

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTRÉS
HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO ÑUBLE Y SU GESTIÓN ESTRATÉGICA
MEDIANTE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO SUPERFICIALES**

EDUARDO MUÑOZ-CASTRO¹
ÁLVARO MARTÍNEZ-CONDE CAMPS²
EDUARDO RUBIO ÁLVAREZ³
IVÁN ROJAS CHOQUE⁴
RAFAEL VALLEBUONA⁵
XIMENA VARGAS MESA⁶

RESUMEN

La necesidad de abastecer la demanda hídrica requiere, generalmente, construir obras que permitan gestionar la disponibilidad del recurso en el tiempo. No obstante, la persistente sequía y las proyecciones de cambio hidrológico sugieren nuevos desafíos en el diseño de estas obras. El objetivo del presente estudio radica en estimar la disponibilidad de recursos hídricos en contexto de clima cambiante para el embalse Nueva La Punilla, Región de Ñuble, y evaluar el impacto que tiene su operación en el estrés hídrico de la cuenca. Para ello se utilizó el modelo GR4J acoplado al módulo de nieve CemaNeige, el cual se forzó con cuatro modelos del CMIP6 bajo un escenario ssp585. Los resultados obtenidos muestran que la operación de un embalse que considera en su dimensionamiento las proyecciones de clima futuro permite cumplir su rol de almacenamiento y permite gestionar estratégicamente el estrés hídrico en la cuenca. Asimismo, agrega valor respecto a la condición natural donde bajo una condición de clima cambiante los caudales serían incluso inferiores a los ecológicos, lo cual abre el debate sobre la definición estacionaria del caudal ecológico.

¹ Asesor en Cambio Climático, Depto. Proyectos de Riego, Dirección de Obras Hidráulicas MOP. Actualmente Especialista en Hidrología en Montgomery & Associates Consultores – email: edualbertofdo@gmail.com

² Consultor independiente. Actualmente Ing. Hidráulico, APRISA – email: alvaromartinezconde@hotmail.com

³ Asesor en Hidrología, Depto. Proyectos de Riego, Dirección de Obras Hidráulicas MOP – email: eduardo.rubio.a@gmail.com

⁴ Jefe Dpto. Proyectos de Riego, Dirección de Obras Hidráulicas MOP – email: ivan.rojas@mop.gov.cl

⁵ Asesor Agroeconómico y Jefe Subrogante del Depto. Proyectos de Riego. Dirección de Obras Hidráulicas. MOP. email: rafael.vallebuona@mop.gov.cl

⁶ Asesora en Cambio Climático, Depto. Proyectos de Riego, Dirección de Obras Hidráulicas MOP – email: ximexvm@gmail.com

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de abastecer las demandas agrícolas con una seguridad de riego de 85% requiere, generalmente, construir obras que permitan gestionar la disponibilidad hídrica en el tiempo. Más aún, considerando que la demanda agrícola aumenta durante los meses de octubre a marzo, donde las precipitaciones son escasas, los sistemas de almacenamiento naturales (e.g., nieve) y artificiales (e.g., embalses) pueden contribuir a satisfacer dichos requerimientos. No obstante, la persistente sequía que ha ocurrido en Chile desde 2010 y las proyecciones de cambio hidrológico a nivel nacional que apuntan a una reducción en la disponibilidad hídrica por causa de, por ejemplo, la disminución en la acumulación nival, sugieren nuevos desafíos en el dimensionamiento de estas obras. Así, incorporar la idea de infraestructura hídrica resiliente durante la concepción, diseño, operación y mantención de obras hidráulicas de menor impacto ambiental y complementada con soluciones basadas en la naturaleza, resulta clave en un contexto de clima cambiante.

Los caudales medidos durante el estiaje en las cuencas del Río Ñuble han presentado un decrecimiento sistemático en el tiempo, lo cual se alinea con la disminución (aumento) en las precipitaciones (temperaturas) en la zona, pero se contrapone con las proyecciones agrícolas a nivel nacional, las cuales buscan aumentar la producción en línea con transformar a Chile en una potencia agroalimentaria. Asimismo, la Región de Ñuble ha sido una de las regiones del país que también se ha visto afectada por los impactos de la sequía meteorológica que persiste desde 2010, lo cual se refleja en los decretos de escasez aplicados en ella. En este contexto, entre los años 2004 a 2009 se inician estudios para construir un embalse en el río Ñuble, en las comunas de San Fabián y Coihueco, en la Provincia de Punilla, Región de Ñuble, que beneficiaría a regantes de comunas de la zona, aportando además a la generación hidroeléctrica y como reserva de agua para consumo humano. Siguiendo dicho curso, en el año 2022, se fijan nuevas exigencias al diseño considerando el efecto del cambio climático, la priorización del consumo humano y, ante este escenario de clima cambiante, verificar la satisfacción del caudal ecológico considerado en el proyecto. El objetivo del presente estudio radica en estimar la disponibilidad de recursos hídricos y de seguridad hídrica en contexto de clima cambiante para el embalse Nueva La Punilla, Región de Ñuble, y evaluar el impacto que tiene su operación en la gestión estratégica del estrés hídrico de la cuenca.

2 ZONA DE ESTUDIO Y DATOS

La zona de estudio corresponde a la cuenca del Río Ñuble en La Punilla, ubicada en la parte alta de la cuenca del Río Ñuble en la Región de Ñuble. La cuenca tiene una superficie de 1254.3 km² y se encuentra controlada por la estación fluviométrica Río Ñuble en La Punilla (Código BNA 8105001; 33,66°S – 71,32°O – 645 m s.n.m.), administrada por DGA, y tiene un rango de elevación que va desde los 645 a 3189 m s.n.m., con una elevación media de 1.696 m s.n.m. Como se ilustra en la Figura 1, se cuenta con dos cuencas controladas que comparten red de drenaje con la cuenca de interés: aguas arriba se ubica la cuenca del Río Sauces antes junta con Ñuble (607 km²) y aguas abajo la cuenca Río Ñuble en San Fabián (1646 km²). De este modo, para efectos de la configuración metodológica, el dominio de estudio se extiende a las tres cuencas, de manera tal de poder incluir verificaciones asociadas a la representatividad espacial de los resultados y su transferibilidad.

Dada su proximidad, las cuencas comparten el patrón de variabilidad estacional que exhibe la cuenca del Río Ñuble en La Punilla (Figura 1), presentando algunas diferencias ligadas a los montos, lo cual responde a los atributos fisiográficos que presenta cada cuenca. En términos hidrológicos, las cuencas presentan un marcado régimen pluvial. Si bien existe un aporte nival, el cual se suaviza en el desarrollo de la red de drenaje, resulta marginal en comparación al aporte de origen pluvial.

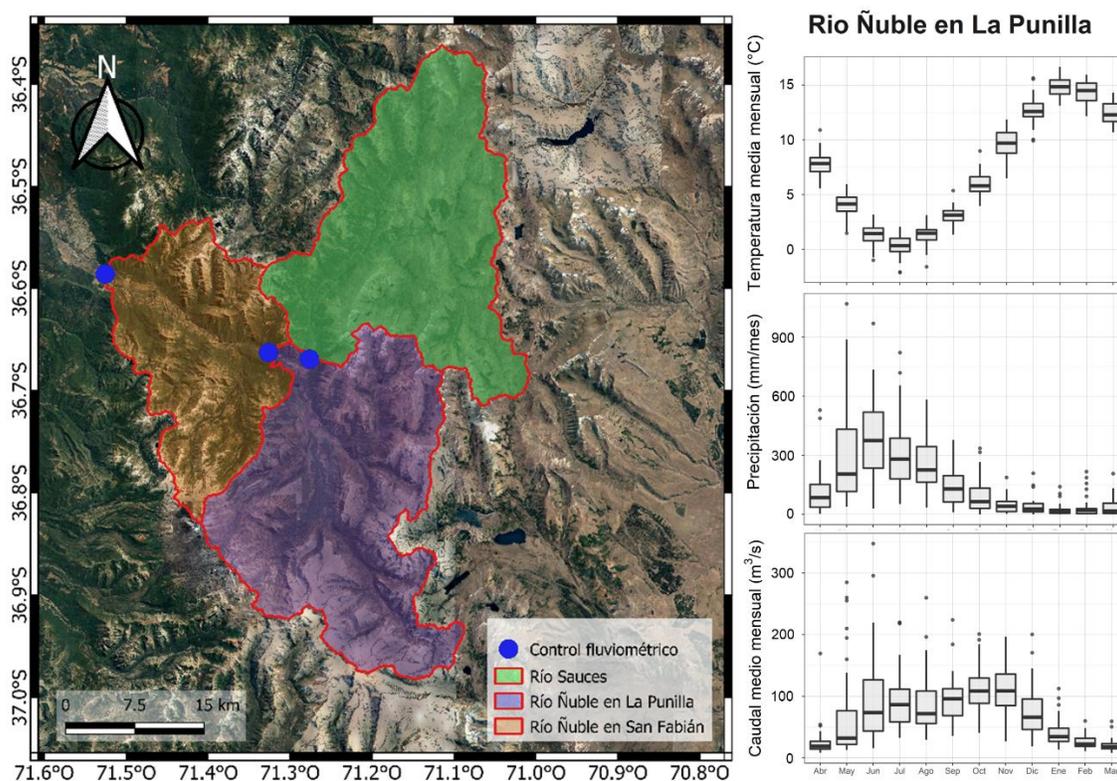


Figura 1: Cuencas de estudio con control fluviométrico y patrones hidroclimáticos asociados a la cuenca de Río Ñuble en La Punilla.

Para la caracterización geomorfológica de las cuencas se utiliza el modelo de elevación digital (DEM) “*Shuttle Radar Topography Mission*” (SRTM) a resolución de aproximadamente 90 x 90 m, el cual es remuestreado a una grilla de aproximadamente 100 x 100 m. Dicho producto se utiliza, por ejemplo, para definir la hipsometría de cada cuenca de interés.

3 METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA

3.1.1 Modelo hidrológico GR4J y módulo de nieve CemaNeige

La caracterización hidrológica de las cuencas de interés y sus proyecciones futuras en un contexto de cambio climático se realizan apoyados del modelo hidrológico GR4J (Perrin et

al., 2003), el cual se acopla al módulo de acumulación y derretimiento de nieve CemaNeige (Valéry et al., 2014a, 2014b). Para configurar el modelo hidrológico GR4J-CN se utilizan las series de precipitación diaria ajustada y la temperatura media diaria derivada del producto CR2MET v2.0, las cuales se agregan espacialmente a nivel de cuenca. Asimismo, se utiliza la hipsometría recuperada del DEM SRTM, mencionado anteriormente.

3.1.2 Enfoque de calibración y selección de parámetros

Para estimar los parámetros del modelo hidrológico se utiliza el algoritmo de optimización global *Shuffle complex evolution* (SCE-UA; Duan et al., 1992) y como función objetivo (FO) una combinación lineal basada en el promedio entre la eficiencia Kling Gupta (KGE) y la evaluación del caudal inverso ($1/Q$) en el índice KGE (iKGE), la cual se aplica a los caudales medios mensuales en Río Ñuble en Punilla. En cada iteración realizada hasta la convergencia se recupera, además del set de parámetros probado y el valor de la función objetivo, las métricas KGE, iKGE por separado, y la eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS). Así, la selección de parámetros se desarrolla filtrando de manera secuencial las N pruebas que genera el algoritmo según tres etapas:

1. Se filtran los sets de parámetros asociados a valores de FO dentro del 20% mejor.
2. Se filtran los sets asociados a valores de NSE dentro del 20% mejor.
3. Se filtran los sets asociados a valores de PBIAS dentro del 20% mejor.

A modo de refinar la selección i) se evalúa la función objetivo en dos periodos diferentes de calibración (i.e., periodo 1985 – 1990 y 2010 – 2020) y se filtra el conjunto de parámetros que reporta un desempeño ubicado en el 20% superior, y ii) se evalúa la función objetivo en la modelación asociada al periodo completo 1985-2020 transfiriendo los parámetros calibrados en Ñuble en Punilla a las cuencas del Río Sauces (aguas arriba de Punilla) y Ñuble en San Fabián (aguas abajo de Punilla). Finalmente, se selecciona y adopta aquel conjunto de parámetros que logra recuperar de manera conjunta el mejor desempeño al evaluar la modelación en las cuencas de Río Sauces y Ñuble en San Fabián, considerando para ello la menor distancia euclidiana al óptimo de la función de evaluación en ambas cuencas.

De este modo, la estrategia de calibración de parámetros propuesta apunta a asegurar, hasta cierto punto, la adecuada representación de diferentes características del hidrograma (i.e., parámetros multipropósitos), la transferencia temporal de parámetros y, adicionalmente, la transferencia espacial de los mismos minimizando la pérdida de desempeño.

3.2 PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Se utilizan las series de precipitación y temperatura media diaria derivadas de cuatro Modelos de Circulación General (GCM) del CMIP6 en escenario SSP5-8.5 (i.e., el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero y medidas sociopolíticas y económicas de mitigación más desfavorable). Dichos modelos corresponden a ACCESS-ESM1-5, CESM2-WACCM, IPSL-CM6A-LR y MIROC6, los cuales fueron estadísticamente escalados a escala de cuenca y luego corregidos por sesgo mediante el método multivariado MBCn (Cannon, 2018) el cual permite incluir (y preservar dentro de lo posible) la codependencia

que existe entre variables meteorológicas al momento de realizar la corrección. La selección de los GCM se basa en la continuidad que estos suponen en términos de su estructura (i.e., conceptualización de la dinámica atmosférica y sus interacciones) e institución desarrolladora respecto a los GCM del CMIP5 seleccionados en el proyecto Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2019a, 2019b, 2018, 2017)

3.3 MODELO DE OPERACIÓN DE EMBALSE NUEVA LA PUNILLA

En el año 2021 se estableció la regla de operación para el embalse mediante la utilización de un modelo operacional, simulando cómo el sistema responde ante diferentes escenarios hidrológicos históricos (1989/90 - 2018/19), contando con la captación de aguas del Río Ñuble en Punilla. Aguas abajo, se libera el caudal necesario para mantener los caudales ecológicos requeridos en cada tramo del río. También se considera la captación de aguas de terceros y la satisfacción de las necesidades de riego después de recibir aportes de las cuencas intermedias.

El embalse opera asignando una porción del volumen útil para satisfacer las demandas de las acciones mejoradas, categorizadas como tipo A, y otra para las nuevas acciones, catalogadas como tipo B. Así, el embalse reserva un volumen de 260 Hm³ para el riego de 60.000 Ha de las acciones A, reserva un volumen adicional para el riego mínimo de 2.244 Ha y un máximo de 7.100 Ha para las acciones tipo B, un volumen para consumo humano (CHum) de 3,9 Hm³, y un volumen para sedimentos (VSed) de 25 Hm³. Bajo esta configuración, el volumen de reserva fijo (VRF) se distribuye, en caso de ser necesario, para los volúmenes destinados al riego. Esta configuración permite almacenar un volumen total de 420 Hm³ en operación normal (ver Tabla 1 y Tabla 2).

Tabla 1: Caudales en m³/s asociados a la operación del embalse.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Qeco	17,00	17,40	17,50	18,30	16,40	14,10	10,20	9,70	9,00	10,20	8,20	15,40
Acc. A	75,29	57,16	27,35	6,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,36	53,35	75,9
Acc. B	8,91	6,76	3,24	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,29	6,31	8,98

Tabla 2: Regla de operación propuesta para embalse Nueva La Punilla.

Tipo A			Tipo B			Vol. Adicional (Hm ³)		
Vol (Hm ³)	Sup. (Ha)	Acc. (-)	Vol (Hm ³)	Sup. (Ha)	Acc. (-)	VRF	CHum	VSed
260	60.000	21.221	22,4	2.244	2.244	109	3,9	25

Para los efectos de la regla de operación, el volumen final del embalse se determina sumando al volumen inicial (V_{inic}), el volumen afluente (V_{afl}) y restando los volúmenes por concepto de entregas para las acciones Tipo A (V_{entA}) y Tipo B (V_{entB}), incluyendo los volúmenes extraídos del volumen de reserva fijo cuando corresponda (V_{adic}), los volúmenes evaporados (V_{evap/fil}) y los rebases del embalse (V_{rebase}), lo cual se ilustra en la siguiente expresión:

$$V_{final} = V_{inic} + V_{afl} - V_{entA} - V_{entB} - V_{evap/fil} - V_{rebase} + V_{adic} \quad (1)$$

Este balance considera el uso del factor de entrega aplicado a las acciones tipo A y tipo B, el cual se estima de acuerdo en función de la temporada de riego respectiva, el volumen pronosticado, definido como la suma del volumen almacenado en el embalse a fin del mes de septiembre, más el volumen de pronóstico de deshielo octubre-abril.

3.4 CONCEPTUALIZACIÓN Y CÁLCULO DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO

El índice de estrés hídrico se define como la relación a largo plazo entre las extracciones de agua y su disponibilidad (WSI, Alvarez-Garreton et al., 2023). En este caso se considera el índice mensualmente, en porcentaje, relacionado con la demanda hídrica asociada, en este caso particular, a los caudales ecológicos (Qeco) definidos mensualmente en base a un período fijo en el tiempo y se evalúa dicha demanda de acuerdo con la expresión (2), la cual se interpreta según lo indicado en la Tabla 3. Notar que la demanda sólo queda definida por el Qeco puesto que se busca analizar los impactos al pie del embalse proyectado.

$$WSI = 100 \times \frac{\text{Demanda hídrica}}{\text{Oferta hídrica natural}} \quad (2)$$

Tabla 3: Interpretación del índice de estrés hídrico

Riesgo de escasez hídrica	Índice de estrés hídrico (WSI)	Implicancias
Alto	> 70 %	La cuenca está sobredemandada y no se recomienda agregar nuevas demandas en la cuenca.
Medio	40 - 70 %	Nuevas extracciones podrían afectar las necesidades ecológicas y demanda aguas abajo.
Bajo	<40 %	La oferta hídrica natural es suficiente para satisfacer las demandas actuales de extracción.

Fuente: Adaptado de Alvarez-Garreton et al. (2023).

4 RESULTADOS

Del proceso de calibración se obtienen los parámetros que se presentan en la Tabla 4, los cuales son utilizados para efectos de la modelación. A modo de contar con una evaluación cualitativa y cuantitativa del desempeño del modelo y su habilidad para representar diferentes periodos hidroclimáticos (i.e., transferibilidad temporal) y cuencas que comparten red de drenaje (i.e., transferibilidad espacial), se presenta la Tabla 5 y Figura 2. De allí se desprende que la modelación permite recuperar los patrones estacionales de los caudales observados y, asimismo, los valores (i.e., montos) asociados sin comprometer en gran medida el desempeño del modelo recuperado del proceso de calibración.

Tabla 4: Parámetros recuperados del proceso de calibración y filtro secuencial.

X1 (mm)	X2 (mm/d)	X3 (mm)	X4 (días)	CN1 (-)	CN2 (mm/°C/d)
152,0323	12,8797	1170,7645	2,2814	0,9864	7,5566

Tabla 5: Desempeño del modelo hidrológico evaluado en términos de la representación del caudal medio mensual en las cuencas de interés para el periodo 1990-2010.

Cuenca	Río Sauces antes junta con Río Ñuble	Río Ñuble en La Punilla	Río Ñuble en San Fabián
KGE	0,86	0,91	0,92
iKGE	0,25	0,91	0,87
FO	0,55	0,91	0,89
NSE	0,83	0,82	0,86
PBIAS	8,40%	1,60%	0,10%

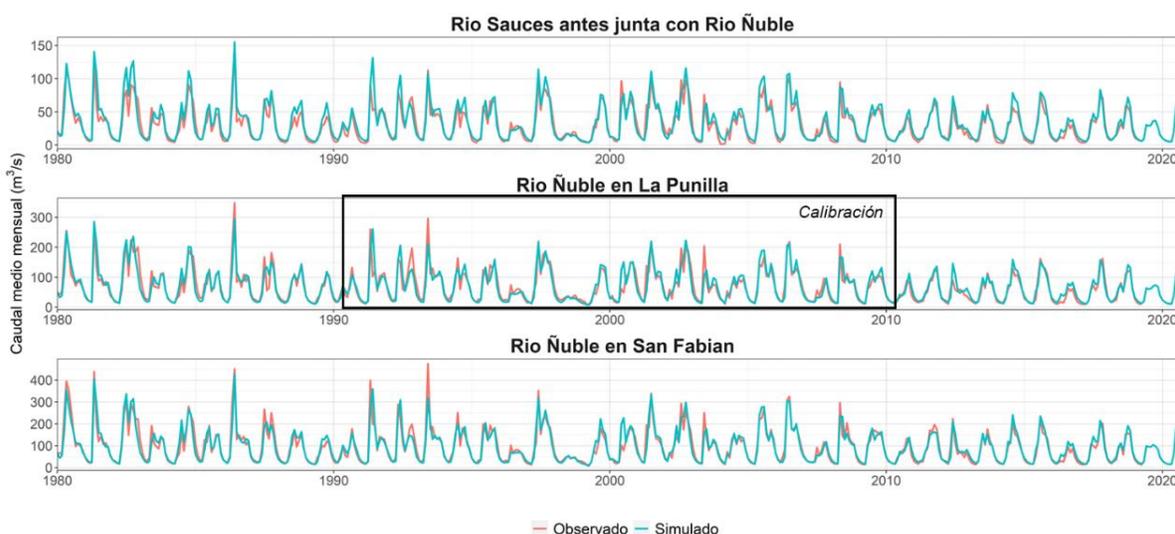


Figura 2: Serie de caudales medios mensuales derivados de la modelación hidrológica (simulado) en el periodo 1980-2020 de las cuencas Río Sauces, Ñuble en La Punilla y Ñuble en San Fabián y comparación respecto a caudales de referencia (observado).

A partir de la modelación hidrológica de la cuenca Río Ñuble en La Punilla utilizando las proyecciones de cambio climático asociadas a cada GCM del CMIP6 considerado para el análisis, se obtienen proyecciones futuras, las cuales se resumen en la Tabla 6, considerando los cambios anuales promedio en el periodo 2028-2058 y su comparación respecto al periodo de referencia 1989-2019. Allí se observa que existe coherencia entre las proyecciones de cambio hidroclimático futuro, con aumentos en la temperatura de entre 0,9 – 1,2°C y evapotranspiración potencial del orden de 7,4 – 11,1%, mientras que se proyecta una disminución de precipitación (5,7 – 10,1%) y caudal (6,2 – 11,8%). En este sentido, los resultados apuntan a que, en términos de los valores anuales promedio en el periodo, los GCM CESM2-WACCM e IPSL-CM6A-LR serían los más desfavorables.

Tabla 6: Temperatura, evapotranspiración potencial, precipitación y caudal medio anual en el periodo de referencia 1989-2019 y proyecciones para el periodo futuro 2028-2058 a partir de cuatro GCMs en escenario ssp5-8.5 para Ñuble en Punilla (pie embalse). En rojo se muestran los cambios absolutos o porcentuales respecto a la referencia (Ref).

Modelo	Periodo	T (°C)	ETP (mm/año)	P (mm/año)	Q (m ³ /s)
CR2Met (Ref)	1989-2019	7,3	630	1.771	68,5
ACCESS-ESM1-5	2028-2058	8,5 (+1,2)	690 (+9,5%)	1.670 (-5,7%)	64,2 (-6,2%)
CESM2-WACCM	2028-2058	8,8 (+1,5)	700 (+11,1%)	1.593 (-10,1%)	60,5 (-11,7%)
IPSL-CM6A-LR	2028-2058	8,5 (+1,2)	687 (+8,9%)	1.594 (-10,0%)	60,4 (-11,8%)
MIROC6	2028-2058	8,2 (+0,9)	677 (+7,4%)	1.638 (-7,5%)	62,8 (-8,3%)

En la Figura 3 y Figura 4 se observan, para cada mes, las curvas de distribución de probabilidad empírica acumulada (ECDF) asociada al WSI a pie de embalse, calculado para la condición sin y con embalse según las series de caudal asociadas a la climatología histórica y futura, respectivamente. El índice se estima como la razón entre el caudal demandado, en este caso el caudal ecológico (Qeco), y la oferta hídrica efectiva en el punto. Cabe mencionar que, en ambas figuras, el eje y representa una probabilidad de no excedencia, mientras que el eje x representa el valor de interés, el cual en este caso corresponde al WSI. En consecuencia, para el WSI un “mejor” resultado viene dado, en términos prácticos, por aquellas curvas que se acercan más al cero del eje y, puesto que darían cuenta de una mayor fracción de tiempo con valores de estrés bajos. Así, de la Figura 3 y Figura 4 se desprende que:

- El embalse permite gestionar el estrés hídrico y asegura satisfacer los caudales ecológicos aun cuando en condiciones naturales (i.e., sin embalse) estos no se lograban suplir. Ejemplo de ello son los meses de enero y febrero, donde el embalse permite regular el estrés hídrico en torno al 25-50%, mientras que en la condición natural se observan casos donde el WSI incluso supera la disponibilidad hídrica natural (i.e., WSI > 100%).
- La gestión del estrés hídrico en los meses de menor disponibilidad natural se realiza a partir de un aumento del WSI en periodos que se caracterizan por la concentración de las precipitaciones en la zona de interés (i.e., junio a agosto). Lo anterior se expresa en términos gráficos a partir del desplazamiento de las curvas segmentadas hacia el lado derecho de los paneles.
- Al comparar las condiciones sin embalse reportadas del análisis de operación según la climatología histórica (Figura 3) y futura (Figura 4) se puede observar que la disminución promedio de los caudales medios mensuales proyectada acentúa el estrés hídrico en la zona. Lo anterior queda de manifiesto, por ejemplo, en meses desde febrero hasta mayo, las curvas futuras dan cuenta de un mayor índice de estrés hídrico (i.e., se desplazan hacia la derecha del panel). Por lo tanto, dado que el Qeco mensual se mantiene constante independiente de la disponibilidad hídrica natural, la única opción que recupera la condición expuesta corresponde a una disminución en los caudales medios mensuales.

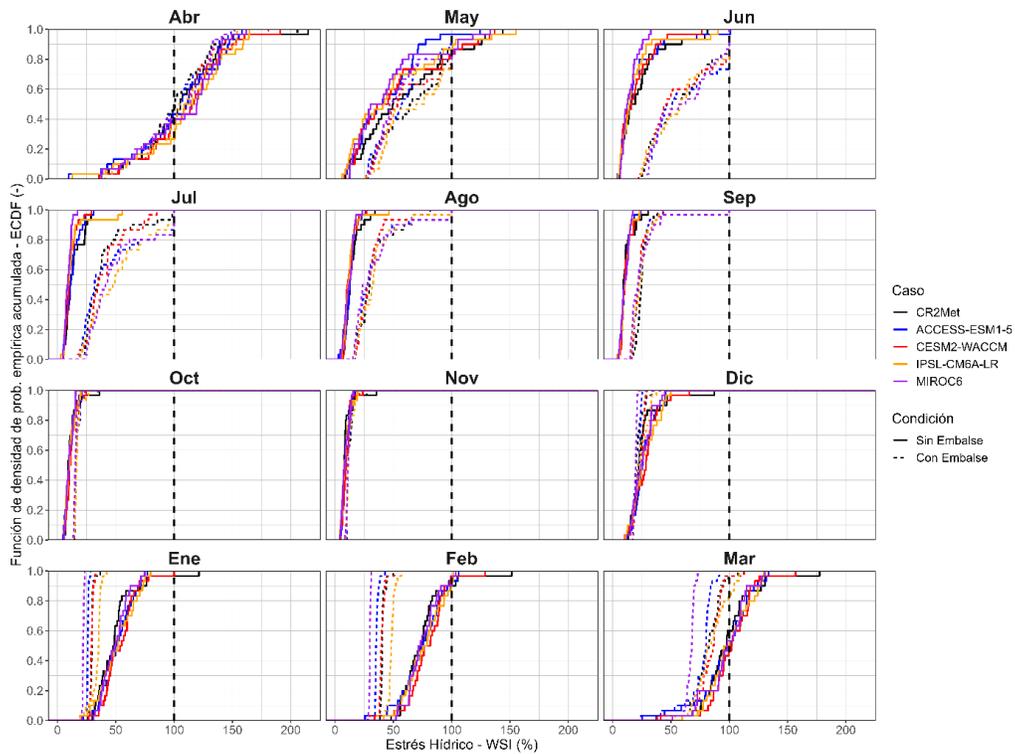


Figura 3: WSI al pie de embalse para la condición con embalse y sin embalse según la climatología en el periodo histórico de referencia 1989-2019.

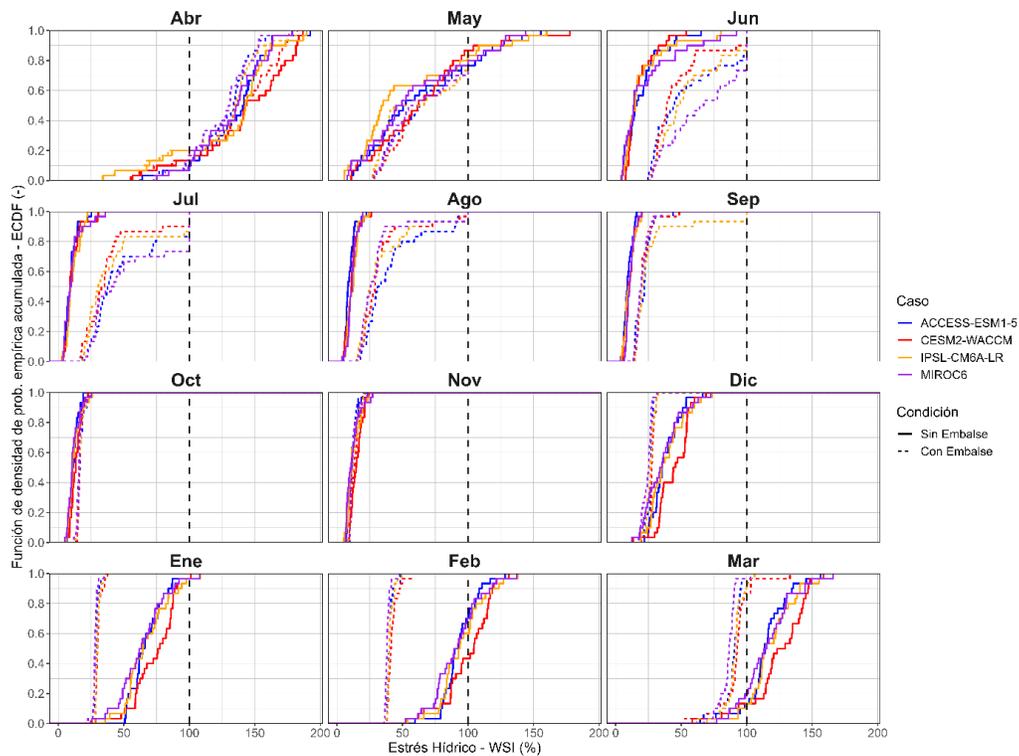


Figura 4: WSI al pie de embalse para la condición con embalse y sin embalse según la climatología proyectada hacia el periodo 2028-2058.

Resulta evidente que, bajo la condición natural (i.e., sin operación del embalse) la cuenca tiene un WSI asociado a un alto riesgo de escasez hídrica pues supera el 70%. Sin embargo, la operación del embalse y la regulación que éste realiza permite satisfacer la demanda en meses donde naturalmente no se lograría. Lo anterior queda en evidencia al analizar el WSI promedio mensual en condición sin y con embalse (Tabla 7 y Tabla 8).

Tabla 7: WSI promedio mensual al pie del embalse para la condición con embalse y sin embalse según la climatología en el periodo histórico de referencia 1989-2019.

Caso		Índice de estrés hídrico (WSI) promedio mensual al pie del embalse en el periodo 1989/90 - 2018/19 (%)											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
CR2Met	Sin embalse	50	75	98	106	59	24	14	14	11	11	9	26
	Con embalse	30	41	81	101	70	59	40	34	25	17	12	21
	Diferencia	-20	-34	-18	-5	12	36	27	20	14	6	3	-4
ACCESS-ESM1-5	Sin embalse	51	74	96	104	44	21	12	13	11	11	9	27
	Con embalse	26	36	75	102	59	60	45	34	24	17	12	22
	Diferencia	-25	-39	-21	-2	15	39	33	21	13	6	3	-5
CESM2-WACCM	Sin embalse	54	79	102	110	52	20	11	12	11	11	10	28
	Con embalse	29	40	84	106	66	58	41	31	24	16	12	23
	Diferencia	-25	-39	-18	-5	14	38	30	18	12	5	2	-5
IPSL-CM6A-LR	Sin embalse	51	76	100	111	49	20	12	13	11	11	9	27
	Con embalse	34	48	85	107	72	60	52	35	26	17	12	24
	Diferencia	-18	-28	-16	-4	23	40	39	22	15	6	3	-3
MIROC6	Sin embalse	50	75	98	107	46	15	9	12	11	10	9	26
	Con embalse	22	30	67	102	59	62	50	34	26	16	11	20
	Diferencia	-28	-45	-31	-5	14	47	41	22	15	6	3	-6

Tabla 8: WSI promedio mensual al pie del embalse para la condición con embalse y sin embalse según la climatología proyectada hacia el periodo 2028-2058.

Caso		Índice de estrés hídrico (WSI) promedio mensual al pie del embalse en el periodo 2028/29 - 2057/58 (%)											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ACCESS-ESM1-5	Sin embalse	67	94	115	134	64	20	10	10	9	12	12	38
	Con embalse	30	40	89	127	72	55	50	41	21	17	12	26
	Diferencia	-38	-53	-25	-7	8	35	40	32	12	5	0	-12
CESM2-WACCM	Sin embalse	74	100	124	142	65	18	11	11	11	13	15	45
	Con embalse	30	42	92	134	70	48	40	34	21	17	14	28
	Diferencia	-43	-58	-32	-7	5	30	29	23	10	3	-1	-17
IPSL-CM6A-LR	Sin embalse	67	95	119	131	55	21	11	12	11	12	13	39
	Con embalse	30	41	91	125	68	55	42	34	27	17	13	26
	Diferencia	-37	-54	-28	-7	13	35	31	22	17	4	0	-13
MIROC6	Sin embalse	64	91	116	132	60	24	11	12	11	12	12	36
	Con embalse	28	39	86	125	71	67	53	31	20	16	13	24
	Diferencia	-35	-53	-30	-7	11	43	43	20	9	5	1	-12

En las tablas anteriores se observa que en los meses de diciembre a abril el WSI disminuye, mientras que en el resto de los meses el WSI aumenta independiente de la climatología empleada para el cálculo. En síntesis, la operación del embalse aumenta el WSI al pie del embalse en los meses de no riego en comparación al caso sin embalse, mientras que en la temporada de riego este índice disminuye en algunos meses (e.g., enero y febrero). Esto da cuenta de la gestión de WSI que realiza el embalse durante su operación y el valor agregado respecto a la condición natural.

5 CONCLUSIONES Y PROSPECTIVAS

A partir de los resultados obtenidos, a continuación, se resume los principales comentarios y conclusiones asociados:

- Las proyecciones de cambio climático hacia el periodo 2028-2058 apuntan a un aumento de temperatura median anual en el rango de 0,9 – 1,5°C respecto a 1989-2019 dependiendo del GCM. Dicho aumento se acentúa en el periodo primavera-verano (i.e., octubre a marzo) en comparación a otoño-invierno (i.e., abril a septiembre), donde se reporta, en promedio, un aumento de 1,7°C respecto a 0,8°C.
- En términos de los cambios medios anuales proyectados en precipitación y caudal, se tiene que para el periodo 2028-2058, en general, las magnitudes asociadas disminuyen respecto a 1989-2019. Dependiendo del GCM, dichas disminuciones se estiman del orden de 6-10% para el caso de precipitación y 6-12% para el caso del caudal. En términos estacionales, dichos cambios se traducen en una disminución de los caudales medios proyectados de, en promedio, 5-33%.
- Según la configuración propuesta, la operación del embalse permite gestionar de manera estratégica el estrés hídrico al pie del embalse, estabilizando el indicador en aquellos meses de menor disponibilidad hídrica natural (e.g., enero y febrero). Asimismo, permite satisfacer las condiciones de seguridad de riego del 85% para una superficie de 60.000 Hectáreas tanto en un contexto de clima actual como futuro.
- La imposición de un caudal ecológico fijo sin considerar la variabilidad hidrológica natural del sistema corresponde a una medida restrictiva que coarta la operación del embalse. En este contexto, resulta necesario visitar dicha definición e incorporar una sensibilización asociada al cambio natural del sistema en respuesta al cambio en las condiciones del clima. Lo anterior, considerando que, incluso bajo la condición sin embalse, en el punto al pie del embalse proyectado el WSI es mayor a 100%.

Si bien el presente estudio evaluó la operación del embalse en un contexto hidroclimático diferente al histórico, subyace el supuesto de ocurrencia modo pronóstico de los caudales afluentes al embalse, lo cual, dados los alcances y limitaciones de los GCM, resulta impreciso. Sin perjuicio de lo anterior, la evaluación propuesta permite incorporar la variabilidad climática futura y su expresión en la disponibilidad hídrica. Para efecto de mejorar el análisis, se propone generar series sintéticas, pero considerando proyecciones futuras a modo de alterar la secuencia de años y sensibilizar los resultados de la operación del sistema de almacenamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Proyectos de Riego de la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas por autorizar el uso de los datos presentados en el artículo. Del mismo modo, se agradece a los revisores anónimos por los aportes realizados.

REFERENCIAS

- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J.P., Billi, M., Lefort, I., Marinao, R., Barría, P., 2023. Protecting environmental flows to achieve long-term water security. *J Environ Manage* 328, 116914. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116914>
- Cannon, A.J., 2018. Multivariate quantile mapping bias correction: an N-dimensional probability density function transform for climate model simulations of multiple variables. *Clim Dyn* 50, 31–49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>
- Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Perrin, C., Michel, C., 2020. airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.4.3.65. <https://doi.org/doi:10.15454/EX11NA>
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., Andréassian, V., 2017. The suite of lumped GR hydrological models in an R package. *Environmental Modelling and Software* 94, 166–171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002>
- DeWalle, D.R., Rango, A., 2008. Principles of snow hydrology. Cambridge University Press.
- DGA, 2019a. Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en la macrozona sur y parte norte de la macrozona Austral, SIT N° 441.
- DGA, 2019b. Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la parte sur de la Macrozona Austral e Isla de Pascua, SIT N° 444.
- DGA, 2018. Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional a las macrozonas Norte y Centro, SIT N° 435, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por UNTEC en UTP con la P.U. Católica de Chile.
- DGA, 2017. Metodología para la Actualización del Balance Hídrico Nacional.
- Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour Res.* <https://doi.org/10.1029/91WR02985>
- L'hôte, Y., Chevallier, P., Coudrain, A., Lejeune, Y., Etchevers, P., 2005. Relationship between precipitation phase and air temperature: comparison between the Bolivian Andes and the Swiss Alps / Relation entre phase de précipitation et température de l'air: comparaison entre les Andes Boliviennes et les Alpes Suisses. *Hydrological Sciences Journal* 50. <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.989>
- Muñoz-Castro, E., Mendoza, P.A., 2020. Identificabilidad de parámetros en modelos hidrológicos GR4J: ¿Somos consistentes?, in: Vargas, X., Muñoz-Castro, Eduardo (Eds.), *Rutas Hidrológicas*. Santiago, Chile.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? *J Hydrol (Amst)* 303, 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J Hydrol (Amst)* 279, 275–289. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Valéry, A., Andréassian, V., Perrin, C., 2014a. “As simple as possible but not simpler”: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 1 - Comparison of six snow accounting routines on 380 catchments. *J Hydrol (Amst)* 517, 1166–1175. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.059>
- Valéry, A., Andréassian, V., Perrin, C., 2014b. ‘As simple as possible but not simpler’: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *J Hydrol (Amst)* 517, 1176–1187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.058>
- Valéry, A., Andréassian, V., Perrin, C., 2010. Regionalization of precipitation and air temperature over high-altitude catchments – learning from outliers. *Hydrological Sciences Journal* 55, 928–940. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.504676>