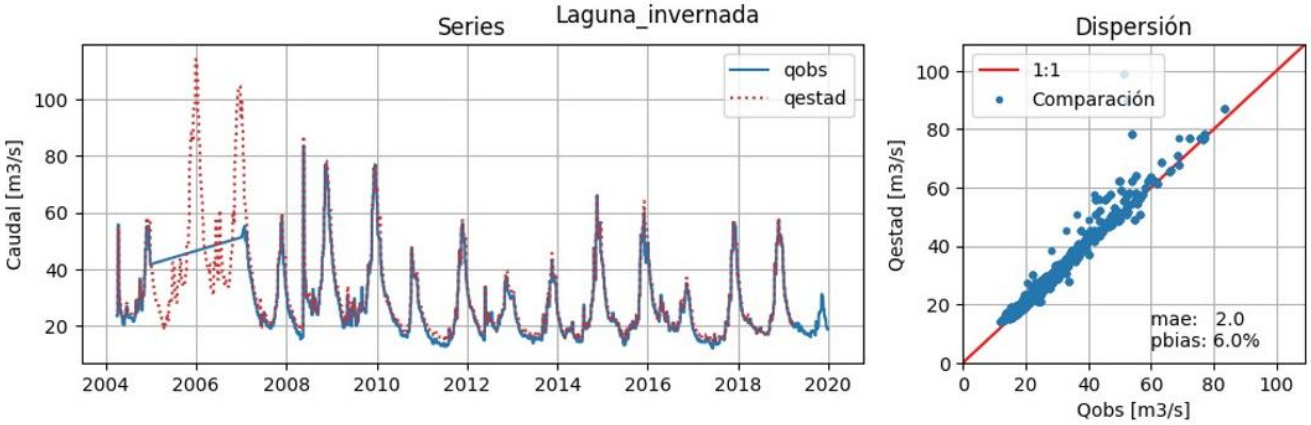


Figura 3.3. Series intercambiable punto de control “Afluentes Laguna Invernada”.

2.6 Series de validación

Se presenta en la **Tabla 3.2** las cuencas donde se tienen valores mensuales de caudales estadísticos. Esta agregación temporal es demasiado general para representar las condiciones hidrológicas de la cuenca, en el contexto del planteo de mejoras de pronósticos de largo plazo. Sin embargo, debido a la calidad de la información que presentan, serán utilizadas para evaluar las mejoras propuestas, a modo de validación.

Tabla 3.2. Series de validación

Punto de control	Bias [%]
Afluentes E. Melado	0,02
Rama Portillo	-8,7
Rama Tinguiririca	36
Rama Tricahue	15
Pilmaiquén	-6,8

A modo de ejemplo, se muestra la **Figura 3.4** que muestra la comparación de caudales observados y la estadística hidrológica para la cuenca definida por el punto de control “Rama Portillo”. Si bien en ella se observa cierta correspondencia entre los registros, no muestra una cantidad de datos tan robusta como las series intercambiables.

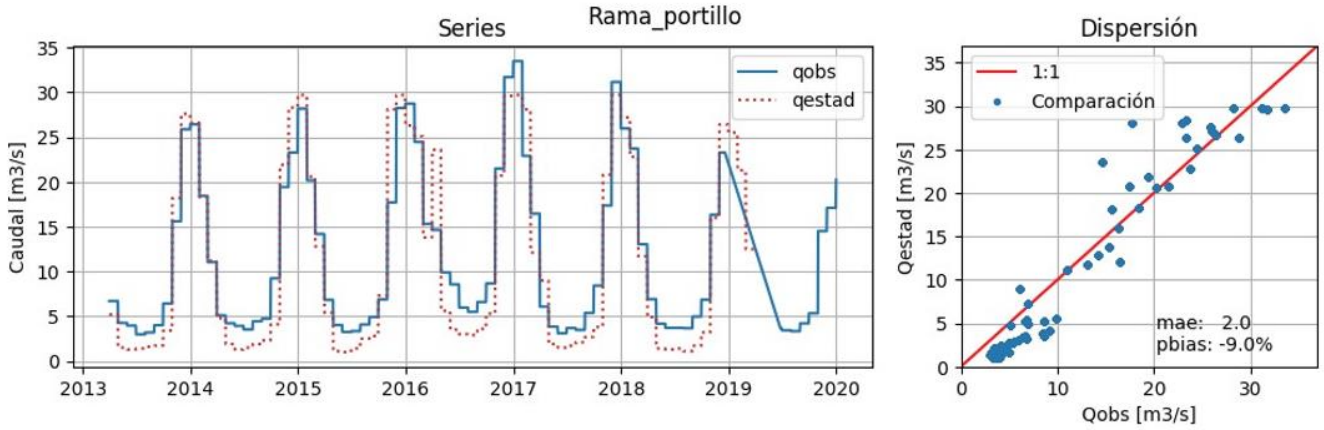


Figura 3.4. Serie de validación punto de control “Rama Portillo”

2.7 Series no intercambiables

Se presenta en la **Tabla 3.3** las cuencas donde a pesar de haber realizado esfuerzos de homologación entre los caudales observados y de la estadística, no es posible utilizar estos últimos como fuente alternativa ni para el planteamiento de mejoras, ni para su validación. Se proponen hipótesis respecto al por qué podría estar ocurriendo esto en cada punto.

Tabla 3.3. Series no intercambiables

Punto de control	Bias [%]
Alfalfal - Colorado	-5
Alfalfal - Olivares	44
C.I. Rama Laja C.Antuco	-6,7
C.I. BT C.Abanico L.Laja	-30
Cuenca Intermedia Tucapel - Central Laja1	35
C.I. entre Ralco y Pangue	-20
Pullinque	-55,1

A modo de ejemplo, se muestra la **Figura 3.5** que muestra la comparación de caudales observados y la estadística hidrológica para la cuenca definida por el punto de control “Pullinque”. No se observa una buena correlación entre ambas fuentes de información.

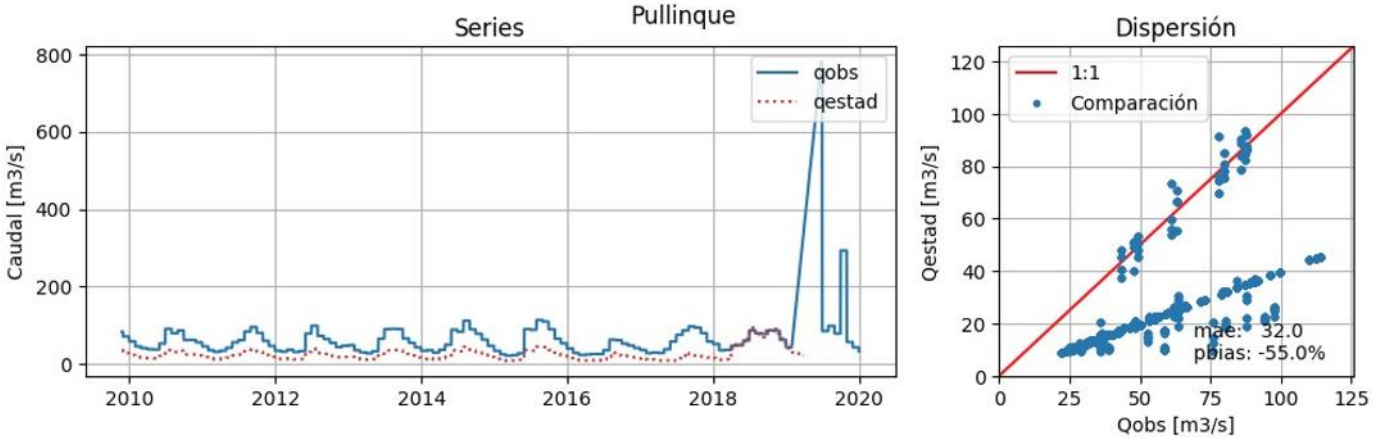


Figura 3.5. Serie no intercambiable punto de control “Pullinque”

2.8 Análisis de resultados homologación de caudales

La **Figura 3.6** presenta un gráfico circular sobre la distribución de resultados del proceso de homologación considerando 36 de los 39 PC utilizados en el SPC. Dos tercios de las cuencas presentan información que puede ser intercambiable, entre estadística hidrológica y observaciones con un cierto grado de confianza, aunque en 3 casos, esto se debe confirmar a medida que se vaya desarrollando el estudio. Adicionalmente, en el 17% de los casos la información de la estadística presenta una calidad de datos suficiente como para proveer un marco de validación de la información. Tras este estudio, se concluye que solo un 19% de los casos la estadística no es homologable a las observaciones, o bien, en algunos casos, no existe o no se ha logrado identificar.

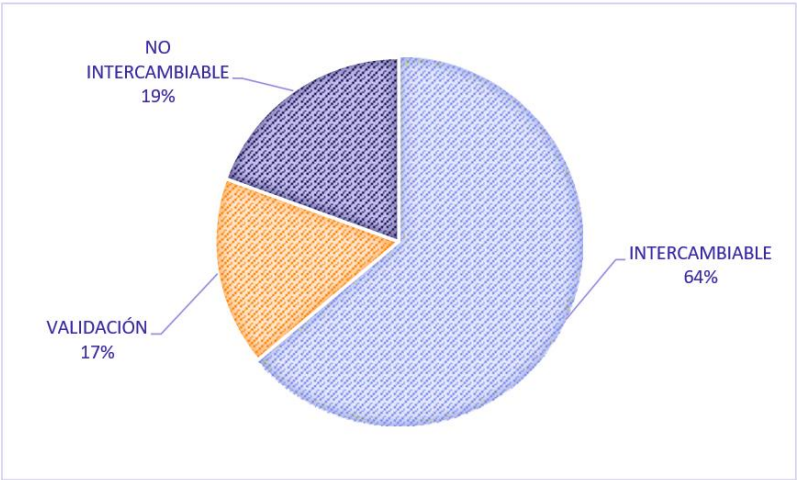


Figura 3.6. Resultado de series intercambiables

2.9 Post procesamiento

Se identificó de forma sistemática en los pronósticos de largo plazo la presencia de sesgos, tanto de subestimación como de sobrestimación, dependiendo de la fecha de inicialización y cuenca. Para corregir este problema se aplicó una técnica de post procesamiento denominada corrección por cuantiles. La metodología consiste en replicar las funciones de distribución de las observaciones, en base a realizar una transformación de los valores en base a las curvas de distribución acumuladas de los conjuntos de valores observados y simulados. Matemáticamente, se representa por

$$V'_{forecast} = F^{-1}_{cdf_{obs}}[F_{cdf_{sim}}(V_{forecast})]$$

Donde:

$V_{forecast}$: pronóstico original

$F_{cdf_{sim}}$: función de probabilidad acumulada definida por el conjunto de valores simulados de volumen de deshielo

$F^{-1}_{cdf_{obs}}$: la función inversa de probabilidad acumulada definida por el conjunto de valores observados de volumen de deshielo en un periodo consecuente a los valores simulados utilizados para definir la función anterior

$V'_{forecast}$: pronóstico ajustado en función del procedimiento.

Una muestra gráfica de la aplicación de esta técnica se presenta en la **Figura 3.7**. Con la curva roja se representa a la curva de distribución acumulada del modelo, con la curva azul se representa a la curva de distribución acumulada de las observaciones. En este ejemplo, se muestra como un valor simulado (V_{or}) de 2,5 sería corregido a un valor de 1,8 (V_{bc}), tras aplicar la técnica de corrección.

En la **Figura 3.7**, se muestran tres bandas de colores para representar los años más secos (color naranjo), años con un volumen normal (color blanco) y años más húmedos (color azul). En el caso de ejemplo, los volúmenes asociados a los años secos casi no sufren alteración, mientras que los de años húmedos si son corregidos significativamente. Esto es muy positivo, debido a que en la fase de diagnóstico se identificó en múltiples ocasiones sesgos en los volúmenes pronosticados en años húmedos. Este sesgo muy probablemente se encuentra asociado a la muestra de caudales utilizada en el proceso de calibración, que, en general, consideraba los años más recientes que presentan una tendencia a ser más secos.

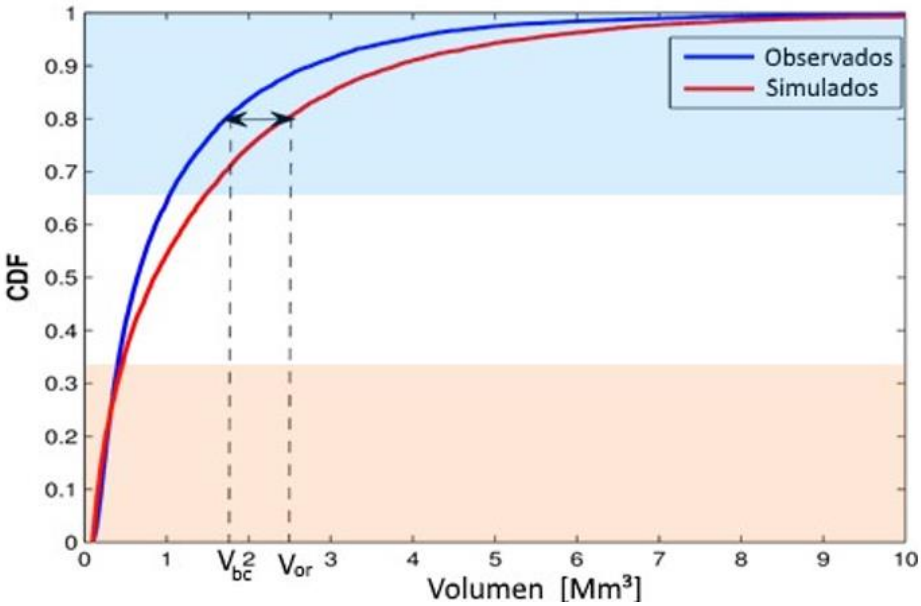


Figura 3.7. Corrección por cuantiles

Esta técnica de corrección se puede aplicar sobre todos y cada uno de los valores de cada ensemble de predicciones, para cada año, corrigiendo no solo los valores medianos de cada conjunto con los que se plantean las curvas de distribución acumulada, sino que toda la muestra de volúmenes de escurrimiento hasta el final de la temporada.

3. EVALUACIÓN METODOLOGÍA SPC – PERIODO ABRIL-MARZO

A diferencia de lo que ocurre en los pronósticos de corto plazo, donde lo que se busca es predecir el caudal exacto que ocurrirá en un horizonte de 2 semanas, en los pronósticos de largo plazo, dado su planteamiento estocástico, la variable que se busca predecir corresponde al volumen de escurrimiento total. Evaluar la similitud exacta de caudal a caudal carece de sentido, ya que la fuente de predictibilidad no es atmosférica si no que hidrológica. Es más, en esta primera instancia de evaluación, la única variable de evaluación a considerar será el volumen total de escurrimiento hasta el final de la temporada, como único horizonte de pronóstico. Dicha variable se define como la acumulación total de volumen escurrido entre la fecha de inicialización del pronóstico y la fecha considerada como final de la temporada.

La **Figura 4.1** presenta un ejemplo de los resultados del pronóstico de largo plazo para la cuenca de Ralco. Esta figura busca ejemplificar el impacto que tiene una adecuada representación de las condiciones hidrológicas de la cuenca. En la figura se muestran los resultados del pronóstico teniendo como fecha de inicialización 1 de julio de 2004 y 1 de julio de 2005, lo que corresponden a un año hidrológico seco y a uno húmedo, respectivamente. A partir de la fecha de inicialización, ambos modelos son forzados con el mismo conjunto de escenarios históricos. Sin embargo, las precipitaciones previas a la fecha de inicialización, que generaron un manto nival que escurre como caudal posteriormente, producen grandes diferencias. El caudal medio en el año hidrológico 2004/05 alcanzó cerca de los 100 m³/s, mientras que en el año hidrológico 2005/06 el caudal medio fue de aproximadamente 200 m³/s. Además, los valores de las crecidas simuladas también difieren significativamente, a pesar de ser la misma información meteorológica utilizada en ambos casos.

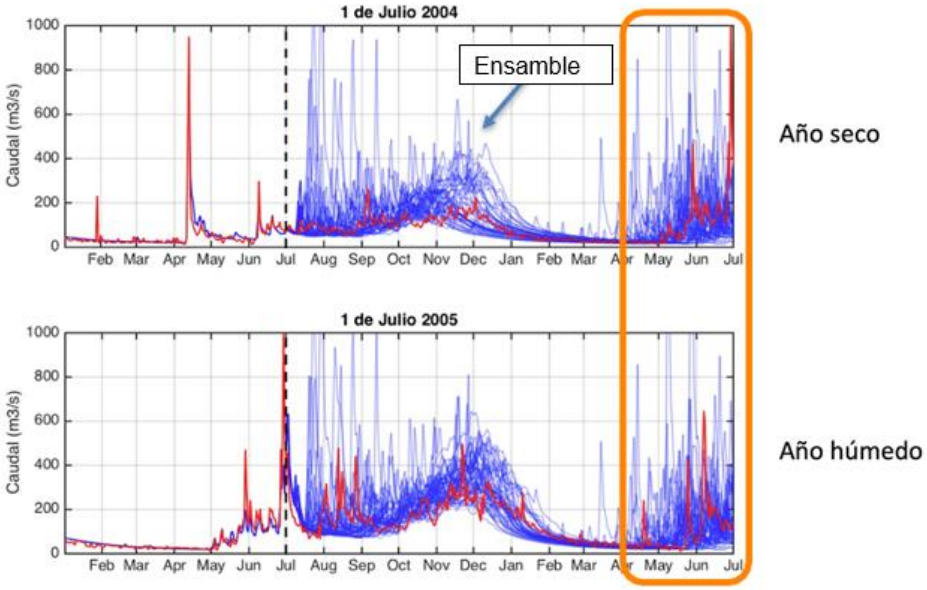


Figura 4.1. Ejemplo de los resultados de escenarios de caudal pronosticados para dos tipos de año hidrológico distintos, bajo la aplicación del método ESP usando como escenarios las condiciones históricas.

3.1 Diagnóstico de capacidad predictiva del SPC en horizontes de largo plazo (sin post procesamiento)

Se utilizó como herramienta de evaluación los índices de desempeño que se presentan en la **Tabla 4.1**. Dichas métricas son usualmente utilizadas en la literatura en lo referente a evaluación de pronósticos realizados con la técnica *ESP*. Dado que las predicciones de ensemble cuentan con un rango de valores como predicción, se establecen algunos términos de referencia para referirse a su habilidad:

Precisión: hace referencia al error que muestra un pronóstico respecto al valor observado, con base en el valor mediano del conjunto de pronósticos. Así, un pronóstico cuya mediana tiene poco error respecto al valor observado, se reconoce como un pronóstico con alta precisión, y aquel con mucho error, como un pronóstico de baja precisión.

Confiabilidad: hace referencia a la variabilidad del ensemble.

Cada uno de los índices de la **Tabla 4.1** apunta a evaluar diferentes aspectos de los pronósticos realizados. Mientras que unos apuntan a la correlación que se da entre los valores, sin importar su magnitud o desviaciones (r), otros indicadores apuntan a los errores medios de los pronósticos respecto a las observaciones. Además, las ultima dos métricas enunciadas (CRPSS y α) entregan nociones sobre la confiabilidad del pronóstico en términos del rango de los pronósticos realizados en el ensemble.

Tabla 4.1. Métricas evaluación SPC Largo Plazo

Notación	Nombre	Ecuación	Interpretación
r	Coeficiente de correlación	$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(q_{m,i} - \overline{q_m}\right)(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(q_{m,i} - \overline{q_m}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(o_i - \bar{o})^2}}$	Métrica determinística que varía entre [-1, 1] con un valoróptimo de 1. Evalúa la asociación lineal entrepronóstico y observaciones independiente del promedio y la varianza de las distribuciones marginales.
$\%Bias$	Sesgo porcentual	$\%_{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(q_{m,i} - o_i)}{\sum_{i=1}^{N} o_i} * 100$	Métrica determinística con un valor óptimo de 0. Mide ladiferencia entre la mediana de los pronósticos y las observaciones.
$RMSE$	Error cuadrático medio	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(q_{m,i} - o_i\right)^2}$	Métrica determinística que varía entre [0,∞) con un valor óptimo de 0

Notación	Nombre	Ecuación	Interpretación
$CRPSS$	Índice de habilidad de probabilidad continua clasificada	$CRPSS = 1 - \frac{CRPS_{fcst}}{CRPS_{estad}}$ $CRPS = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\int_{-\infty}^{\infty}[F(q) - F_o(q)]^2 dq$ $F_o(q) = \begin{cases} 0, & q < o \\ 1, & q \geq o \end{cases}$	Métrica probabilística que varía que entre (-∞,1] con unvalor óptimo de 1. Mide la habilidad de CRPS relativo a un pronóstico de referencia (Hersbach, 2000). CRPS cuantifica la diferencia entre la distribución acumulada (cdf) de un pronóstico (F) y la correspondiente CDF de observaciones (FO).
α	Índice de confiabilidad	$\alpha = 1 - 2[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\lvert P_i(o_i) - U(o_i)\rvert]$	Métrica probabilística que varía entre [0,1]. Cuantifica la cercanía entre la CDF empírica de muestras de valores p con la CDF de una distribución

La **Tabla 4.2** presenta un cuadro resumen de las principales observaciones y conclusiones de cada cuenca. A modo general, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Cuencas de tipo pluvial serán enfocadas en identificar combinaciones de tiempo de inicialización y horizontes de pronóstico que entreguen resultados válidos.
- Cuencas que tienen un régimen nival tienen en general buena capacidad predictiva
- Se identificó una tendencia a la sub/sobre estimación de valores de años hidrológicos húmedos, asociados principalmente a la base de información utilizada para calibrar cada modelo. La información tiende a contener solo años hidrológicos secos y normales, al ser de periodos recientes comprendidos en la sequía presente en la zona central.
- Cuencas de regímenes mixtos de tipo nivo-pluvial y pluvio-nival presentan resultados variados y deben ser revisados caso a caso.

Tabla 4.2. Principales Resultados por punto de control SPC Largo Plazo

Cuenca	Descripción de observaciones
Chacayes	Ciclo de deshielo presenta desfase temporal
	Buena capacidad predicción antes de la temporada deshielo
	Tiene sesgo menor de subestimación y sobrestimación en deshielos tempranos y tardíos respectivamente
Sauzal	Cuenca identificada como no homologable, ya que la estadística presentaba características que no permitieron su uso como reemplazo de información
Teno	Cuenca no tiene ponderación en SPC
	Tiene una subestimación constante y sistemática

Cuenca	Descripción de observaciones
	Existe buena correlación entre los volúmenes observados y pronosticados
Rapel	Sobrestimaciones constantes debido a dinámicas de la cuenca
	Oportunidades de mejora debido a lo sistemático de los sesgos
	Podría existir una componente estructural inherente al modelo
El Paso	Caudales observados de base de modelo sesgados a caudales bajos
	Modelo no tiene capacidad predictiva en otro tipo de años hidrológicos
	Se propone un post procesamiento para corrección de sesgo
	Alternativamente, se propone el desarrollo de un modelo específico para PLP
San Andrés	Caudales observados de base de modelo sesgados a caudales bajos
	Modelo no tiene capacidad predictiva en otro tipo de años hidrológicos
	Se propone un post procesamiento para corrección de sesgo
	Alternativamente, el desarrollo de un modelo específico para PLP
Rama Azufre	Subestimación constante, con mayor énfasis en años secos
	Sobrestimación del último mes de la temporada
	Se buscarán técnicas de corrección sujetas a tipo de año hidrológico
Laguna Invernada	Presenta buena capacidad predictiva en general
	Caudales de años húmedos levemente subestimados
	Se buscarán técnicas de corrección sujetas a tipo de año hidrológico
Laguna del Maule	Buena capacidad predictiva en general
	Podría eventualmente revisarse subestimación en parte tardía de la temporada de deshielo
Hoya intermedia Colbún	Buena capacidad predictiva en general
	Podría eventualmente revisarse la sobreestimación presente en los meses de deshielo temprano
Hoya intermedia Pehuenche	Buena capacidad predictiva en general
	Presenta sesgos sistemáticos de sub y sobrestimación en deshielo
Rucúe	Análisis posteriores, si es que se realizan, se focalizará en distintos horizontes de pronósticos. Dichos horizontes de pronóstico se limitarán en función de la predictibilidad de la precipitación
Isla	Buena capacidad predictiva en general
	Presenta sub y sobreestimaciones leves los periodos temprano y tardío de deshielo respectivamente
	Problemas identificados asociados principalmente a años húmedos
Alto Polcura	No presenta mayores problemas
	Se considera un modelo satisfactorio y, por tanto, no se priorizará dentro de las mejoras a desarrollar
Antuco	En general buen rango, aunque con alta variabilidad en los sesgos
	Presenta sesgos sistemáticos en los últimos meses los que serán revisados
Laguna Laja	En general presenta resultados aceptables, aunque con algo de sesgo
	Buena amplitud del ensemble

Cuenca	Descripción de observaciones
Laja1	No es posible realizar un pronóstico de largo plazo por falta de fuentes de predictibilidad
	Análisis posteriores, si es que se realizan, se focalizaran en distintos horizontes de pronósticos
	Dichos horizontes de pronóstico se limitarán en función de la predictibilidad de la precipitación
Ralco	En general presenta un buen desempeño
	Existe una leve subestimación sistemática en los periodos de deshielo
	Existen algunos puntos que escapan del comportamiento general que deben ser revisados en detalle.
Huequecura	No es posible realizar un pronóstico por falta de fuentes de predictibilidad
	Análisis posteriores, si es que se realizan, se focalizaran en distintos horizontes de pronósticos
	Dichos horizontes de pronóstico se limitarán en función de la predictibilidad de la precipitación
Angostura	Modelo de gran variabilidad debido a régimen primariamente pluvial
	A pesar de lo anterior, componente nival entrega un grado de predictibilidad
	Presenta sesgos de subestimación de valores, que pueden ser eventualmente corregidos
Mampil	A pesar de ser una cuenca pluvial, presenta predictibilidad
	Tiene algunos sesgos que se buscará remover
	Los ensemble de predicciones presentan un rango que ayuda a la capacidad predictiva
Peuchén	Serie estadística mantiene una relación con observaciones, pero no es exactamente igual
	Se generan problemas de subestimación de los valores pronosticados
	Dicha subestimación en el caso de no poder unificar la fuente de caudales observados puede ser corregida por medio de técnicas de corrección de sesgo para obtener valores razonables
Canutillar	Carece de base física para realizar pronósticos de largo plazo
	Esfuerzos se enfocarán en revisar horizontes de pronóstico válido para puntos de inicialización

3.2 Aplicación de técnicas de post procesamiento

Se planteó el desarrollo de un proceso de validación del tipo Leave-one-out para evaluar el potencial efecto de un sobreajuste debido a la metodología utilizada. Esta técnica de validación consiste en excluir del grupo de calibración de las observaciones y su correspondiente simulación al momento de establecer las funciones de transferencia. Posteriormente, se utilizan dichas funciones para evaluar la capacidad correctiva del modelo al comparar el valor corregido mediante dichas funciones con la observación. Este proceso se realiza de forma iterativa para cada una de las observaciones disponibles. Se aplica tanto en las cuencas homologables como no homologables. Con el fin de simplificar la evaluación del desempeño de esta técnica, se plantean solamente tres índices de evaluación. Estos índices apuntan a evaluar distintos ámbitos de la corrección y se describen en la **Tabla 4.4**.

Tabla 4.4. Principales Resultados por punto de control SPC Largo Plazo

Índice de evaluación	**Fórmula**	**Interpretación**
Confiabilidad	$Confiabilidad = 100 * \frac{\sum_1^n \lvert I_n \rvert}{n}$ [%] $I_n \begin{cases} 1, si\ V_{min} < V_{obs} < V_{max} \\ 0, \quad de\ lo\ contrario \end{cases}$ n es el número de pronósticos que se tienen para una fecha de inicialización	Un valor de 100% representa una confiabilidad perfecta, donde el rango de valores pronosticado siempre incluyó, en todos los pronósticos retrospectivos calculados, el valor efectivamente observado. Un valor de 0% se interpreta como que el rango de pronósticos no logra en ninguna ocasión definir adecuadamente un intervalo que incorpore el valor efectivamente observado.
Sesgo Porcentual (% Bias)	$\%_{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(q_{m,i} - o_i)}{\sum_{i=1}^{N} o_i} * 100$ Donde: $q_{m,i}$ es la mediana del ensemble del pronóstico i o_i es la observación efectiva en el pronóstico i.	El sesgo porcentual es una métrica determinística con un valor óptimo de 0. Mide la diferencia media entre la mediana de los pronósticos y sus respectivas observaciones y muestra la tendencia media hacia donde se inclina la mediana de los pronósticos con respecto a sus observaciones, y tiene por tanto un signo asociado. En el caso de ser positivo, se interpreta como que en promedio hay una sobrestimación de los valores del modelo. Por el contrario, si el valor es negativo, se interpreta como que existe una subestimación
CRPSS (puntuación de habilidad de probabilidad continua clasificada)	$CRPSS = 1 - \frac{CRPS_{fcst}}{CRPS_{estad}}$ $CRPS = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\int_{-\infty}^{\infty}[F(q) - F_o(q)]^2 dq$ $F_o(q) = \begin{cases} 0, & q < o \\ 1, & q \geq o \end{cases}$	Métrica probabilística que varía que entre (-∞,1] con un valor óptimo de 1. Mide la habilidad de un pronóstico relativo a un pronóstico de referencia. Su cálculo se basa en la comparación de los valores CRPS (puntuación de probabilidad clasificada continua), índice que busca cuantificar la diferencia entre la distribución acumulada (CDF) de un pronóstico (F) y la correspondiente CDF de observaciones (F_O). Los dos valores de CRPS a comparar son calculados en base a los pronósticos del sistema y a un pronóstico de referencia, que en este caso corresponde a la estadística hidrológica de caudales.

En las **Tabla 4.5**, **Tabla 4.6** y **Tabla 4.7** se presentan los resultados del índice de confiabilidad, de sesgo porcentual y de CRPSS para todas los modelos, a lo largo de todos los periodos de inicialización. Estas tablas presentan una excelente perspectiva de los beneficios o perjuicios que se producen al aplicar la técnica de post procesamiento propuesta. A modo de análisis general, en la **Tabla 4.5** de los valores de confiabilidad se muestran aumentos sostenidos en todas las cuencas en casi todos los meses. En particular, la mayoría de las cuencas nivales, nivo-pluviales o nivo-glaciales, mejoran el indicador de confiabilidad en el trimestre de octubre-diciembre, periodo identificado como el inicio del período de deshielo. Este trimestre fue identificado como uno de los periodos más débiles en lo referente al desempeño de este indicador. En el caso de los sesgos porcentuales que se muestran en la **Tabla 4.6**, las técnicas de post procesamiento remueven efectivamente - en general - el sesgo medio porcentual, dejándolo casi en neutro en la mayoría de los casos. En la fase de diagnóstico se identificó una tendencia a una subestimación en las cuencas del sector geográfico centro (Maipo, Cachapoal, Tinguiririca) y una sobrestimación en las cuencas de Maule y Laja. Es posible especular que estos sesgos se encuentran relacionados a sesgos de las forzantes meteorológicas, debido a su distribución espacial. En algunos reducidos casos, en cuencas y meses particulares, el proceso de validación demuestra que la capacidad de corrección no es tan efectiva como se muestra en la **Tabla 4.6**. En general, este problema ocurre en cuencas no homologables o cuyos modelos no están asociados a regímenes hidrológicos de tipo natural (Rapel y Teno, por ejemplo). En la **Tabla 4.7** se muestran los valores de CRPSS que presentan una evolución temporal desde un impacto negativo a un impacto positivo. De esta tabla, es posible concluir que los pronósticos del primer trimestre sin post procesamiento representan una mejor proyección que los postprocesados. Sin embargo, se observan mejoras sostenidas en todas las cuencas en el periodo de deshielo. La disminución a principios de año de este índice guarda relación con los efectos que genera la técnica de corrección por cuantiles sobre el conjunto sin procesar, que, al tener un rango relativamente amplio, termina replicando el conjunto de observaciones con el que se desarrolló la función de corrección. Sin embargo, los pronósticos originales sin post procesamiento sí tienen una fuente menor de predictibilidad, asociada a almacenamientos subterráneos. Esto se traduce en los rangos más acotados de cada ensemble, lo que a su vez conlleva a los mejores valores de desempeño del CRPSS.

Tabla 4.5. Tabla resumen de los resultados del índice de confiabilidad para la fase de diagnóstico y los resultados post procesados mediante la técnica de corrección.

Cuenca	Categoría	CONFIABILIDAD - FASE DIAGNOSTICO												Cuenca	CONFIABILIDAD - POST PROCESADA											
		ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR		ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Alfalfal Olivares	no homologable	100%	100%	79%	58%	68%	11%	5%	5%	0%	0%	25%	35%	Alfalfal Olivares	90%	90%	90%	86%	76%	67%	67%	57%	43%	38%	71%	52%
Alfalfal Colorado	no homologable	89%	95%	58%	53%	42%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	25%	Alfalfal Colorado	86%	90%	90%	86%	81%	71%	52%	48%	43%	67%	52%	57%
Chacayes	homologable	100%	100%	100%	98%	98%	72%	43%	34%	36%	40%	35%	21%	Chacayes	100%	100%	100%	98%	85%	72%	55%	36%	42%	55%	44%	58%
Sauzal	no homologable	100%	100%	100%	100%	100%	70%	0%	10%	20%	9%	36%	45%	Sauzal	91%	91%	91%	91%	73%	82%	82%	55%	36%	64%	45%	55%
Teno	homologable	88%	88%	84%	88%	88%	80%	30%	20%	22%	26%	48%	52%	Teno	100%	100%	96%	90%	90%	74%	76%	68%	46%	40%	52%	50%
Rapel	homologable	98%	98%	94%	77%	45%	30%	32%	34%	26%	8%	18%	69%	Rapel	100%	100%	100%	92%	100%	85%	75%	72%	60%	45%	65%	57%
El Paso	homologable	30%	34%	25%	19%	9%	2%	4%	0%	4%	2%	4%	0%	El Paso	91%	100%	100%	94%	91%	70%	36%	34%	23%	26%	35%	31%
San Andres	homologable	28%	24%	18%	16%	6%	4%	4%	4%	2%	4%	15%	2%	San Andres	100%	98%	98%	94%	86%	72%	62%	46%	36%	38%	29%	10%
Rama Portillo	homologable	90%	90%	80%	82%	73%	29%	4%	6%	6%	12%	64%	18%	Rama Portillo	96%	96%	96%	91%	79%	68%	49%	42%	42%	38%	75%	78%
Rama Tinguiririca	homologable	65%	73%	54%	54%	33%	13%	4%	4%	8%	6%	24%	20%	Rama Tinguiririca	96%	96%	96%	93%	83%	76%	57%	43%	37%	40%	38%	40%
Rama Tricahue	homologable	92%	94%	85%	88%	81%	35%	13%	13%	8%	17%	37%	22%	Rama Tricahue	96%	96%	96%	93%	85%	80%	59%	46%	28%	36%	46%	50%
Rama Azufre	homologable	92%	92%	90%	88%	84%	34%	22%	16%	18%	27%	40%	10%	Rama Azufre	100%	100%	100%	96%	82%	66%	43%	33%	33%	29%	52%	69%
Laguna Invernada	homologable	90%	90%	82%	78%	82%	73%	35%	25%	31%	57%	62%	78%	Laguna Invernada	100%	100%	98%	96%	94%	88%	80%	65%	63%	65%	78%	80%
Laguna Maule	homologable	90%	88%	90%	88%	82%	72%	50%	38%	40%	20%	19%	10%	Laguna Maule	96%	98%	96%	88%	84%	80%	66%	60%	42%	40%	35%	42%
Embalse Melado	homologable	92%	90%	94%	98%	87%	73%	60%	63%	60%	65%	53%	45%	Embalse Melado	98%	98%	96%	98%	92%	85%	77%	55%	68%	71%	65%	53%
Claro Y Garzas	homologable	80%	86%	90%	86%	80%	65%	37%	41%	35%	45%	39%	49%	Claro Y Garzas	100%	100%	98%	90%	86%	69%	45%	49%	53%	63%	55%	55%
Isla	homologable	88%	90%	84%	92%	90%	72%	54%	28%	18%	12%	21%	50%	Isla	100%	100%	100%	94%	90%	86%	82%	64%	60%	42%	56%	56%
Hi Pehuenche	homologable	86%	88%	78%	84%	80%	69%	59%	37%	29%	25%	32%	54%	Hi Pehuenche	100%	100%	98%	96%	92%	80%	69%	55%	53%	43%	42%	42%
Hi Colbun	homologable	94%	92%	96%	92%	78%	55%	37%	39%	41%	24%	42%	66%	Hi Colbun	100%	100%	100%	100%	98%	78%	71%	55%	59%	63%	62%	72%
Laguna Laja	homologable	88%	92%	88%	86%	82%	71%	59%	63%	53%	45%	64%	70%	Laguna Laja	100%	100%	94%	94%	96%	88%	88%	80%	84%	76%	72%	66%
Antuco	homologable	92%	94%	96%	90%	78%	64%	62%	72%	80%	46%	27%	27%	Antuco	100%	100%	100%	94%	90%	82%	74%	76%	84%	72%	71%	79%
Alto Polcura	homologable	88%	92%	92%	94%	94%	76%	74%	78%	72%	38%	52%	65%	Alto Polcura	100%	100%	100%	96%	96%	84%	76%	72%	78%	70%	73%	79%
Rama Laja	no homologable	67%	33%	33%	33%	33%	67%	0%	0%	0%	0%	67%	0%	Rama Laja	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%
Abanico	no homologable	85%	85%	85%	77%	69%	77%	69%	77%	77%	23%	15%	38%	Abanico	81%	75%	81%	75%	75%	75%	69%	56%	56%	56%	56%	50%
Rucue	homologable	13%	10%	8%	23%	42%	46%	60%	65%	75%	71%	74%	77%	Rucue	96%	96%	96%	96%	96%	86%	86%	70%	60%	60%	69%	65%
Ralco	homologable	62%	64%	74%	81%	85%	87%	81%	75%	79%	72%	67%	77%	Ralco	100%	100%	98%	98%	94%	87%	89%	79%	81%	75%	67%	81%
Angostura	homologable	76%	78%	72%	62%	64%	46%	56%	26%	30%	30%	27%	65%	Angostura	100%	100%	92%	98%	94%	84%	90%	62%	66%	56%	63%	73%
Huequecura	homologable	94%	96%	100%	100%	98%	96%	80%	44%	28%	58%	98%	98%	Huequecura	100%	100%	100%	100%	98%	94%	100%	94%	86%	84%	100%	98%
Mampil	homologable	78%	82%	72%	82%	82%	82%	82%	82%	88%	82%	83%	54%	Mampil	100%	100%	100%	100%	94%	94%	96%	88%	70%	58%	69%	69%
Peuchen	homologable	2%	2%	0%	2%	0%	0%	2%	4%	18%	4%	73%	35%	Peuchen	100%	100%	96%	94%	86%	84%	70%	48%	56%	48%	42%	40%
Pullinque	no homologable	89%	89%	89%	89%	100%	100%	100%	100%	100%	89%	78%	89%	Pullinque	82%	82%	82%	82%	82%	82%	82%	73%	64%	64%	73%	73%
Pilmaiquen	homologable	83%	96%	91%	96%	91%	89%	92%	81%	85%	57%	76%	53%	Pilmaiquen	100%	98%	98%	98%	93%	89%	91%	80%	80%	81%	82%	53%
Canutillar	homologable	86%	84%	90%	88%	94%	98%	98%	80%	84%	84%	67%	63%	Canutillar	100%	100%	100%	98%	100%	100%	100%	96%	96%	90%	75%	65%

Tabla 4.6. Tabla resumen de los resultados del índice de sesgo porcentual para la fase de diagnóstico y los resultados post procesados mediante la técnica de corrección.

Cuenca	Categoría	SESGO PORCENTUAL - FASE DIAGNOSTICO												Cuenca	SESGO PORCENTUAL - POST PROCESADA											
		ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR		ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Alfalfal Olivares	no homologable	-35%	-39%	-41%	-44%	-43%	-40%	-39%	-39%	-37%	-31%	-17%	14%	Alfalfal Olivares	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	2%
Alfalfal Colorado	no homologable	-27%	-30%	-31%	-33%	-35%	-35%	-34%	-34%	-31%	-28%	-20%	-3%	Alfalfal Colorado	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Chacayes	homologable	-12%	-12%	-13%	-11%	-9%	-11%	-12%	-14%	-15%	-10%	5%	16%	Chacayes	7%	7%	4%	3%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Sauzal	no homologable	-13%	-13%	-14%	-19%	-26%	-25%	-24%	-23%	-21%	-18%	-4%	8%	Sauzal	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%	1%	1%	0%	0%
Teno	homologable	-5%	1%	-8%	-14%	-22%	-34%	-50%	-51%	-22%	3%	-6%	2%	Teno	52%	57%	23%	20%	9%	8%	5%	6%	5%	4%	4%	5%
Rapel	homologable	82%	89%	98%	77%	86%	85%	81%	60%	67%	94%	63%	-2%	Rapel	42%	48%	22%	19%	9%	12%	14%	10%	12%	9%	7%	4%
El Paso	homologable	-49%	-47%	-49%	-52%	-55%	-56%	-50%	-60%	-64%	-67%	-65%	-12%	El Paso	15%	9%	7%	5%	4%	4%	3%	12%	11%	13%	12%	19%
San Andres	homologable	-41%	-49%	-52%	-52%	-51%	-50%	-45%	-34%	-48%	-54%	-28%	110%	San Andres	10%	11%	8%	5%	4%	4%	3%	5%	11%	6%	6%	14%
Rama Portillo	homologable	-5%	-5%	-4%	-15%	-20%	-20%	-18%	-24%	-25%	-23%	-7%	11%	Rama Portillo	6%	6%	3%	3%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0%
Rama Tinguiririca	homologable	-2%	3%	-1%	-15%	-18%	-19%	-14%	-19%	-16%	-11%	-3%	7%	Rama Tinguiririca	8%	9%	6%	4%	3%	2%	2%	2%	2%	2%	1%	1%
Rama Tricahue	homologable	1%	8%	4%	-12%	-18%	-18%	-18%	-24%	-19%	-12%	0%	4%	Rama Tricahue	7%	8%	5%	3%	2%	2%	2%	2%	1%	2%	1%	0%
Rama Azufre	homologable	-30%	-33%	-33%	-33%	-31%	-30%	-27%	-25%	-24%	-14%	5%	19%	Rama Azufre	6%	6%	3%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%
Laguna Invernada	homologable	-12%	-12%	-12%	-15%	-15%	-14%	-12%	-12%	-9%	-1%	1%	2%	Laguna Invernada	7%	8%	5%	4%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	0%
Laguna Maule	homologable	-7%	-6%	-1%	-1%	3%	5%	6%	7%	6%	12%	17%	31%	Laguna Maule	6%	7%	5%	4%	4%	1%	2%	4%	2%	2%	2%	3%
Embalse Melado	homologable	27%	28%	26%	21%	18%	28%	42%	35%	32%	139%	124%	56%	Embalse Melado	20%	19%	11%	7%	3%	2%	2%	3%	2%	1%	2%	3%
Claro Y Garzas	homologable	42%	45%	41%	31%	33%	34%	25%	20%	11%	11%	1%	6%	Claro Y Garzas	14%	14%	10%	7%	5%	3%	3%	3%	2%	2%	3%	3%
Isla	homologable	-3%	-6%	-6%	-10%	-10%	-9%	-10%	-16%	2%	25%	22%	6%	Isla	14%	15%	10%	7%	3%	2%	1%	2%	3%	3%	2%	2%
Hi Pehuenche	homologable	-5%	-7%	-6%	-8%	-9%	-9%	-9%	-12%	-1%	17%	9%	0%	Hi Pehuenche	18%	18%	11%	9%	4%	4%	3%	3%	4%	2%	1%	2%
Hi Colbun	homologable	14%	16%	17%	18%	17%	19%	23%	18%	17%	29%	20%	11%	Hi Colbun	19%	16%	9%	6%	4%	3%	3%	3%	4%	3%	3%	2%
Laguna Laja	homologable	-2%	0%	3%	5%	9%	14%	19%	13%	14%	15%	3%	4%	Laguna Laja	10%	9%	6%	4%	2%	2%	2%	2%	2%	1%	3%	3%
Antuco	homologable	0%	1%	7%	7%	12%	19%	20%	4%	0%	15%	17%	24%	Antuco	15%	14%	7%	5%	4%	4%	4%	3%	3%	2%	2%	3%
Alto Polcura	homologable	-6%	-4%	-2%	-4%	0%	4%	9%	-1%	-3%	11%	5%	6%	Alto Polcura	10%	9%	5%	3%	2%	2%	2%	2%	3%	2%	2%	2%
Rama Laja	no homologable	83%	86%	66%	49%	34%	28%	31%	33%	31%	20%	8%	0%	Rama Laja	5%	5%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%
Abanico	no homologable	31%	31%	22%	19%	17%	18%	14%	6%	-1%	-5%	-1%	4%	Abanico	37%	38%	35%	32%	27%	20%	14%	8%	5%	2%	1%	2%
Rucue	homologable	-38%	-37%	-36%	-32%	-26%	-25%	-17%	-12%	-5%	3%	0%	0%	Rucue	11%	11%	7%	8%	6%	6%	7%	8%	12%	16%	31%	8%
Ralco	homologable	-15%	-15%	-12%	-9%	-6%	-5%	-7%	-15%	-9%	0%	0%	4%	Ralco	10%	9%	5%	3%	2%	2%	2%	2%	1%	1%	1%	0%
Angostura	homologable	7%	5%	14%	17%	17%	18%	18%	25%	27%	31%	21%	7%	Angostura	17%	16%	11%	9%	5%	7%	4%	5%	6%	5%	6%	4%
Huequecura	homologable	-1%	-6%	2%	6%	6%	4%	30%	49%	48%	42%	3%	-24%	Huequecura	7%	7%	3%	4%	2%	2%	3%	3%	7%	8%	5%	1%
Mampil	homologable	-15%	-15%	-13%	-11%	-9%	-10%	-8%	-13%	-15%	-14%	-7%	9%	Mampil	6%	4%	3%	2%	2%	2%	2%	3%	3%	3%	3%	2%
Peuchen	homologable	-64%	-62%	-59%	-55%	-51%	-47%	-40%	-41%	-41%	-36%	-20%	9%	Peuchen	7%	4%	2%	2%	2%	2%	1%	2%	2%	2%	2%	3%
Pullinque	no homologable	19%	19%	9%	4%	-6%	-7%	-12%	-17%	-20%	-19%	-16%	-8%	Pullinque	16%	15%	14%	8%	3%	1%	1%	0%	1%	1%	1%	0%
Pilmaiquen	homologable	-7%	-3%	-2%	-1%	1%	1%	0%	-3%	-13%	-19%	-18%	-16%	Pilmaiquen	2%	1%	1%	1%	1%	1%	2%	2%	3%	2%	2%	2%
Canutillar	homologable	-18%	-17%	-17%	-18%	-21%	-25%	-30%	-25%	-18%	-19%	-17%	-16%	Canutillar	2%	2%	2%	2%	3%	4%	5%	7%	12%	10%	13%	17%

Tabla 4.7. Tabla resumen de los resultados del índice de CRPSS para la fase de diagnóstico y los resultados post procesados mediante la técnica de corrección

Cuenca	Categoría	CRPSS - FASE DIAGNOSTICO												Cuenca	CRPSS - POST PROCESADA											
		ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR		ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
Alfalfal Olivares	no homologable	0.75	0.66	0.53	0.27	-0.18	-0.71	-1.39	-2.02	-0.91	0.52	0.91	0.97	Alfalfal Olivares	0.76	0.71	0.70	0.71	0.68	0.68	0.68	0.61	0.56	0.81	0.95	0.97
Alfalfal Colorado	no homologable	0.79	0.74	0.68	0.53	0.17	-0.42	-1.51	-1.72	0.32	0.76	0.92	0.99	Alfalfal Colorado	0.87	0.87	0.85	0.84	0.83	0.77	0.68	0.59	0.85	0.96	0.98	0.99
Chacayes	homologable	0.81	0.78	0.77	0.71	0.62	0.50	0.33	0.38	0.70	0.92	0.98	0.99	Chacayes	0.26	0.21	0.33	0.47	0.53	0.57	0.55	0.62	0.80	0.92	0.98	0.99
Sauzal	no homologable	0.88	0.86	0.83	0.72	0.49	0.10	-1.18	-0.22	0.61	0.85	0.98	0.99	Sauzal	0.73	0.71	0.71	0.68	0.54	0.55	0.66	0.66	0.77	0.91	0.99	0.99
Teno	homologable	0.60	0.59	0.62	0.60	0.57	0.34	0.16	0.44	0.85	0.97	0.99	1.00	Teno	0.00	0.17	0.35	0.34	0.50	0.52	0.72	0.73	0.87	0.96	0.98	0.99
Rapel	homologable	0.59	0.57	0.55	0.51	0.44	0.31	0.48	0.73	0.87	0.91	0.97	0.99	Rapel	0.17	0.23	0.38	0.41	0.56	0.61	0.70	0.74	0.82	0.92	0.97	0.98
El Paso	homologable	0.48	0.43	0.20	-0.15	-0.56	-0.75	-0.62	-0.88	-0.47	0.33	0.78	0.92	El Paso	0.15	0.28	0.37	0.53	0.60	0.56	0.58	0.29	0.45	0.73	0.91	0.96
San Andres	homologable	0.55	0.37	0.04	-0.34	-0.57	-0.68	-0.56	-0.29	-0.60	0.15	0.84	0.88	San Andres	0.21	0.19	0.36	0.49	0.60	0.59	0.63	0.36	0.21	0.69	0.90	0.96
Rama Portillo	homologable	0.90	0.90	0.86	0.75	0.62	0.50	0.23	-0.89	-0.91	0.68	0.97	0.99	Rama Portillo	0.61	0.60	0.69	0.74	0.81	0.83	0.82	0.80	0.67	0.66	0.96	0.99
Rama Tinguiririca	homologable	0.87	0.86	0.80	0.71	0.56	0.48	0.10	-0.14	0.61	0.90	0.98	0.99	Rama Tinguiririca	0.65	0.63	0.70	0.76	0.81	0.83	0.83	0.78	0.71	0.68	0.92	0.98
Rama Tricahue	homologable	0.87	0.84	0.80	0.73	0.63	0.54	0.06	-0.35	0.70	0.93	0.99	0.99	Rama Tricahue	0.64	0.62	0.69	0.76	0.80	0.82	0.81	0.72	0.67	0.75	0.94	0.99
Rama Azufre	homologable	0.74	0.70	0.66	0.54	0.36	0.06	-0.07	0.05	0.53	0.89	0.98	0.99	Rama Azufre	0.34	0.32	0.45	0.50	0.62	0.67	0.65	0.64	0.80	0.94	0.99	1.00
Laguna Invernada	homologable	0.80	0.77	0.75	0.69	0.60	0.51	0.50	0.59	0.82	0.96	0.99	0.99	Laguna Invernada	0.51	0.44	0.48	0.49	0.62	0.69	0.76	0.76	0.86	0.94	0.99	0.99
Laguna Maule	homologable	0.83	0.82	0.81	0.77	0.69	0.61	0.54	0.61	0.81	0.92	0.97	0.98	Laguna Maule	0.65	0.61	0.60	0.58	0.55	0.58	0.58	0.57	0.70	0.89	0.96	0.98
Embalse Melado	homologable	0.76	0.76	0.78	0.79	0.71	0.38	0.11	0.67	0.93	0.94	0.97	0.99	Embalse Melado	0.49	0.52	0.62	0.66	0.72	0.73	0.72	0.62	0.80	0.97	0.98	0.99
Claro Y Garzas	homologable	0.72	0.69	0.70	0.66	0.52	0.28	0.15	0.63	0.90	0.96	0.98	0.99	Claro Y Garzas	0.59	0.58	0.63	0.63	0.65	0.65	0.46	0.53	0.76	0.90	0.94	0.97
Isla	homologable	0.77	0.76	0.76	0.73	0.66	0.61	0.57	0.56	0.80	0.93	0.98	0.99	Isla	0.34	0.30	0.43	0.48	0.60	0.71	0.77	0.76	0.87	0.94	0.99	0.99
Hi Pehuenche	homologable	0.75	0.74	0.74	0.72	0.66	0.55	0.54	0.65	0.86	0.96	0.98	0.99	Hi Pehuenche	0.35	0.32	0.43	0.46	0.60	0.62	0.68	0.72	0.87	0.97	0.99	0.99
Hi Colbun	homologable	0.78	0.78	0.78	0.76	0.72	0.54	0.43	0.72	0.90	0.95	0.98	0.99	Hi Colbun	0.34	0.35	0.51	0.54	0.62	0.58	0.61	0.71	0.85	0.95	0.97	0.99
Laguna Laja	homologable	0.83	0.83	0.84	0.83	0.79	0.60	0.38	0.78	0.93	0.98	0.99	0.99	Laguna Laja	0.51	0.53	0.61	0.61	0.60	0.59	0.60	0.78	0.92	0.97	0.98	0.99
Antuco	homologable	0.81	0.81	0.82	0.80	0.76	0.55	0.41	0.81	0.95	0.98	0.99	1.00	Antuco	0.38	0.46	0.61	0.58	0.54	0.49	0.52	0.73	0.91	0.98	0.99	0.99
Alto Polcura	homologable	0.83	0.82	0.84	0.84	0.82	0.70	0.57	0.79	0.92	0.97	0.99	1.00	Alto Polcura	0.51	0.51	0.60	0.66	0.67	0.63	0.61	0.72	0.90	0.96	0.98	0.99
Rama Laja	no homologable	0.39	0.35	0.42	0.49	0.56	0.33	-0.38	0.52	0.79	0.94	0.98	0.99	Rama Laja	0.78	0.76	0.76	0.86	0.77	0.72	0.87	0.97	0.97	0.97	0.99	0.99
Abanico	no homologable	0.80	0.77	0.76	0.70	0.60	0.57	0.29	0.68	0.87	0.94	0.98	0.99	Abanico	0.50	0.43	0.43	0.31	0.29	0.39	0.19	0.53	0.80	0.93	0.98	0.99
Rucue	homologable	0.57	0.56	0.57	0.58	0.57	0.35	0.28	0.84	0.95	0.98	0.99	1.00	Rucue	0.53	0.54	0.55	0.51	0.41	0.16	0.42	0.75	0.87	0.94	0.97	0.99
Ralco	homologable	0.77	0.77	0.81	0.82	0.80	0.68	0.53	0.84	0.96	0.99	0.99	1.00	Ralco	0.49	0.55	0.66	0.67	0.65	0.55	0.54	0.82	0.94	0.98	0.99	1.00
Angostura	homologable	0.78	0.78	0.78	0.73	0.69	0.40	0.49	0.76	0.90	0.97	0.98	1.00	Angostura	0.46	0.49	0.55	0.46	0.48	0.37	0.59	0.71	0.87	0.96	0.97	0.99
Huequecura	homologable	0.83	0.83	0.86	0.86	0.86	0.71	0.57	0.90	0.96	0.99	1.00	1.00	Huequecura	0.61	0.62	0.75	0.74	0.71	0.44	0.72	0.92	0.95	0.98	0.99	1.00
Mampil	homologable	0.81	0.82	0.82	0.81	0.77	0.62	0.47	0.80	0.93	0.97	0.99	0.99	Mampil	0.55	0.61	0.68	0.69	0.63	0.51	0.55	0.73	0.88	0.94	0.97	0.99
Peuchen	homologable	0.36	0.36	0.35	0.30	0.13	-0.35	-0.54	0.50	0.82	0.93	0.98	0.99	Peuchen	0.57	0.70	0.73	0.72	0.64	0.58	0.59	0.72	0.87	0.95	0.98	0.99
Pullinque	no homologable	0.86	0.85	0.84	0.83	0.79	0.72	0.39	0.85	0.91	0.95	0.98	1.00	Pullinque	0.65	0.64	0.62	0.68	0.70	0.54	0.57	0.89	0.93	0.96	0.98	1.00
Pilmaiquen	homologable	0.90	0.92	0.92	0.91	0.85	0.69	0.30	0.81	0.91	0.95	0.98	0.99	Pilmaiquen	0.81	0.82	0.83	0.81	0.70	0.39	0.25	0.68	0.85	0.94	0.97	0.98
Canutillar	homologable	0.82	0.82	0.83	0.77	0.70	0.32	-0.07	0.70	0.88	0.94	0.96	0.98	Canutillar	0.77	0.77	0.79	0.72	0.56	0.15	0.17	0.54	0.73	0.88	0.91	0.95

3.3 Comparación Largo Plazo SPC Actual y método base

El proveedor ha calculado la diferencia entre el valor del indicador mensual de desempeño, determinado para los pronósticos obtenidos utilizando la metodología base del Coordinador ("Definición de los Caudales a Utilizar para Planificar la Operación", 2000), y la metodología del SPC actual. En la **Tabla 4.8** se definen los indicadores utilizados durante los periodos marzo-2019, septiembre-2019, marzo-2020, septiembre-2020, marzo-2021 (5 periodos).

Tabla 4.8. Cálculo margen de desempeño SPC Actual

Indicador	Formulación
Error Absoluto Porcentual Medio (MAPE)	$MAPE_{k,LP,i} = 100\frac{\sum_1^n \lvert Q_p^{k,LP,i} - Q_o^{k,LP,i} \rvert}{\sum_1^n Q_o^{k,LP,i}}$
Margen de Desempeño del Pronóstico de Largo Plazo	$MDP_{k,LP,i} = -\frac{MAPE(SPC)_{k,LP,i} - MAPE(BASE)_{k,LP,i}}{MAPE(BASE)_{k,LP,i}}$
Qp = Caudal mensual pronosticado Qo = Caudal mensual observado n = Número total de meses evaluados k= Semestre de evaluación de desempeño del SPC (octubre-marzo/abril-septiembre) LP = periodo largo plazo (mes 1 a mes 12) del pronóstico realizado i = índice punto de control	

El cálculo anterior considera un periodo de evaluación de 6 meses y los pronósticos del caudal mensual en un horizonte de 1 a 12 meses desde la fecha de emisión del pronóstico realizado. En el caso de la metodología base, el valor del caudal mensual pronosticado es igual al valor mediano de la estadística hidrológica de acuerdo con lo establecido en la metodología base. En el caso del SPC actual, el valor de caudal mensual pronosticado es igual al valor mediano de todos los escenarios pronosticados del SPC en un horizonte de 1 a 12 meses desde la fecha de emisión del pronóstico realizado. Sí el valor del *MDP* es positivo, el pronóstico realizado por el SPC actual tuvo mejor desempeño que el pronóstico hecho por el método base, y viceversa. Los resultados de la evaluación del desempeño durante las últimas 5 temporadas se muestran en la **Figura 4.2**. El *MDP* a través del SPC fue, en término de promedio y mediana de los puntos de control más certero que la metodología base utilizada por el Coordinador, y a partir de septiembre 2019, obtuvo ambos estadísticos sobre un 20% mejor.

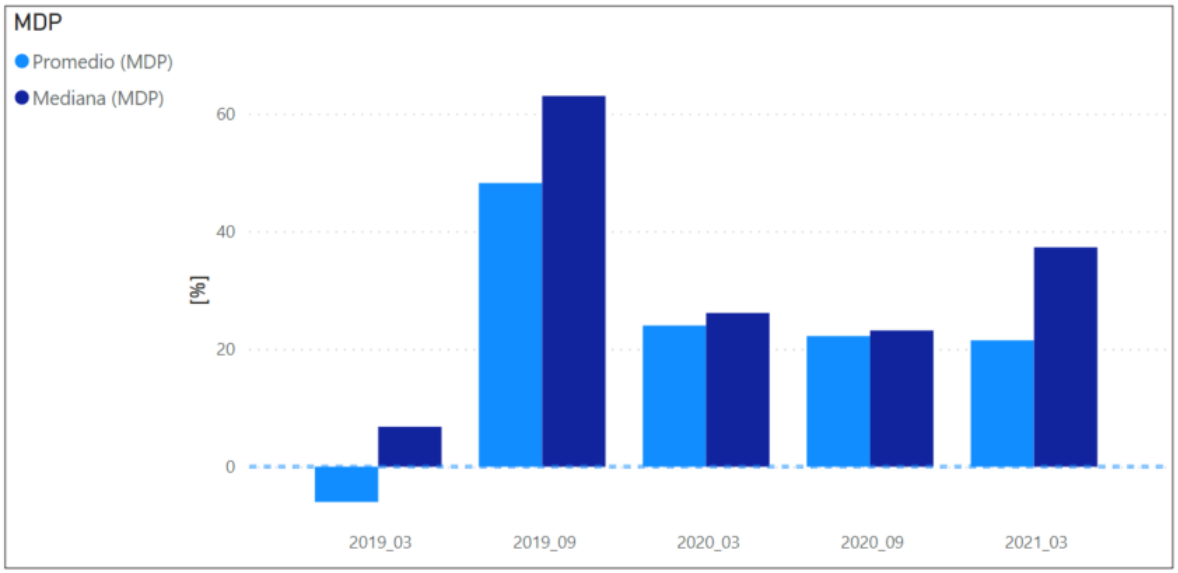


Figura 4.2. Promedio y mediana del margen de desempeño evaluado en los puntos de control.

3.4 Puntos de control que es posible aplicar el SPC de Largo Plazo

El proveedor identificó que es posible aplicar el SPC de Largo Plazo en los puntos que cumpliesen con alguno de los criterios nombrados a continuación:

a. Cuencas (Puntos de Control) donde fue posible homologar los caudales históricos a las series recientes observadas (capítulo 3.4). Incluye puntos de validación.
b. Cuencas donde las métricas de desempeño del SPC de Largo Plazo durante la temporada octubre 2020 y marzo 2021 (deshielo 2020/21) fueron similares o mejores a las obtenidas a través del pronóstico de deshielo (desarrollado por otro proveedor) para el mismo periodo en las mismas cuencas.
c. Cuencas donde el desempeño del SPC de Largo Plazo durante la temporada octubre 2020 y marzo 2021 (deshielo 2020/21) ha aumentado debido a las mejoras realizadas en el periodo abril 2021- actualidad.
d. Cuencas donde no se tienen valores de caudal observado y el SPC de Largo Plazo realiza pronóstico.

En algunos casos se debe mejorar el desempeño del modelo antes de utilizar SPC de Largo Plazo (se excluyen para la temporada 2021/22)

Las cuencas que cumplen el criterio para aplicar SPC Largo Plazo fueron 36 de 39 y se enumeran a continuación:

Tabla 4.9. Puntos de control y aplicación de SPC Largo Plazo

N°	Macrocuenca	Punto de Control (PC)	Criterio
1	Maipo	Alfalfal - Colorado	b
2	Maipo	Alfalfal - Olivares	b
3	Rapel	Captación Río Teno	a
4	Rapel	Chacayes	a
5	Rapel	Afluente a Embalse C.Rapel	a
6	Rapel	Sauzal	a
7	Tinguiririca	El Paso	a
8	Tinguiririca	Rama Azufre	a
9	Tinguiririca	Rama Portillo	b
10	Tinguiririca	Rama Tinguiririca	c
11	Tinguiririca	Rama Tricahue	c
12	Tinguiririca	San Andres	a
13	Maule	C.I. E.C.Colbún-Maule en Armerillo	c
14	Maule	C.I. E.C.Colbún-Desagüe L.Invernada-L.Maule	a
15	Maule	C.I. BT C.Isla - desagüe L.Maule	a
16	Maule	C.I. BT Maule C.Pehuenche-L.Invernada-L.Maule	a
17	Maule	Claro en S.Carlos + E.Las Garzas	a
18	Maule	Afluentes E.Melado	a
19	Maule	Hoya Intermedia Colbún	a
20	Maule	Hoya Intermedia Pehuenche	a
21	Maule	Afluentes Laguna Invernada	a
22	Maule	Afluentes Laguna Maule	a
23	Laja	C.I. BT C.Abanico L.Laja	c
24	Laja	Captación Alto Polcura	a
25	Laja	Polcura en BT C.Antuco	a
26	Laja	Cuenca Intermedia Tucapel-Central Laja1	d
27	Laja	C.I. Laja en Tucapel-Desagüe L.Laja-Capt. Alto Polcura	c
28	Laja	Afluentes L.Laja	a
29	Laja	C.I. Rama Laja C.Antuco	c
30	Mampil	Mampil	e
31	Peuchén	Peuchen	e
32	Rucue	Rucue	a
33	Biobío	Cuenca intermedia Embalses Pangue - Angostura	a
34	Biobío	C. I. entre Ralco y Pangue	c
35	Biobío	Afluente río Huequecura	a
36	Biobío	Afluentes Embalse Ralco	a
37	Sur	Afluentes Lago Chapo	a
38	Sur	Pilmaiquen	c
39	Sur	Pullinque	e

3.5 Plan de trabajo SPC de Largo Plazo periodo 2021/22

En la revisión y comparación que se hizo en los puntos de control donde el SPC y que el pronóstico de deshielo (ejecutado por un proveedor distinto al del SPC) fueron comparables durante el periodo 2020/2021, se desprende el siguiente plan de trabajo para el periodo 2021/2022:

- Seguimiento diario de caudales observados. Estos caudales son enviados por los coordinados y deben ser revisados y validados constantemente (de forma diaria).
- Comparación de los pronósticos en los puntos de control en común (entre SPC y pronóstico de deshielo). Esto sirve como herramienta de validación para cotejar los resultados.
- Existen riesgos en puntos donde el SPC de Largo Plazo no presenta caudales homologables, por lo que debe estar contantemente evaluando la factibilidad que escenarios pronosticados sean reales y tomar las medidas pertinentes.
- Como se vio en el capítulo homologación de caudales, no se cuenta con series históricas para todos los puntos de control, por lo que existe la posibilidad que las series observadas disponibles los últimos años aporten a la correcta estimación de caudales, lo que podría significar en una diferencia entre los valores pronosticados y observados que debe ser corregida a medida que avance el periodo 2021/22.

3.6 Beneficios de utilizar el SPC de Largo Plazo en conjunto con el pronóstico de Deshielo

Se comparó el SPC y el pronóstico de deshielo en puntos de control en común y al comienzo de cada mes, entendiendo que el primer pronóstico se realiza el 1 de agosto, y el último, el 1 de marzo (8 pronósticos) para el periodo de deshielo octubre - marzo, o mes-actual - marzo si el mes-actual es noviembre, diciembre, enero, febrero o marzo. La comparación de los pronósticos a través de la métrica MAPE para el deshielo 2020/21 se presenta en la **Figura 4.3**, utilizando el SPC (SPC), el pronóstico de deshielo (DESH) y el promedio de ambos pronósticos (JUNTOS).

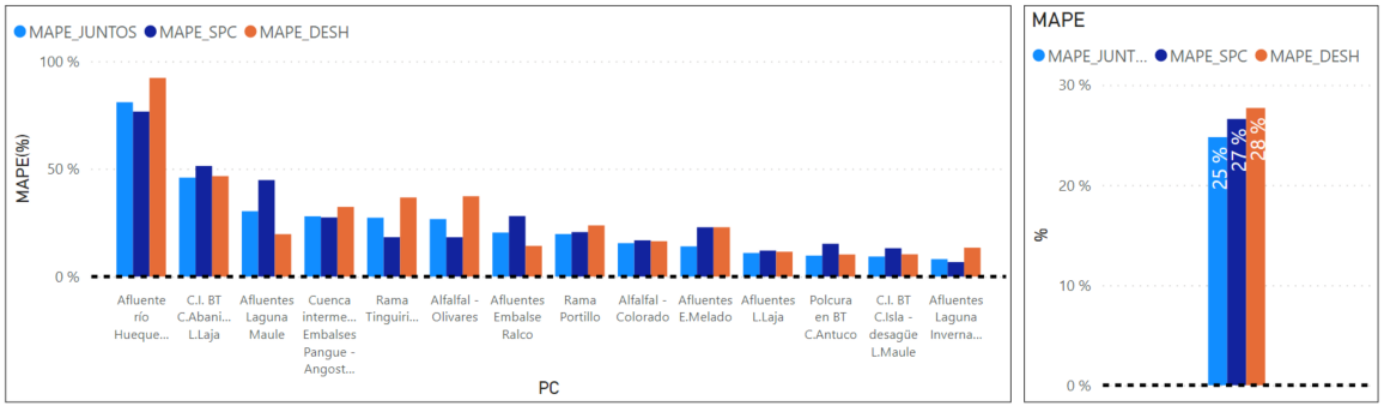


Figura 4.3. comparación desempeño pronóstico Largo Plazo del SPC, Deshielo y promedio de ambos.

Se observa que, utilizando ambos pronósticos (a través del promedio de ambos), permite disminuir el MAPE en promedio en un 3%, y que además siempre se tendrá un error menor al máximo error de ambos pronósticos. Es esperable que el plan de trabajo del presente año permita una disminución aún mayor.

Existe un beneficio último del uso de SPC que se verá este año y consiste en que al constatar el año hidrológico pasado (2020/2021) terminó con valores de caudal muy bajo en abril, lo que sumado a la poca precipitación acumulada a la fecha del presente año hidrológico, a través de los resultados del SPC desde ya es posible visualizar que los caudales para el periodo de deshielo, que comienza en octubre, podrían ser probablemente bajos o muy bajos al compararlos con la estadística histórica.

4. EFECTOS EN LA OPERACIÓN DEL SEN

Para observar el efecto de incorporar los datos del SPC en la programación de largo plazo, se modificó el procedimiento actual utilizado en el PLP y se realizaron simulaciones para ver los efectos en el sistema. En particular, se analizó los costos marginales, las cotas de los embalses y el costo de operación resultante.

Se analizaron 3 casos:

- **Caso Base (BASE):** Corresponde a datos obtenidos directamente del proceso de programación diaria en una fecha determinada. El modelo PLP corre con una estadística de 60 hidrologías históricas a partir de la 5 semana de simulación.
- **Caso 15 Hidrologías(15H):** Se modifica en el caso base las hidrologías históricas simuladas. En particular se utilizan las últimas 15 hidrologías para tener una referencia adicional sobre la cual comparar los resultados del SPC.
- **Caso Series SPC(SSPC):** Se reemplaza las series históricas de aquellas cuencas en que existe punto de control del SPC, para el primer año hidrológico, por series sintéticas determinadas por el SPC de acuerdo con la metodología descrita en este mismo informe. Para el segundo año se considera la estadística hidrológica completa (60 hidrologías).

Se analizaron los casos descritos anteriormente para 4 fechas de inicialización del SPC de Largo Plazo:

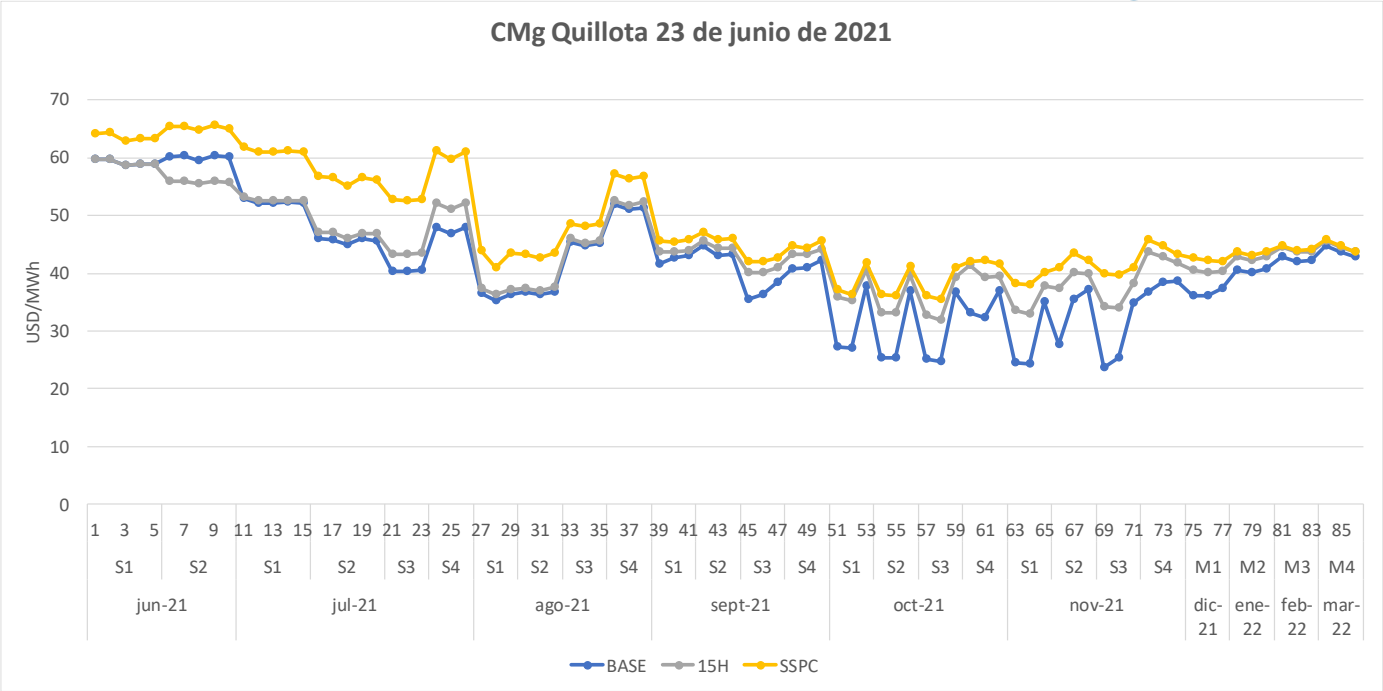
- 12 de junio de 2021
- 15 de junio de 2021
- 19 de junio de 2021
- 23 de junio de 2021

A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Análisis Costo Marginal

En el siguiente gráfico se muestra el CMg promedio (promedio de todas las hidrologías, estadísticas o sintéticas), obtenido para Quillota 220 kV en los 3 casos para el día 23 de junio de 2021.

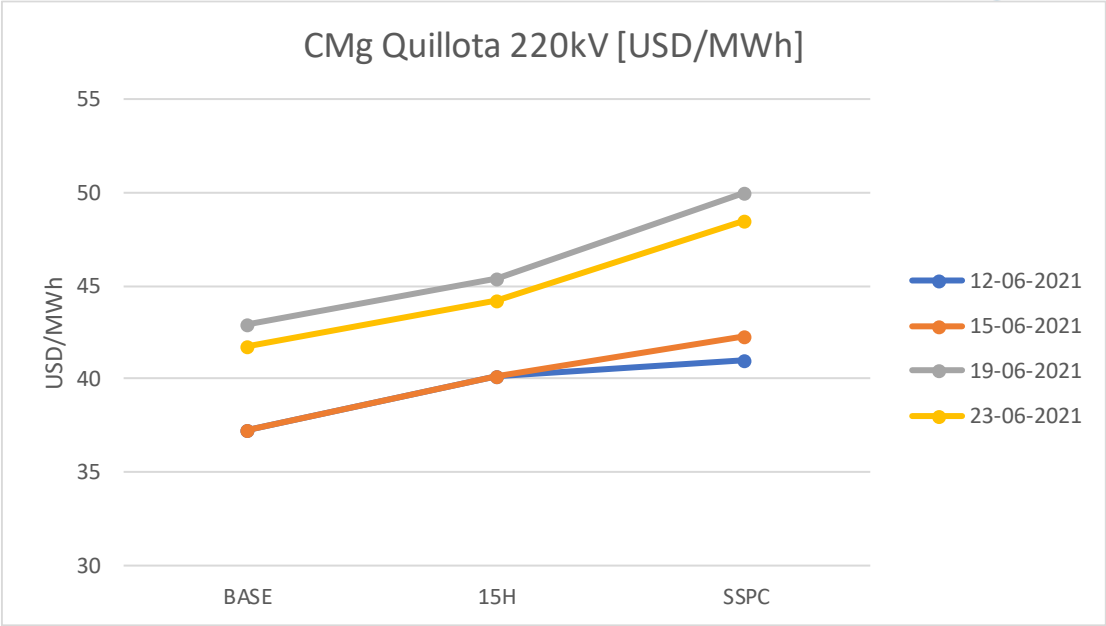
.



Del gráfico se observa, que durante todo el período el CMg obtenido en SSCP resulta ser el mayor. Si comparamos el valor promedio obtenido de todo el período, el CMg en el caso SSCP es mayor en un 16% respecto al caso base.

Respecto al caso 15H, el CMg promedio es 6% mayor respecto al caso base.

En el siguiente gráfico se observa el CMg promedio obtenido en todo el período (desde la fecha de simulación hasta marzo de 2022: primer año hidrológico), para cada caso.



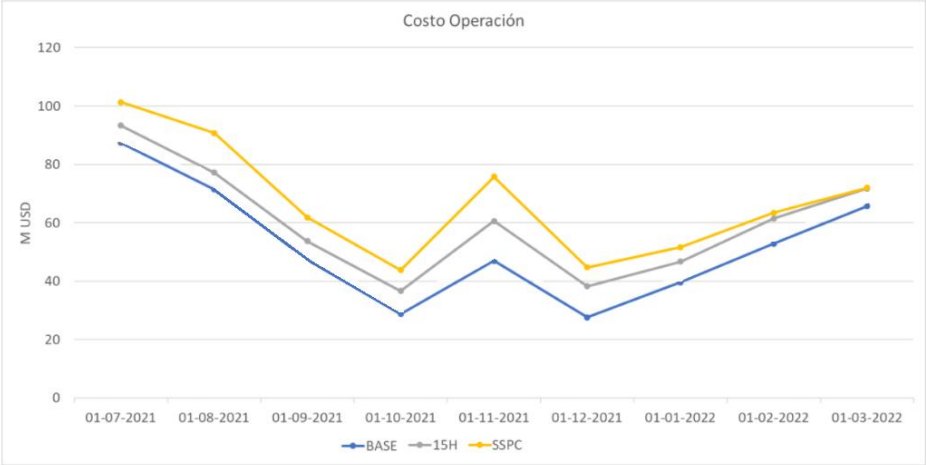
Tal como se esperaba, para todas las fechas analizadas, el CMg en el caso SSCP resulta ser el mayor. En promedio el CMg supera al caso base en 14%, considerando las 4 fechas simuladas.

Las condiciones secas entregadas por el caso SSPC son consecuentes con las condiciones hidrológicas presentes en el SEN actualmente. Conforme a lo anterior, es esperable que las proyecciones de caudales del SSPC tiende a entregar valores de hidrologías más secas, por lo que el CMg tiende a ser mayor respecto a los otros casos analizados, independiente de la fecha simulada.

En el anexo se observa los resultados obtenidos para el resto días.

Análisis Costo de Operación

A continuación, se muestra el costo de operación mensual obtenido de las simulaciones para el período comprendido entre julio 2021 y marzo 2022 para el día 23 de junio de 2021.



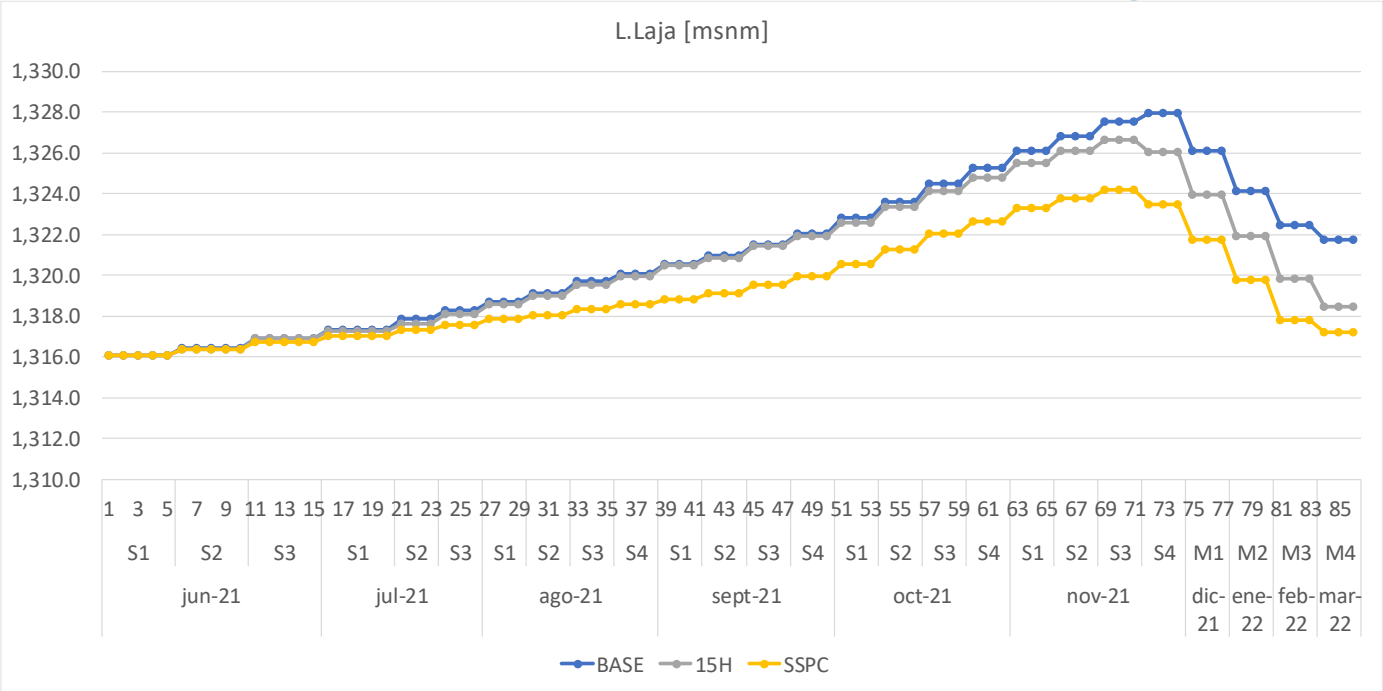
El caso SSPC presenta el costo de operación más alto, consistente con los costos marginales mayores vistos en la sección anterior y con las condiciones hidrológicas inherentes al caso.

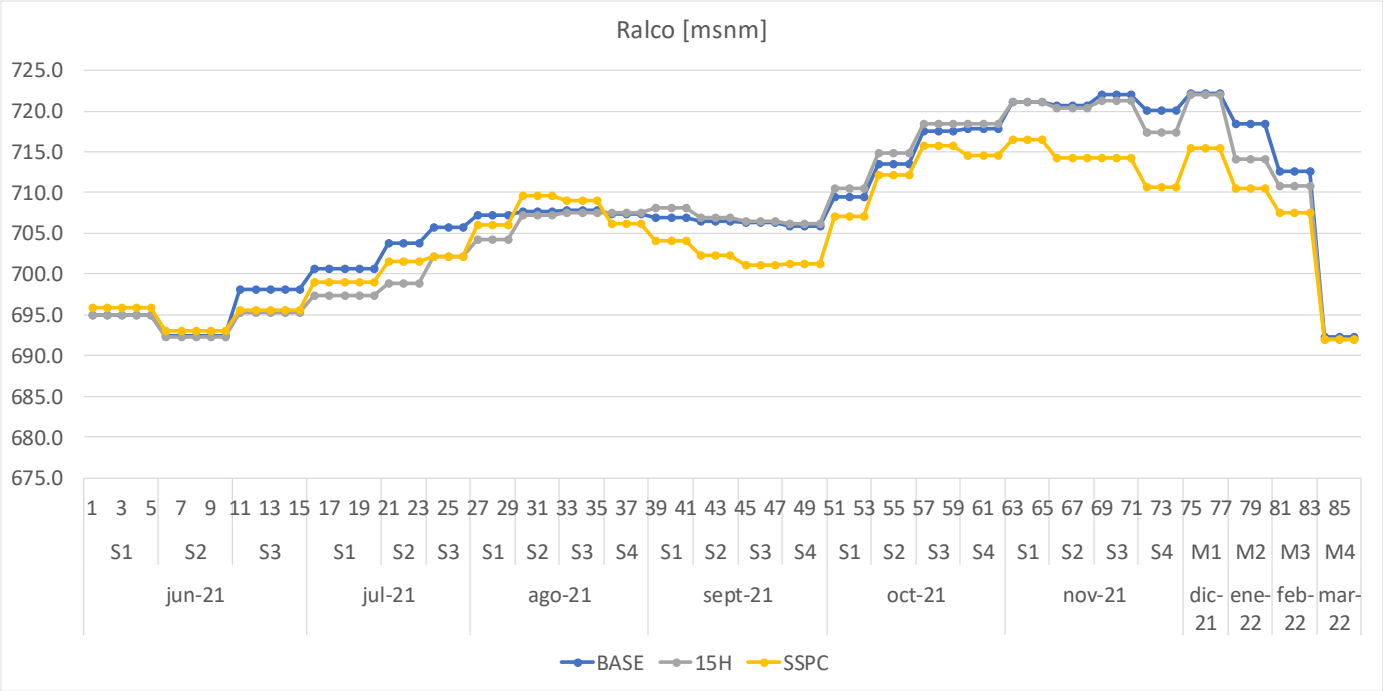
En promedio para todo el período (desde la fecha de simulación hasta marzo de 2022), el costo de operación del caso SSPC es un 27,5% más alto, respecto al caso base. Las mayores diferencias se presentan en noviembre y diciembre 2021, donde se obtiene un costo de operación 60% más alto para el caso SSPC respecto al caso base. Lo anterior se explica porque en el caso SSPC no se están considerando las hidrologías más húmedas de la estadística, lo que reduce la energía disponible en el período de deshielo producto de la menor acumulación de nieve.

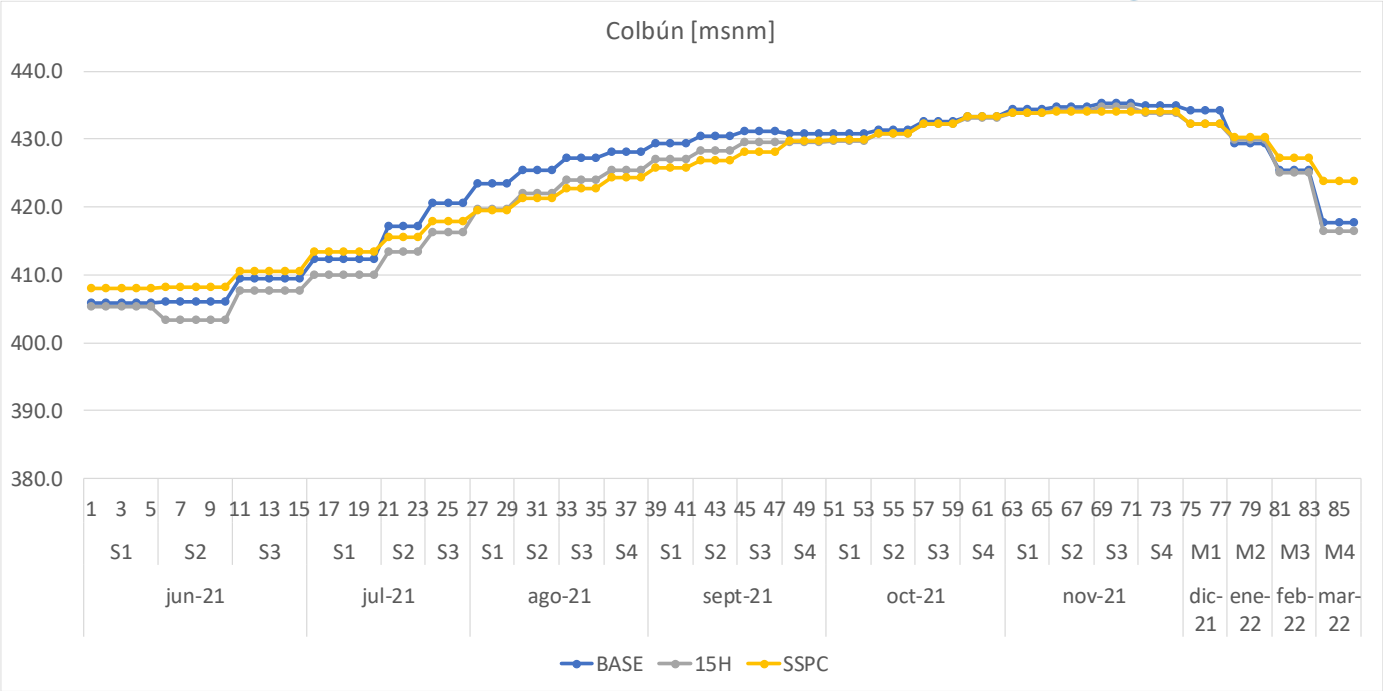
Respecto al caso 15H, el costo de operación promedio para todo el periodo es un 13,4% más alto que el caso base. Al igual que el caso SSPC, las mayores diferencias entre el caso 15H y el caso base se presentan en noviembre y diciembre, donde el costo de operación del caso 15H es 29% y 39%, respectivamente más alto que el caso base.

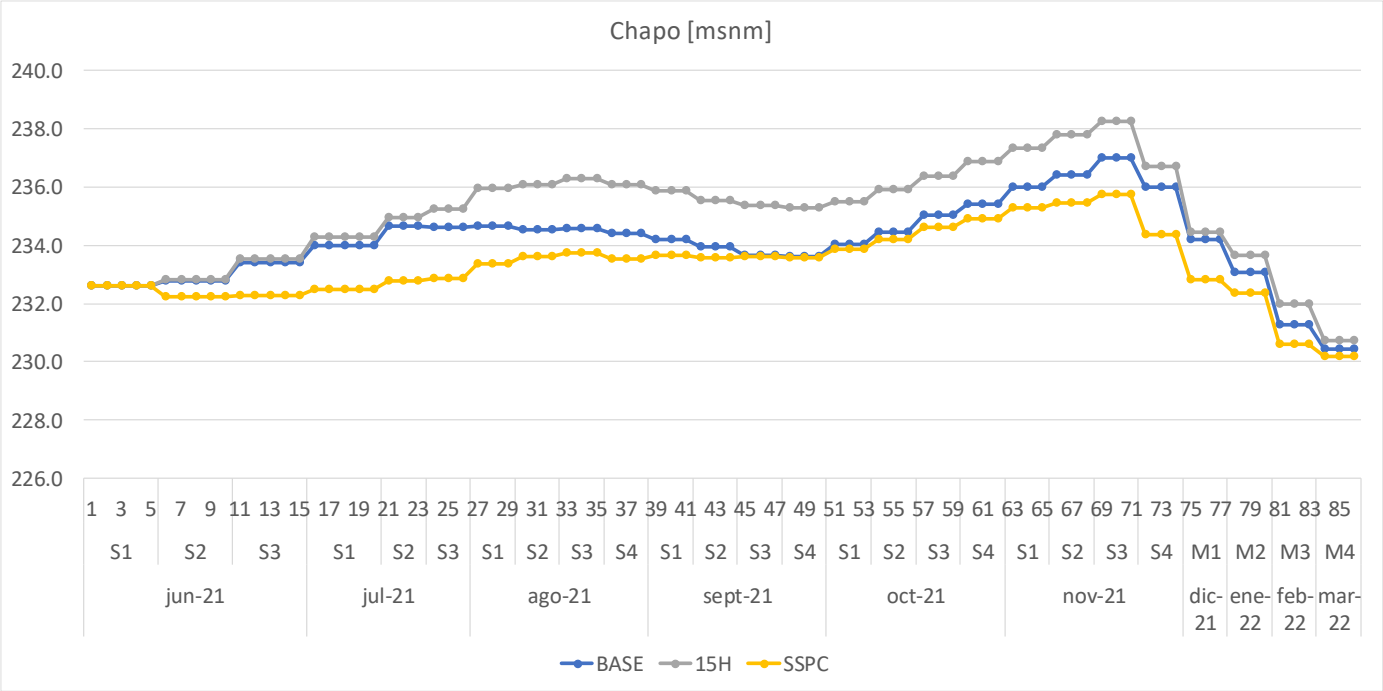
Análisis Cotas Embalses

A continuación se observa la evolución de la cota en Laja, Ralco, El Chapo y Colbún para cada caso, para la programación correspondiente al 23 de junio de 2021.


L.Laja [msnm]
1,330.0
1,328.0
1,326.0
1,324.0
1,322.0
1,320.0
1,318.0
1,316.0
1,314.0
1,312.0
1,310.0
1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85
S1 S2 S3 S1 S2 S3 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 M1 M2 M3 M4
jun-21 jul-21 ago-21 sept-21 oct-21 nov-21 dic-21 ene-22 feb-22 mar-22
BASE 15H SSPC


Ralco [msnm]
725.0
720.0
715.0
710.0
705.0
700.0
695.0
690.0
685.0
680.0
675.0
1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85
S1 S2 S3 S1 S2 S3 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 M1 M2 M3 M4
jun-21 jul-21 ago-21 sept-21 oct-21 nov-21 dic-21 ene-22 feb-22 mar-22
BASE 15H SSPC





De los gráficos anteriores se observa, tal como se esperaba, que en el caso SSCP resultan trayectorias de cota en general más bajas que en los demás casos.

En el caso SSCP la trayectoria del Lago Laja resulta menor que el Caso Base en 0,15%, mientras que el caso15H llegaría a estar bajo un 0,05% aproximadamente. En las condiciones actuales de

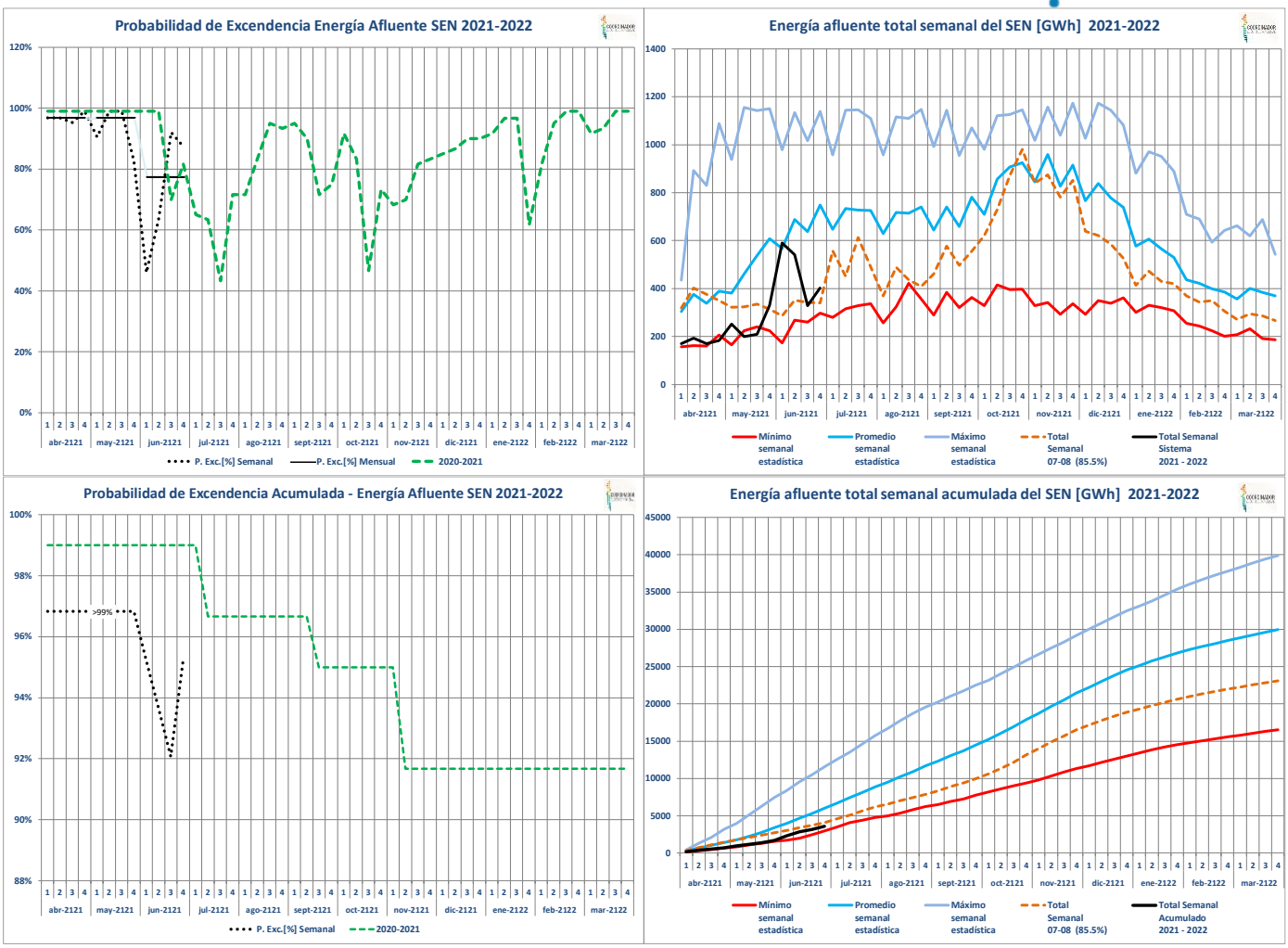
operación y programación, el Lago Laja no tiene disponibles derechos de generación y se espera que comience a generar los derechos de riego a partir de diciembre de 2021. En estas condiciones, con menores afluentes disponibles en las series hidrológicas obtenidas a partir del caso SSPC, el Laja no tiene opciones para determinar estrategias de operación distintas.

En el caso de Ralco para el caso SSCP la diferencia llega a 0,41%, mientras 15H llega al 0.1%. Para este embalse el modelo PLP toma decisiones de operación distintas al Caso Base. De hecho, durante el mes de agosto de 2021, Ralco llega a una cota más alta en el caso SSPC respecto al Caso Base. Lo anterior se debe a que con el SSPC se considera una serie de caudales más secos y el modelo no ve un deshielo abundante. Con esto, de ser necesario, el modelo puede tomar la decisión de subir la cota del embalse Ralco sin riesgo de vertimiento lo que contribuye a optimizar la operación del sistema. Para las programaciones de los días 12 y 15 de junio lo indicado es más evidente (las trayectorias de cota se muestran en el anexo).

Para el embalse Colbún la mayor disminución se da en el caso 15H llegando 0,4%, mientras SSPC llega a 0,16%. La operación del embalse Colbún se encuentra condicionada por la restricción de cota de riego del período estival. En condiciones secas como las previstas en el caso SSPC, la operación de la central Colbún se ajustará para cumplir con la restricción de cota indicada. Para un año húmedo, en el que se desestimen condiciones secas futuras, el modelo permitiría aumentar la generación actual sin poner en riesgo las restricciones estivales.

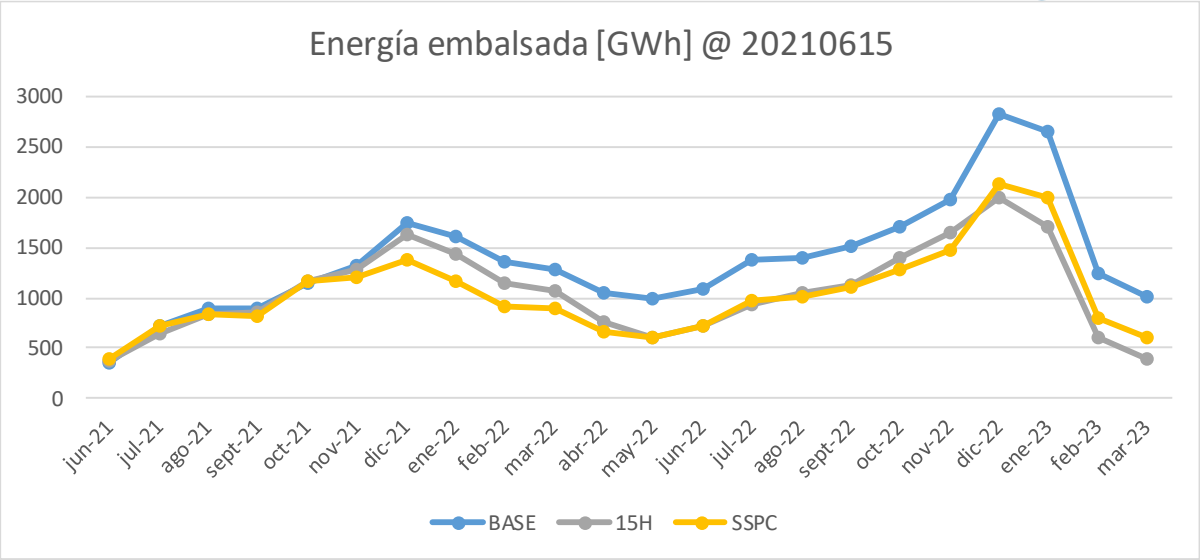
Finalmente, en el Lago Chapo, para el caso SSPC la disminución de cota llega a 0,34% en promedio. La trayectoria de cota está por debajo de las demás trayectorias en el caso SSPC. La operación del Lago Chapo (Central Canutillar) se encuentra afectada por las restricciones de transmisión de la zona sur y por la característica pluvial de la cuenca que aún en condiciones secas, tiene disponibilidad de afluentes.

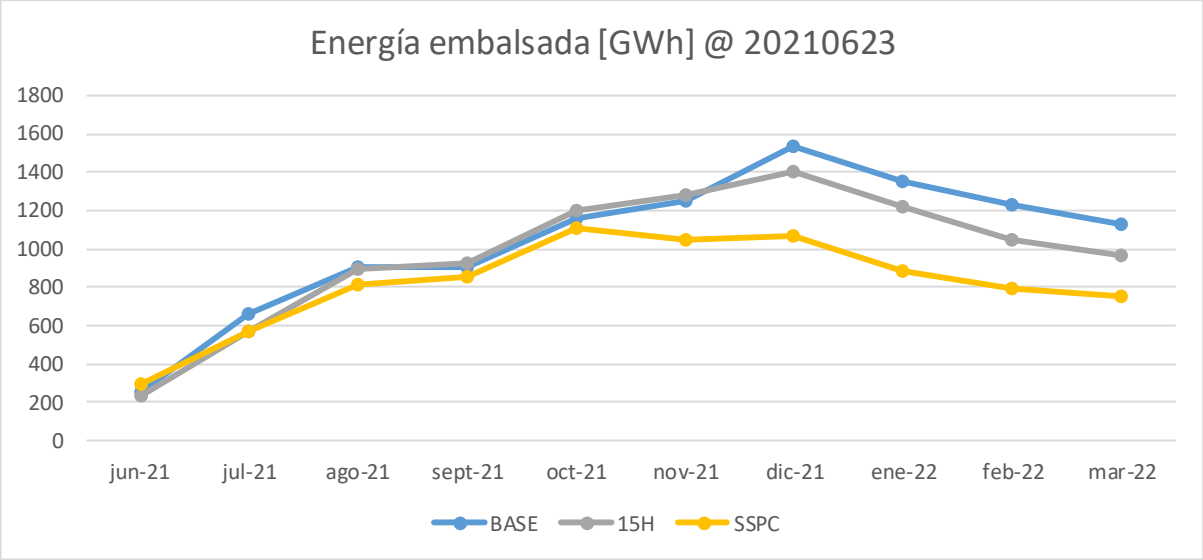
En el anexo se observa el análisis del resto de días, pero como conclusión en general la tendencia se mantiene constante mostrando el caso SSCP como el escenario más seco de los 4 analizados. La visión del caso SPC es consecuente con las condiciones hidrológicas predominantes actualmente en el SEN, la cual se observa en los gráficos siguientes. Al respecto, se presenta la evolución de la energía afluente y la probabilidad de excedencia asociada. Al 30 de junio de 2021 la probabilidad de excedencia de la energía afluente acumulada es de 95.3%, valor correspondiente a un año seco.



Análisis Energía Embalsada

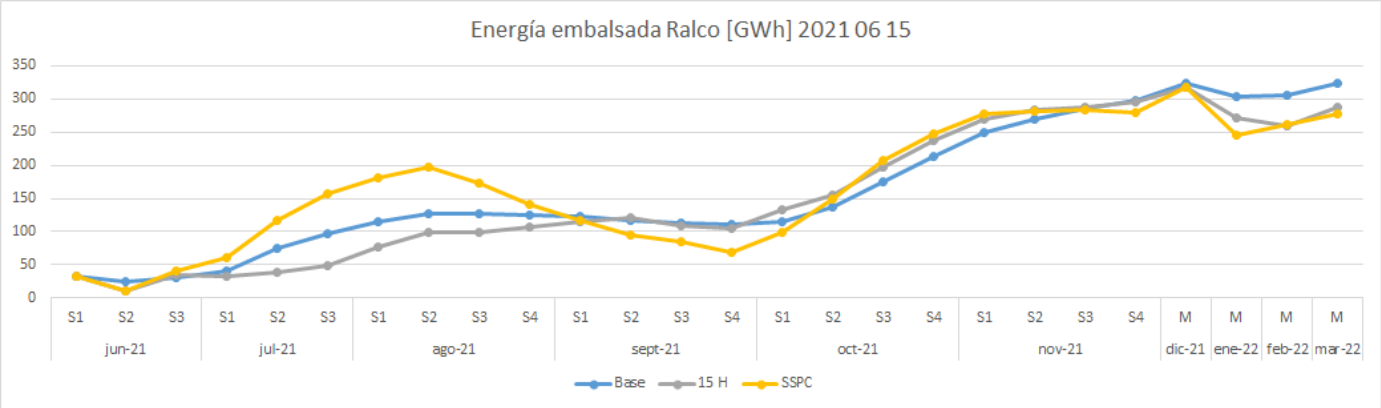
En los siguientes gráficos, se observa la energía embalsada de todo el sistema para dos programaciones en particular (15 y 23 de junio de 2021).

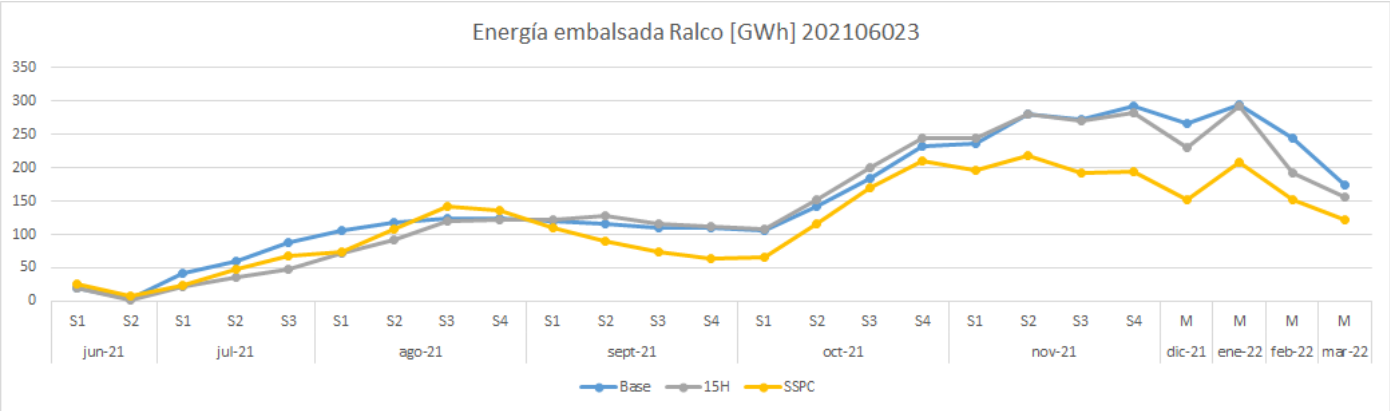




Los gráficos anteriores son consistentes con los resultados presentados. El caso SSPC, y tal como ya se ha mencionado, resulta una proyección de caudales más seca respecto al resto de casos, por lo tanto, la energía embalsada en el SEN debe ser menor.

Ahora, si analizamos Ralco individualmente, se observa una operación conservadora en el caso SSPC, previo al período de deshielo, coherente con las condiciones secas simuladas y con la ausencia de restricciones adicionales a la cota del embalse:

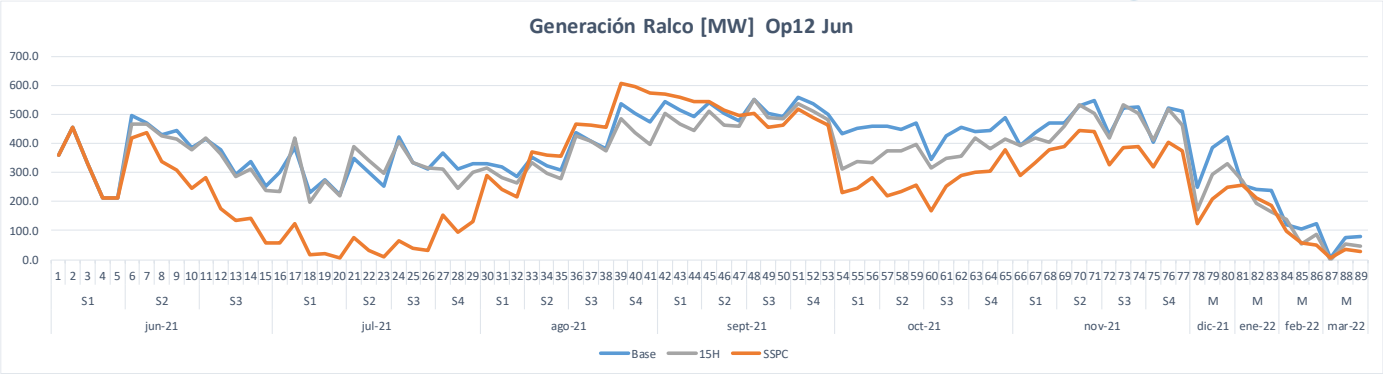


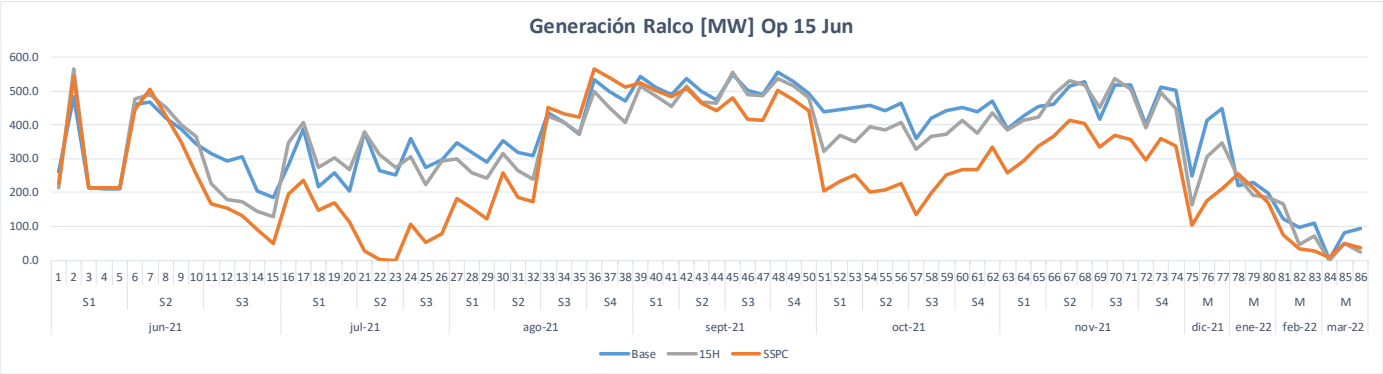


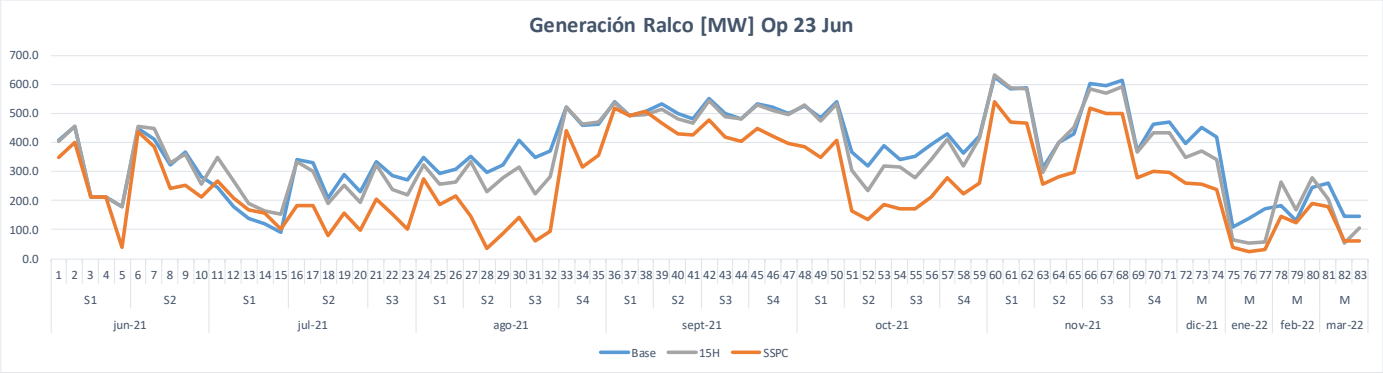
De los gráficos se observa que se aumenta la energía embalsada de Ralco previa al deshielo. Es importante señalar finalmente que el modelo no embalsa agua de un período a otro (se entiende como período a un año hidrológico, es decir abril año N a marzo del año N+1).

Generación

En los siguientes gráficos se observa en particular, el comportamiento de Ralco, quien debido a su naturaleza operativa es quien representa de mejor manera el comportamiento esperado luego de incorporar las series SPC en la programación (caso SSPC). En particular, antes del período de deshielo se embalsa agua en mayor medida en el caso SSPC respecto al caso Base y 15H, por lo que el comportamiento es más conservador. Esta tendencia se observa con claridad en la operación de los días 12 y 15 de junio. En el caso del día 23 la tendencia sigue siendo la misma, pero la magnitud es menor al comparar con los días anteriormente señalados.


Generación Ralco [MW] Op12 Jun
700.0
600.0
500.0
400.0
300.0
200.0
100.0
0.0
jun-21
jul-21
ago-21
sept-21
oct-21
nov-21
dic-21
ene-22
feb-22
mar-22
Base
15H
SSPC


Generación Ralco [MW] Op 15 Jun
600.0
500.0
400.0
300.0
200.0
100.0
0.0
jun-21
jul-21
ago-21
sept-21
oct-21
nov-21
dic-21
ene-22
feb-22
mar-22
Base
15H
SSPC


Generación Ralco [MW] Op 23 Jun
700.0
600.0
500.0
400.0
300.0
200.0
100.0
0.0
jun-21
jul-21
ago-21
sept-21
oct-21
nov-21
dic-21
ene-22
feb-22
mar-22
Base
15H
SSPC

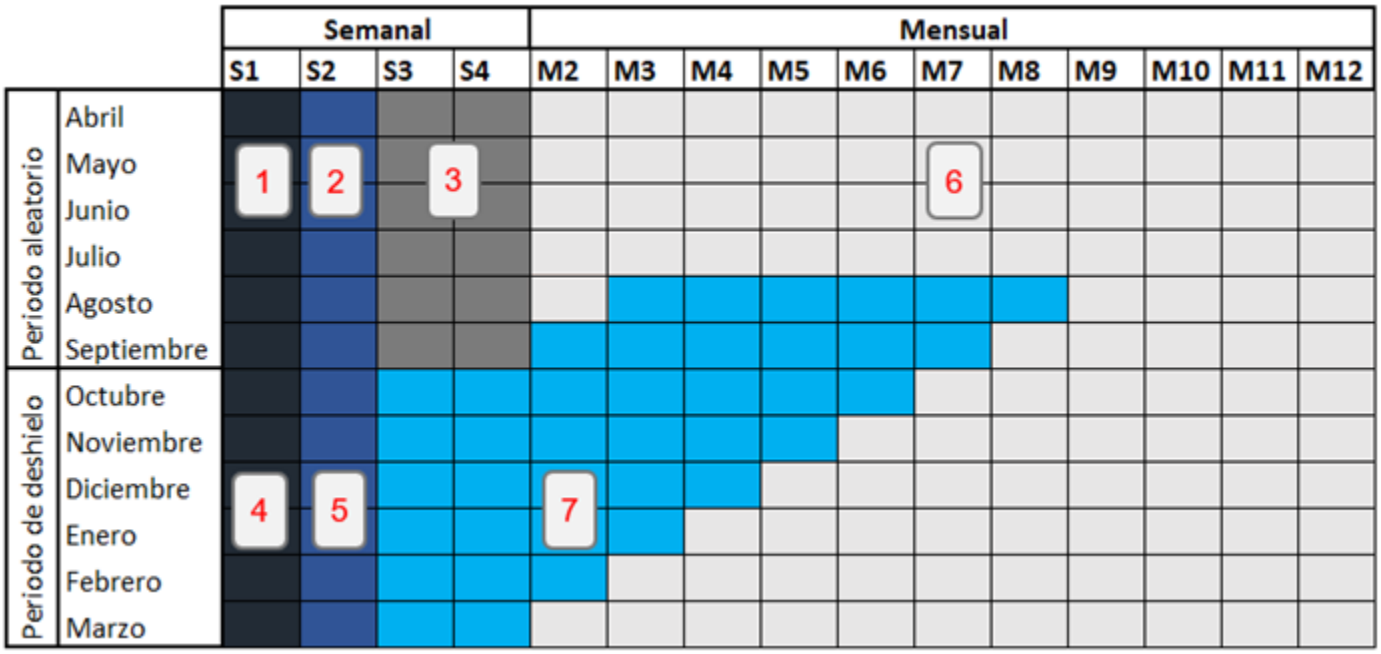
5. COMENTARIOS FINALES SOBRE EFECTOS EN LA OPERACIÓN DEL SEN

Si se simulan condiciones más secas para el primer año hidrológico, los costos de operación térmicos del sistema y los costos marginales aumentan. Lo anterior no implica que la reducción hidrológica o la eliminación de hidrologías húmedas implique una desoptimización de la operación del sistema. Por el contrario, una mejor información de las condiciones hidrológicas a futuro permite optimizar la operación de los embalses en el corto plazo, como es el caso del embalse Ralco en los ejemplos mostrados, y disminuye el riesgo de no cumplir con restricciones estivales que pueden afectar entregas a riego como en el caso del embalse Colbún.

Los análisis realizados para el CMg, costo de operación y cotas de embalses, muestran que al utilizar el caso SSPC en el proceso de programación el sistema se encarece debido a la disminución del recurso hídrico esperado. En particular el CMg, aumenta en un 14% entre el caso SSPC y el Caso Base, considerando las 4 fechas simuladas y el costo de operación aumenta en un 25%.

6. APLICACIÓN DEL SPC EN LA PROGRAMACIÓN DE LA OPERACIÓN

En la siguiente figura se resumen el tratamiento de la incertidumbre hidrológica en la programación de mediano plazo y la incorporación del SPC para el horizonte de un año hidrológico:



A continuación, se describe la metodología utilizada para cada etapa del horizonte de programación:

1-4 : Pronóstico primera semana SPC (aplicado desde año 2018).

2-5 : Reducción de la estadística hidrológica de acuerdo con los volúmenes mínimos y máximos proyectados de la segunda semana del SPC (aplicado desde año 2018).

3 **:** Estadística histórica condicionada (aplicado desde 1999).

6 : Series de caudales sintéticas proyectadas por el SPC utilizando la meteorología reducida a los últimos 25 años **(aplicado desde agosto 2021).**

7 **:** Series de caudales sintéticas proyectadas por el SPC utilizando la meteorología reducida a los últimos 25 años sesgadas por Vmin y Vmax **(aplicado desde agosto 2021),** donde:

- Vmin: Mínimo entre el volumen mínimo proyectado por Pronóstico de Deshielo y SPC.
- Vmax: Mínimo entre el volumen máximo proyectado por Pronóstico de Deshielo y SPC.

Las series de caudales sintéticas para las etapas de horizonte 6 y 7 son calculadas a partir de una meteorología reducida desde los últimos 60 años a los últimos 25 años. Esta reducción tiene fundamento en las normales climáticas y la tendencia observada de los caudales los últimos años. Respecto a las normales climáticas, para realizar análisis de valores medios se considera y recomienda de forma estándar utilizar los últimos 30 años de meteorología observada (precipitación, temperatura, etc.)[1], mientras que por otra parte, el Coordinador a través del estudio "Informe de Desarrollo de Modelos" encargado a CONIC-BF[2], ha indicado que las precipitaciones y de caudales muestran cierta tendencia decreciente los últimos 20 años. En conclusión, dado el rango de factibilidad obtenido entre 20 y 30 años, el Coordinador ha considerado utilizar de forma representativa los últimos 25 años de meteorología para el cálculo de series de caudales sintéticos.

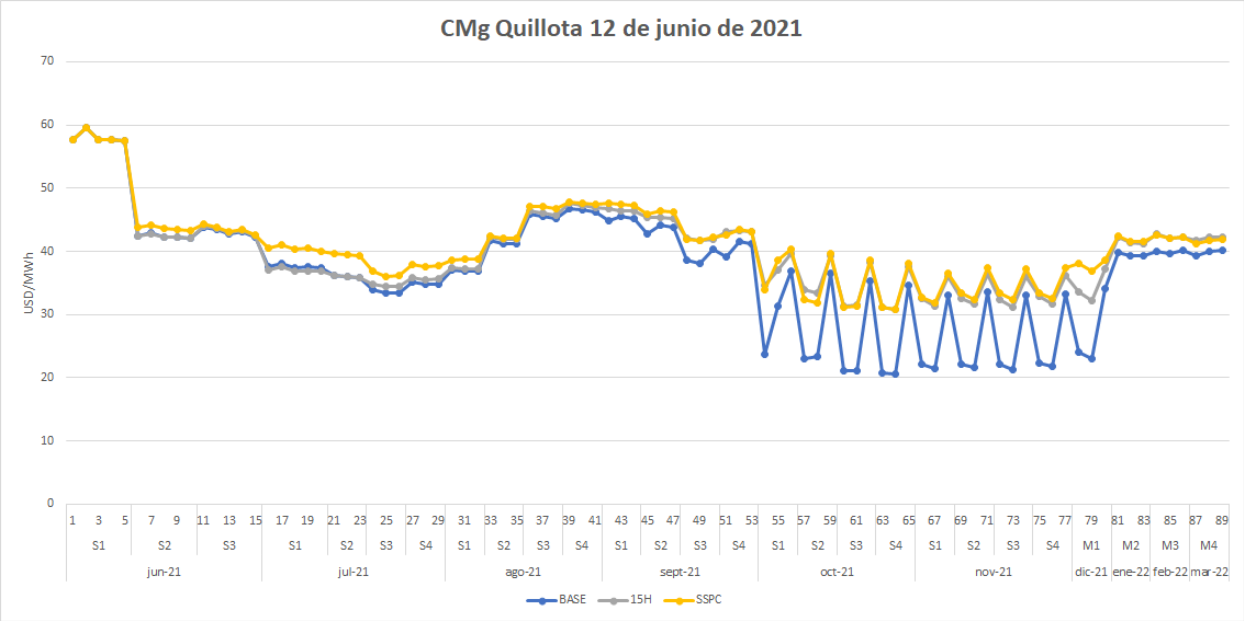
---

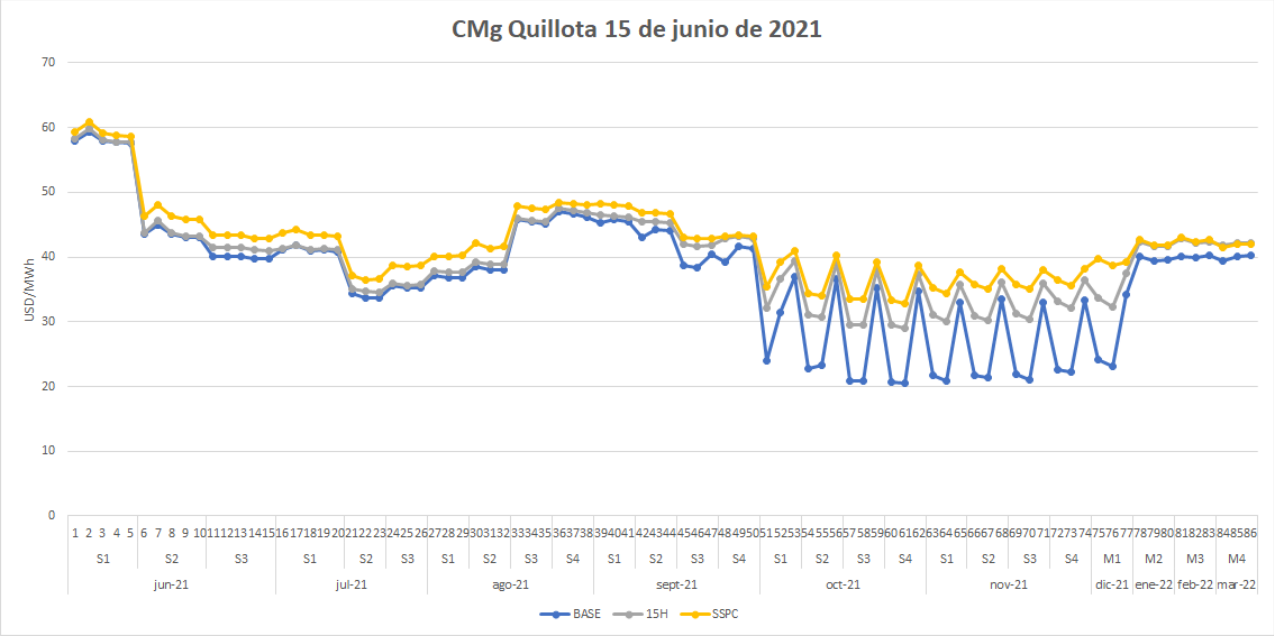
[1] (DGA, 2021). Nuevas Normales Climáticas (1991-2020) SDT N°440.

[2] (Coordinador Eléctrico Nacional, 2021). Informe de Desarrollo de Modelos. Pronóstico de deshielo cuencas río Aconcagua, Colorado, Rapel, Tinguiririca, Maule, Laja y Biobío.
https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2021/08/Pronostico-de-deshielo-temporada-2021-2022-1.zip

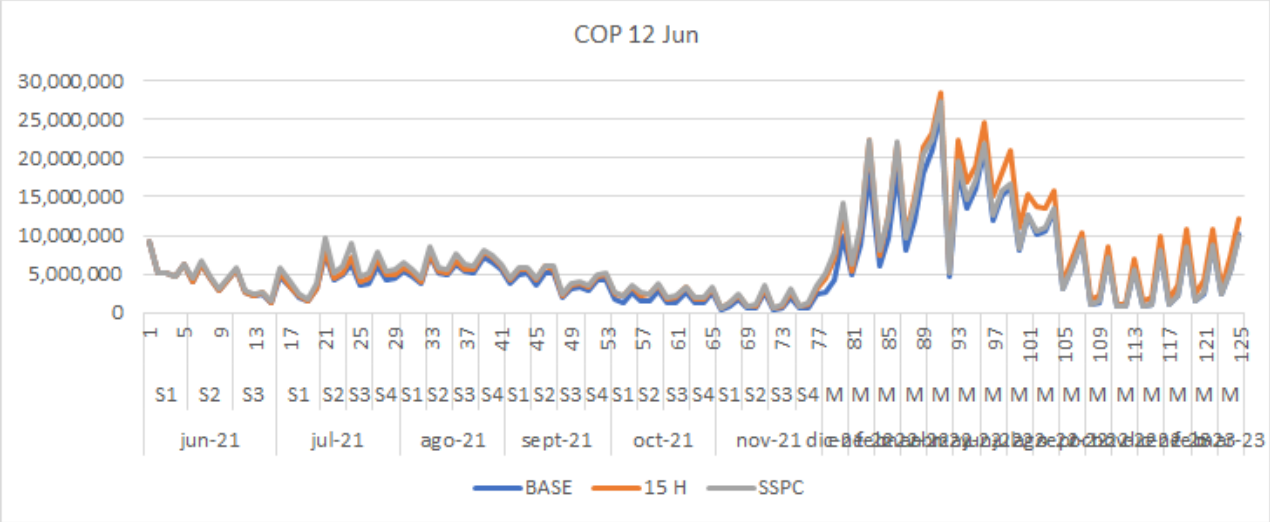
7. ANEXOS

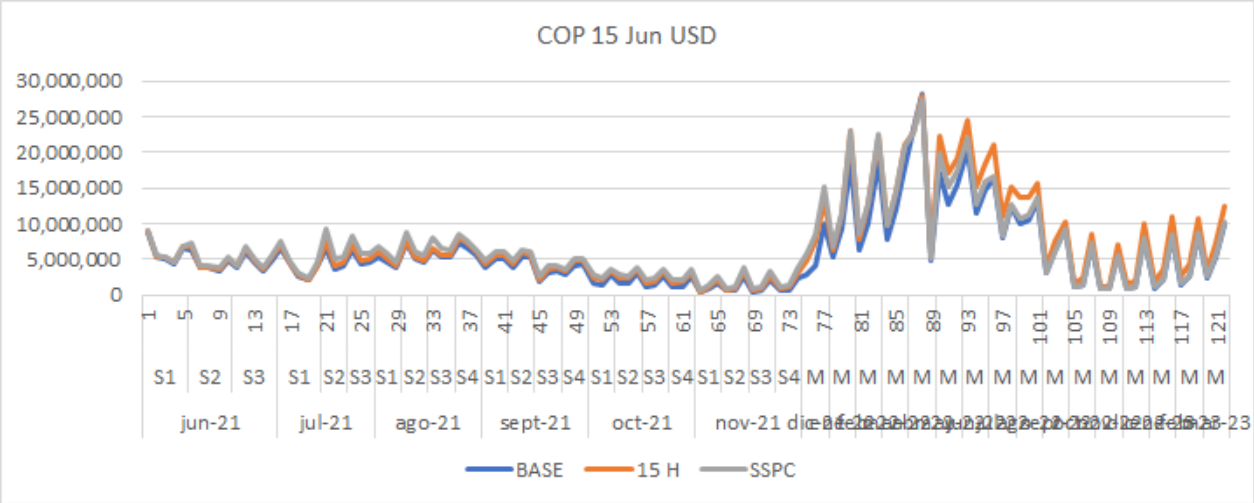
Análisis CMg, 12,15 de junio de 2022.





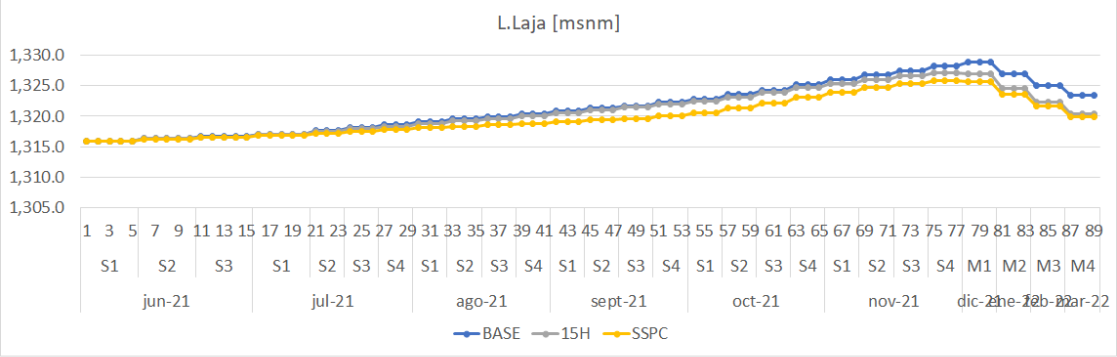
Análisis Costo de Operación, 12,15 de junio de 2022.

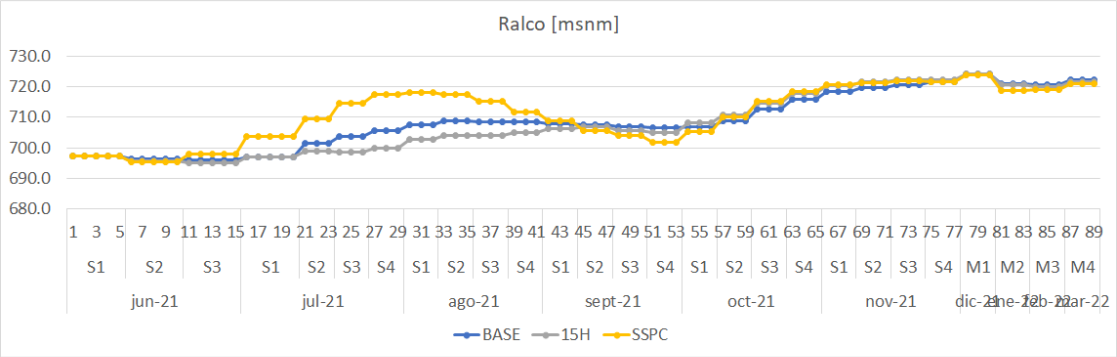


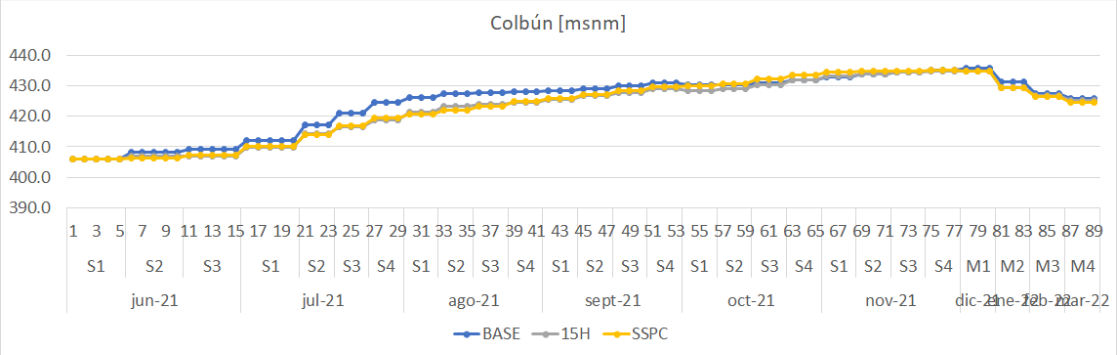


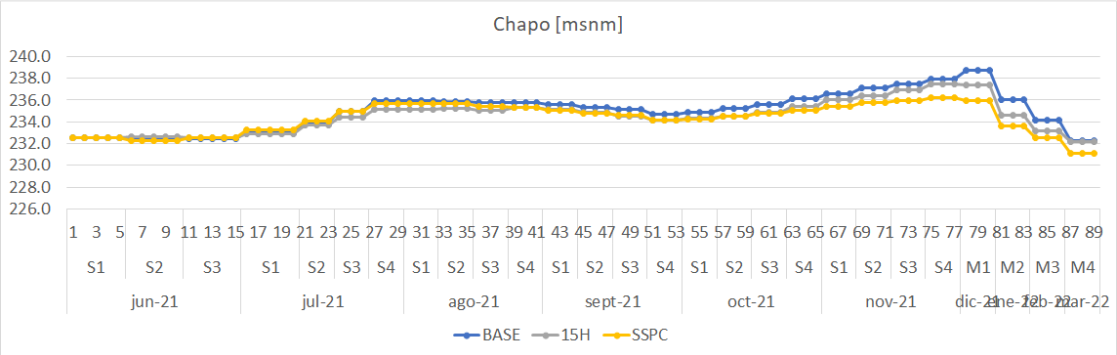
Análisis Cotas Embalses: días 12 y 15 de junio de 2022.

12 Junio

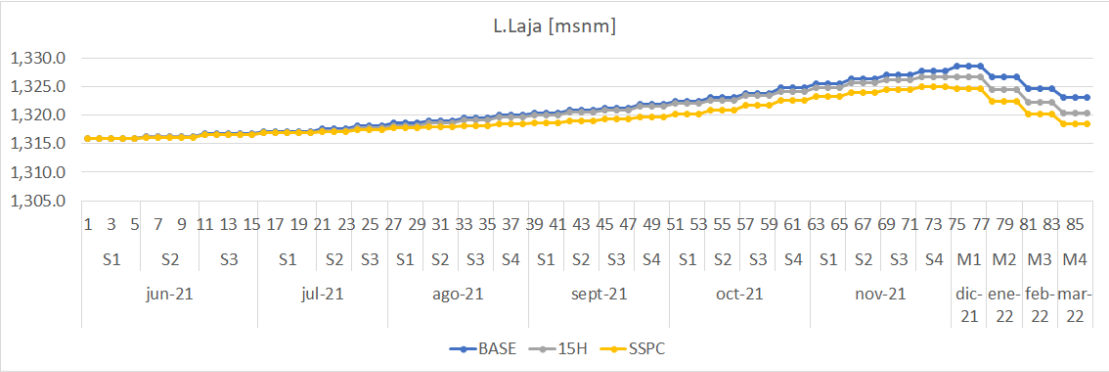


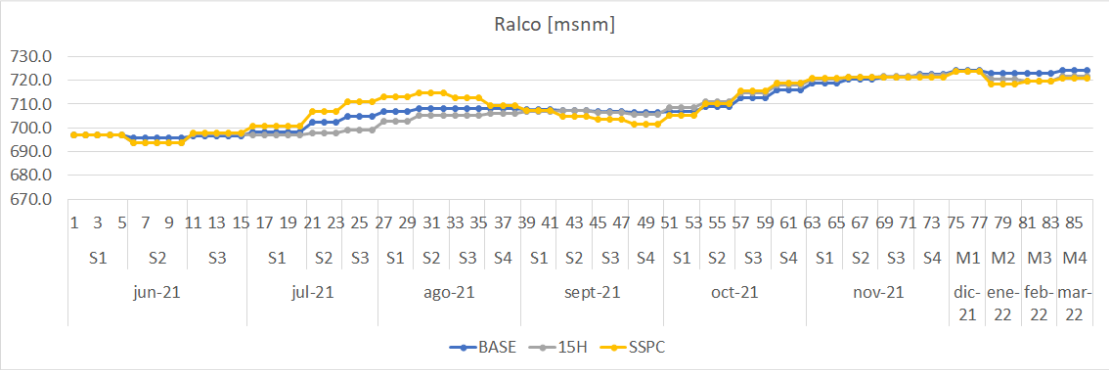


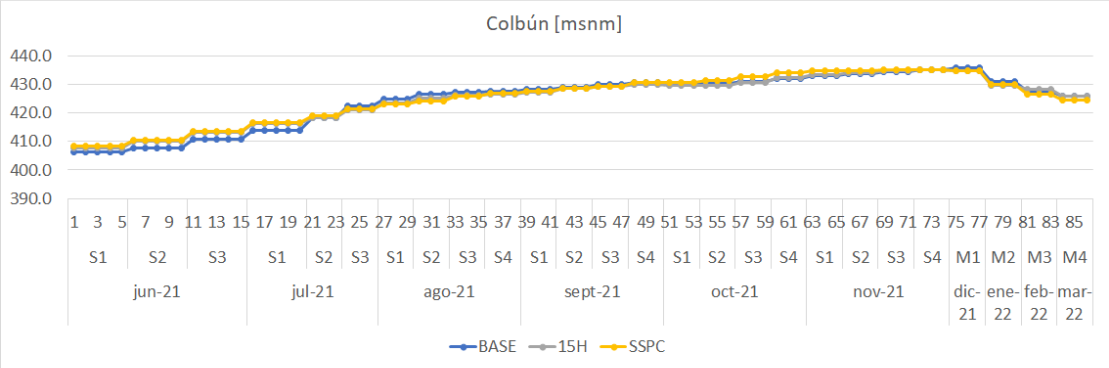


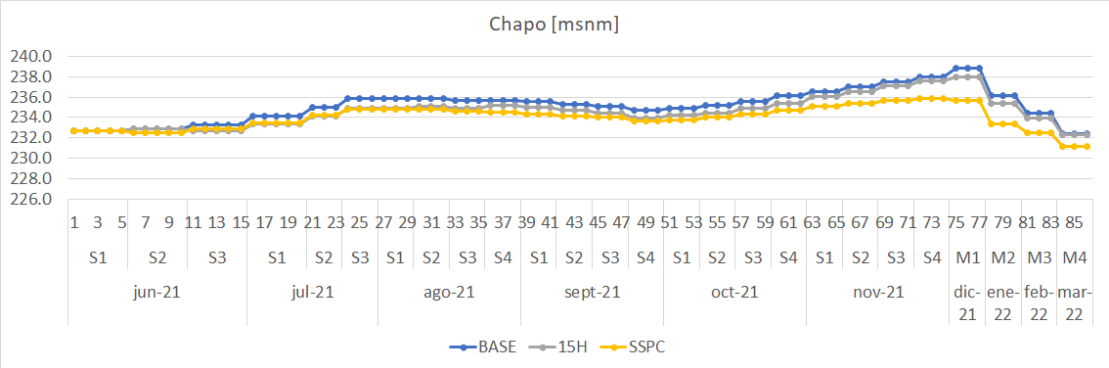


15 Junio


L.Laja [msnm]
1,330.0
1,325.0
1,320.0
1,315.0
1,310.0
1,305.0
1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85
S1 S2 S3 S1 S2 S3 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 M1 M2 M3 M4
jun-21 jul-21 ago-21 sept-21 oct-21 nov-21 dic-21 ene-22 feb-22 mar-22
BASE 15H SSPC


Ralco [msnm]
730.0
720.0
710.0
700.0
690.0
680.0
670.0
1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85
S1 S2 S3 S1 S2 S3 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 M1 M2 M3 M4
jun-21 jul-21 ago-21 sept-21 oct-21 nov-21 dic-21 ene-22 feb-22 mar-22
BASE 15H SSPC


Colbún [msnm]
440.0
430.0
420.0
410.0
400.0
390.0
1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85
S1 S2 S3 S1 S2 S3 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 M1 M2 M3 M4
jun-21 jul-21 ago-21 sept-21 oct-21 nov-21 dic-21 ene-22 feb-22 mar-22
BASE 15H SSPC


Chapo [msnm]
240.0
238.0
236.0
234.0
232.0
230.0
228.0
226.0
1 3 5 7 9 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63 65 67 69 71 73 75 77 79 81 83 85
S1 S2 S3 S1 S2 S3 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 S1 S2 S3 S4 M1 M2 M3 M4
jun-21 jul-21 ago-21 sept-21 oct-21 nov-21 dic-21 ene-22 feb-22 mar-22
BASE 15H SSPC