

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTUDIO DE TENDENCIAS EN LOS AFLUENTES A LOS EMBALSES RALCO
Y LAJA CONSIDERANDO 300 AÑOS DE RECONSTRUCCIÓN**

PILAR BARRIA S.¹
ARIEL MUÑOZ ²
KEVIN WALSH ³
MURRAY PEEL ⁴
IGNACIO MUNDO ⁵

RESUMEN

La cuenca del Biobío, localizada en el sector central de Chile, es estratégica dada su importancia para la agricultura y la generación hidroeléctrica en la región. De acuerdo a los registros de caudales afluentes a los embalses Ralco y Laja, se han observado disminuciones en los volúmenes sin regulación durante los últimos 50 años. Estas tendencias se observan tanto a nivel anual como en la estación de deshielo. Sin embargo, al observar el caudal del período de otoño-invierno, esta tendencia es positiva. Uno de los grandes problemas en la región es la falta de registros extensos de caudales. En este contexto la Dendrocronología constituye una importante herramienta, al permitir obtener a partir de los anillos de crecimiento de los árboles la variabilidad natural de los principales forzantes de la generación de escorrentía. En el presente trabajo, cronologías de *Araucaria Araucana* fueron utilizados para reconstruir 300 años de los afluentes a los embalses Laja y Ralco. Nuestro principal resultado es que las tendencias observadas en el registro instrumental no son significativas, y corresponden a un ciclo de la variabilidad natural del clima.

¹Estudiante de doctorado, Earth Sciences Department, University of Melbourne

²Profesor, Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

³Profesor Asociado, Earth Sciences Department, University of Melbourne

⁴Investigador Asociado, Department of Infrastructure Engineering, University of Melbourne

⁵Investigador, Laboratorio de Dendrocronología e Historia Ambiental, IANIGLA, CRICYT.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El caudal responde a la variabilidad climática en distintas escalas de tiempo que varían desde horas a siglos. Las autoridades del agua están lidiando con demandas crecientes de caudal y con limitaciones en el suministro del recurso [D. M. Meko *et al.*, 2012]. En particular en la parte alta de la cuenca del río Biobío se han observado reducciones en el caudal medio anual y el caudal del periodo de deshielo. El entender y atribuir estos cambios requiere del análisis de la variabilidad natural del recurso en el pasado, sin embargo la escasez de registros extensos impide atribuir y entender estos cambios. En este contexto, los métodos paleoclimáticos son una herramienta muy útil para entender las variaciones en los procesos de generación de escorrentía en el tiempo en áreas como Chile central, pues permiten extender los registros a cientos de años. En el presente trabajo, métodos de reconstrucción paleoclimática son utilizados para generar un modelo del caudal medio anual (Abril-Marzo) y del caudal del periodo de otoño-invierno (Abril-Septiembre) de los afluentes al Embalse Ralco y Laja, en la parte alta del río Biobío. Debido a que el comportamiento del caudal de la estación de primavera- verano (deshielo) es similar al caudal anual, y a que al reconstruir el período de deshielo con las cronologías ésta comparte regresores con el caudal anual (no independiente), decidimos no presentar dicha reconstrucción.

Los registros paleoclimáticos derivan de *Araucaria Araucana*, conífera de larga vida que crece en los Andes patagónicos. [Muñoz *et al.*, 2013] estudian los patrones de crecimiento de las araucanas indicando que se correlacionan positivamente con la precipitación en la zona central de Chile y negativamente con las temperaturas en la zona, lo que se atribuye a que estos árboles crecen de acuerdo a la disponibilidad de humedad en el suelo. La temperatura y la precipitación son los principales forzantes de la generación de escorrentía en la zona, lo que valida el uso de anillos de crecimiento de arboles con este fin.

Chile Central se caracteriza por presentar un clima del tipo temperado con veranos secos y calurosos e inviernos húmedos y fríos de acuerdo a la Clasificación de Köppen-Geiger [Peel *et al.*, 2007]. En particular, la cuenca del río Biobío, ubicada entre 36°42'S y 38°49'S, y 71°W y 73° 20'W, yace en la transición entre dos zonas climáticas, la primera con veranos cálidos y secos y la segunda que carece de un periodo seco. El río Biobío ha sido identificado como fundamental para la economía chilena por su importancia en las actividades forestales, de agricultura y de hidroelectricidad [CADE-IDEPE, 2004]. Los caudales utilizados en este estudio corresponden a los afluentes naturales a los embalses Ralco y Laja, los que en conjunto con las cronologías utilizadas en el presente estudio se muestran en la Figura 1.

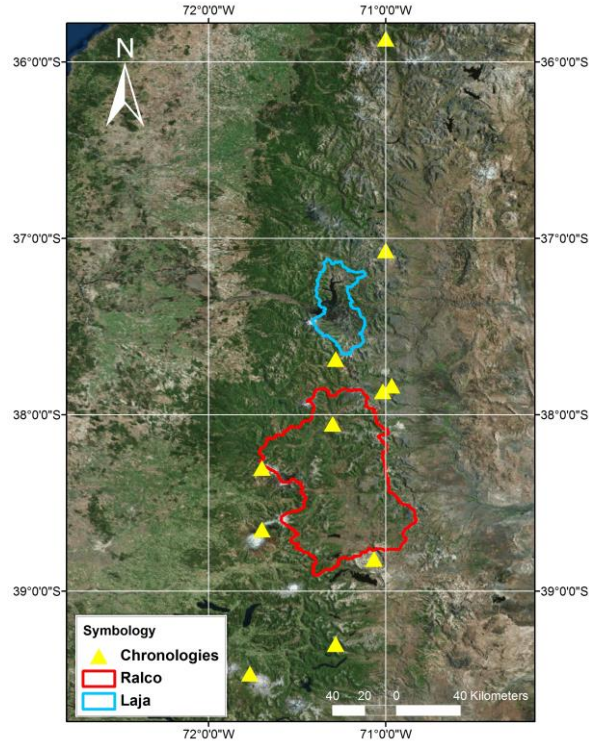


Figura 1 Ubicación cuencas y cronologías

Los caudales fueron pre-procesados ponderándolos por el área de las sub-cuencas que ellas representan y posteriormente estudiados. De acuerdo al análisis de los registros de caudales en la cuenca, tendencias negativas (reducciones) en el caudal medio anual y el del período de deshielo han sido observados, lo que se contrapone a la tendencia positiva de los caudales del período de otoño-invierno (aumentos). Dichas tendencias no son estadísticamente significativas y pueden ser observadas en la Figura 2, en que se presentan las pendientes del ajuste lineal de cada serie de tiempo.

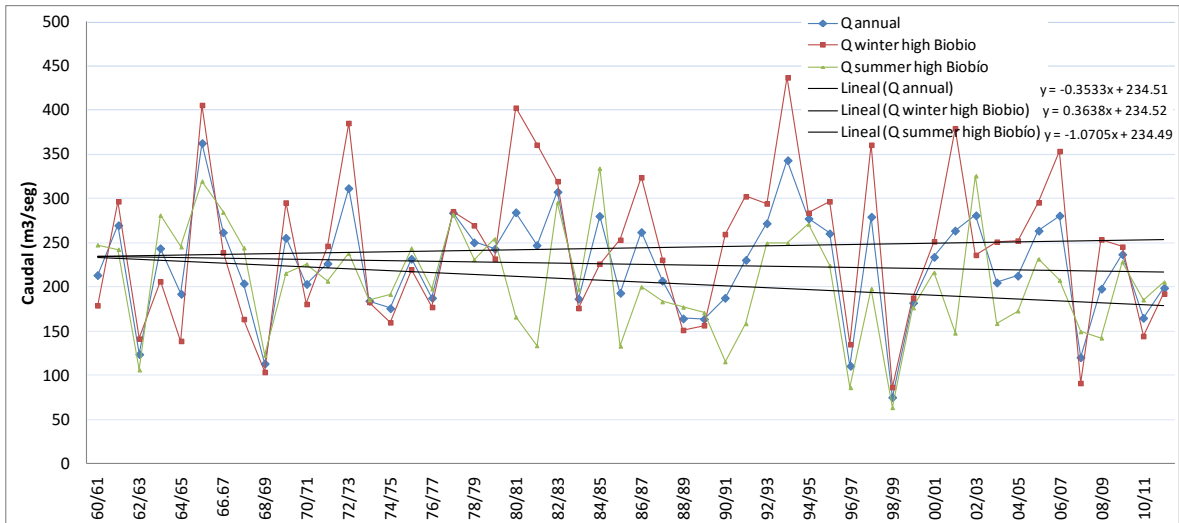


Figura 2 Tendencias en los caudales medios anuales y estacionales afluentes a los embalses Laja y Ralco de acuerdo a los registros instrumentales

Ante este contexto las principales interrogantes que buscamos abordar en el presente trabajo son:

- ¿Es posible reconstruir el caudal anual y estacional afluente a los embalses Ralco y Laja?
- ¿Cómo se comparan las tendencias obtenidas a partir de los registros de caudales con los resultados considerando 300 años de caudal reconstruido?.
- ¿Cómo se comparan los principales estadísticos y curvas de probabilidad de excedencia entre los registros instrumentales y los caudales reconstruidos?.

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo abordamos los objetivos a través de una reconstrucción de los caudales afluentes a los embalses Ralco y Laja, utilizando anillos de crecimiento de Araucarias. A continuación presentamos los datos y metodología utilizados.

2.1 Datos

Estadística de caudales medios mensuales de los afluentes a los embalses Laja y Ralco fueron entregados por ENDESA (Empresa Nacional de Energía Sociedad Anónima) Chile (comunicación personal, Octubre 12, 2013). La información abarca el período comprendido entre 1960 al 2011, y representa el caudal "natural" afluente a los embalses que suministran el recurso para la generación en las hidroeléctricas Abanico, El Toro, Ralco y Pangué.

Cronologías de anillos de crecimiento de árboles fueron utilizados como proxy de las variables climáticas en la región (precipitación y temperatura). Un set de 31 cronologías de *A. araucana* y *A. chilensis* muestreado por el Dr. Ariel Muñoz (comunicación personal, Julio 18, 2013) en diferentes sectores de la cordillera de los Andes en el sector de Chile Central fueron utilizadas para el modelo de reconstrucción. De éstas cronologías, 6 fueron seleccionadas pues presentan mejores correlaciones con el caudal en las cuencas en estudio.

2.2 Metodología

La reconstrucción de caudal en los afluentes a los Embalses Ralco y Laja fue realizada utilizando regresión lineal múltiple, incorporando las componentes principales de las cronologías de crecimiento de árboles que presentaron mejores correlaciones con el caudal y precipitación en el área. El caudal utilizado corresponde a un promedio ponderado de los caudales afluentes al Embalse Laja y al Embalse Ralco. En la calibración del modelo se utilizó el total de la serie de tiempo de caudales observados disponibles, debido a que los registros son cortos. Sin embargo, el modelo se validó utilizando la metodología "leave one out" [David M. Meko and Woodhouse, 2011]. Este método consiste en sucesivamente tomar un valor de la serie de tiempo de las observaciones y calibrar el modelo con los restantes valores de la serie de tiempo. Luego con aquel modelo se predice la variable que se dejó fuera. La evaluación del modelo seleccionado se realizó utilizando el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de Nash & Sutcliffe y el error cuadrático medio (RMSE). Además se evaluó el estadístico F de la regresión lineal, junto con el pvalor de dicho estadístico (P_f), la reducción del error (RE) y se evaluó la independencia de los residuos utilizando el estadístico Durbin Watson (DW).

Una vez calibrado el modelo, se utilizó para reconstruir el caudal medio anual y el caudal medio de otoño-invierno de los afluentes a los embalses Laja y Ralco. Los análisis de tendencias fueron realizados utilizando la prueba de Mann-Kendall y en la comparación de las curvas de probabilidad de excedencia se utilizó el método Mann-Whitney U test.

3. RESULTADOS

Utilizando la metodología descrita en el capítulo anterior obtuvimos la reconstrucción de los afluentes a los Embalses Ralco y Laja, una para los caudales anuales y otro para los caudales del período de otoño e invierno. Estas reconstrucciones explican aproximadamente un 42% de la varianza del caudal observado. En la Tabla 1 se presentan los estadísticos de los modelos obtenidos. En la Figura 3 se presentan ambos, los caudales observados y los reconstruidos en color rojo durante el período observado. Para el caso del caudal medio anual, los anillos de crecimiento de árboles se extienden hasta el año 2001/02, y para el caudal medio de otoño e invierno hasta el año 2003/04, por lo que las reconstrucciones se extienden hasta dichos años.

Tabla 1 Estadísticos de los modelos de reconstrucción de caudal

Variable	Periodo	R^2	R^2_{adj}	F	P_f	Nash-Sutcliffe	RE	RE Validación	RMSE	RMSE Validación	DW
Q anual	1960-2001	0.427	0.37	5.37	0.0008	0.43	0.43	0.21	0.84	0.91	2.15
Q otoño-invierno	1960-2003	0.416	0.37	6.95	0.00025	0.42	0.42	0.3	0.81	0.84	2.3

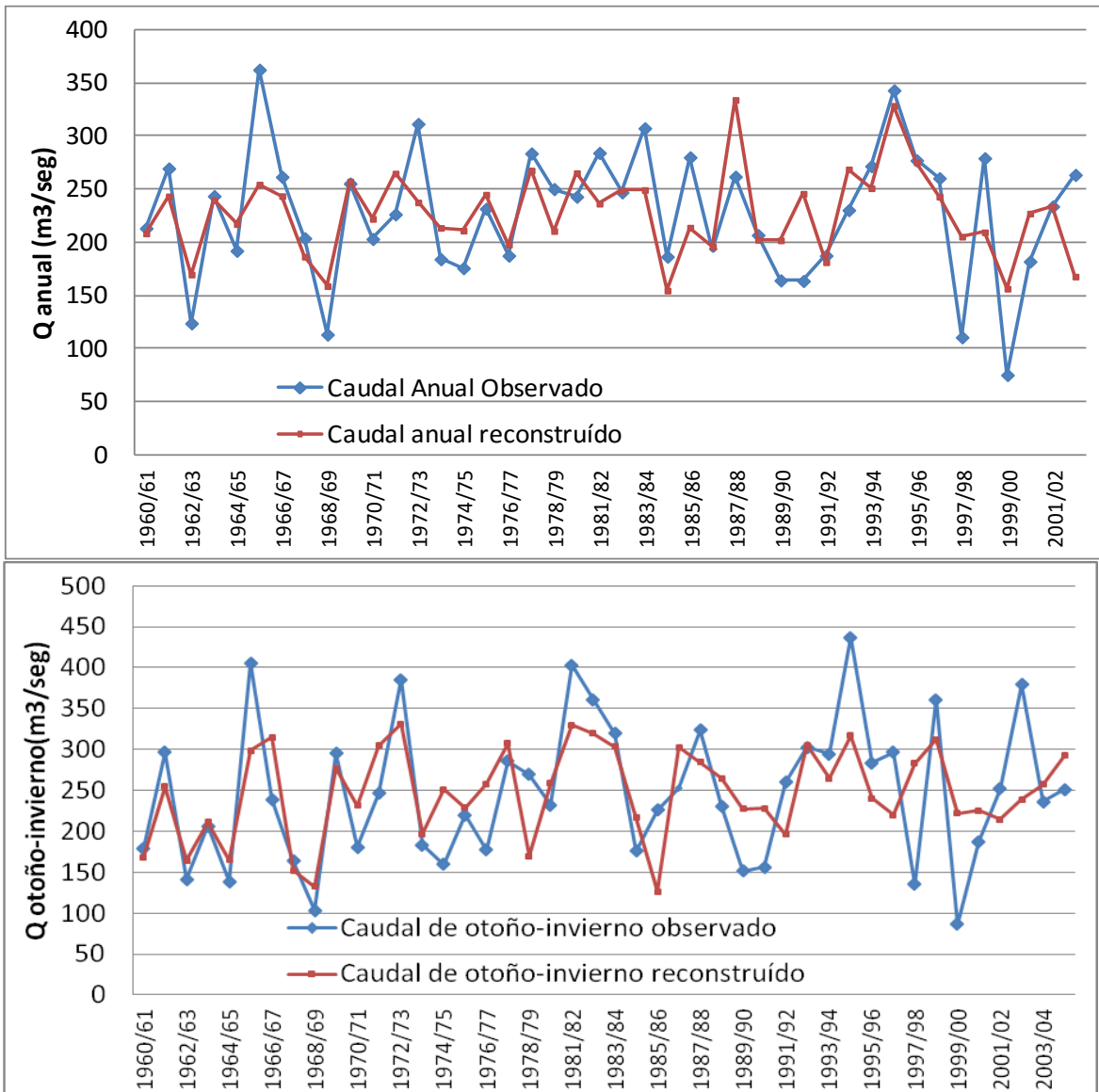


Figura 3 Comparación reconstrucción y registros instrumentales durante el período observado. La figura superior muestra el caudal medio anual y la figura inferior el caudal medio de Otoño-Invierno. En rojo se presenta la reconstrucción y en azul los valores observados

Luego, con el modelo obtenido a través de las regresiones múltiples utilizando las cronologías de árboles, se reconstruyó el caudal medio anual y del periodo de otoño-invierno en ambas cuencas (afluentes al Embalse Ralco y Laja). Dado que ambas cuencas presentan resultados similares en el tiempo, decidimos presentar sólo los afluentes al Embalse Ralco en las Figuras 4 y 5. En ambas figuras se puede ver que al ajustar una spline de 25 años el caudal ha presentado grandes variaciones cíclicas. En color azul se presentan los caudales observados. Ciclos de alrededor de 80 años fueron observados al realizar análisis espectral, y de 4 a 8 años, representativos de ENSO (El Niño Southern Oscillation).

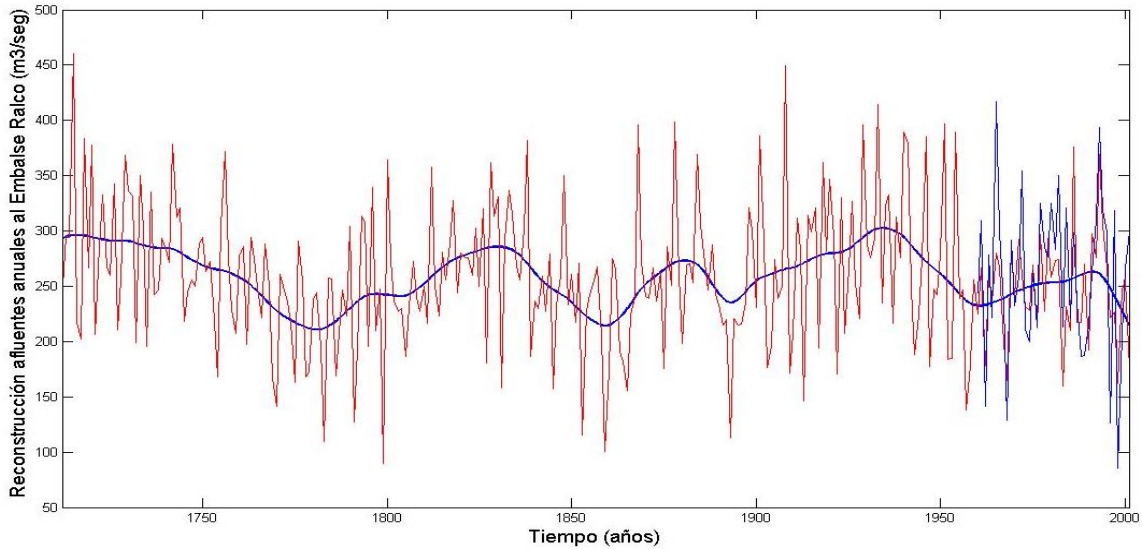


Figura 4 Reconstrucción de caudales afluentes al Embalse Ralco y spline de 25 años

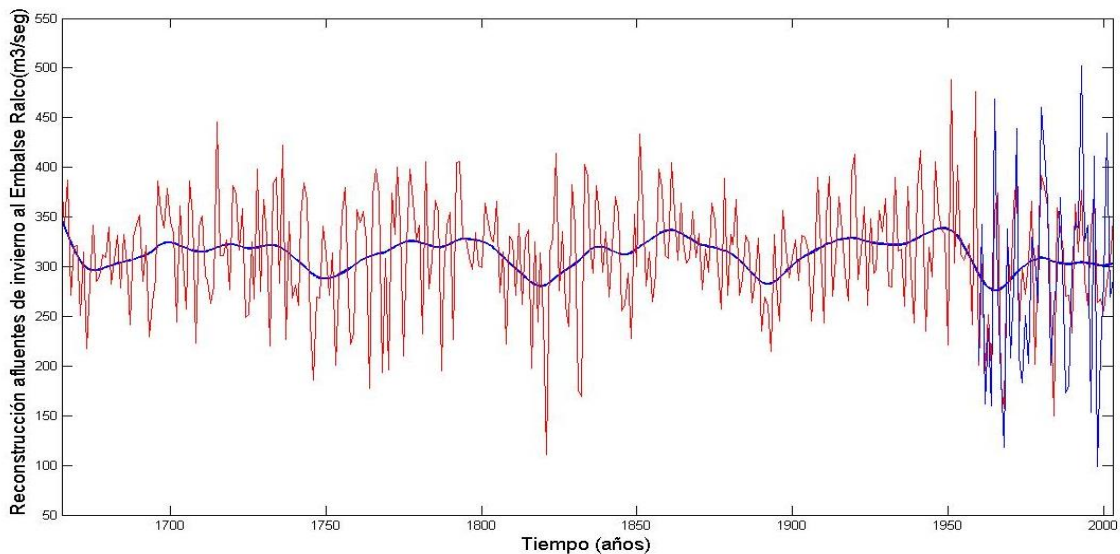


Figura 5 Reconstrucción de caudales afluentes al Embalse Ralco y spline de 25 años

Tabla 2 Comparación de los estadísticos de los caudales reconstruidos y observados normalizados (sin unidades)

Variable	Media	Promedio	Curtosis	Asimetría
Caudal medio anual observado	0.09	0	3	-0.24
Caudal medio anual reconstruido	0.15	0.19	3.39	0.29
Caudal medio de otoño e invierno observado	0.02	0	2.44	0.25
Caudal medio de otoño e invierno reconstruido	0.25	0.21	3.23	-0.28

En cuanto a los resultados presentados en la Tabla 2 en relación a la medianas de tanto los caudales de invierno como los anuales, hemos encontrado que al considerar los 300 años de reconstrucción dicho valor es mayor que el observado en los registros instrumentales, reforzando la hipótesis de reducciones de caudales en los últimos 50 años. El mismo resultado fue observado a partir del promedio de los registros instrumentales y las reconstrucciones. Al analizar la asimetría del caudal anual, dicho valor es negativo al considerar sólo el período de registros instrumentales, en contraste al considerar el registro completo en el que la asimetría es positiva. Esto es un indicativo de que al considerar sólo los últimos 50 años de datos instrumentales, los caudales presentan una mayor tendencia a presentar extremos negativos. Lo opuesto es observado en los caudales de otoño-invierno, en que al considerar sólo el registro instrumental el valor de la asimetría es positivo, respecto a la reconstrucción completa, lo que indica una tendencia a una mayor ocurrencia de valores extremos positivos en los caudales de invierno durante los últimos años.

Para el análisis de las tendencias en los caudales anuales y de otoño-invierno se utilizó el test de Mann- Kendall, el cual arrojó que las tendencias negativa y positiva observada en los registros instrumentales anuales y de invierno respectivamente no son significativas. Sin embargo al considerar la serie de tiempo completa, obtenida en base a la reconstrucción, tendencias negativas significativas al 95% fueron encontradas en los caudales medios anuales, a partir de 1900.

Alternativamente, con el objetivo de explorar las diferencias en los caudales considerando solo los registros observados y la reconstrucción completa, construimos las curvas de duración para los volúmenes afluentes a los Embalses Laja y Ralco, tanto para los valores anuales, como para los valores representativos de los meses de otoño-invierno. Dichos resultados para los afluentes al embalse Ralco se presentan en las Figuras 4 y 5 respectivamente. De acuerdo a la Figura 4, no existen grandes diferencias entre las curvas de duración de caudales anuales observados y reconstruidos, diferenciando mayormente en caudales bajos, en que los registros instrumentales muestran valores menores, o una tendencia a caudales más bajos que considerando la reconstrucción completa. En este análisis utilizamos el test de Man-Whitney para identificar si ambas curvas provienen de distintas distribuciones, es decir, si es que son significativamente distintas una de la otra. En el caso de los volúmenes anuales, las series de tiempo no pasaron el test, por lo que no podemos concluir que los volúmenes de los registros instrumentales son significativamente distintos a los observados considerando la reconstrucción completa.

De acuerdo a la Figura 5, los volúmenes afluentes a los embalses Laja y Ralco durante los meses de invierno considerando los registros instrumentales y las reconstrucciones presentan distintas curvas de duración. Esto indica que la distribución de los volúmenes afluentes ha cambiado durante los últimos 50 años. Las curvas de duración presentadas en la Figura 5 pasan el test de Man-Whitney, lo que indica que son significativamente distintas. Sin embargo no hay evidencia de que los aumentos de caudales observados en los registros instrumentales sean significativos.

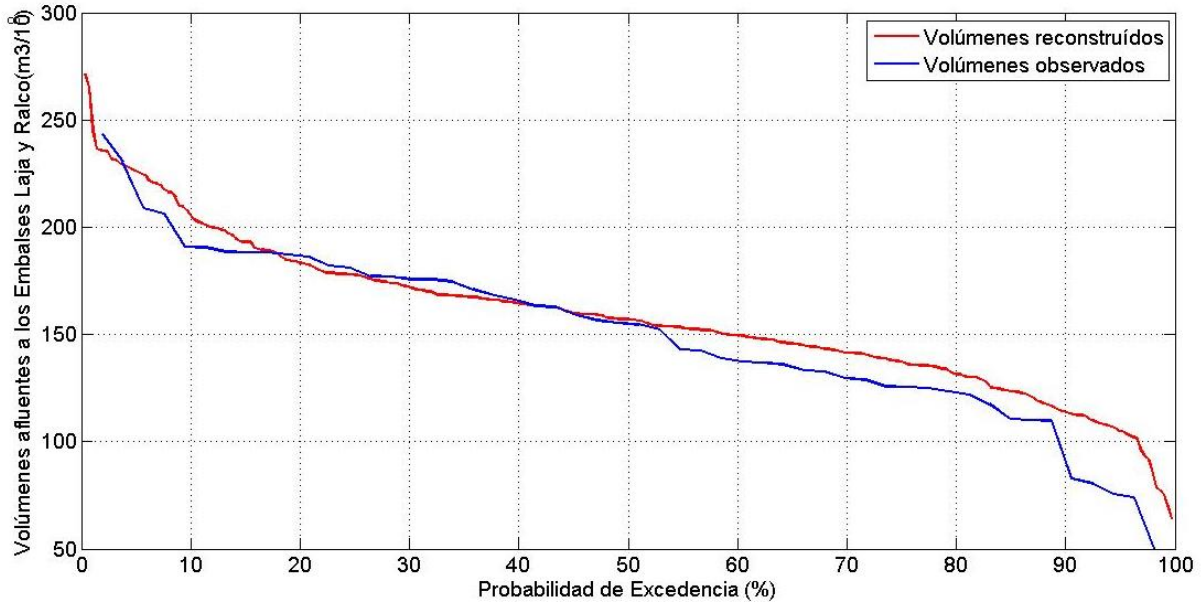


Figura 6 Comparación de la probabilidad de excedencia de los volúmenes anuales reconstruidos y observados afluentes a los embalses Laja y Ralco

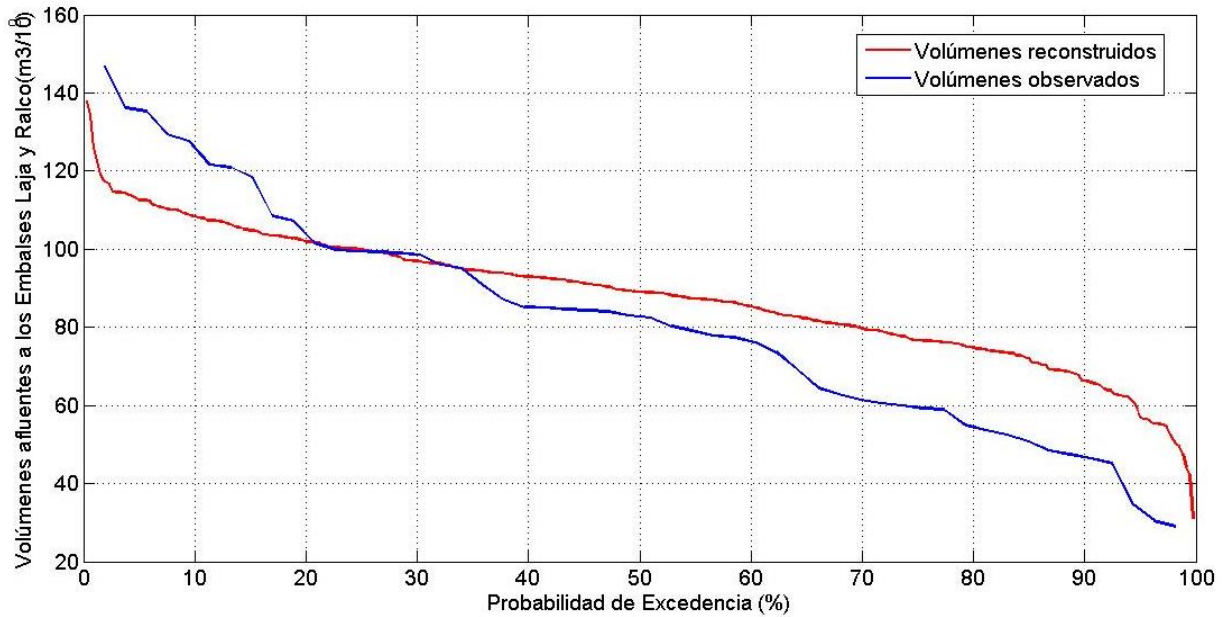


Figura 7 Comparación de la probabilidad de excedencia de los volúmenes del período de otoño e invierno reconstruidos y los observados

4. CONCLUSIONES

En relación a los resultados obtenidos en el presente trabajo concluimos que:

- Es posible reconstruir los caudales medios anuales y los caudales de otoño-invierno afluentes a los embalses Ralco y Laja. Lo cual indica que los anillos de crecimiento de

árboles en la zona son representativos de la variación de la precipitación en la parte alta de la cuenca del Biobío. Efectivamente los caudales observados en los registros instrumentales son menores o en promedio más bajos que los obtenidos considerando 300 años de reconstrucción. Este resultado es estadísticamente significativo para los caudales de otoño-invierno.

- Las tendencias negativas en los caudales medios anuales observados son estadísticamente significativas a partir de 1900 aproximadamente.

- La tendencia positiva (aumento) en los caudales observados de otoño-invierno afluente a los Embalses de Ralco y Laja no es estadísticamente significativa y puede ser atribuida a la variabilidad natural del clima.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada en parte por "The Australian Research Council (ARC) Centre of Excellence for Climate System Science" (grant CE110001028). Financiamiento adicional fue obtenido por parte de Becas Chile.

También queremos agradecer especialmente a ENDESA por la colaboración con datos para el presente trabajo.

REFERENCIAS

CADE-IDEPE, C. e. I. (2004), DIAGNOSTICO Y CLASIFICACION DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGUN OBJETIVOS DE CALIDAD CUENCA DEL RIO BIO BIO.

Meko, D. M., and C. A. Woodhouse (2011), Application of streamflow reconstruction to water resources management, in *Dendroclimatology*, edited, pp. 231-261 % @ 1402040105, Springer.

Meko, D. M., C. A. Woodhouse, and K. Morino (2012), Dendrochronology and links to streamflow, *J. Hydrol.*, 412-413, 200-209.

Muñoz, A. A., J. Barichivich, D. A. Christie, W. Dorigo, D. Sauchyn, Á. González-Reyes, R. Villalba, A. Lara, N. Riquelme, and M. E. González (2013), Patterns and drivers of *Araucaria araucana* forest growth along a biophysical gradient in the northern Patagonian Andes: Linking tree rings with satellite observations of soil moisture, *Austral Ecology*, n/a-n/a.

Peel, M. C., B. L. Finlayson, and T. A. McMahon (2007), Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 4, 439-473.