

## EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA ESCORRENTÍA DE LA CUENCA VERTIENTE A LA ESTACIÓN DUQUECO EN VILLUCURA

*F. Medina Medina*<sup>1</sup>, *E. Muñoz Ortiz*<sup>2</sup>, *P. Tume Zapata*<sup>3</sup>

### RESUMEN:

Chile es catalogado como altamente vulnerable a los efectos del cambio climático. Estos efectos se reflejan en un acelerado cambio de variables climáticas como la temperatura, las precipitaciones y la evapotranspiración provocando una disminución de los caudales. Debido a esto los sectores más perjudicados son el agrícola, forestal e hidroeléctrico que dependen fuertemente de la disponibilidad de agua. Este estudio, busca analizar cómo los efectos mencionados anteriormente afectarán a los caudales afluentes a la estación Duqueco en Villucura. Para saber cómo se comportarán estas variables en el futuro se utilizaron series de precipitación y evapotranspiración obtenidas de una modelación bajo el escenario A1B de cambio climático. Con estas series como datos de entrada se utilizó un modelo hidrológico mensual para simular los caudales afluentes a la estación para el periodo 1970 – 2085. Se utilizó la herramienta “*Monte Carlo Analisis Toolbox*” para calibrar y validar el modelo. Este modelo fue calibrado para el periodo 1970-2000 y validado para el periodo 2001 – 2015. Finalmente, con el modelo calibrado y validado se realizaron 10.000 simulaciones para generar las series de caudales medios mensuales, donde se concluyó que los caudales presentarán una tendencia negativa y que en el punto de estudio los caudales afluentes disminuirán 0.198 m<sup>3</sup>/s/año.

### ABSTRACT:

Chile is classified as highly vulnerable to the effects of climate change. These effects are reflected in an accelerated change of climatic variables such as temperature, rainfall and evapotranspiration, causing a decrease in flows. Due to this, the most affected sectors are the agricultural, forestry and hydroelectric sectors that depend heavily on the availability of water. This study seeks to analyze how the effects mentioned above will affect the tributary flows to the Duqueco station in Villucura. To know how these variables will behave in the future, we used series of precipitation and evapotranspiration obtained from a modeling under scenario A1B of climate change. With these series as input data, a monthly hydrological model was used to simulate the tributary flows to the station for the period 1970 - 2085 The tool “*Monte Carlo Analisis Toolbox*” was used to calibrate and validate the model. This model was calibrated for the period 1970-2000 and validated for the period 2001 - 2015. Finally, with the model calibrated and validated, 10,000 simulations were carried out to generate the series of monthly average flows, where it was concluded that the flows will present a negative trend and that at the point of study the tributary flows will decrease 0.198 m<sup>3</sup> / s / year.

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [fmedina@ing.ucsc.cl](mailto:fmedina@ing.ucsc.cl)

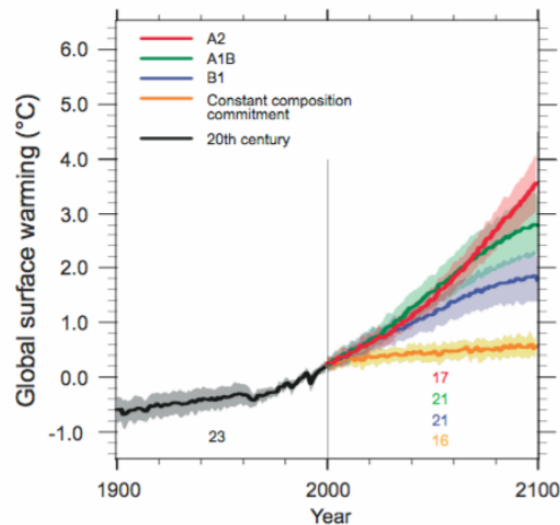
<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [emunozo@ucsc.cl](mailto:emunozo@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, [ptume@ucsc.cl](mailto:ptume@ucsc.cl)

## INTRODUCCIÓN

El cambio global se entiende como la interrelación de cambios inducidos por los procesos naturales y por la acción humana en el ambiente global, y sus implicaciones en el funcionamiento de los ecosistemas naturales y en la sociedad (IPCC-AR4, Christensen et al., 2007). La problemática del cambio climático global ha causado preocupación tanto en agricultores, como en la comunidad científica, ya que variables claves para el crecimiento de cultivos como la precipitación y la temperatura se ven directamente afectadas.

El panel intergubernamental del cambio climático (IPCC) desarrolló un esquema que considera cómo aumentará la temperatura superficial del planeta bajo distintos escenarios de emisiones de gases invernaderos (GEI). La Figura 1 muestra los distintos escenarios que se analizaron, partiendo con el más favorable “Compromiso de composición constante”, hasta el menos favorable “Escenario A2”. El IPCC concluyó que la temperatura de la Tierra para el año 2100 aumentaría entre 2 y 4°C (Christensen et al., 2007).



**Figura 1:** Evolución proyectada de la temperatura promedio superficial planetaria  
 (Fuente: IPCC-AR4, Christensen et al., 2007)

Nuevos retos ambientales, sociales y de gestión del territorio y los recursos, surgen ante el deterioro medioambiental propiciado por el hombre y las amenazas reales de cambio climático, que según los expertos tendrán unas consecuencias diferentes en cada zona climática. Según el cuarto informe del IPCC (IPCC-AR4, Christensen et al., 2007), las consecuencias del cambio climático a nivel global previsiblemente se traducirán en: disminución de la precipitación anual; disminución del caudal anual de los ríos, mayor número de incendios forestales; menor rendimiento de los cultivos; aumento de la demanda de agua para la agricultura; menor cantidad de energía hidroeléctrica; mayor riesgo de pérdida de diversidad biológica; etc. (cabe destacar que existe un quinto informe del IPCC, pero debido a la disponibilidad de datos a escala regional se optó por utilizar el cuarto informe).

Durante el siglo XX, se verificó una significativa disminución de las precipitaciones en la región subtropical de Chile (Aceituno et al., 1992). Las precipitaciones en la zona han sido variables, aunque

según el Centro del Clima y la Resiliencia (CR2) las zona central y sur de Chile se encuentran bajo la sequía de mayor extensión territorial y temporal en el último siglo.

Surge la necesidad de conocer y profundizar en los efectos del cambio climático en un escenario vulnerable y de incertidumbre como es la cuenca del río Duqueco. Es por esto que el presente estudio tiene como objetivo estimar los efectos del cambio climático sobre los caudales afluentes a la estación fluviométrica Duqueco en Villucura, para el periodo 1970-2085. Para ello, se utilizó el modelo hidrológico mensual presentando en Muñoz (2010) y Muñoz (2011), utilizando series de precipitación y evapotranspiración simuladas bajo el escenario A1B de cambio climático para el mismo periodo de análisis.

Además, se analizaron las tendencias que presentaron las precipitaciones, temperaturas y evapotranspiración potencial y su impacto sobre los caudales, para concluir cualitativamente sobre los posibles efectos en la zona.

### ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se realizó sobre la cuenca de la estación fluviométrica Duqueco en Villucura, ubicada en la Región del Bio Bio (Figura 2). La cuenca de esta estación es una sub cuenca del río Duqueco y posee un área total de 836.6 km<sup>2</sup>.

La zona presenta un alto índice de pluviometría, ya que se encuentra entre los 1.000 mm/año en la parte más baja y los 6.000 mm/año en la más alta (DGA,1997) debido a la ubicación precordillerana de la cuenca donde el efecto orográfico produce un incremento de las precipitaciones (Garreaud, 2011).

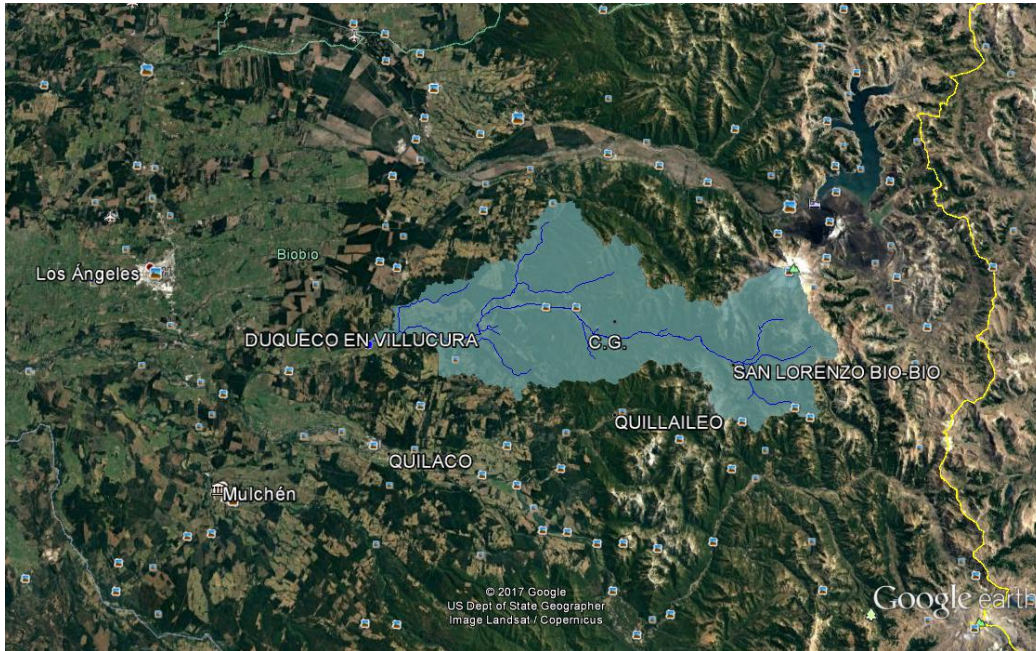
El caudal medio mensual registrado en la estación es de 54.9 m<sup>3</sup>/s, mientras que el caudal medio mensual máximo registrado es de 308.3 m<sup>3</sup>/s, ambos para el período 1942-2015.

El río Duqueco se encuentra intervenido con 5 centrales hidroeléctricas en funcionamiento. La central Peuchén, la central Mampil, la central Lleuquereo y las dos centrales hidroeléctricas en serie Aillín y Las Juntas que se ubican en la cuenca alta del Duqueco, en la confluencia de los ríos Aillín y Duqueco.

La cuenca en estudio se considera principalmente forestal (incluyendo bosques nativos), con gran presencia del desarrollo de la agricultura (Villaroel, 2014) como se puede apreciar en la Tabla 1. Esto implica que, cualquier alteración sobre los caudales podría modificar el uso de suelo y actividades en la cuenca afectando la economía de la zona.

**Tabla 1:** Usos del suelo en la subcuenca Duqueco en el período 1976-2013 (Villaroel, 2014).

USOS (%)	PERIODO				
	1976	1979	1996	2008	2013
Bosques	43%	29%	28%	29%	72%
Plantaciones	5%	14%	28%	34%	
Agricultura	48%	53%	40%	32%	28%
Otros	4%	5%	4%	5%	



**Figura 2:** Ubicación de la cuenca estudiada en la región del Bío Bío.

## DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Un modelo hidrológico busca reproducir los diferentes procesos y fenómenos que ocurren en una cuenca con el objeto de simular y predecir condiciones futuras a fin de actuar con bases científicas y técnicas en la gestión, administración y optimización de los usos del agua. A causa de esto, actualmente los modelos hidrológicos se utilizan como una herramienta de diseño, para intentar explicar fenómenos y procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca o para evaluar efectos sobre la hidrología causados por la variabilidad y cambio climático (Muñoz et al, 2011).

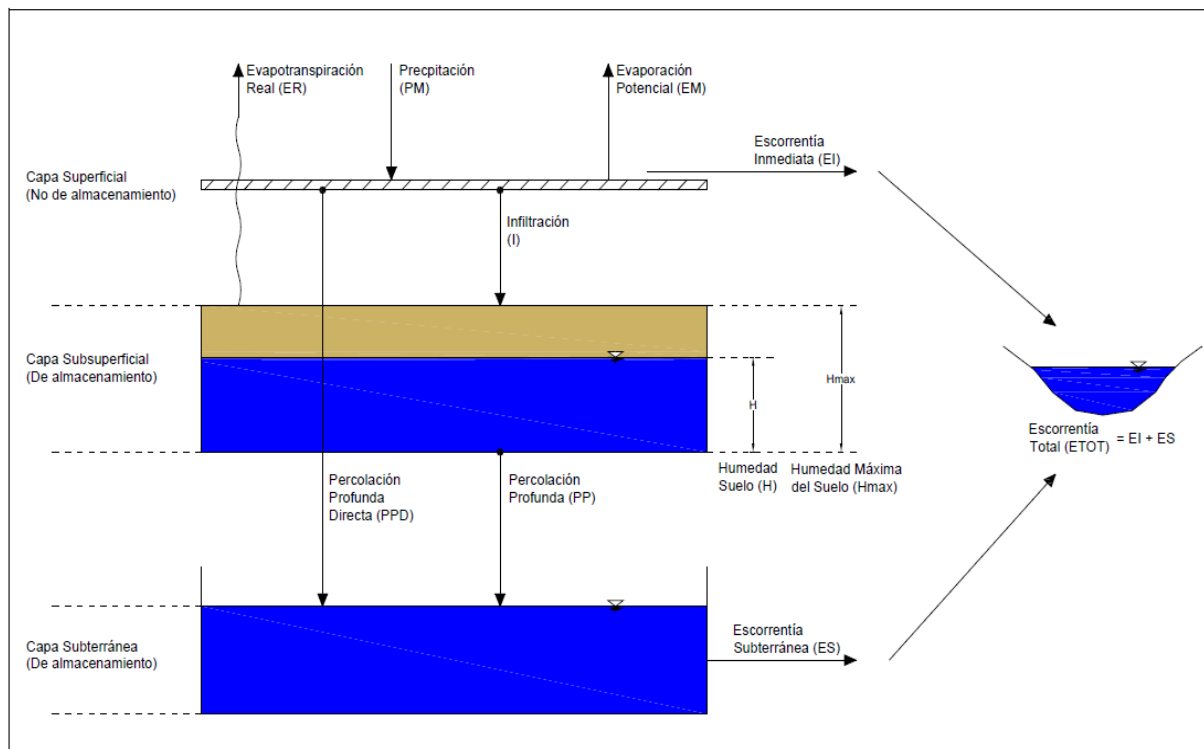
Los factores principales a considerar para la selección de un modelo deben ser en función del propósito para el cual se requiere y la disponibilidad de recursos (en términos de tiempo, datos, capacidades de cálculo, etc.). En el caso de cuencas con disponibilidad de datos limitada, un modelo conceptual resulta la mejor opción (Muñoz et al., 2011). Es por esto que, para la simulación de caudales afluentes al punto de estudio, se utilizó el modelo de balance hídrico mensual pluvio-nival semi-distribuido de tipo conceptual presentado en (Muñoz, 2010) y (Muñoz, 2011). Este modelo considera una componente pluvial, una componente nival y una componente de extracciones y aportes, lo que permite generalizar la aplicación a cualquier cuenca.

Debido a que en el área de estudio predomina el régimen pluvial, solo el modulo pluvial fue utilizado y se describe brevemente más adelante. Por otra parte, para realizar la calibración del modelo se utiliza la herramienta de análisis de sensibilidad e incertidumbre "*Monte Carlo Analysis Toolbox*".

La Figura 3 muestra un esquema conceptual del modelo presentado en Muñoz (2010) y Muñoz (2011) utilizado en el presente estudio.

La componente pluvial se modela a través de un modelo de precipitación-escorrentía que considera la cuenca como un sistema de doble almacenamiento, un sistema de almacenamiento superficial (SS) y un sistema de almacenamiento subterráneo (US). El SS representa el agua almacenada en el estrato de suelo no saturado, es decir, como humedad del suelo (H). El US representa el agua almacenada en el estrato de suelo saturado. El modelo requiere de dos variables de entrada, la precipitación (PM) y la evapotranspiración potencial (ETP). La salida del modelo es la escorrentía total (ETOT) a la salida de cuenca, la cual se compone de la suma de escorrentía subterránea (ES) más la escorrentía directa o superficial (EI). Los montos de escorrentía se calculan a través de seis parámetros de calibración, más dos parámetros que permiten analizar la sensibilidad de las variables de entrada PM y ETP (Zúñiga et al., 2012).

En la Tabla 2 se presenta una breve descripción de los parámetros y su influencia en el modelo.



**Figura 3:** Modelo conceptual módulo pluvial del modelo MHM.

**Tabla 2: Parámetros del módulo pluvial del modelo hidrológico mensual.**

Parámetro	Descripción	Influencia
Cmáx	Coeficiente de escorrentía máxima cuando el almacenamiento sub-superficial está saturado	EI
Plím, mm	Monto de precipitación límite sobre el cual existe percolación profunda directa (PPD)	PPD
D	Porcentaje de precipitación sobre Plím que se transforma en PPD	PPD
Hmáx, mm	Capacidad máxima de almacenamiento en la Capa sub-superficial	Cmáx y ER
PORC	Fracción de Hmáx que define el contenido de agua en el suelo bajo el cual existen restricciones sobre los procesos de evaporación	Hcrit y ER
Ck	Coeficiente de escorrentía subterráneo	ES
A	Factor de ajuste de los datos de precipitación	PM
B	Factor de ajuste de los datos de evapotranspiración	PET y ER

## DATOS DE ENTRADA Y METODOLOGÍA

El modelo hidrológico requiere, como variables de entrada, la precipitación y la evapotranspiración media en la cuenca. Debido a que se busca simular los caudales para el periodo 1970 – 2085 bajo el escenario A1B de cambio climático, es necesario tener proyecciones de precipitación y evapotranspiración para el mismo periodo. Por este motivo se utilizaron las series de precipitación y temperatura a nivel mensual obtenidas de los resultados de la modelación regional PRECIS-ECHAM del Proyecto Anillos SOC-28: "Impactos Sociales Ambientales del Cambio Climático Global en la Región del Bío-Bío". Los resultados se encuentran contenidos en grillas de resolución  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  y en cuanto a las precipitaciones estas se encuentran sobreestimadas, debido principalmente a los grandes valores que se simulan en la Cordillera de Nahuelbuta (Rojas, 2006).

Para utilizar la información grillada fue necesario crear 5 estaciones meteorológicas sintéticas, debido a que se utilizaron datos de 5 grillas que abarcaban el área de la cuenca de estudio (Figura 4). En estas estaciones se guardaron las series de precipitación y temperatura media a nivel mensual. Luego, para obtener las series de evapotranspiración potencial media se utilizó el método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), el cual está basado en la determinación de la evapotranspiración potencial ( $EP$ ) en función de la temperatura media ( $T_m$ ), con una corrección en función de los días del mes y la cantidad de horas de sol en la cuenca.

Finalmente, la distribución espacial de las series de precipitación y evapotranspiración sobre la cuenca se realizó mediante Polígonos de Thiessen.

Para obtener los caudales afluentes al punto de estudio, se realizó una modelación de la cuenca de la estación fluviométrica Duqueco en Villucura. Esta estación está administrada por la Dirección General de Aguas (DGA) y posee registros de caudales necesarios para la calibración y validación del modelo.

Para la calibración y validación del modelo, se utilizó la herramienta “*Monte Carlo Analysis Toolbox*” MCAT (Wagener y Kollat, 2007). MCAT es utilizada para calcular soluciones aproximadas asociadas a expresiones matemáticas de alta complejidad. MCAT permite calibrar un modelo de un modo semi-automático permitiendo al usuario mantener un comportamiento identificable o realista del modelo. Opera ejecutando repetitivas simulaciones con un conjunto de parámetros aleatorios dentro de un rango (definido previamente) físico o conceptualmente válido. Luego, almacena los resultados de cada simulación y los valores de la función objetivo (medida de calidad de las simulaciones) para su posterior análisis (Zúñiga et al., 2012).

Para la calibración se ejecutaron 10 mil simulaciones en un período de 31 años (1970-2000) para identificar el valor óptimo de calibración de cada uno de los parámetros. Para esto se utilizaron gráficos de dispersión, que relacionan el valor de cada parámetro con el valor de la función objetivo obtenido y gráficos de identificabilidad y sensibilidad regional, los cuales representan curvas de función de distribución acumulada (cdf) según la función objetivo utilizada.

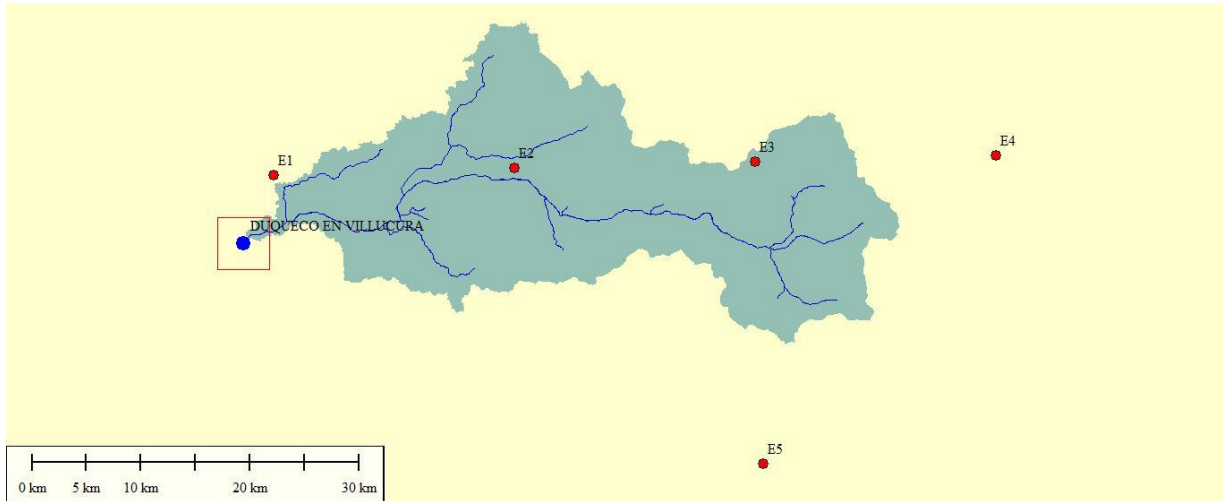
La función objetivo utilizada fue el índice de eficiencia de Kling-Gupta KGE (Gupta *et al*, 2009)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Donde  $r$  es el coeficiente de correlación de Pearson,  $\alpha$  es la razón entre la desviación estándar de los caudales simulados y observados, y  $\beta$  es la razón entre los caudales medios simulados y observados. La función KGE es una mejora del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE (Nash and Sutcliffe, 1970). KGE varía entre  $-\infty$  y 1, siendo 1 el valor óptimo (Muñoz, 2011).

Se seleccionaron aquellos modelos con KGE mayor a 0.6, con el objetivo de calibrar en base a modelos bien comportados. El valor óptimo de cada parámetro se obtuvo seleccionando el percentil 50 de la cdf de los modelos bien comportados. La Tabla 3 muestra el valor óptimo de calibración para cada parámetro analizado. Luego, se realizó el proceso de validación para el periodo 2001-2015.

Finalmente, el modelo calibrado y validado se utilizó para generar la serie de caudales afluentes a la estación Duqueco en Villucura, en un período de 116 años, desde el año 1970 hasta el año 2085. Con los datos utilizados y los resultados obtenidos, se realizó un análisis de las tendencias que presentaron los caudales a largo plazo.



**Figura 4:** Estaciones sintéticas meteorológicas (rojas) y estación fluviométrica de estudio (azul).

**Tabla 3:** Resultados de validación de parámetros correspondientes al módulo pluvial.

Parámetro	Valor óptimo
Cmáx	0.31
Hmáx (mm)	363
D(%)	13.8
Plím	220
PORC (%)	46.5
Ck	0.61
A	0.49
B	1.67

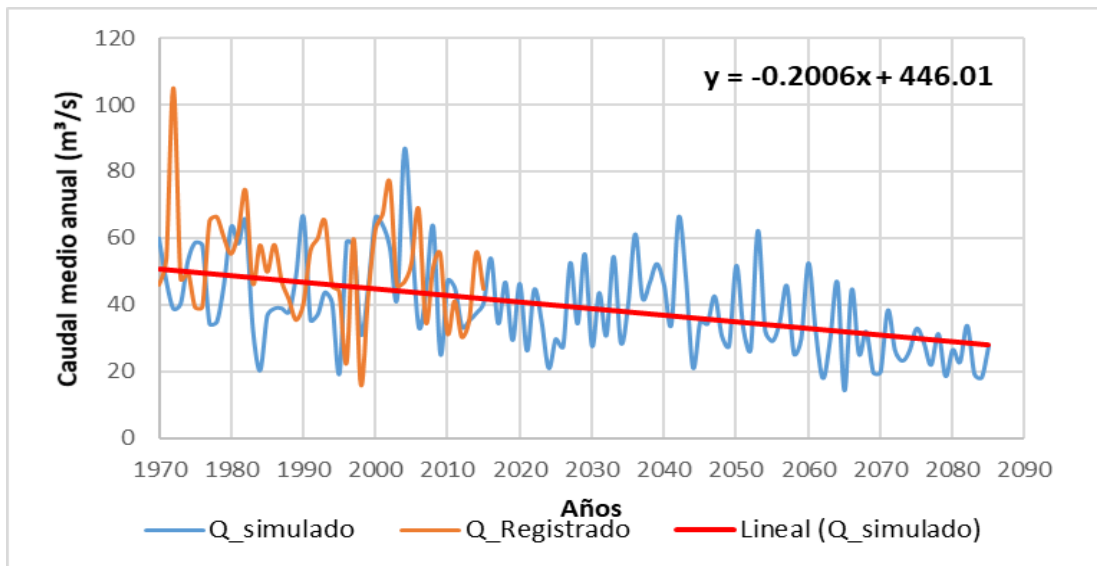
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El aumento de la temperatura y de la evapotranspiración, sumado a la disminución de las precipitaciones se traducen en una disminución de los caudales afluentes a la cuenca de la estación Duqueco en Villucura (Figura 5). Los resultados muestran que el caudal medio anual en el punto de estudio disminuirá  $0.198 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$ . Esta disminución se explica por el aumento de la temperatura (Figura 6) que influye directamente en el proceso de evapotranspiración (Figura 7), sumado a la disminución de las precipitaciones (Figura 8) en la cuenca vertiente a la estación Duqueco en Villucura.

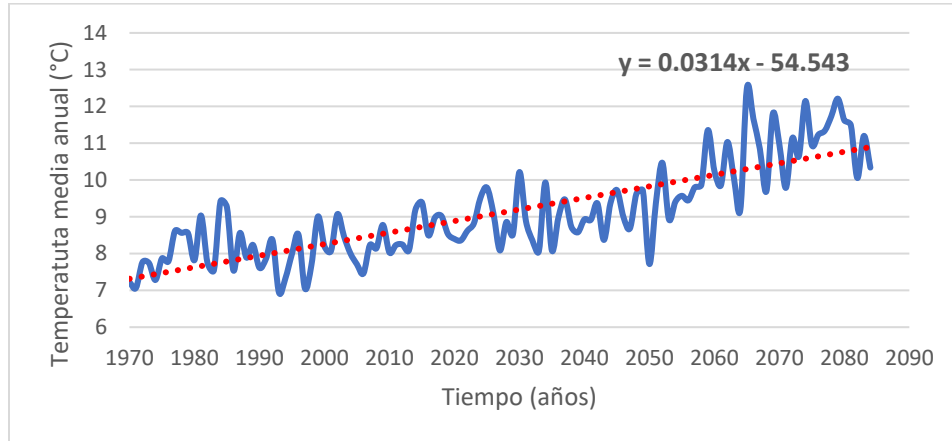
Es destacable que al analizar las tendencias de todos los meses por separado los resultados reflejan una disminución en los caudales (Figura 9), pero en el periodo 2025-2040 se observa un incremento significativo en los caudales provocado por aumento de temperaturas, años más lluviosos y evapotranspiración más constantes (Figuras 6,7 y 8).

La disminución de caudales significa una disminución de recursos para riego, lo que traerá como consecuencia a largo plazo la disminución de hectáreas regadas de plantaciones y bosques forestales y nativos. Sin embargo, con una buena planificación estas consecuencias pueden ser mitigadas.

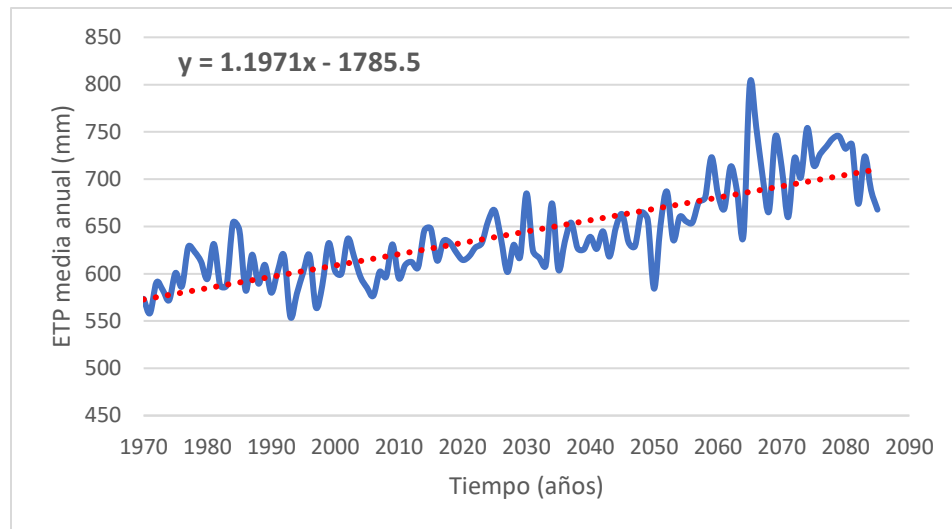
En la cuenca del río Duqueco existen especies en peligro de conservación tales como el Lleuque y el Guindo Santo. También existen especies de bosques nativos, estas son el Radal, Avellano, Lengua, Roble, Coihue y el Raulí. Además, existen grandes bosques forestales de pino y eucaliptus, éstos últimos consumen una gran cantidad de agua por lo que, una disminución del caudal puede provocar problemas en su crecimiento y desarrollo.



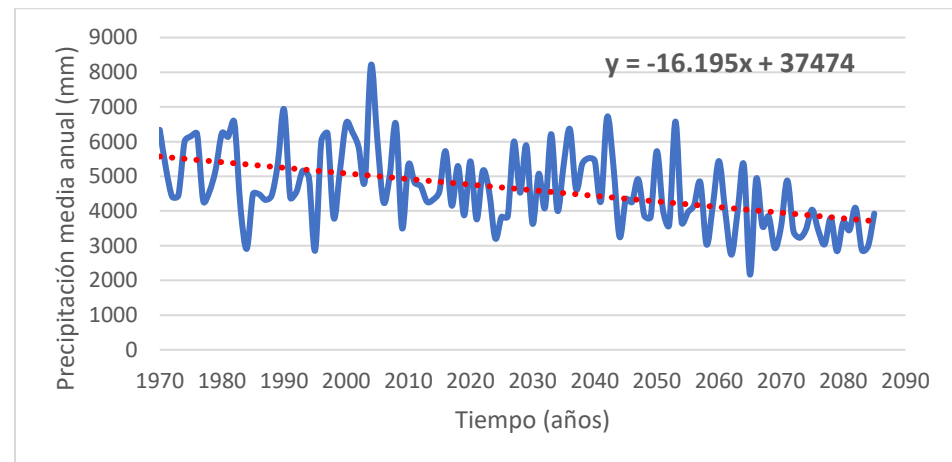
**Figura 5:** Caudales medios anuales simulados vs registrados 1970-2085 y 1970-2015 respectivamente. Se presenta la ecuación de la línea de tendencia que permite cuantificar el caudal en cualquier año.



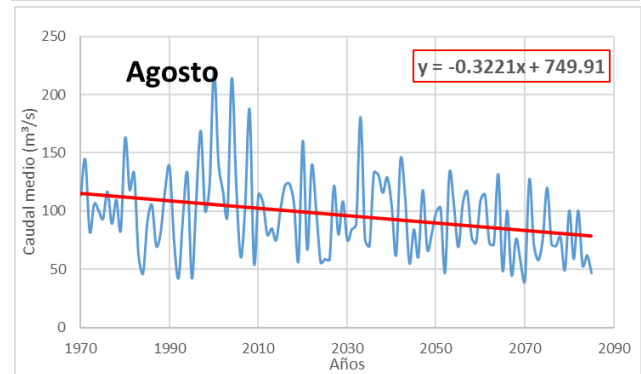
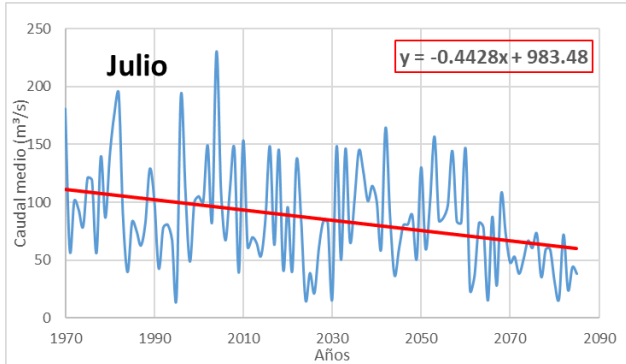
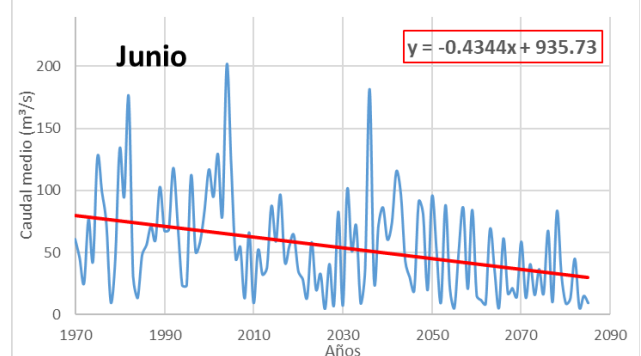
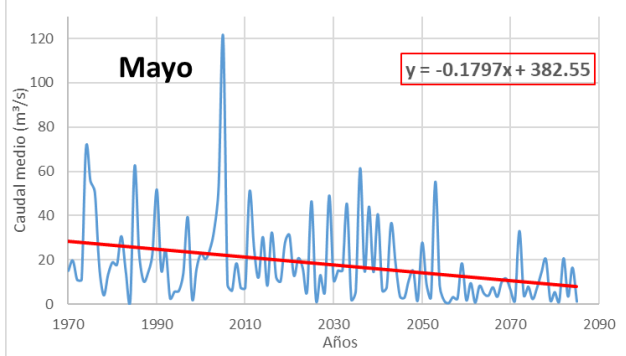
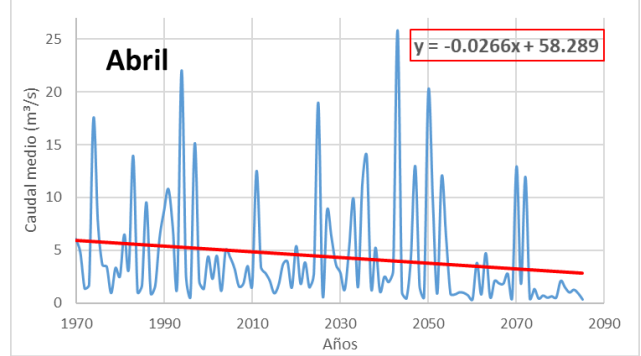
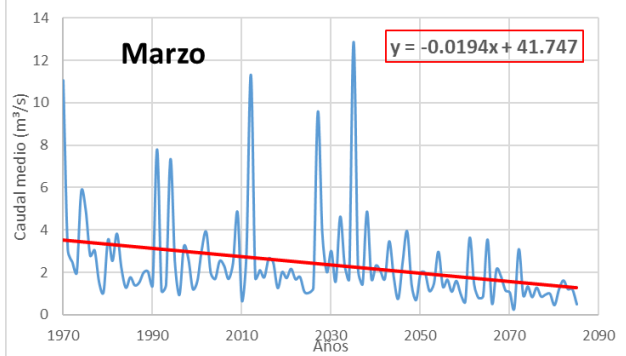
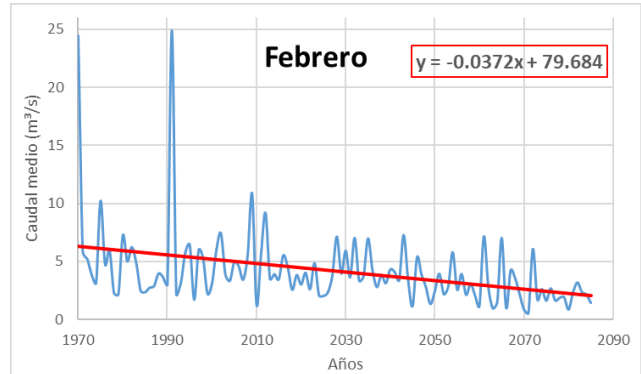
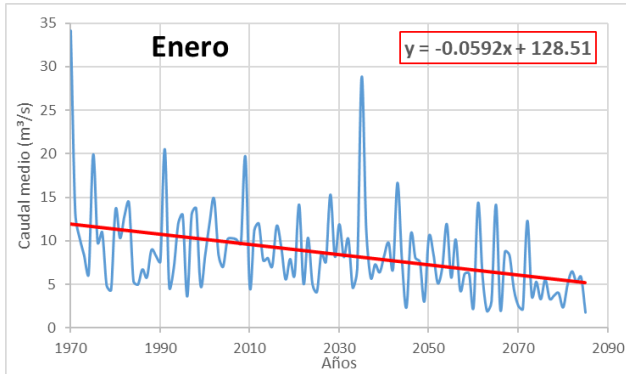
**Figura 6:** Temperatura media anual proyectada para el periodo 1970 – 2085.

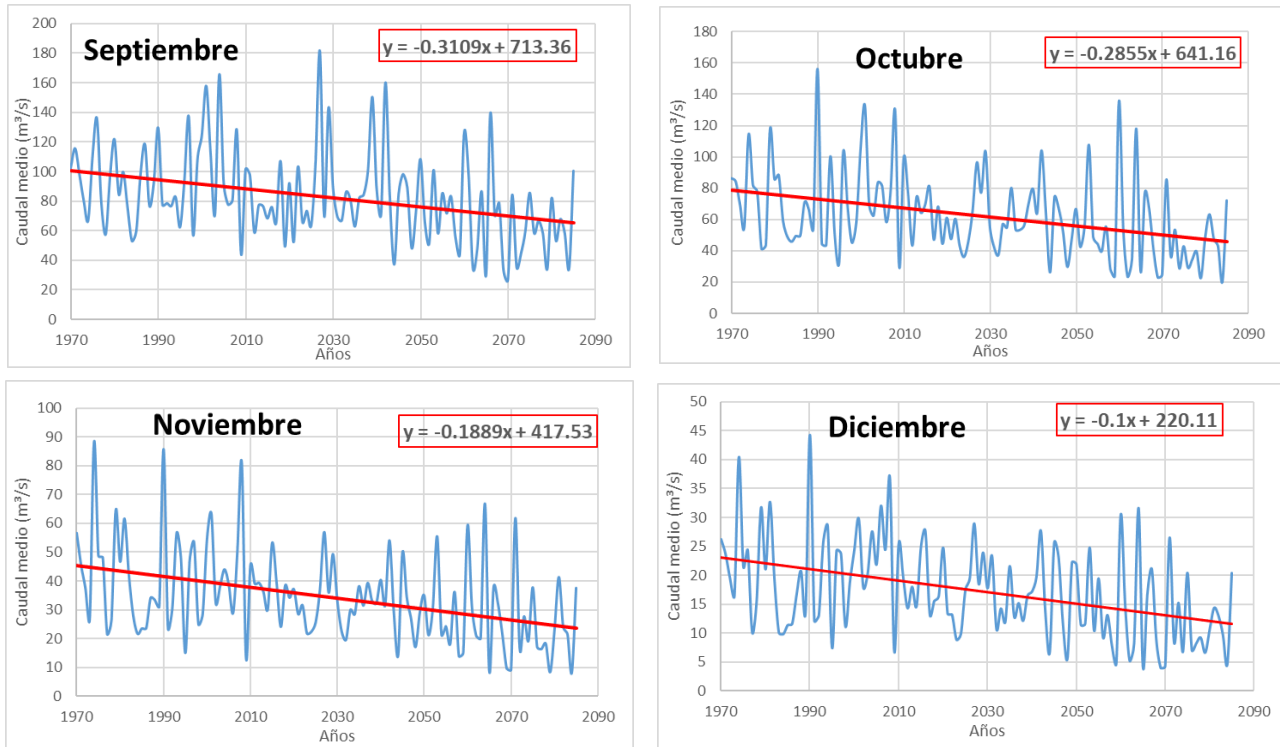


**Figura 7:** Evapotranspiración media anual proyectada para el periodo 1970 – 2085.



**Figura 8:** Precipitación media anual proyectada para el periodo 1970 – 2085.





**Figura 9:** Caudales medios mensuales anuales para el periodo 1970 – 2085.

## CONCLUSIONES

El cambio climático traerá consigo efectos negativos para los sectores agrícola, forestal e hidroeléctrico ya que, a partir de la simulación de caudales afluentes a la cuenca de la estación Duqueco en Villucura, se observa que en el punto de estudio para el periodo 1970 – 2085, el caudal medio anual disminuirá  $0.198 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$ . Esta disminución de caudal es provocada por el aumento de la temperatura y la evapotranspiración,  $0.024^\circ\text{C}/\text{año}$  y  $0.916 \text{ mm}/\text{año}$  respectivamente, y por una disminución de  $12.19 \text{ mm}/\text{año}$  en las precipitaciones.

La tendencia de los caudales en general es negativa para el periodo 1970 – 2085, no obstante, para el periodo 2025-2040 se observan crecidas importantes llegando a simularse un caudal máximo mensual de  $181 \text{ m}^3/\text{s}$  para el año 2036 (julio) y un caudal medio anual promedio de  $42 \text{ m}^3/\text{s}$  producto de un incremento en las precipitaciones según la proyección del escenario A1B de cambio climático.

## REFERENCIAS

- Christensen JH, Hewitson B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held I, Jones R, Kolli RK, Kwon RT, Laprise R, Magaña V, Mearns CG, Menendez CG, Raisanen J, Rinke A, Sarr A, Whetton P. (2007). *Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Garreaud, R. D. (2011). Cambio Climático: Bases Físicas e impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro - INIA No. 93.*
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology 377*, 80-91.
- Muñoz, E. (2010). *Desarrollo de un modelo hidrológico como herramienta de apoyo para la gestión del agua. Aplicación a la cuenca del Río Laja, Chile. Tesis de Master, Departamento de Ciencias y Técnicas del agua y del Medio Ambiente.* Universidad de Cantabria, España.
- Muñoz, E. (2011). *Perfeccionamiento de un modelo hidrológico aplicación de análisis de identidad dinámica y uso de datos grillados. Tesis de Doctorado, Departamento de Recursos Hídricos.* Universidad de Concepción, Chile.
- Nash and Sutcliffe. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology 10(3)*, 282-290.
- Rojas, M. (2006). Multiple Nested Regional Climate Simulations for Southern South America: Sensitivity to Model Resolution. *Mon. Weather Review Vol 134, pages 2208-2223.*
- Santibañez, F., & Uribe, J. (1993). "*Atlas Agroclimático de Chile de las Regiones Sexta, Séptima, Octava y Novena*".
- Thornthwaite, C. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review 38*, 55-94.
- Villaroel, L. (2014). *Estudio del efecto potencial de la deforestación en las escorrentías en grandes cuencas de régimen pluvial en la zona centro sur de Chile.* Tesis de pregrado, Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles. Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Wagener, T. and Kollat, J. (2007). Numerical and visual evaluation of hydrological and environmental models using the Monte Carlo analysis toolbox. *Environmental Modelling and Software 22*, 1021-1033
- Zuñiga, R., Muñoz, E., y Arumí, J.L. (2012). Estudio de los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. *Obras y Proyectos 11*, 69-78.