



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

INFORME DE TRABAJO DE HABILITACIÓN PROFESIONAL EN GEOFÍSICA

*Variabilidad e incerteza de la herramienta FLOW (IFOP): Ríos de la
Patagonia modelados con VIC*

Por: José Miguel Olivares Muñoz

2 de agosto de 2022

Concepción, Chile

Profesor Guía: Andrés Sepúlveda

Profesor Co-Guía: Osvaldo Artal

Profesor Co-Guía: Paulo Moreno

© 2022, José Miguel Olivares Muñoz

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

AGRADECIMIENTOS

El proceso de realizar mi tesis fue posible no solo por mi esfuerzo, sino por también al apoyo de profesores, familiares y amigos. Primero quisiera mencionar a mi madre, la cual durante todo el pregrado fue mi apoyo y mi guía a través del proceso, muchas veces ella me dio las fuerzas para seguir cuando sentía que ya no podía. Siempre dire que todo lo que he logrado y lograré será gracias a mi madre y a mis familiares.

También debo agradecer a la comisión de mi tesis, el Dr. Hector Sepulveda , Dr. Osvaldo Artal y al investigador Paulo Moreno. El apoyo, guía e inspiración que ellos me otorgan fueron cruciales para desarrollar este proyecto.

Finalmente, quiero agradecer a cada uno de mis amigos, por estar presentes en todo momento, siempre apoyándonos mutuamente y enfrentando juntos las adversidades.

Resumen

Los modelos de hidrológicos son una representación simplificada de los distintos procesos que ocurren en una cuenca, ya sea en la superficie o bajo esta. Dentro de los modelos existentes, se encuentra VIC el cual es un modelo de infiltración de 2 o más capas que estudia la infiltración del agua y a través de esto estima la escorrentía superficial. VIC fue utilizado para generar FLOW, el cual es un set de datos con información de cuencas de salida costera en la Patagonia Occidental.

En el presente informe se muestra el estudio realizado con el objetivo de validar FLOW, el cual es una salida del modelo VIC, que contiene información de caudales con salida al mar de la Patagonia occidental entre los años 1979 al 2018. El objetivo de la creación de FLOW fue tener una base de datos de los puntos de descarga de ríos y glaciares en la Patagonia Occidental, con la finalidad de poder usar esta base de datos en otros modelos numéricos del IFOP que requieren entradas de caudal de agua dulce, como lo son el ROOMS y el MIKE-3. La validación fue realizada en las cuencas del río Puelo, Palena y Aysen entre los años 2004 y 2014 para los ríos Palena y Aysen, y entre los años 2004 y 2016 para el río Puelo.

Los resultados muestran un buen desempeño de FLOW, alcanzando en el río Aysen: $NSE = 0.79$, y una correlación del 93%, en el río Palena: $NSE = 0.8$ y una correlación del 0.88. En el río Puelo se alcanzaron valores de $NSE = 0.85$ y una correlación del 93%, siendo el valor de NSE más alto en los tres ríos estudiados. Por otro lado, FLOW parece subestimar las grandes crecidas de caudal registradas por las estaciones DGA, dicho comportamiento se repite en las tres cuencas estudiadas. Estacionalmente, FLOW sobrestima el caudal de primavera, ya que FLOW no posee un módulo que considere el aporte del derretimiento glaciar a la cuenca. Finalmente, se concluye (basado en los índices hidrológicos) que FLOW tiene un buen comportamiento a la hora de reproducir el caudal de cada cuenca, pero no logra reproducir correctamente los periodos de grandes crecidas de caudal y los periodos de deshielo.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
1. Introducción	1
1.0.1. VIC Model	3
1.0.1.1. Evotranspiración	5
1.0.1.2. Capacidad de infiltración	5
1.0.1.3. Escorrentía superficial del suelo desnudo	6
1.0.1.4. Escorrentía superficial y subsuperficial De Suelo Con Cobertura Vegetal	6
1.0.2. CR2MET	7
1.0.3. TauDEM	7
1.0.4. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	9
1.0.5. ERA-Interim reanalysis	9
1.1. Modelación con VIC	10
1.2. Patagonia occidental	11
1.3. Objetivo	12
2. Metodología	13
2.1. Area de estudio	13
2.1.1. Río Puelo	13
2.1.2. Río Palena	14
2.1.3. Río Aysén	15
2.2. Datos	16
2.2.1. DGA	16
2.2.2. FLOW	17
2.2.3. Datos faltantantes estaciones DGA	18
2.2.4.	19
2.2.4.1. Fase fría o negativa del ENOS (La Niña)	20
2.2.4.2. Fase caliente o positiva del ENOS (El Niño)	20
2.3. Análisis y métodos	20
2.3.1. Desempeño del modelo	20
2.3.1.1. Coeficiente Nash-Sutcliffe	20
2.3.1.2. Sesgo estadístico porcentual (pBias)	21

2.3.1.3.	Error cuadrático medio estandarizado con la SD (RSR)	21
2.3.1.4.	Coefficiente de correlación de Pearson	22
3.	Resultados	23
3.1.	Río Puelo	23
3.1.1.	Diferencia FLOW vs DGA	24
3.1.2.	Distribución de los datos	25
3.1.3.	Wavelets	26
3.1.4.	Ciclo Anual	27
3.1.5.	Integración de agua simulada y observada.	28
3.2.	Río Palena	31
3.2.1.	Diferencia FLOW vs DGA	32
3.2.2.	Distribución de los datos	33
3.2.3.	Wavelets	34
3.2.4.	Ciclo Anual	35
3.2.5.	Integración de agua simulada y observada.	36
3.3.	Río Aysen	39
3.3.1.	Diferencia FLOW vs DGA	39
3.3.2.	Distribución de los datos	41
3.3.3.	Wavelets	42
3.3.4.	Ciclo Anual	43
3.3.5.	Integración de agua simulada y observada.	45
3.3.5.1.	Integración mensual y estacional de agua	45
3.4.	Indices Climaticos (Desempeño del Modelo)	46
4.	Análisis	48
5.	Discusión	51
6.	Conclusión	53
	Referencias	56

Índice de cuadros

2.2.1.Estaciones utilizadas para completar datos faltantes.	19
3.1.1.Fechas en las cuales FLOW sobrestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Puelo	25
3.1.2.Fechas en las cuales FLOW subestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Puelo	25
3.1.3.Desempeño de FLOW en cada mes del año para el río Puelo. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada mes para las estaciones DGA.	30
3.1.4.Desempeño de FLOW en cada estación del año para el río Puelo. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada estación del año para las estaciones DGA. . . .	30
3.2.1.Fechas en las cuales FLOW sobrestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Palena	32
3.2.2.Fechas en las cuales FLOW subestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Palena	33
3.2.3.Desempeño de FLOW en cada mes del año para el río Palena. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada mes para las estaciones DGA.	38
3.2.4.Desempeño de FLOW en cada estación del año para el río Palena. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada estación del año para las estaciones DGA. . . .	38
3.3.1.Fechas en las cuales FLOW sobrestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Aysen	41
3.3.2.Fechas en las cuales FLOW subestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Aysen	41
3.3.3.Desempeño de FLOW en cada mes del año para el río Aysen. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada mes para las estaciones DGA.	46
3.3.4.Desempeño de FLOW en cada estación del año para el río Aysen. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada estación para las estaciones DGA.	46
3.4.1.Indices hidrológicos calculados en cada río	47

Índice de figuras

1.0.1. Distintas capas de cobertura vegetal, y los distintos flujos de agua y energía considerados por VIC. (Imagen obtenida del sitio web de VIC)	4
2.1.1. Cuenca binacional del río Puelo. Elaboración propia.	14
2.1.2. Cuenca río Palena. Elaboración Propia	15
2.1.3. Cuenca río Aysen. Elaboración Propia	16
2.2.1. Estaciones fluviométricas de la DGA, el color indica el caudal medio presente en cada estación. Imagen extraída del informe de meteo data.	17
3.1.1. La serie temporal del Río Puelo abarca desde el 1 de enero del año 2004 hasta el 31 de diciembre del año 2014. Los triángulos de color negro indican las fechas donde hubieron sobreestimaciones por parte del modelo, y los triángulos verdes indican puntos donde hubo subestimaciones por parte del modelo.	23
3.1.2. Diferencias entre la serie simulada y observada para el río Puelo. La figura superior izquierda muestra la resta entre la serie temporal simulada y observada para los 10 años elegidos en el río Aysen. La línea roja entrecortada, marca la posición de la primera desviación estándar de la serie de datos observados, y la línea entrecortada azul, marca la segunda desviación estándar. La figura superior derecha muestra la distribución de los restos, dentro del intervalo de la primera desviación estándar. La figura en el panel inferior muestra las fechas donde se obtuvieron diferencias sobre y bajo 2 desviaciones estándar, y estas son comparadas con el índice MEI del ENOS.	24
3.1.3. Distribución de los datos de la serie del río Puelo. El gráfico de la izquierda muestra la comparación entre la distribución de los datos de ambas series temporales, la línea verde entrecortada señala el punto hasta donde los datos comparten la misma distribución. El gráfico de la derecha corresponde a un scatter plot entre ambas series temporales, y la línea negra se graficó considerando los valores punto a punto de ambas series.	26

3.1.4. Coherencia entre la serie observada y FLOW. El gráfico de la izquierda muestra el campo de coherencia entre ambas series temporales para los años de validación a distintos periodos (en días), y el gráfico de la derecha muestra la coherencia promedio registrada para cada periodo.	27
3.1.5. Ciclo Anual río Puelo. La línea verde representa los dato diarios de la DGA, la línea negra representa el ciclo anual con promedio mensual, la línea púrpura representa los datos diarios de FLOW, la línea naranja representa los datos con promedio mensual de FLOW y la línea gris (parte inferior del grafico) representa la diferencia entre los datos de la DGA y los datos FLOW. Además, se incluye la STD del ciclo anual diario para ambas series temporales.	28
3.1.6. Integración del agua registrada en las estaciones de la DGA y la registrada por FLOW. El panel superior muestra la integración de la cantidad de agua por meses, y el panel inferior muestra lo mismo, pero para las estaciones del año.	29
3.2.1. La serie temporal del Río Palena abarca desde el 1 de enero del año 2004 hasta el 31 de diciembre del año 2014. Los triángulos de color negro indican las fechas donde hubieron sobreestimaciones por parte del modelo, y los triángulos verdes indican puntos donde hubieron subestimaciones por parte del modelo.	31
3.2.2. Diferencias entre la serie simulada y observada para el río Palena. La figura superior izquierda muestra la resta entre la serie temporal simulada y observada para los 10 años elegidos en el río Palena. La línea roja entrecortada, marca la posición de la primera desviación estándar de la serie de datos observados, y la línea entrecortada azul, marca la segunda desviación estándar. La figura superior derecha muestra la distribución de los restos, dentro del intervalo de la primera desviación estándar. La figura en el panel inferior muestra las fechas donde se obtuvieron diferencias sobre y bajo 2 desviaciones estándar, y estas son comparadas con el índice MEI del ENOS.	32
3.2.3. Distribución de los datos de la serie del río Palena. El gráfico de la izquierda muestra la comparación entre la distribución de los datos de ambas series temporales, la línea verde entrecortada señala el punto hasta donde los datos comparten la misma distribución. El gráfico de la derecha corresponde a un scatter plot entre ambas series temporales, y la línea negra se graficó considerando los valores punto a punto de ambas series.	34
3.2.4. Coherencia entre la serie observada y FLOW. El gráfico de la izquierda muestra el campo de coherencia entre ambas series temporales para los años de validación a distintos periodos (en días), y el gráfico de la derecha muestra la coherencia promedio registrada para cada periodo.	35

3.2.5.Ciclo Anual río Palena. La línea verde representa los dato diarios de la DGA, la línea negra representa el ciclo anual con promedio mensual, la línea púrpura representa los datos diarios de FLOW, la línea naranja representa los datos con promedio mensual de FLOW y la línea gris (parte inferior del gráfico) representa la diferencia entre los datos de la DGA y los datos FLOW. Además, se incluye la STD del ciclo anual diario para ambas series temporales.	36
3.2.6.Integración del agua registrada en las estaciones de la DGA y la registrada por FLOW. El panel superior muestra la integración de la cantidad de agua por meses, y el panel inferior muestra lo mismo, pero para las estaciones del año.	37
3.3.1.La serie temporal del Río Aysen abarca desde el 1 de enero del año 2004 hasta el 31 de diciembre del año 2014. Los triángulos de color negro indican las fechas donde hubo sobreestimaciones por parte del modelo, y los triángulos verdes indican puntos donde hubo subestimaciones por parte del modelo.	39
3.3.2.Diferencias entre la serie simulada y observada para el río Aysen. La figura superior izquierda muestra la resta entre la serie temporal simulada y observada para los 10 años elegidos en el río Aysen. La línea roja entrecortada, marca la posición de la primera desviación estándar de la serie de datos observados, y la línea entrecortada azul, marca la segunda desviación estándar. La figura superior derecha muestra la distribución de los restos, dentro del intervalo de la primera desviación estándar. La figura en el panel inferior muestra las fechas donde se obtuvieron diferencias sobre y bajo 2 desviaciones estándar, y estas son comparadas con el índice MEI del ENOS.	40
3.3.3.Distribución de los datos de la serie del río Aysén. El gráfico de la izquierda muestra la comparación entre la distribución de los datos de ambas series temporales, la línea verde entrecortada señala el punto hasta donde los datos comparten la misma distribución. El gráfico de la derecha corresponde a un scatter plot entre ambas series temporales, y la línea negra se graficó considerando los valores punto a punto de ambas series.	42
3.3.4.Coherencia entre la serie observada y FLOW. El gráfico de la izquierda muestra el campo de coherencia entre ambas series temporales para los años de validación a distintos periodos (en días), y el gráfico de la derecha muestra la coherencia promedio registrada para cada periodo.	43

3.3.5.Ciclo Anual río Aysen. La línea verde representa los dato diarios de la DGA, la línea negra representa el ciclo anual con promedio mensual, la línea púrpura representa los datos diarios de FLOW, la línea naranja representa los datos con promedio mensual de FLOW y la línea gris (parte inferior del grafico) representa la diferencia entre los datos de la DGA y los datos FLOW. Además, se incluye la STD del ciclo anual diario para ambas series temporales.	44
3.3.6.Integración del agua registrada en las estaciones de la DGA y la registrada por FLOW. El panel superior muestra la integración de la cantidad de agua por meses, y el panel inferior muestra lo mismo, pero para las estaciones del año.	45
3.4.1.Distribución temporal de los índices climáticos, para cada río. Los puntos rojos fuera del boxplot corresponden a valores outlier	47

Capítulo 1

Introducción

Antes de empezar, se describe un poco del lenguaje que será utilizado en el informe.

- **Datos observados:** Datos registrados por estaciones o instrumentos de medición directa o indirecta de alguna variable física.
- **Modelo:** Un modelo numérico es una técnica de representación teórica de algún evento natural, el cual resuelve ecuaciones para obtener predicciones de un valor, por ejemplo, un modelo numérico de océano resuelve ecuaciones de dinámica de fluido y de otros procesos para obtener estimaciones de una variable oceánica.
- **Producto de modelo:** Resultados obtenidos por el modelo tras haber realizado la simulación.
- **Calibración:** Técnica de ajuste que consiste en afinar el producto del modelo utilizando datos observados.
- **Validación:** Técnica que consiste en verificar como se comportan los datos obtenidos desde el modelo con los datos observados.

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de los distintos procesos que ocurren en una cuenca, ya sea en la superficie o bajo esta. Esta representación se hace a través del uso de ecuaciones hidrológicas (Ecuación fundamental de la hidrología, escorrentía, infiltración, etc.). El uso de los modelos hidrológicos pueden ser variados, ya que pueden ser usados por ejemplo, para estudiar los efectos que tendrá el cambio climático en la hidrografía de un lugar (4), como

herramienta de gestión de una zona, o también pueden ser usados como base de modelación de otros procesos. Existen distintos tipos de modelos hidrológicos, los cuales son usados con distintos fines. En el caso de este trabajo, se trabajara con la salida de caudal del modelo VIC, este corresponde a un modelo de infiltración, el cual utilizando datos de precipitación y temperatura, estima la infiltración del agua en el suelo a través de una curva de infiltración, y a partir de esto estima una escorrentía superficial(15).

Algunos otros modelos hidrológicos son el SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (19) , el cual fue desarrollado con la finalidad de estudiar el impacto del uso del suelo en la cantidad de agua, sedimentos y sustancias agrícolas químicas en grandes cuencas hidrográficas sometidas al uso de tierra y con variedad de suelos. Las variables de entrada requeridas por SWAT corresponden a variables climáticas, propiedades del suelo, topografía, vegetación y las prácticas de manejo de tierra que se realizan en la cuenca. A partir de estas variables SWAT es capaz de obtener el estado del movimiento de agua, movimiento de sedimento, estado de la cosecha, ciclo de nutrientes, etc.

SWAT fue utilizado por (28) en la cuenca del río Aysén, con el objetivo de estudiar el ciclo del nitrógeno en la cuenca. Los autores mencionan la complejidad de realizar modelación en esta zona, debido a las dificultades del terreno. Para abordar esto realizaron una modificación al código fuente de SWAT, para adaptarlo a la zona de estudio.

Otro modelo es el GR2m (20), el cual a partir de datos de precipitación y temperatura es capaz de reconstruir caudales mensuales. Este modelo funciona a partir de dos parámetros: 1) X1, el cual corresponde a la máxima capacidad de almacenamiento de un reservorio en mm y 2) X2, el cual corresponde al coeficiente de intercambio de agua subterránea (adimensional) (25) .

1.0.1. VIC Model

VIC es un modelo hidrológico de infiltración y de macroescala desarrollado por Xu Liang en la década de los 1990, en la Universidad de Washington.

Vic trabaja considerando la superficie como una grilla plana y de celdas uniformes de largo mayor a 1 km, donde cada celda es simulada de manera independiente, sin comunicación entre ellas y la distribución de las subgrillas (Elevación, cobertura del suelo, etc.), es obtenida a través de distribuciones estadísticas. El camino que siguen los flujos modelados, son obtenidos utilizando algún modelo de enrutamiento.

Los datos de entrada del modelo corresponden a series de tiempo diarias de variables meteorológicas (Precipitación, temperatura, velocidad del viento, etc.), y se considera que el agua solo entra a una grilla a través de la atmosfera, y se ignora el flujo de agua que hay entre celdas cuando esto ocurre sin un canal. Cabe mencionar que se considera que cuando el agua entra a un canal de agua, esta permanece ahí sin regresar al suelo.

El modelo caracteriza el subsuelo como si estuviera formado por 3 o menos capas de suelo, y la superficie es descrita por distintos tipos de cobertura terrestre, los cuales se representan con $N+1$. Los diferentes tipos de vegetación presentes en la zona son considerados en el índice $n=1,2,3\dots N$. Por tanto, si una zona no posee vegetación, estaría representada por $N+1$ (Suelo desnudo). Los tipos de cobertura terrestre se caracterizan de acuerdo al índice de área foliar (IAF) de la zona, resistencia del dosel vegetal, y la fracción relativa de raíces de cada capa del suelo. Cabe mencionar que una zona sin la presencia de raíces presentaría mayor pérdida de agua hacia la atmosfera en forma de evaporación.

Para estimar la evotranspiración de cada tipo de vegetación presente en la zona, se utiliza la evapotranspiración potencial, la resistencia del dosel, la resistencia aerodinámica a la transferencia de agua y la resistencia arquitectónica.

A cada clase de cobertura terrestre se le asocia una sola capa de dosel, y si consideramos una zona con dos capas de suelo, la capa superior representaría el comportamiento dinámico de la columna del suelo, la cual posee una respuesta rápida a eventos de lluvia, y la capa inferior caracteriza la humedad del suelo, la cual varía lentamente entre grandes eventos de lluvia. Por tanto, se puede entender que la capa inferior responde a eventos de lluvia que saturan la capa superior. Para cada tipo de cobertura de suelo se calcula la infiltración, el transporte de humedad entre capas, la escorrentía superficial y la escorrentía subsuperficial.

Finalmente, se puede obtener el flujo de calor latente total transferido a la atmósfera, el calor sensible total, los flujos de calor del suelo, la temperatura superficial efectiva, la escorrentía superficial total y la escorrentía subsuperficial, sumando todos los tipos de cobertura superficial.

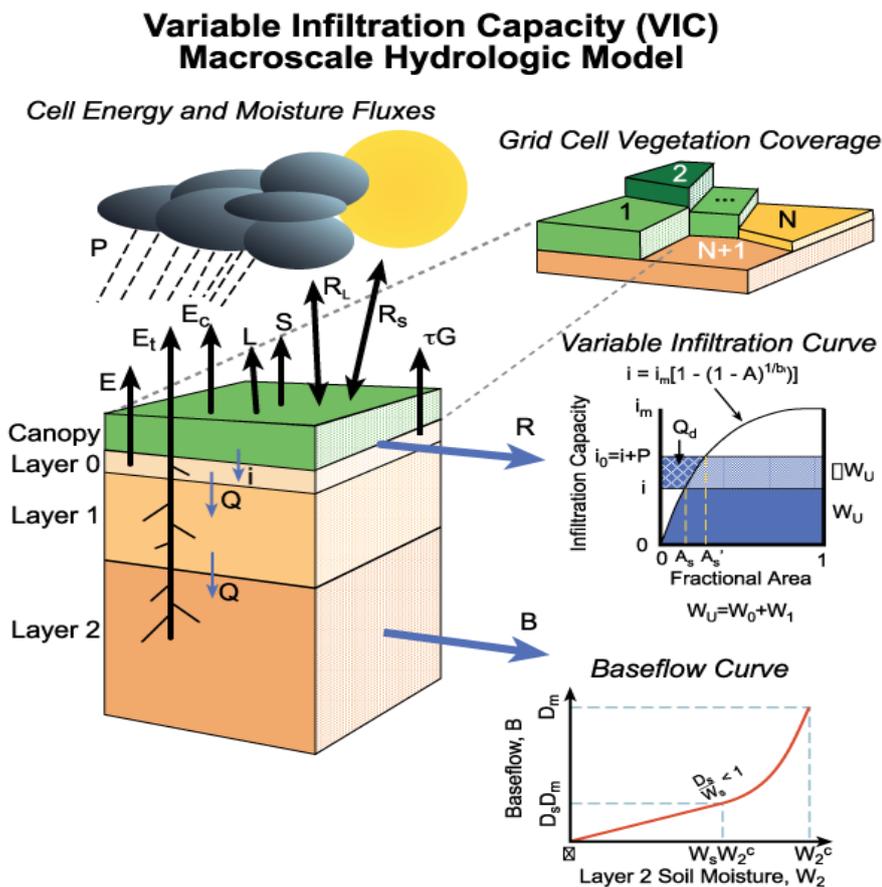


Figura 1.0.1: Distintas capas de cobertura vegetal, y los distintos flujos de agua y energía considerados por VIC. (Imagen obtenida del sitio web de VIC)

A continuación se muestran algunas de las ecuaciones que resuelve VIC, el resto de ecuaciones pueden ser encontradas en (15).

1.0.1.1. Evotranspiración

En el modelo se consideran tres tipos de evaporación, que corresponden a la evaporación de la capa de dosel de cada clase de vegetación, la transpiración de cada una de las clases de vegetación y la evaporación del suelo desnudo. La evapotranspiración total sobre la celda de la cuadrícula se calcula como la suma de los componentes del dosel, la vegetación y el suelo desnudo, ponderados por las respectivas fracciones del área de cobertura superficial (A).

La máxima evaporación desde la n-sima clase de cobertura superficial, $E_c^*[n]$, se define como:

$$E_c^*[n] = \left(\frac{W_i[n]}{W_{im}[n]} \right)^{2/3} E_p[n] \frac{r_w[n]}{r_w[n] + r_0[n]} \quad (1.0.1)$$

Donde \mathbf{n} corresponde a la clase de cobertura vegetal, $W_i[n]$ es la cantidad de agua interceptada en el dosel y que es almacenada, $W_{im}[n]$ es la capacidad máxima de agua que puede ser interceptada por el dosel vegetal, $E_p[n]$ es la evaporación potencial de una superficie, $r_0[n]$ es la resistencia arquitectónica que se debe a la variación del gradiente de humedad específica entre las hojas y el aire suprayacente en la capa del dosel, $r_w[n]$ es la resistencia aerodinámica a la transferencia de agua.

1.0.1.2. Capacidad de infiltración

La capacidad de infiltración corresponde al nivel máximo de agua que un suelo es capaz de absorber, este parámetro depende de sus propiedades físicas y la humedad presente. En VIC, la capacidad de infiltración se define como:

$$i = i_m [1 - (1 - A)^{1/b_i}] \quad (1.0.2)$$

Donde \mathbf{i} corresponde a la capacidad de infiltración, i_m corresponde a la capacidad máxima de infiltración, A corresponde a una fracción de área cuya capacidad de infiltración es menor a i y \mathbf{b} corresponde al parámetro de forma de la infiltración.

1.0.1.3. Escorrentía superficial del suelo desnudo

La escorrentía superficial se calcula en base a la fórmula para la infiltración mencionada anteriormente. El contenido máximo de humedad del suelo de la capa 1 viene dado por:

$$W_1^c = \frac{i_m}{1 + b_i} \quad (1.0.3)$$

Luego, para calcular la escorrentía, se asume que esta es generada en aquellas áreas en que la precipitación, mas el almacenamiento de humedad del suelo, supera la capacidad de almacenamiento del suelo en un paso de tiempo anterior:

$$\begin{aligned} Q_d[N + 1] \cdot \Delta t &= P \cdot \Delta t - W_1^c + W_1^-[N + 1], \\ i_0 + P \cdot \Delta t &\geq i_m \\ Q_d[N + 1] \cdot \Delta t &= P \cdot \Delta t - W_1^c + W_1^-[N + 1] \\ &+ W_1^c \left[1 - \frac{i_0 + P \cdot \Delta t}{i_m} \right]^{1+b_i}, \\ i_0 + P \cdot \Delta t &\leq i_m \end{aligned} \quad (1.0.4)$$

Donde $W_1^-[N + 1]$ es el contenido de humedad de la capa 1 al principio del paso temporal y \mathbf{P} corresponde a la precipitación.

1.0.1.4. Escorrentía superficial y subsuperficial De Suelo Con Cobertura Vegetal

Las ecuaciones que describen la escorrentía, el balance de agua en cada capa, son semejantes a las ecuaciones para el suelo desnudo (sin vegetación), excepto que se cambia E_1 (Evaporación de la primera capa), E_2 (Evaporación de la segunda capa) y P , por $P_t[n], E_1^t$ y E_2^t , luego la evapotranspiración total y la escorrentía total Q se define como:

$$\begin{aligned}
 E &= \sum_{n=1}^N C_v[n] \cdot (E_c[n] + E_r[n]) + C_v[N + 1] \cdot E_1 \\
 Q &= \sum_{n=1}^{N+1} C_v[n] \cdot (Q_d[n] + Q_b[n])
 \end{aligned}
 \tag{1.0.5}$$

donde $C_v[n]$ es la fracción de cobertura vegetal para la n-sima superficie, $C_v[N + 1]$ es la fracción de área cubierta por suelo desnudo.

1.0.2. CR2MET

El producto CR2MET contiene información de variables meteorológicas, tales como precipitación y temperaturas medias y extremas, para el territorio de Chile continental, entre los años 1979 y 2016.

El producto para la precipitación se obtuvo a partir de la regionalización estadística de los datos del reanálisis atmosféricos ERA-interim, los cuales poseen una resolución espacial de grilla de aproximadamente 70 km. Los métodos estadísticos considerados para la regionalización de los datos de ERA-Interim, incluyen funciones de transferencia para pasar de datos de gran escala a datos de una escala más regional. Estos métodos consideran la topografía local y parámetros de precipitación, los cuales son calibrados mediante observaciones.

Tras la regionalización realizada, se obtuvo un producto de precipitación con una resolución espacial de grilla rectangular de aproximadamente 5 km.

La obtención del producto para las temperaturas, también se basó en una regionalización de los datos de ERA-Interim, y además se consideraron los datos satelitales de temperatura superficial estimada del MODIS LST.

1.0.3. TauDEM

TauDEM (24), <https://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/>) es un conjunto de herramientas de Modelos Digitales de Elevación (MDE) para la extracción y el

análisis de información hidrológica a partir de la topografía representada por un MDE . **TauDem proporciona las siguientes capacidades:**

- Desarrollo de MDEs condicionados hidrológicamente (sin foso) utilizando el enfoque de inundación
- Calcula las trayectorias de los flujos (direcciones) y las pendientes
- Calcula el área de contribución utilizando métodos de dirección de flujo simple y múltiple
- Múltiples métodos para la delineación de redes de flujos, incluyendo métodos topográficos basados en la forma, sensibles a la densidad de drenaje espacialmente variable
- Métodos objetivos para la determinación del umbral de delineación de la red de canales basados en las caídas de los arroyos
- Delineación de las cuencas y subcuencas que drenan a cada segmento de arroyo y asociación entre los atributos de la cuenca y del segmento para establecer modelos hidrológicos

Funciones especializadas para el análisis del terreno, incluyendo:

- Cálculo de la relación pendiente/área que es la base del índice de humedad topográfica
- Calcula la distancia hacia arriba de las crestas y hacia abajo de los arroyos en las variantes horizontal, vertical, a lo largo de la pendiente y directa
- Traza un mapa de los lugares situados en la parte superior de la ladera en los que las actividades tienen un efecto en la parte inferior de la misma.
- Evalúa la contribución de la pendiente ascendente sujeta a descomposición o atenuación
- Calcula la acumulación cuando la absorción está sujeta a limitaciones de concentración
- Calcula la acumulación cuando la absorción está sujeta a limitaciones de transporte

- Evalúa la acumulación inversa
- Evalúa las posibles zonas de salida de las avalanchas

1.0.4. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

La SRTM (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) fue una misión que voló a bordo del transbordador espacial Endeavour, del 11 al 22 de febrero del 2000. La misión estuvo a cargo de la NASA y de la NGA, con la finalidad de crear un conjunto global de datos de elevación de terreno.

En la misión se utilizaron dos radares, los cuales ya habían participado en una misión en el año 1994, pero para esta misión fueron modificados, para obtener datos comparando dos imágenes tomadas desde distintos ángulos mediante el uso de dos antenas de radar diferentes, una de ellas ubicada dentro del transportador y otra ubicada al final de un mástil del transbordador. Las diferencias entre las dos señales obtenidas, permiten el cálculo de la elevación digital (27).

1.0.5. ERA-Interim reanalysis

El producto ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>) es un conjunto de datos que abarca desde 1979 hasta la actualidad, y se continúa actualizando en el tiempo de manera mensual (2).

ERA-Interim se inició el 2006 con la finalidad de crear un puente con el set de datos anterior, ERA-40, el cual abarca un periodo de 50 años entre 1957 al 2002. Los objetivos principales del proyecto ERA-Interim eran mejorar ciertos aspectos del ERA-40, tales como: la representación del ciclo hidrológico, la calidad de la circulación estratosférica y el manejo de sesgos y cambios en el sistema de observación, y además algunas de las mejoras añadidas por ERA-Interim incluyen: Análisis variacional de 4 dimensiones, análisis de humedad y corrección de sesgo variacional para los datos satelitales.

El modelo atmosférico, utilizan los datos IFS (Integrated Forecasting System) del ECMWF, con una configuración espacial, la cual incluye: 60 niveles verticales

con el nivel superior a 0,1 hpa, una representación esferico-armonica T255 para los campos dinámicos básicos, y una grilla gaussiana con una resolución aproximadamente uniforme de 79 km.

A la vez, el modelo atmosférico es acoplado con un modelo oceánico de olas, el cual resuelve aproximadamente 30 frecuencias de olas y 24 olas direccionales en los nodos, con una cuadrícula de 1 grado de latitud/longitud.

El producto final de ERA-Iterim, incluye:

- Campos de análisis y pronóstico atmosférico.
- Campos de análisis y pronóstico atmosféricos evaluados a niveles de presión estándar.
- Campos de análisis atmosféricos en superficies isoentrópicas y $PV = \pm 2$ PVU.
- Campos de análisis y pronóstico del modelo de olas acoplado.
- Integraciones verticales de campos de nivel del modelo.

1.1. Modelación con VIC

Desde su creación, VIC ha sido usado en diversos estudios con distintos propósitos, por ejemplo (16), hicieron uso de VIC para simular la escorrentía sobre la región de Huang-Huai-Hai en China entre dos intervalos temporales(2001-2030 y 2016-2045), con una resolución espacial de grilla de 50x50[Km] y 48 puntos grillados. Los datos de precipitación y de temperatura, fueron obtenidos utilizando el modelo PRECIS, en el intervalo temporal de interés. El objetivo del estudio es evaluar como el cambio climático afectara el régimen hidrológico de la zona.

Los resultados del estudio muestran que VIC es más sensible a los cambios en la precipitación que a los cambios de temperatura, mostrando cambios positivos para el incremento de la precipitación y cambios negativos (disminución escorrentía) para el aumento de la temperatura. También se observó aumento de las sequías en las estaciones de verano y otoño. Finalmente, los resultados mostraron un

incremento en precipitación y temperatura, en el intervalo temporal estudiado, así como un aumento de la escorrentía total en la región, pero los autores indican que la variación de la escorrentía en la región es desigual, o sea que en lugares de la región se pronostica mayor escorrentía y en otros se pronostica una disminución de esta.

Otro ejemplo del uso de VIC es (4), donde utilizando el software estudiaron el impacto del cambio climático en el régimen hidrológico y eventos extremos en la cuenca de los Andes en Chile central. En este caso, el modelo VIC fue ejecutado usando una resolución espacial de grilla de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Los resultados muestran una disminución de la precipitación del 30 % para el final del siglo, y por consiguiente una disminución del 40 % en la escorrentía de la zona. Los autores de este artículo mencionan ciertas técnicas herramientas estadísticas, las cuales son útiles para regionalizar modelos de baja resolución.

1.2. Patagonia occidental

Bajo el sistema de clasificación climática de Koppen (13), la Patagonia Occidental (Patagonia chilena), se puede clasificar como una provincia Esteparia muy fría de tendencia seco estival, este tipo de clima presenta precipitaciones a lo largo de todo el año, sin una estación seca definida, con precipitaciones que varían desde 400[mm] hasta los 100[mm] en los sectores menos lluviosos. Pero debido a las características geográficas que presenta la Patagonia, dentro de esta se pueden encontrar zonas con distintos tipos de clima, encontrando por ejemplo en la zona costera al sur de la latitud $46^\circ 40'S$, climas marítimo templado frío lluvioso (Cfb), templado frío con gran humedad (Cfc) y tundra isotérmico (E Ti.) (29).

Dentro de la Patagonia occidental se pueden encontrar glaciares de distintos tamaños, dentro de los cuales destaca el denominado Campo de Hielo Sur (CHS), el cual es el segundo cuerpo glaciar más grande de latino América sur, luego de la Antártica (1). El CHS abarca un área de 13.000[km^2] y posee una longitud de 350[km], y a su vez el CHS se subdivide en cuencas glaciares, las cuales generan aporte de agua tanto al Océano Pacífico como al Océano Atlántico, en el lado de

Argentina.

1.3. Objetivo

El objetivo de este trabajo es realizar la validación del producto de la simulación realizada en VIC por METEODATA para el instituto de fomento pesquero IFOP. El producto de la modelación se llama FLOW, este contiene información de caudales de cerca de 30 mil cuencas con salida costera en la zona de la Patagonia. FLOW fue creado con el objetivo de obtener una fuente de datos hidrológicos en puntos de descarga al mar de ríos y glaciares de la Patagonia Occidental, para luego ser utilizada en otros modelos numéricos con los que trabaja el IFOP como lo son el ROOMS y el MIKE-3. La información de FLOW, puede ser encontrada en la página web de CHONOS.

Los datos de FLOW se validan estudiando su eficiencia con respecto a los datos observados,. También se estudiará la calidad de los datos obtenidos, a través de índices hidrológicos frecuentemente empleados en la literatura((17),(12),(23)).

Capítulo 2

Metodología

2.1. Area de estudio

2.1.1. Río Puelo

La cuenca andina del río Puelo abarca un área de aproximadamente $9000[km^2]$, donde $3150[km^2]$ se encuentran ubicados en Chile y el resto en Argentina. Su desembocadura se encuentra en el Estuario de Reloncaví a $41^{\circ}35'S$ de latitud, presentando un caudal medio de $615[m^3 * s^{-1}]$, y un régimen mixto de precipitaciones y deshielos con picos en invierno (mayo-julio) producto de la precipitación y un pico secundario de deshielo a fines de la primavera (noviembre-diciembre). (14). Cabe mencionar que el caudal del río se ve influenciado a su vez por el aporte de los distintos tributarios presentes en la zona.

La cordillera de los Andes, así como en la mayoría de la Patagonia Occidental, tiene un rol fundamental en la cantidad de agua que se registra en la zona, debido a que en esta zona se producen lluvias orográficas con valores de $1800 [mm/año]$ en Puerto Montt y $2430[mm/año]$ en la estación Puelo en Llanada Grande.

La parte occidental del río Puelo se encuentra en la región de los lagos, la cual presenta un clima lluvioso, con dos subtipos de climas de acuerdo a la clasificación climática de Köppen: Clima Templado Lluvioso con influencia mediterránea y clima templado frío de costa occidental con máximo invernal de lluvias.

Las precipitaciones de la región de los Lagos, presentan un régimen estacional, con una leve influencia de El niño oscilación del sur (ENOS), presentando en la fase positiva una precipitación bajo la media en la estación de verano.

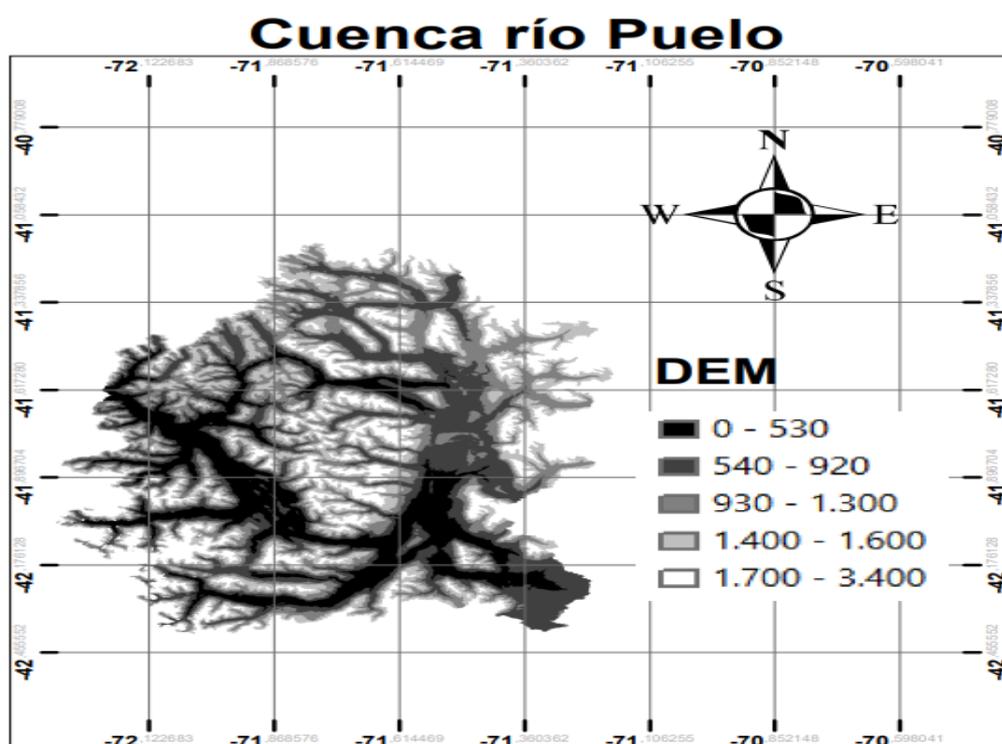


Figura 2.1.1: Cuenca binacional del río Puelo. Elaboración propia.

2.1.2. Río Palena

El río Palena está ubicado entre la Región de los Lagos y la región de Aysen ($43^{\circ}14', 44^{\circ}3'S$), su cuenca hidrográfica posee una superficie de $13.396[km^2]$ de los cuales $5700[km^2]$ pertenecen a Chile y el resto a Argentina. El caudal medio del río Palena es de $812[m^3 * s^{-1}]$.

La cuenca del río Palena posee un régimen pluvio-nival, es decir, posee un máximo de caudal en los meses de mayor precipitación y disminuye en los meses menor precipitación, pero el caudal es amortiguado por el aporte de agua del deshielo.

La zona en la cual se encuentra el río Palena, según la clasificación de Koppen, posee un clima templado frío de costa occidental con máxima invernal de lluvias.

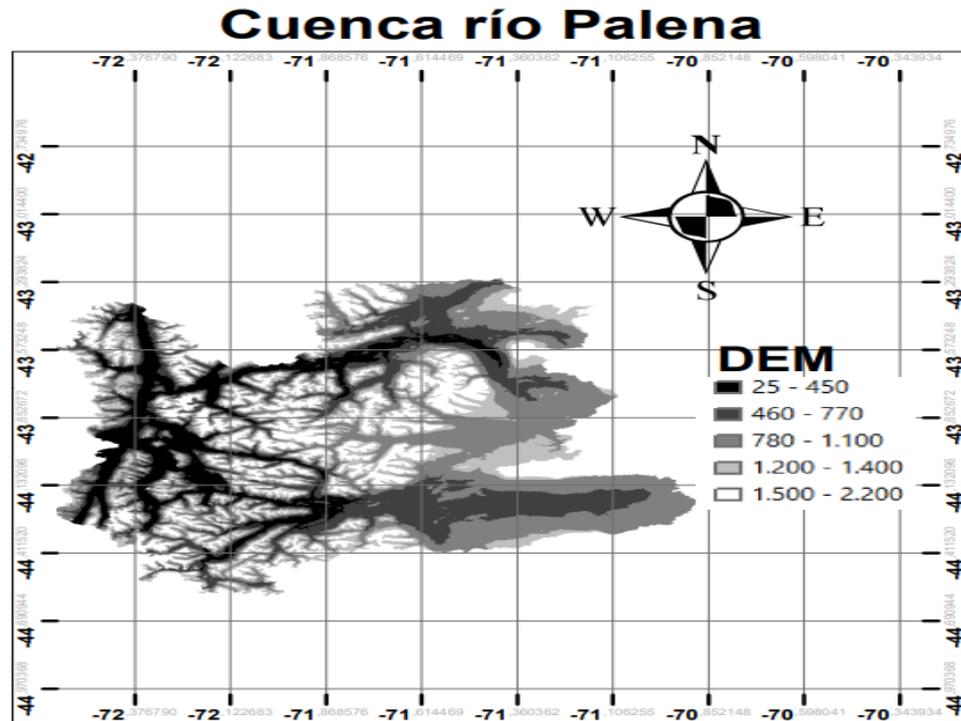


Figura 2.1.2: Cuenca río Palena. Elaboración Propia

2.1.3. Río Aysén

El río Aysén se ubica en la cuenca del río Aysen, en la XI región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, registrando un caudal promedio de $528 [m^3 * s^{-1}]$. La cuenca cubre un área de aproximadamente $11.000 [km^2]$, y esta se encuentra cubierta de bosque nativo y zonas glaciares.

El clima en esta zona es templado con bajas temperaturas, presenta regímenes de altas precipitaciones y fuertes vientos. Aunque debido a las características geográficas de la zona, es posible encontrar microclimas dentro de la cuenca. De acuerdo a (21) en la cuenca predomina un régimen hidrológico pluvial-nival, y además es posible encontrar 3 subregímenes: Un régimen nivo-pluvial mixto en cauces trasandinos, nivo-pluvial mixto y nivo-pluvial regulado por lagos y glaciares.

Por otro lado, (6), clasifica la cuenca del río Aysen con cuatro tipos de clima:

- Clima marítimo templado frío y lluvioso, en la zona Oeste de la cordillera principal

- Clima de hielo por altura en las partes altas de la cordillera
- Clima trasandino con degeneración esteparia.
- Clima de estepa frío en la franja oriental.

Además, en esta zona existe presencia de relieves, tales como: Una cordillera principal al Oeste, con altitudes que varían entre 1800 y 2000 [m], una precordillera al Este, la cual marca la zona de transición entre la Cordillera Principal y la zona Extrandina, con altitudes sobre los 2000[m], y finalmente una Zona Extrandina, la cual se encuentra conformada por llanuras y mesetas con alturas entre 400 y 700 [m].

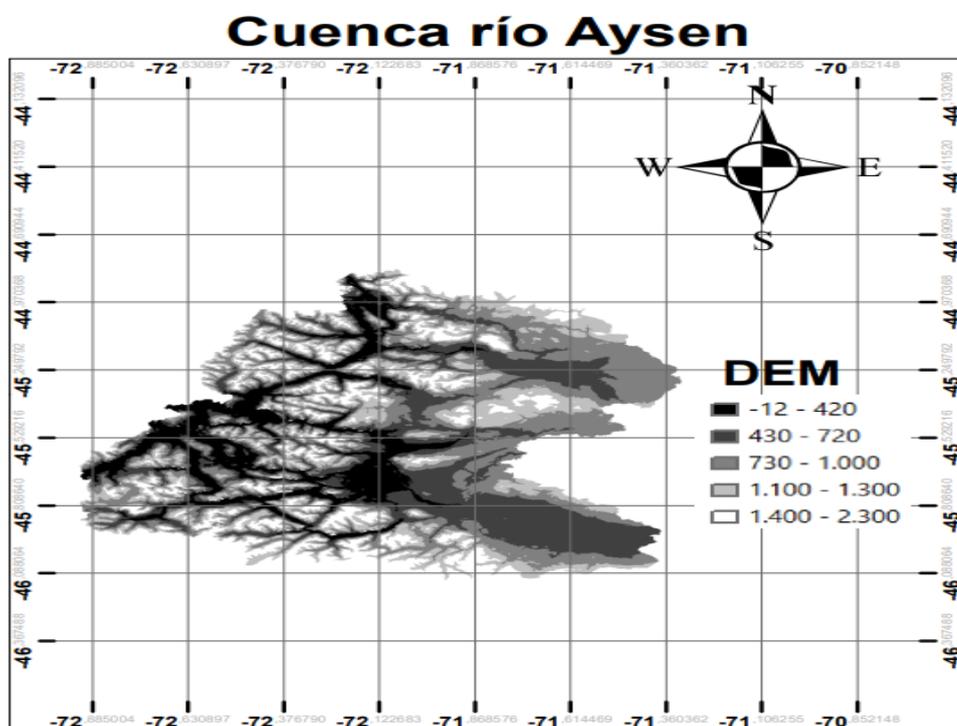


Figura 2.1.3: Cuenca río Aysen. Elaboración Propia

2.2. Datos

2.2.1. DGA

La calibración y validación de FLOW se realiza utilizando los datos observados por las estaciones fluviométricas de la DGA.

Dentro de la zona de estudio se encuentran un total de 119 estaciones fluviométricas con datos de caudal diarios, pero después de realizar una inspección de los datos, se optó por utilizar un total de 68 estaciones.

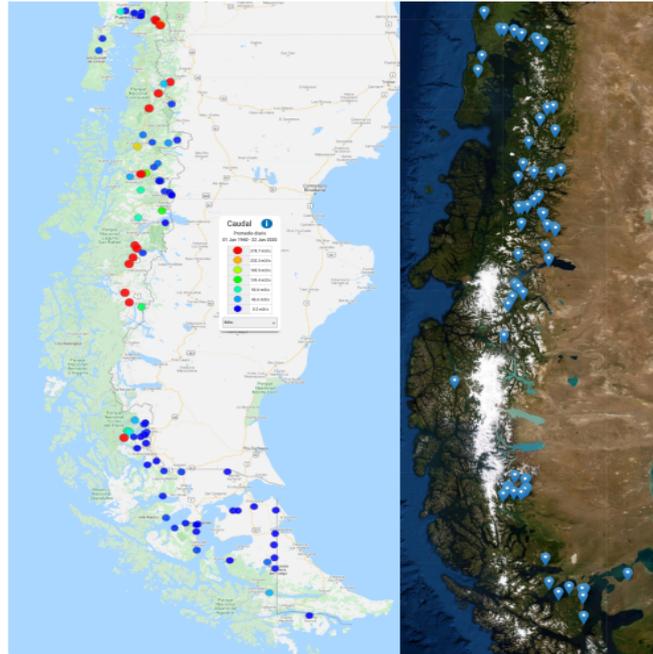


Figura 2.2.1: Estaciones fluviométricas de la DGA, el color indica el caudal medio presente en cada estación. Imagen extraída del informe de meteodata.

2.2.2. FLOW

FLOW es una herramienta perteneciente al sistema de información oceanográfica CHONOS del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) <http://chonos.ifop.cl/>.

Esta herramienta contiene información diaria de caudales, para aproximadamente 30 mil cuentas hidrográficas ubicadas en la Patagonia chilena con salida al mar, abarcando desde 1980 hasta 2018. La construcción de FLOW se hizo a partir del modelo hidrológico VIC (Variable Infiltration Capacity, (15),(9), el cual fue forzado utilizando datos de precipitación y temperatura del modelo CR2MET ((3)), también se utilizaron datos de elevación topográfica del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para representar las cuencas, y finalmente la calibración del modelo se realizó utilizando datos observados por las estaciones fluviométricas de la DGA.

Actualmente, los datos de FLOW son utilizados para alimentar otros modelos que requieren de datos de caudal ríos. Por ejemplo, dentro de la página de CHONOS,

se encuentran el modelo MOSA-ROMS, el cual pronostica distintas variables oceanográficas, y una de sus entradas son los datos de caudal de FLOW.

Los datos utilizados se encuentran disponibles en la página de CHONOS, herramienta FLOW . La serie temporal de los datos simulados posee una resolución temporal diaria, abarcando desde el 1 de enero de 1979 hasta el 31 de diciembre del año 2018. Los datos observados se cortan de acuerdo a la disponibilidad de datos en cada río a utilizar, para el caso del río Puelo se utilizan los datos desde el 1 de enero del 2004 hasta el 31 de diciembre del 2016 y para los ríos Aysen y Palena, se utilizan datos que van desde el 1 de enero del año 2004 hasta el 31 de diciembre del año 2014.

Río	Estación	Lon	Lat	Caudal Medio [m ³ *s ⁻¹]
Aysén	Río Aysén en Puerto Aysen	-72.62	-45.41	524.48
Puelo	Río Puelo en Carrera Basilio	-72.21	-41.6	615.27
Palena	Río Palena Bajo Junta Rosselot	-72.38	-43.82	816.03

2.2.3. Datos faltantes estaciones DGA

Para el caso del río Puelo y Aysén, se rellenaron los datos faltantes con datos de estaciones cercanas (ver **tabla 2.2.1**). No se realizó el mismo procedimiento en el río Palena, debido a que no se disponen de estaciones fluviométricas lo suficientemente cercanas, y en este caso, los cálculos se realizaron considerando solo las fechas donde había datos observados (DGA) y los datos de FLOW.

Río	Estación Nueva	Lon	Lat	Caudal Medio [m ³ *s ⁻¹]
Aysén	Río Blanco antes junta río Aysén	-72.6	-45.4	258.67
Puelo	Río Puelo en desague lago Tagua-Tagua	-72.17	-41.64	568.18

Cuadro 2.2.1: Estaciones utilizadas para completar datos faltantes.

2.2.4.

Índice multivariado del ENSO: MEI

Se busca comparar las fechas donde se encuentran las mayores diferencias entre los datos modelados y observados con las variaciones anuales del ENSO, con la finalidad de entender si el desempeño de FLOW varía junto a este índice.

El índice del ENSO a utilizar es el índice MEI (Multivariable ENSO index) (26), el cual también fue utilizado por (5) en el estudio de plumas de ríos en el mar interior de Chiloé (Puelo, Río Grande, Futaleufú y Palena).

Este índice se obtiene al promediar los componentes principales de las variables temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire, presión atmosférica al nivel del mar, nubosidad, componente zonal del viento y componente meridional del viento. Los promedios son realizados cada dos meses, partiendo desde diciembre del año anterior.

Los valores positivos de este índice indican una fase caliente del ENSO y se asocia al evento de **El niño**, mientras que los valores negativos indican una fase fría del ENSO y se asocian al evento de **La Niña**.

La serie temporal de los valores del índice MEI, se puede obtener desde la página de la NOAA (<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>).

2.2.4.1. Fase fría o negativa del ENOS (La Niña)

La fase fría o negativa del ENOS se caracteriza por una disminución en la temperatura superficial del mar frente a las costas de Chile, y una disminución de las precipitaciones en Chile central.

2.2.4.2. Fase caliente o positiva del ENOS (El Niño)

La fase cálida del ENOS se caracteriza por un aumento de la temperatura superficial del mar del Pacífico frente a las costas de Chile, y un aumento de las precipitaciones en Chile central.

2.3. Análisis y métodos

El análisis a realizar se basa en el estudio de la eficiencia del modelo a través del uso de distintos índices hidrológicos que se mencionan más abajo, también se estudiara la cantidad de agua que ingresa el modelo y se comparara con la cantidad de agua que se registra en las estaciones de la DGA, se hará un análisis de Fourier utilizando wavelets (8) para estudiar las frecuencias más significativas que comparten los datos de FLOW y de la DGA, se estudiara las fechas en las cuales los datos FLOW y DGA presentan las mayores diferencias, y esas fechas serán comparadas con el índice multivariado del ENSO (MEI) con la finalidad de saber si el desempeño de FLOW se ve afectado por este índice, se estudiará la distribución y qué cantidad de esta es compartida por ambas series temporales utilizando un gráfico cuantil-cuantil (QQplot), y finalmente se estudiara el ciclo anual diario y mensual de ambas series temporales, y se estudiara la diferencia entre los ciclos de los datos DGA y FLOW para saber en qué fechas o estaciones las diferencias entre FLOW y los datos DGA son mayores.

2.3.1. Desempeño del modelo

2.3.1.1. Coeficiente Nash-Sutcliffe

Para estudiar el desempeño del modelo, se utilizan índices del ajuste de los datos simulados a los datos observados. En la literatura correspondiente, se sugiere el

uso del índice NSE (Nash-Sutcliffe coefficient) (18) para estudiar el desempeño del modelo a la hora de simular el caudal del río.

El desempeño del modelo según el índice NSE será clasificado como excelente si $NSE > 0.8$, Muy bueno si NSE se encuentra entre 0.65 y 0.80, Bueno si el valor de NSE se encuentra entre 0.4 y 0.65, malo para los valores entre 0.2 y 0.4, y se considerará como un desempeño muy malo si los valores de NSE son menores a 0.2 (7).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (2.3.1)$$

Donde Q_o^t corresponde al caudal observado en el paso temporal t, y Q_m^t corresponde al caudal simulado en el instante t. Para el índice NSE, se consideran los valores más cercanos a 1 como un indicador de mejor desempeño.

El índice KGE también es utilizado para estudiar el desempeño del modelo:

2.3.1.2. Sesgo estadístico porcentual (pBias)

El sesgo estadístico porcentual indica la diferencia entre la medición promedio observada y el valor predicho por el modelo, y nos da una idea de que tan exacto es el modelo al compararlo con las observaciones. Se considerará los valores de pBias < al 10 % como un indicador de un buen desempeño del modelo (Khamis et al.).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \quad (2.3.2)$$

2.3.1.3. Error cuadrático medio estandarizado con la SD (RSR)

Este indicador mide el error presente entre dos conjuntos de datos. En este caso mide el error entre las variables observadas y las variables predichas por el modelo. Los valores que serán considerados como un buen desempeño del modelo, serán aquellos valores de RSR < 0.5 (Khamis et al.).

$$\text{RSR} = \frac{\text{RMSE}}{\text{STDEV}_{\text{obs}}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{sim}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y^{\text{mean}})^2}} \quad (2.3.3)$$

2.3.1.4. Coeficiente de correlación de Pearson

Este coeficiente nos permite conocer como se relacionan 2 conjuntos de datos. Los valores de correlación entre 0.30 y 0.50 serán considerados como una correlación moderada, y los valores entre 0.50 y 1 serán considerados como una correlación fuerte (10).

$$r = \frac{n(\sum Q_o^t Q_m^t) - (\sum Q_o^t)(\sum Q_m^t)}{\sqrt{[n \sum (Q_o^t)^2 - (\sum Q_o^t)^2][n \sum (Q_m^t)^2 - (\sum Q_m^t)^2]}} \quad (2.3.4)$$

Capítulo 3

Resultados

3.1. Río Puelo

La validación del río Puelo se realizó para un periodo de 12 años, que fue donde se encontró la mayor continuidad en los datos. El río Puelo presenta un total de 0.44 % de datos subestimados, y un total de 0.02 % de datos sobrestimados.

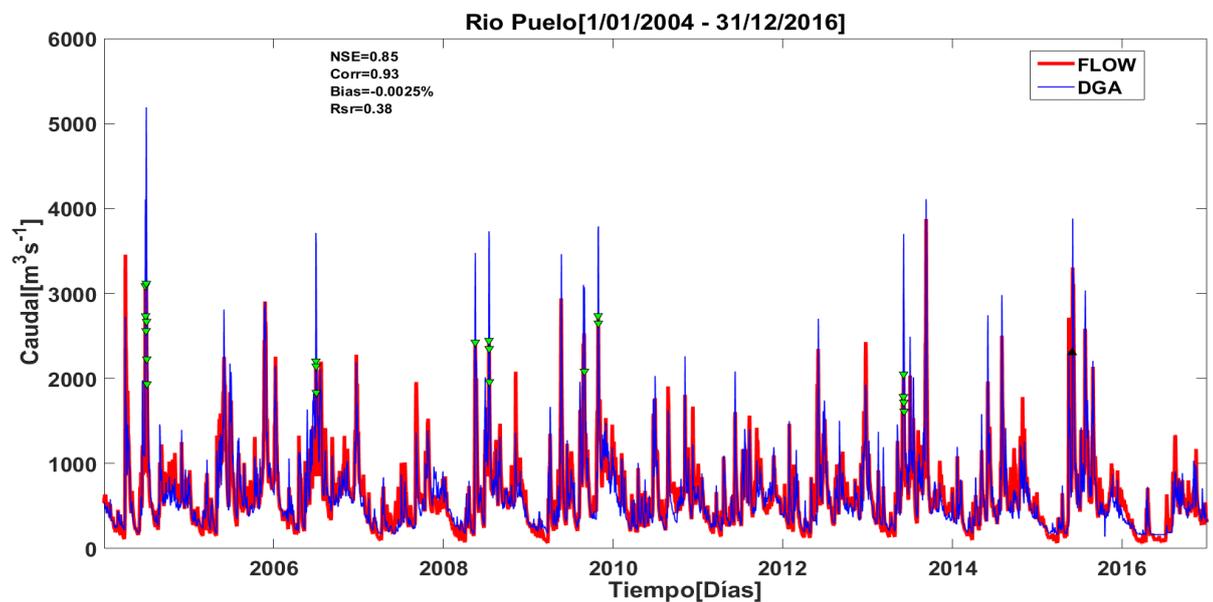


Figura 3.1.1: La serie temporal del Río Puelo abarca desde el 1 de enero del año 2004 hasta el 31 de diciembre del año 2014. Los triángulos de color negro indican las fechas donde hubieron sobrestimaciones por parte del modelo, y los triángulos verdes indican puntos donde hubo subestimaciones por parte del modelo.

Las diferencias del río Puelo siguieron el mismo tratamiento anteriormente mencionado, presentando dentro de la primera desviación estándar un 99.5 % de los datos.

3.1.1. Diferencia FLOW vs DGA

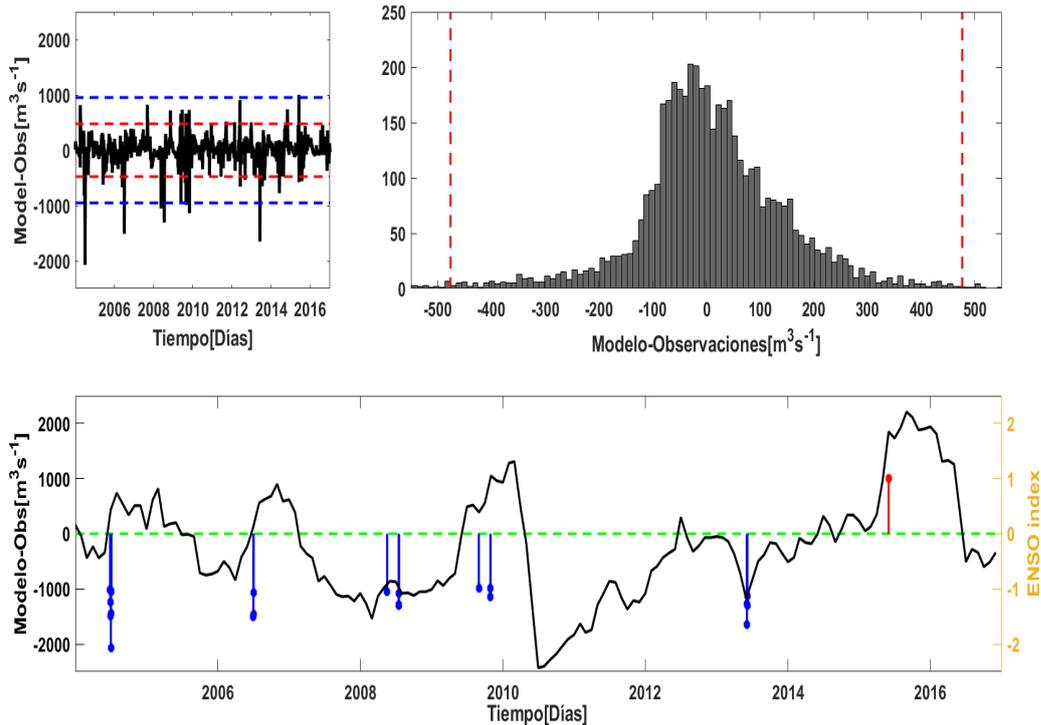


Figura 3.1.2: Diferencias entre la serie simulada y observada para el río Puelo. La figura superior izquierda muestra la resta entre la serie temporal simulada y observada para los 10 años elegidos en el río Aysen. La línea roja entrecortada, marca la posición de la primera desviación estándar de la serie de datos observados, y la línea entrecortada azul, marca la segunda desviación estándar. La figura superior derecha muestra la distribución de los restos, dentro del intervalo de la primera desviación estándar. La figura en el panel inferior muestra las fechas donde se obtuvieron diferencias sobre y bajo 2 desviaciones estándar, y estas son comparadas con el índice MEI del ENOS.

Las siguientes tablas muestran los caudales en las fechas para las cuales la diferencia entre el caudal de FLOW y el caudal observado es mayor o menor a más menos dos desviaciones estándar.

Fecha	DGA	FLOW	Diferencia	Índice MEI
01-06-2015	1305	2306.1	1001.1	Positivo

Cuadro 3.1.1: Fechas en las cuales FLOW sobrestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Puelo

Fecha	DGA	FLOW	Diferencia	Índice MEI
28-06-2004	4106	3089.8	-1016.2	Positivo
29-06-2004	3971	2736.1	-1234.9	Positivo
01-07-2004	4051	2561.7	-1489.3	Positivo
02-07-2004	5190	3117.9	-2072.1	Positivo
03-07-2004	4120	2670.4	-1449.6	Positivo
04-07-2004	3279	2229.2	-1049.8	Positivo
05-07-2004	2968	1936.7	-1031.3	Positivo
02-07-2006	3714	2204.1	-1509.9	Positivo
03-07-2006	3597	2144.7	-1452.3	Positivo
04-07-2006	2901	1834.2	-1066.8	Positivo
18-05-2008	3478	2424.9	-1053.1	Negativo
16-07-2008	3732	2445.9	-1286.1	Negativo
17-07-2008	3657	2350.3	-1306.7	Negativo
18-07-2008	3048	1961.1	-1086.9	Negativo
31-08-2009	3074	2084.7	-989.3	Positivo
29-10-2009	3724	2736.5	-987.5	Positivo
30-10-2009	3789	2649.6	-1139.4	Positivo
04-06-2013	3055	1786.1	-1268.9	Negativo
05-06-2013	3701	2050.0	-1651.0	Negativo
06-06-2013	3015	1719.9	-1295.1	Negativo
07-06-2013	2750	1613.7	-1136.3	Negativo

Cuadro 3.1.2: Fechas en las cuales FLOW subestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Puelo

3.1.2. Distribución de los datos

La distribución de los datos del río Puelo, muestra un 85% de los datos que comparten la misma distribución, y una correlación del 93%.

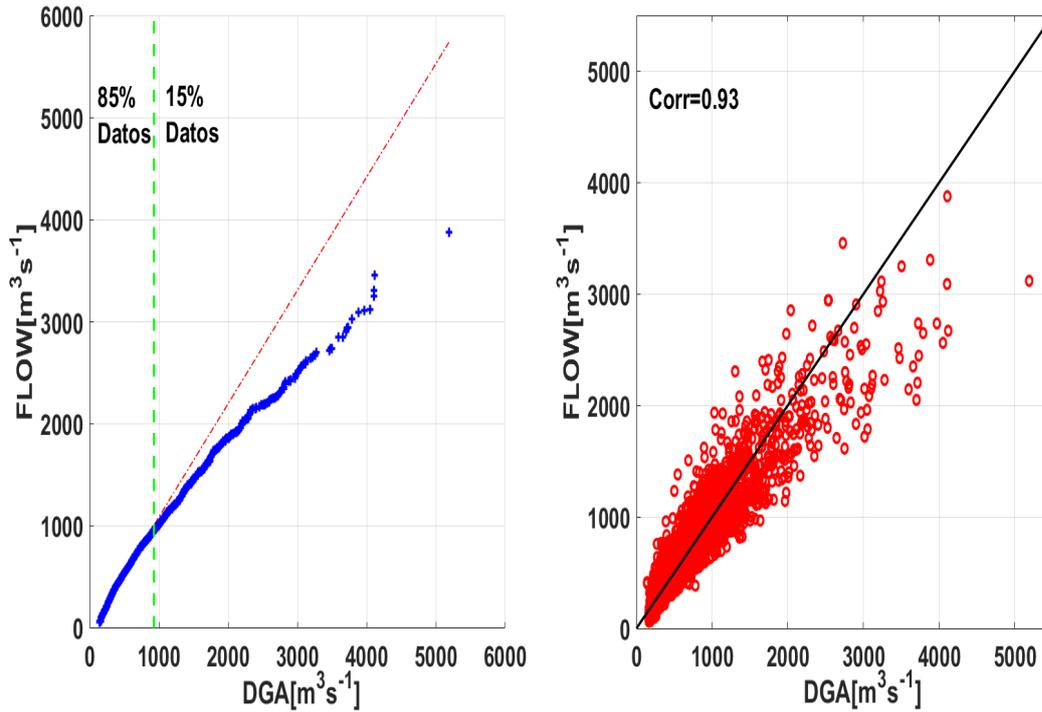


Figura 3.1.3: Distribución de los datos de la serie del río Puelo. El gráfico de la izquierda muestra la comparación entre la distribución de los datos de ambas series temporales, la línea verde entrecortada señala el punto hasta donde los datos comparten la misma distribución. El gráfico de la derecha corresponde a un scatter plot entre ambas series temporales, y la línea negra se graficó considerando los valores punto a punto de ambas series.

3.1.3. Wavelets

El gráfico de la coherencia promedio, nos muestra que el modo dominante para el río Puelo se encuentra para frecuencias entre 256 y 512 días, entre los años 2005 y 2016.

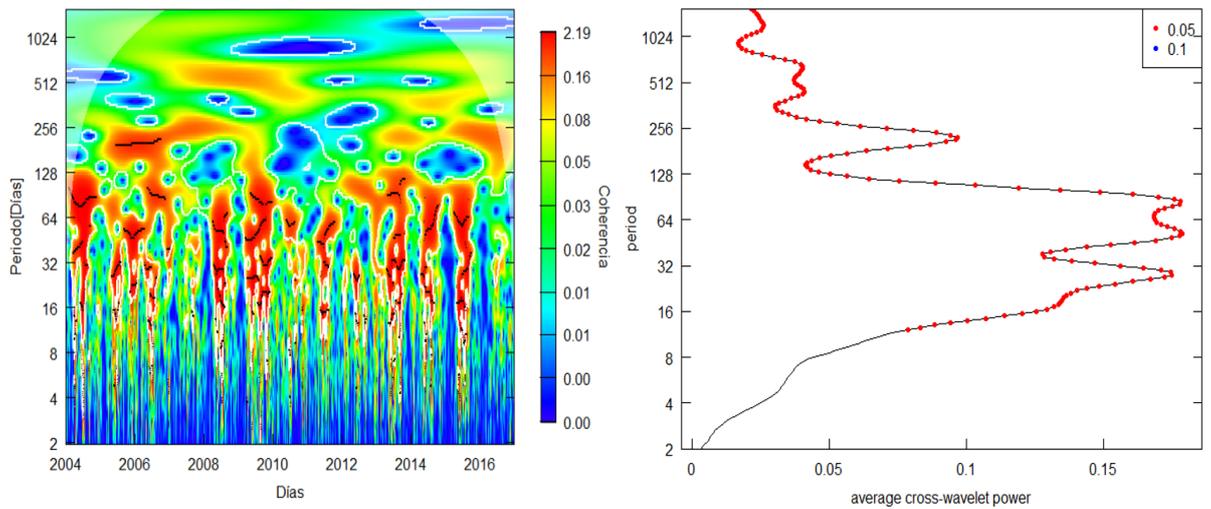


Figura 3.1.4: Coherencia entre la serie observada y FLOW. El gráfico de la izquierda muestra el campo de coherencia entre ambas series temporales para los años de validación a distintos periodos (en días), y el gráfico de la derecha muestra la coherencia promedio registrada para cada periodo.

3.1.4. Ciclo Anual

El ciclo anual de los datos de FLOW y de la DGA del río Puelo se muestran con datos diarios, datos con promedio mensual y la diferencia entre los datos DGA y los datos de FLOW.

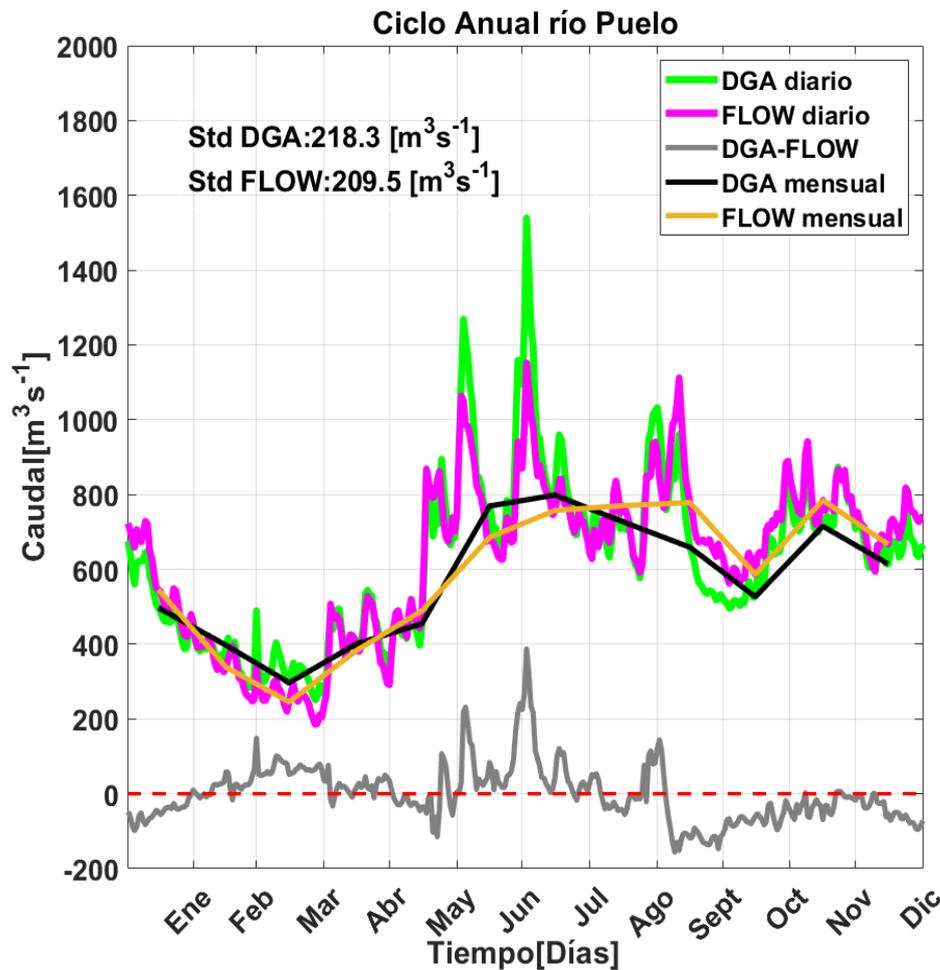


Figura 3.1.5: Ciclo Anual río Puelo. La línea verde representa los datos diarios de la DGA, la línea negra representa el ciclo anual con promedio mensual, la línea púrpura representa los datos diarios de FLOW, la línea naranja representa los datos con promedio mensual de FLOW y la línea gris (parte inferior del gráfico) representa la diferencia entre los datos de la DGA y los datos FLOW. Además, se incluye la STD del ciclo anual diario para ambas series temporales.

3.1.5. Integración de agua simulada y observada.

A continuación se muestra la integración (suma) del agua que se registró en FLOW y la que fue registrada en las estaciones de la DGA. La integración se realizó tanto de manera mensual, estacional y total. El objetivo de esto es ver cómo varía el desempeño de FLOW en escala mensual, estacional y en de manera general.

Al integrar el caudal total registrado por FLOW y por las estaciones DGA en el río Puelo, nos da como resultado un caudal total de $2.902.770 [m^3 * s^{-1}]$ para FLOW

y $289[m^3 * s^{-1}]$ para los datos DGA, lo cual corresponde a una sobreestimación de caudal, con una diferencia del 0.4 % con respecto a los datos DGA.

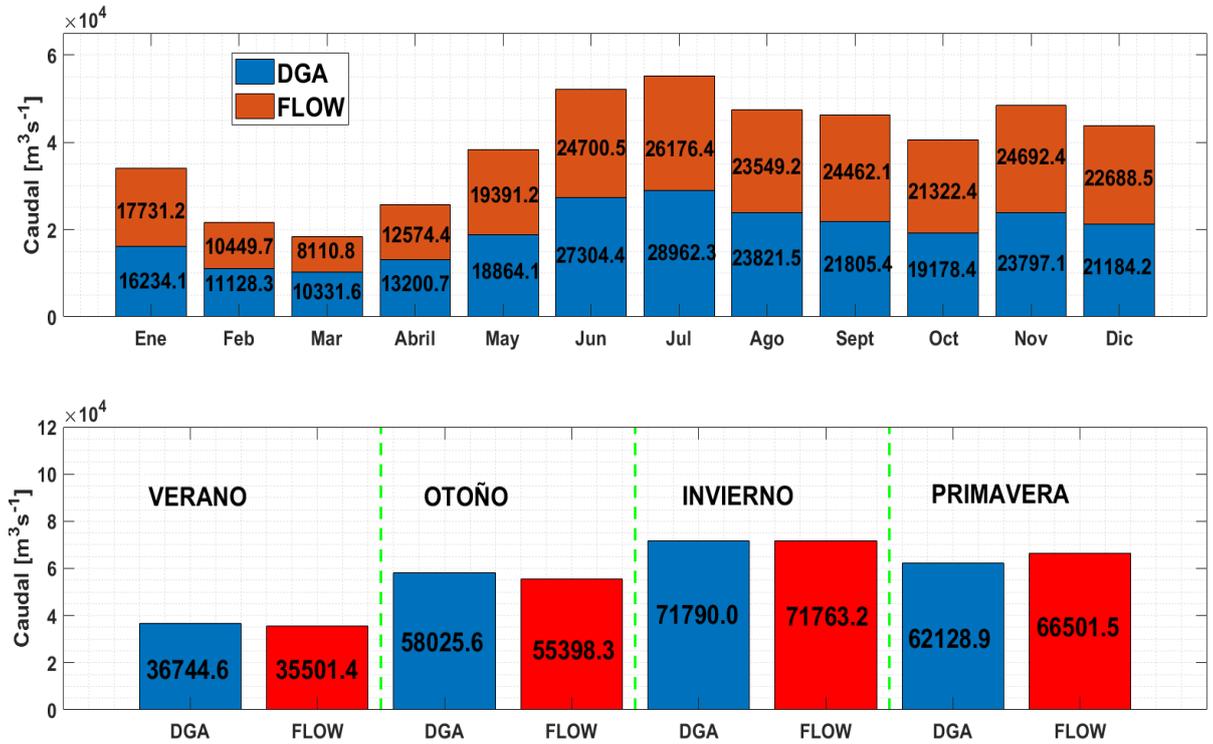


Figura 3.1.6: Integración del agua registrada en las estaciones de la DGA y la registrada por FLOW. El panel superior muestra la integración de la cantidad de agua por meses, y el panel inferior muestra lo mismo, pero para las estaciones del año.

Las siguientes tablas resumen lo expuesto en el gráfico anterior, mostrando el comportamiento de FLOW por mes y por estaciones.

Mes		Diferencia % (DGA vs FLOW)
Enero	Sobreestimación	9.2
Febrero	Subestimación	6
Marzo	Subestimación	21.5
Abril	Subestimación	4
Mayo	Sobreestimación	2.7
Junio	Subestimación	9.5
Julio	Subestimación	9.6
Agosto	Subestimación	1.14
Septiembre	Sobreestimación	12.1
Octubre	Sobreestimación	11.7
Noviembre	Sobreestimación	3
Diciembre	Sobreestimación	7.1

Cuadro 3.1.3: Desempeño de FLOW en cada mes del año para el río Puelo. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada mes para las estaciones DGA.

Estación		Diferencia % (DGA vs FLOW)
Verano	Subestimación	3.3
Otoño	Subestimación	4.5
Invierno	Subestimación	0.03
Primavera	Sobreestimación	7

Cuadro 3.1.4: Desempeño de FLOW en cada estación del año para el río Puelo. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada estación del año para las estaciones DGA.

3.2. Río Palena

La validación del río Palena se realizó para un periodo de 10 años, que fue donde se encontró la mayor continuidad en los datos. La comparación de ambas series temporales se muestra en la **Figura 3.2.1**. En el caso del río Palena, bajo el mismo criterio utilizado en el río Aysen, la cantidad de datos subestimados representa un 0.39 % de los datos, y los datos sobrestimados representan un 0.07 % de los datos.

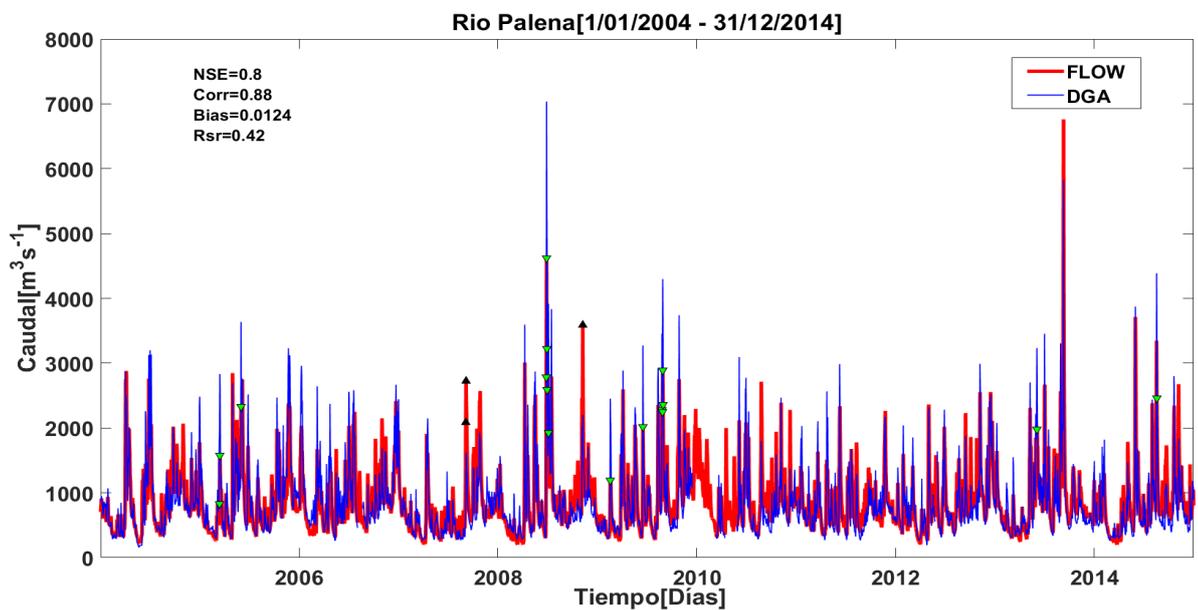


Figura 3.2.1: La serie temporal del Río Palena abarca desde el 1 de enero del año 2004 hasta el 31 de diciembre del año 2014. Los triángulos de color negro indican las fechas donde hubieron sobreestimaciones por parte del modelo, y los triángulos verdes indican puntos donde hubieron subestimaciones por parte del modelo.

Las diferencias calculadas para el río Palena (**Figura 3.2.2**), siguieron el mismo tratamiento del río Aysen, y en este caso dentro de la primera desviación estándar se encuentra el 95.2 % de los datos.

3.2.1. Diferencia FLOW vs DGA

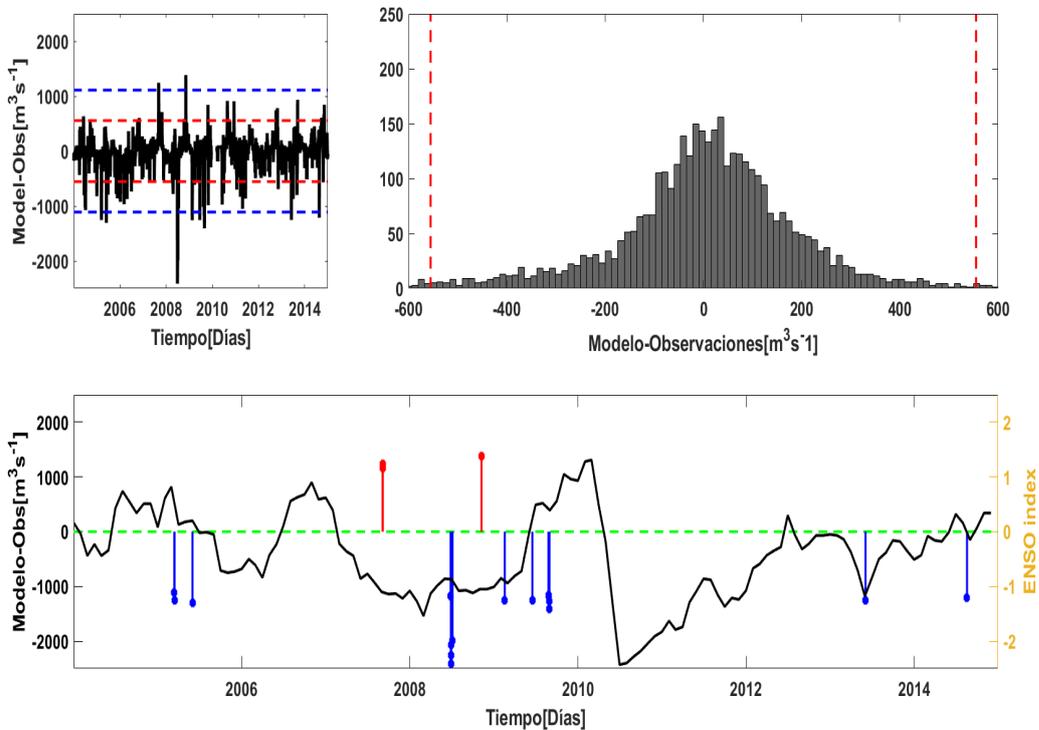


Figura 3.2.2: Diferencias entre la serie simulada y observada para el río Palena. La figura superior izquierda muestra la resta entre la serie temporal simulada y observada para los 10 años elegidos en el río Palena. La línea roja entrecortada, marca la posición de la primera desviación estándar de la serie de datos observados, y la línea entrecortada azul, marca la segunda desviación estándar. La figura superior derecha muestra la distribución de los restos, dentro del intervalo de la primera desviación estándar. La figura en el panel inferior muestra las fechas donde se obtuvieron diferencias sobre y bajo 2 desviaciones estándar, y estas son comparadas con el índice MEI del ENOS.

Las siguientes tablas muestran los caudales en las fechas para las cuales la diferencia entre el caudal de FLOW y el caudal observado es mayor o menor a más menos dos desviaciones estándar.

Fecha	DGA	FLOW	Diferencia	Índice MEI
05-09-2007	842	2085.5	1243.5	Negativo
06-09-2007	1567	2724.3	1157.3	Negativo
08-11-2008	2203	3588.2	1385.2	Negativo

Cuadro 3.2.1: Fechas en las cuales FLOW sobrestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Palena

Fecha	DGA	FLOW	Diferencia	Índice MEI
14-03-2005	1951	830.4	-1120.6	Positivo
15-03-2005	2832	1576.2	-1255.8	Positivo
01-06-2005	3636	2329.9	-1306.1	Positivo
27-06-2008	3964	2785.5	-1178.5	Negativo
28-06-2008	7035	4620.8	-2414.2	Negativo
29-06-2008	5478	3223.3	-2254.7	Negativo
30-06-2008	4661	2589.7	-2071.3	Negativo
05-07-2008	3915	1925.2	-1989.8	Negativo
17-02-2009	2453	1193.4	-1259.6	Negativo
17-06-2009	3274	2017.5	-1256.5	Positivo
26-08-2009	3455	2281.9	-1173.1	Positivo
28-08-2009	3403	2249.0	-1154.0	Positivo
29-08-2009	4298	2890.1	-1407.9	Positivo
30-08-2009	3635	2359.8	-1275.2	Positivo
04-06-2013	3233	1978.9	-1254.1	Negativo
19-08-2014	3674	2460.4	-1213.6	Neutro

Cuadro 3.2.2: Fechas en las cuales FLOW subestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Palena

3.2.2. Distribución de los datos

La distribución de los datos del río Palena se muestran en la **Figura 3.2.3**, donde se observa que un 92 % de los datos comparten una misma distribución y las series comparten una correlación del 88 %.

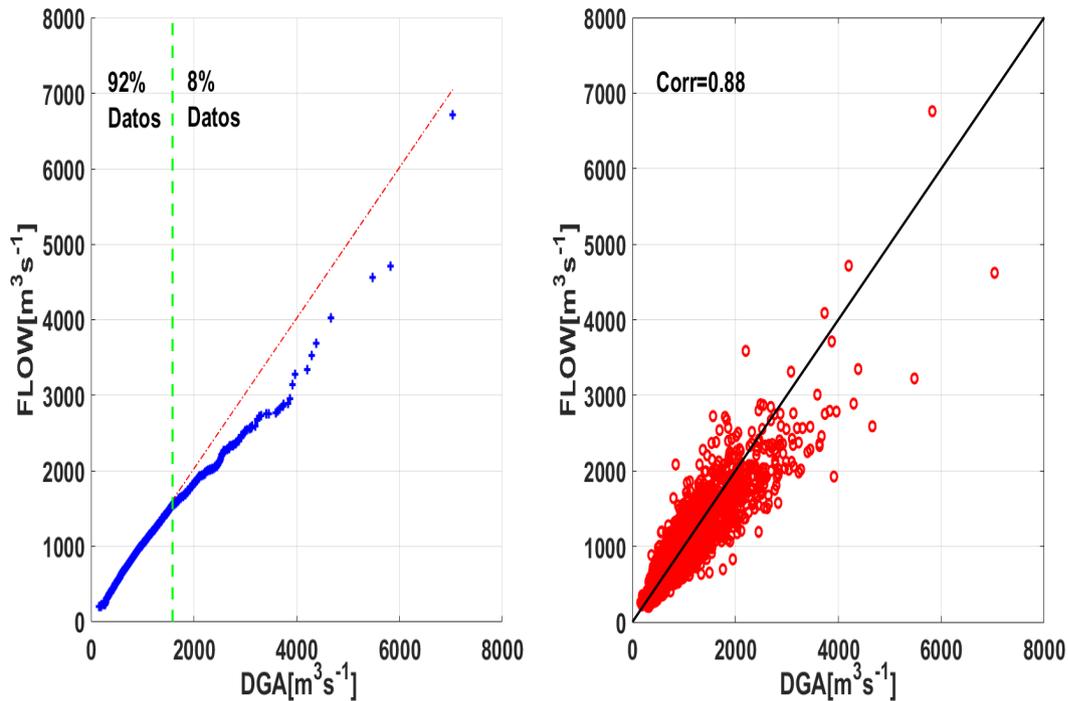


Figura 3.2.3: Distribución de los datos de la serie del río Palena. El gráfico de la izquierda muestra la comparación entre la distribución de los datos de ambas series temporales, la línea verde entrecortada señala el punto hasta donde los datos comparten la misma distribución. El gráfico de la derecha corresponde a un scatter plot entre ambas series temporales, y la línea negra se graficó considerando los valores punto a punto de ambas series.

3.2.3. Wavelets

El análisis de frecuencias para las series temporales del río Palena, se muestra en la **figura 3.2.4**

Los modos dominantes se observan para frecuencias de 60 días en los años 2004 al 2005, 2006 al 2007, 2008 al 2009, 2009 al 2010.

La figura de la coherencia promedio, muestra que para el río Palena, los modos dominantes se encuentran para las frecuencias entre 64 y 128 días.

Las figuras con los ciclos anuales muestran que la simulación subestima las grandes crecidas de caudal, por ejemplo en el mes de junio el valor de caudal de las observaciones alcanza valores cercanos a los $2000[m^3 * s^{-1}]$, mientras que la

simulación simuló un caudal cercano a los $1400[m^3 * s^{-1}]$.

El análisis de las frecuencias muestra

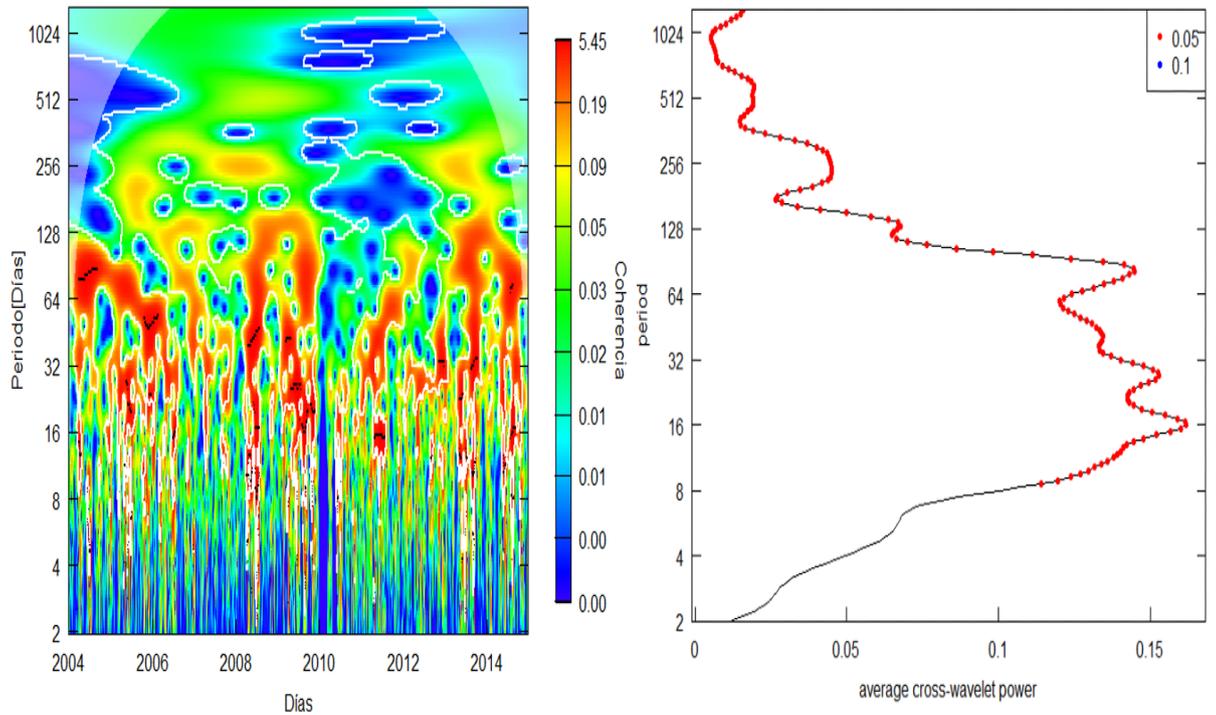


Figura 3.2.4: Coherencia entre la serie observada y FLOW. El gráfico de la izquierda muestra el campo de coherencia entre ambas series temporales para los años de validación a distintos periodos (en días), y el gráfico de la derecha muestra la coherencia promedio registrada para cada periodo.

3.2.4. Ciclo Anual

El ciclo anual de los datos de FLOW y de la DGA del río Palena se muestran con datos diarios, datos con promedio mensual y la diferencia entre los datos DGA y los datos de FLOW.

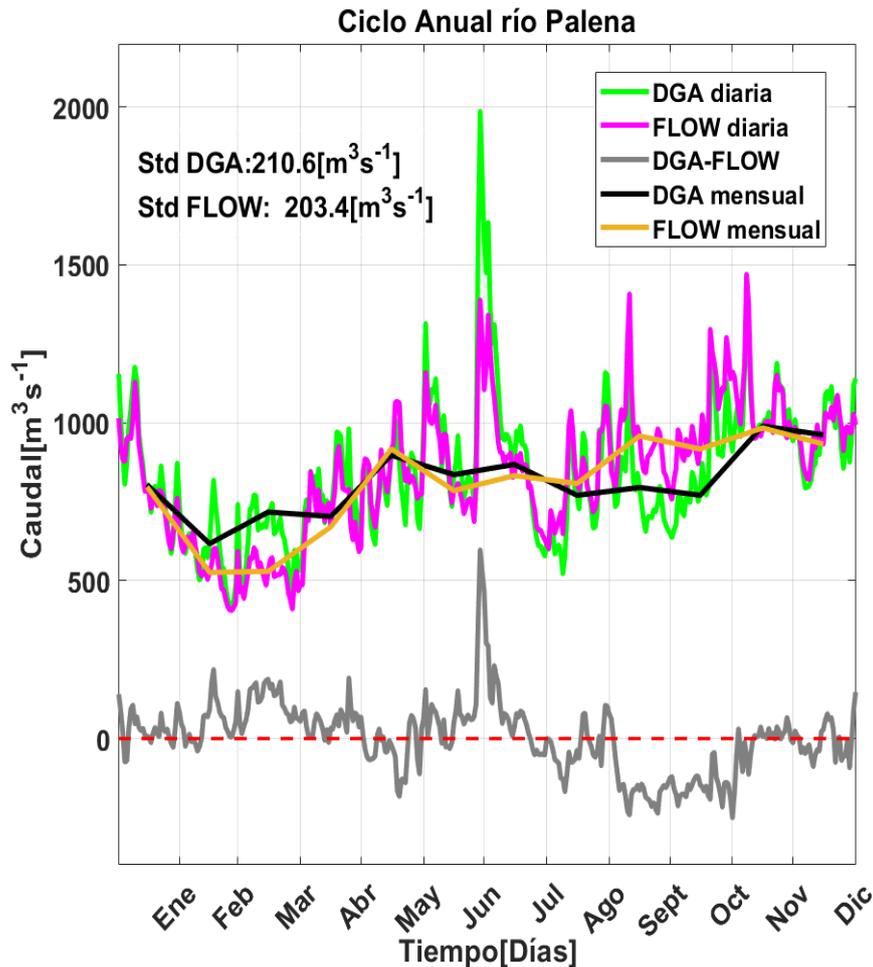


Figura 3.2.5: Ciclo Anual río Palena. La línea verde representa los datos diarios de la DGA, la línea negra representa el ciclo anual con promedio mensual, la línea púrpura representa los datos diarios de FLOW, la línea naranja representa los datos con promedio mensual de FLOW y la línea gris (parte inferior del gráfico) representa la diferencia entre los datos de la DGA y los datos FLOW. Además, se incluye la STD del ciclo anual diario para ambas series temporales.

3.2.5. Integración de agua simulada y observada.

A continuación se muestra la integración (suma) del agua que se registró en FLOW y la que fue registrada en las estaciones de la DGA. La integración se realizó tanto de manera mensual, estacional y total. El objetivo de esto es ver como varía el desempeño de FLOW en escala mensual, estacional y en de manera general.

Al integrar el caudal total registrado por FLOW y por las estaciones DGA en el río Palena, nos da como resultado un caudal total de $4.667.560 [\text{m}^3 * \text{s}^{-1}]$ para FLOW

y $4.690.650[m^3 * s-1]$ para los datos DGA, lo cual corresponde a una subestimación de caudal, con una diferencia del 0.5 % con respecto a los datos DGA.

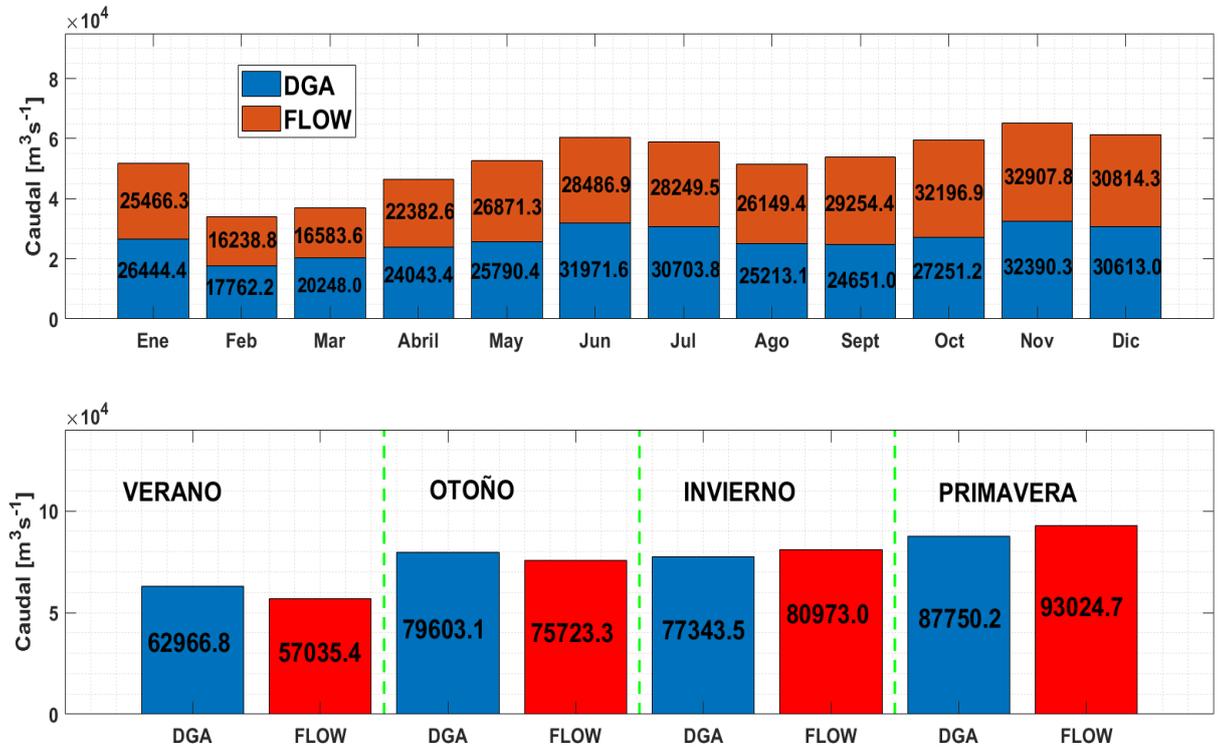


Figura 3.2.6: Integración del agua registrada en las estaciones de la DGA y la registrada por FLOW. El panel superior muestra la integración de la cantidad de agua por meses, y el panel inferior muestra lo mismo, pero para las estaciones del año.

Las siguientes tablas resumen lo expuesto en el gráfico anterior, mostrando el comportamiento de FLOW por mes y por estaciones.

Mes		Diferencia % (DGA vs FLOW)
Enero	Subestimación	3.6
Febrero	Subestimación	8.5
Marzo	Subestimación	18
Abril	Subestimación	6.9
Mayo	Sobreestimación	4.1
Junio	Subestimación	10.8
Julio	Subestimación	7.9
Agosto	Sobreestimación	3.7
Septiembre	Sobreestimación	18.6
Octubre	Sobreestimación	18.1
Noviembre	Sobreestimación	1
Diciembre	Sobreestimación	0.6

Cuadro 3.2.3: Desempeño de FLOW en cada mes del año para el río Palena. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada mes para las estaciones DGA.

Estación		Diferencia % (DGA vs FLOW)
Verano	Subestimación	9.4
Otoño	Subestimación	4.8
Invierno	Sobreestimación	4.6
Primavera	Sobreestimación	6

Cuadro 3.2.4: Desempeño de FLOW en cada estación del año para el río Palena. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada estación del año para las estaciones DGA.

3.3. Río Aysen

La validación del río Aysen se realizó para un periodo de 10 años, que fue donde se encontró la mayor continuidad en los datos. La comparación de las series temporales simuladas y observadas se muestran en la **Figura 3.3.1** para un periodo de 10 años, donde en la parte superior izquierda se observa el resultado tras calcular los índices utilizados para evaluar el desempeño del modelo.

Los triángulos verdes y negros muestran las fechas en las cuales se encontraron diferencias mayores a 2 desviaciones estándar (**Figura 3.3.2**). En el caso del río Aysen, la cantidad de datos subestimados, representan un 0.37% del total de los datos (Triángulos verdes), mientras que los datos sobrestimados representan un 0.17% de los datos (Triángulos verdes).

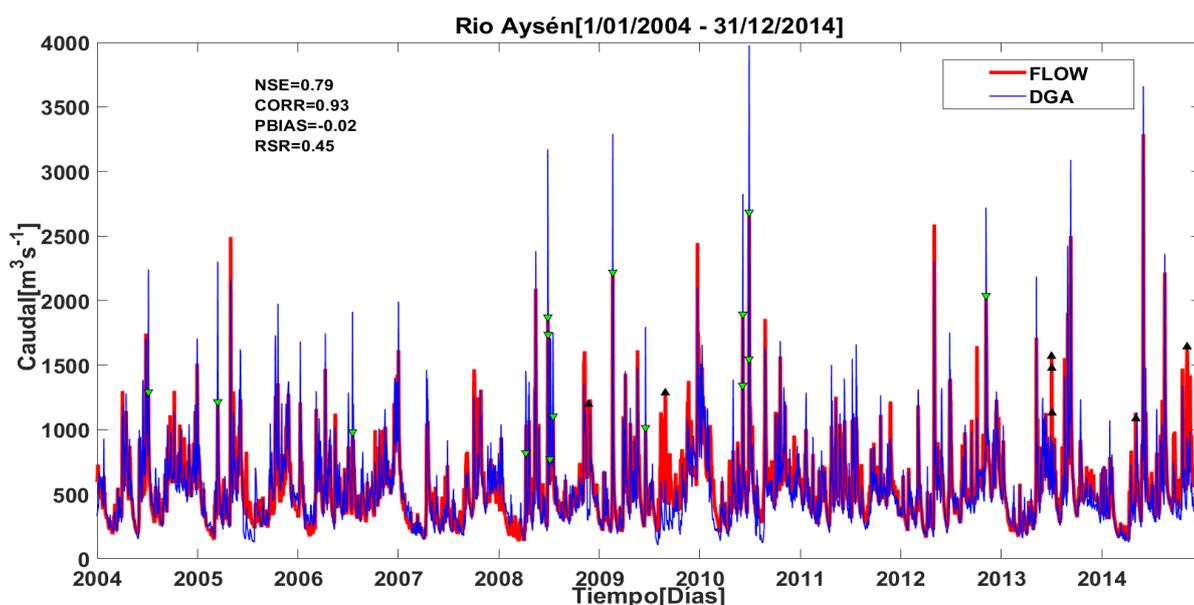


Figura 3.3.1: La serie temporal del Río Aysen abarca desde el 1 de enero del año 2004 hasta el 31 de diciembre del año 2014. Los triángulos de color negro indican las fechas donde hubo sobrestimaciones por parte del modelo, y los triángulos verdes indican puntos donde hubo subestimaciones por parte del modelo.

3.3.1. Diferencia FLOW vs DGA

El cálculo de las diferencias se realizó sustrayendo los datos observados a los datos simulados, por lo tanto, los valores positivos representan puntos donde el modelo obtuvo un mayor caudal, y los valores negativos representan puntos donde el modelo obtuvo un menor caudal. El cálculo de la diferencia para el

río Aysén se muestra en la **Figura 3.3.2**, donde en el panel superior izquierdo se muestra la serie temporal de las diferencias, junto con la primera y segunda desviación estándar (línea roja y azul), en el panel superior derecho se muestra la distribución de las diferencias dentro del rango de la primera desviación estándar, que es donde se concentra el 98.7% de los datos, y en el panel inferior se muestra las fechas en las cuales se encontraron diferencias mayores a 2 desviaciones estándar junto con la serie temporal mensual del índice MEI del ENSO.

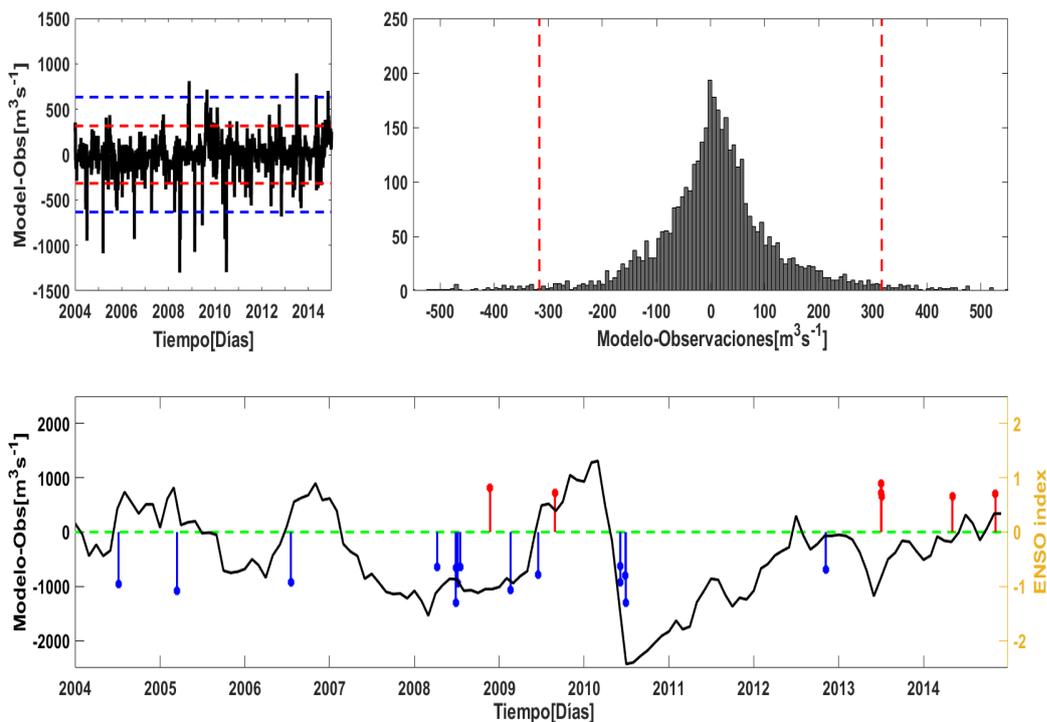


Figura 3.3.2: Diferencias entre la serie simulada y observada para el río Aysen. La figura superior izquierda muestra la resta entre la serie temporal simulada y observada para los 10 años elegidos en el río Aysen. La línea roja entrecortada, marca la posición de la primera desviación estándar de la serie de datos observados, y la línea entrecortada azul, marca la segunda desviación estándar. La figura superior derecha muestra la distribución de los restos, dentro del intervalo de la primera desviación estándar. La figura en el panel inferior muestra las fechas donde se obtuvieron diferencias sobre y bajo 2 desviaciones estándar, y estas son comparadas con el índice MEI del ENOS.

Las siguientes tablas muestran los caudales en las fechas para las cuales la diferencia entre el caudal de FLOW y el caudal observado es mayor o menor a más menos dos desviaciones estándar.

Fecha	DGA	FLOW	Diferencia	Índice MEI
22-11-2008	387	1197.3	810.32	Negativo
28-08-2009	569	1285.3	716.26	Positivo
02-07-2013	849	1568.7	719.7	Negativo
03-07-2013	581	1476	894.95	Negativo
04-07-2013	466	1129.7	663.65	Negativo
05-05-2014	430	1085.5	655.54	Negativo
07-11-2014	939	1642.3	703.26	Positivo

Cuadro 3.3.1: Fechas en las cuales FLOW sobrestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Aysen

Fecha	Valor Observado	Valor Simulado	Diferencia	Índice MEI
06-07-2004	2241	1291.8	-949.2	Negativo
15-03-2005	2302	1215.1	-1086.9	Positivo
18-07-2006	1913	982.2	-930.8	Positivo
08-04-2008	1455	820	-635	Negativo
27-06-2008	3172	1871.9	-1300.1	Negativo
28-06-2008	2388	1736.9	-651.1	Negativo
05-07-2008	1711	770.7	-940.3	Negativo
16-07-2008	1751	1104.1	-646.9	Negativo
18-02-2009	3291	2219.3	-1071.7	Negativo
17-06-2009	1796	1015	-781	Positivo
05-06-2010	1977	1342.3	-634.7	Negativo
06-06-2010	2825	1893.9	-931.1	Negativo
28-06-2010	2348	1546.7	-801.3	Negativo
29-06-2010	3978	2683.3	-1294.7	Negativo
06-11-2012	2721	2038.5	-682.5	Neutro

Cuadro 3.3.2: Fechas en las cuales FLOW subestimo el caudal registrado en las estaciones de la DGA. Río Aysen

3.3.2. Distribución de los datos

Para obtener otro punto de vista del comportamiento de las series, se compara la distribución de sus datos, lo cual se muestra en la **Figura 3.3.3**. La figura del panel izquierdo muestra la manera en que se distribuyen los datos de ambas series, en esta figura, si los datos están más cercanos a la línea roja entrecortada, significa que los datos provienen de una misma distribución. También en la misma figura se muestra un gráfico de dispersión de ambas series temporales, donde se

observa una correlación del 0.93 %.

En el caso de la figura del panel izquierdo para el río Aysen se observa un 94 % de los datos que comparten una misma distribución, mientras que un 6 % de los datos se escapan de este supuesto, mostrando valores simulados que alcanzan valores menores a los observados.

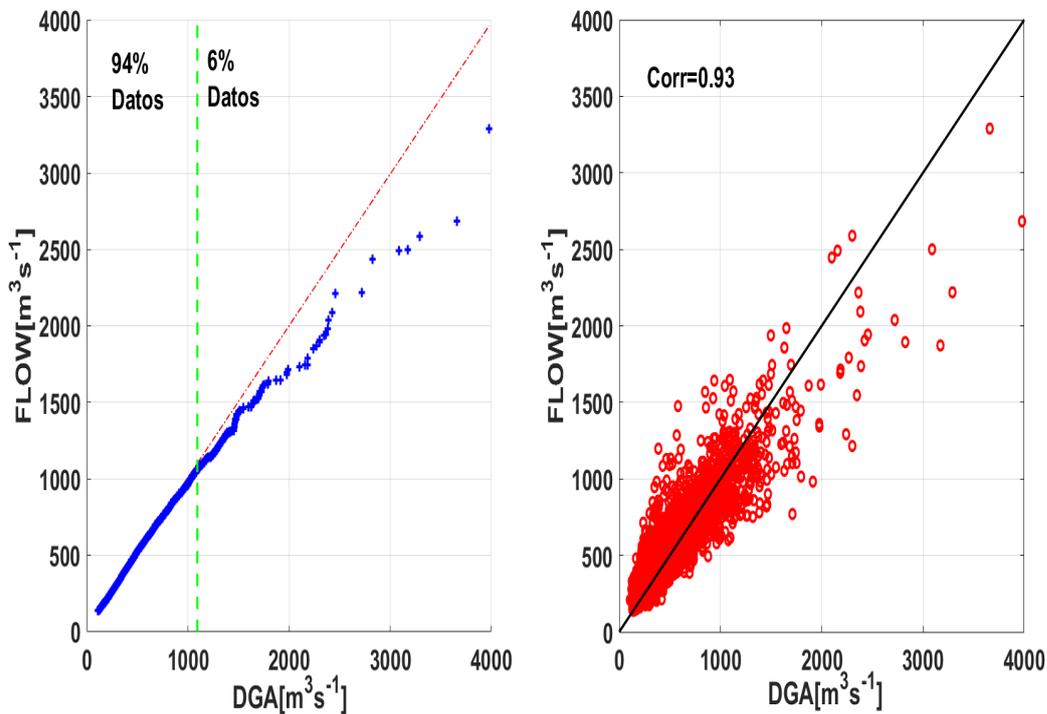


Figura 3.3.3: Distribución de los datos de la serie del río Aysén. El gráfico de la izquierda muestra la comparación entre la distribución de los datos de ambas series temporales, la línea verde entrecortada señala el punto hasta donde los datos comparten la misma distribución. El gráfico de la derecha corresponde a un scatter plot entre ambas series temporales, y la línea negra se graficó considerando los valores punto a punto de ambas series.

3.3.3. Wavelets

El análisis de frecuencias para el río Aysen se muestra en la figura 3.3.4. Los modos dominantes se observan desde el año 2005 hasta el 2010, para frecuencias entre 128 y 256 días, desde el 2004 hasta el 2006 para frecuencias entre 60 y 120 días y entre los años 2012 y 2014 se observa una alta coherencia para frecuencias entre 30 y 400 días.

El gráfico de la coherencia promedio muestra que para el río Aysen, las frecuencias entre 128 y 256 días, son las que alcanzan los mayores valores de coherencia.

Para realizar el análisis de coherencia de ambas series temporales, se les sustrajo el valor diario del ciclo anual a cada serie temporal, para poder estudiar las anomalías.

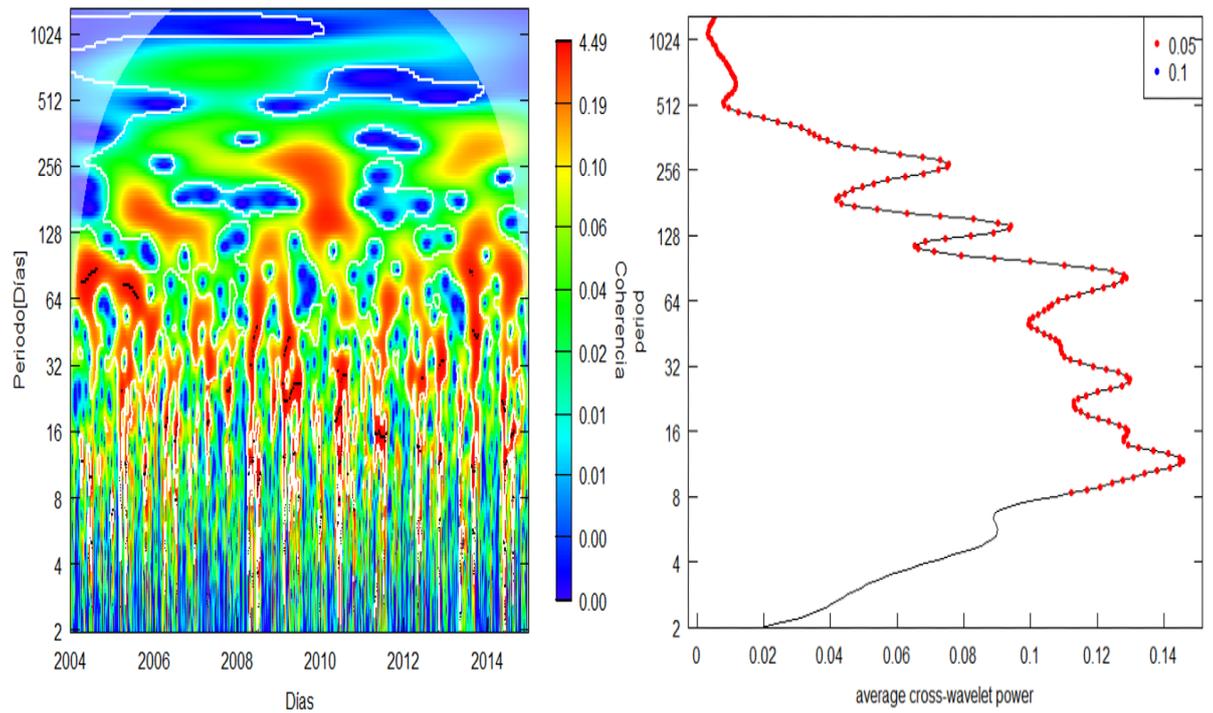


Figura 3.3.4: Coherencia entre la serie observada y FLOW. El gráfico de la izquierda muestra el campo de coherencia entre ambas series temporales para los años de validación a distintos periodos (en días), y el gráfico de la derecha muestra la coherencia promedio registrada para cada periodo.

3.3.4. Ciclo Anual

El ciclo anual de los datos de FLOW y de la DGA del río Aysen se muestran con datos diarios, datos con promedio mensual y la diferencia entre los datos DGA y los datos de FLOW.

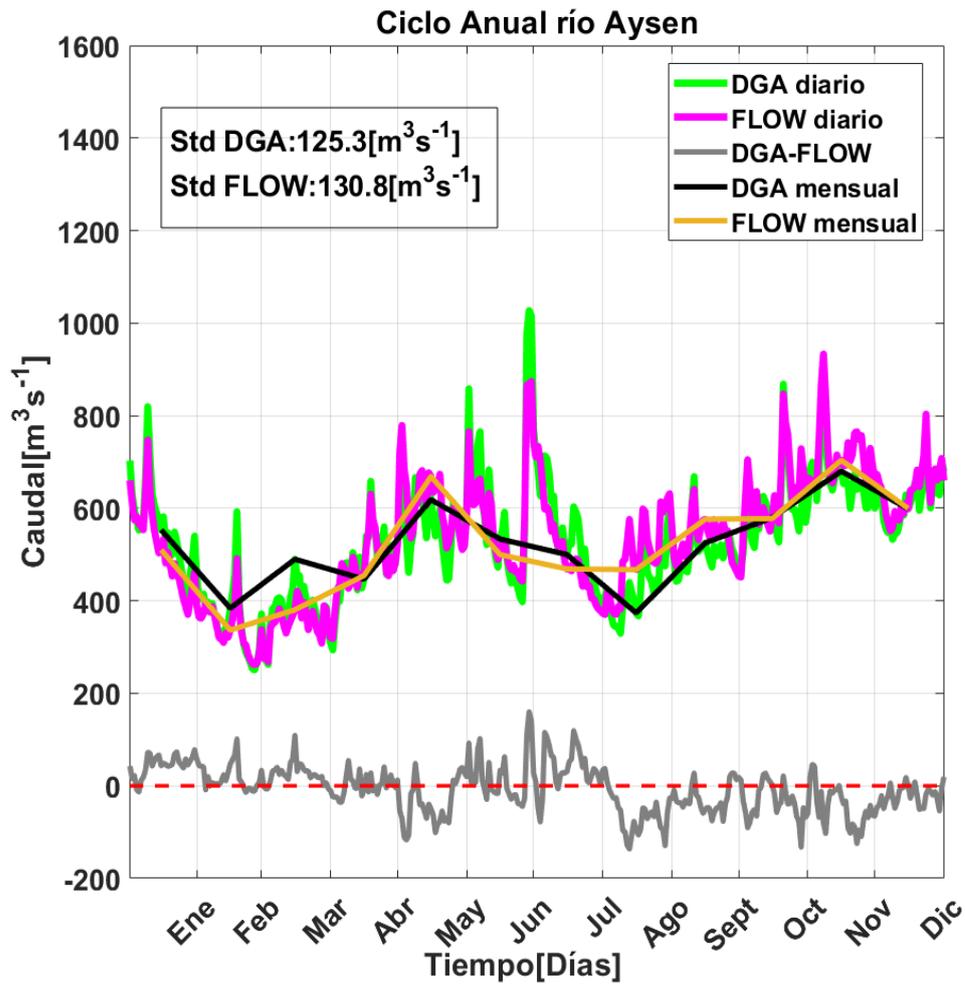


Figura 3.3.5: Ciclo Anual río Aysen. La línea verde representa los datos diarios de la DGA, la línea negra representa el ciclo anual con promedio mensual, la línea púrpura representa los datos diarios de FLOW, la línea naranja representa los datos con promedio mensual de FLOW y la línea gris (parte inferior del gráfico) representa la diferencia entre los datos de la DGA y los datos FLOW. Además, se incluye la STD del ciclo anual diario para ambas series temporales.

3.3.5. Integración de agua simulada y observada.

A continuación se muestra la integración (suma) del agua que se registró en FLOW y la que fue registrada en las estaciones de la DGA. La integración se realizó tanto de manera mensual, estacional y total. El objetivo de esto es ver como varía el desempeño de FLOW en escala mensual, estacional y en de manera general.

Al integrar el caudal total registrado por FLOW y por las estaciones DGA en el río Aysén, nos da como resultado un caudal total de $3.769.690[m^3 * s^{-1}]$ para FLOW y $3.782.400[m^3 * s^{-1}]$ para los datos DGA, lo cual corresponde a una subestimación de caudal, con una diferencia del 0.3 % con respecto a los datos DGA.

3.3.5.1. Integración mensual y estacional de agua

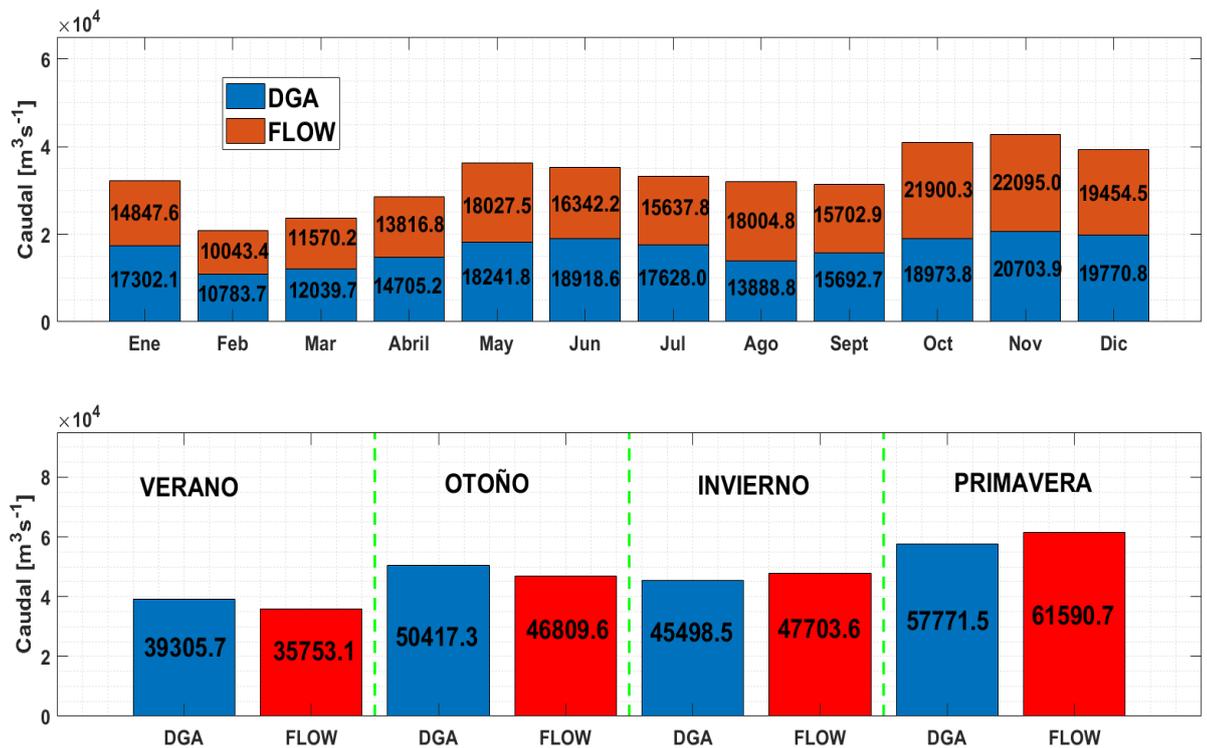


Figura 3.3.6: Integración del agua registrada en las estaciones de la DGA y la registrada por FLOW. El panel superior muestra la integración de la cantidad de agua por meses, y el panel inferior muestra lo mismo, pero para las estaciones del año.

Las siguientes tablas resumen lo expuesto en el gráfico anterior, mostrando el comportamiento de FLOW por mes y por estaciones.

Mes		Diferencia % (DGA vs FLOW)
Enero	Subestimación	14.1
Febrero	Subestimación	6.8
Marzo	Subestimación	3.8
Abril	Subestimación	6
Mayo	Subestimación	1.1
Junio	Subestimación	13.6
Julio	Subestimación	11.2
Agosto	Sobreestimación	29.6
Septiembre	Sobreestimación	0.06
Octubre	Sobreestimación	15
Noviembre	Sobreestimación	6.7
Diciembre	Subestimación	1.6

Cuadro 3.3.3: Desempeño de FLOW en cada mes del año para el río Aysen. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada mes para las estaciones DGA.

Estación		Diferencia % (DGA vs FLOW)
Verano	Subestimación	9
Otoño	Subestimación	7.1
Invierno	Sobreestimación	4.8
Primavera	Sobreestimación	6.6

Cuadro 3.3.4: Desempeño de FLOW en cada estación del año para el río Aysen. La diferencia porcentual es calculada comparando con el caudal integrado de cada estación para las estaciones DGA.

3.4. Indices Climaticos (Desempeño del Modelo)

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los índices hidrológicos calculados en los tres ríos, así como la diferencia entre la mediana y la media de los valores de FLOW y los valores observados (**Tabla 3.4.1**). Además se agrega la distribución de los valores de los índices a lo largo de la serie temporal, para los tres ríos estudiados (**Figura 3.4.1**).

Río	NSE	Corr	Pbias	Rsr	Diff Mean[m ³ s ⁻¹]	Diff Median[m ³ s ⁻¹]
Aysén	0.79	0.93	-0.02	0.45	6.07	18.24
Puelo	0.85	0.93	0.0025	0.38	1.58	36.22
Palena	0.8	0.88	0.0124	0.42	-3.09	41.72

Cuadro 3.4.1: Índices hidrológicos calculados en cada río

La **figura 3.4.1** muestra la distribución temporal de los índices climáticos en forma de boxplot.

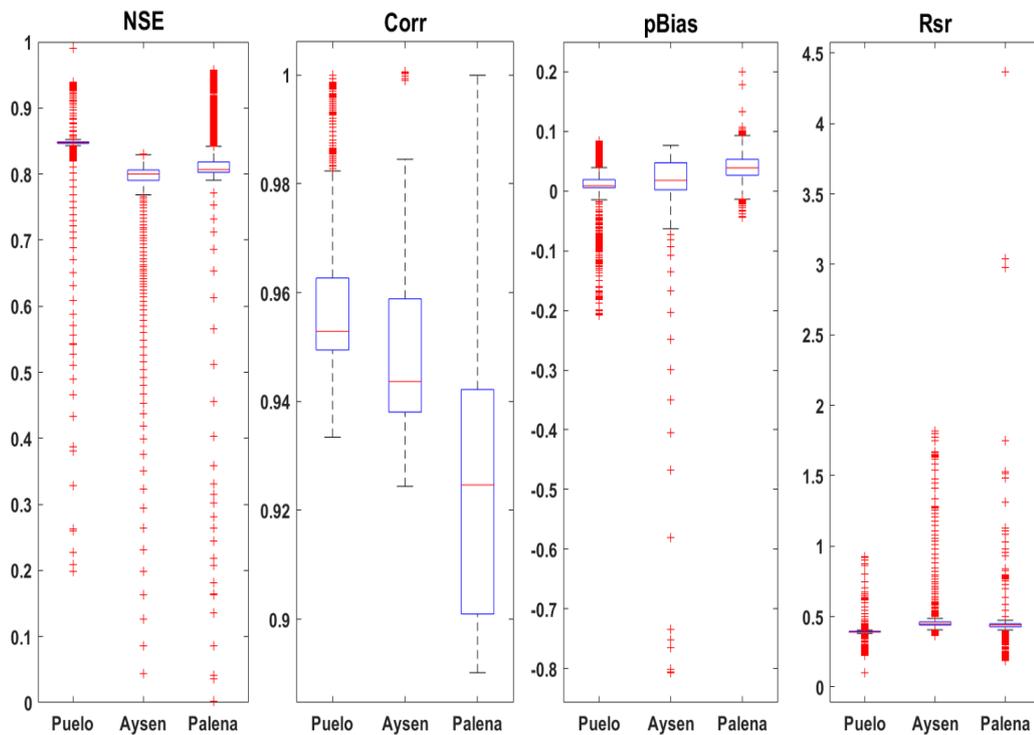


Figura 3.4.1: Distribución temporal de los índices climáticos, para cada río. Los puntos rojos fuera del boxplot corresponden a valores outlier

Capítulo 4

Análisis

En los gráficos de distribución de los datos observamos que las series comparten un mínimo del 85% de la distribución (en el caso del río Puelo) y un máximo del 94% de distribución (río Aysen). Los datos para los cuales la serie de FLOW y DGA no comparten la misma distribución, corresponden a fechas en las cuales FLOW subestima el caudal registrado en las estaciones de la DGA.

La distribución de las diferencias se centra dentro de la primera desviación estándar para cada río estudiado. Esto nos dice que el comportamiento de FLOW es similar a los datos de la DGA, y esta idea se respalda al mirar los índices hidrológicos calculados, los cuales alcanzaron los valores más altos mencionados dentro de la literatura (**Ver tabla 3.4.1**).

Por tanto, ya sabemos que FLOW tiene un buen rendimiento para simular los caudales, pero encontramos ciertas fechas para las cuales FLOW subestima los caudales estudiados, y otras (aunque en menor cantidad) para las cuales FLOW sobreestima el caudal observado.

Si realizamos la integración del agua simulada y el agua observada en intervalos mensuales y estacionales, observamos que tanto en el río Puelo como en el río Palena, la mayor subestimación se da para el mes de marzo y la mayor sobreestimación se da para el mes de septiembre. En el caso del río Aysen, la mayor subestimación se da en el mes de enero y la mayor sobreestimación se da en el mes de agosto. Estacionalmente, los tres ríos presentan una sobreestimación

en la estación de primavera, y en este caso, tanto el río Palena como el río Aysen presentan la mayor subestimación en el mes de verano, y el río Puelo presenta la mayor subestimación en la estación de Otoño.

Al sumar la cantidad total de agua registrada en cada río tanto para los datos FLOW como los DGA, se observa que la diferencia entre ambas series es menor al 2% en cada río, con una tendencia a la subestimación del caudal total. Cabe mencionar que para realizar la suma fue necesario no considerar las fechas para las cuales no se registro caudal en las estaciones DGA, ya que si no se hacía esto, el caudal simulado sobrestimaba el caudal registrado en la estación.

El estudio con wavelets muestra que los fenómenos de un periodo alto (Baja frecuencia) tienen una mayor coherencia que los eventos de alta frecuencia, y además la coherencia promedio muestra que los valores de coherencia son significativos a partir de la escala semanal (8).

El estudio de los wavelets muestra que los eventos de alto periodo (baja frecuencia) alcanzan la menor coherencia, y los eventos que van desde la escala semanal a la escala anual son los que alcanzan la mayor coherencia. También, se observa que los eventos con un periodo menor a la escala semanal tienen baja coherencia y además no son significativos. Esto puede indicar que FLOW tiene una buena capacidad para representar eventos de escala semanal-anual, pero pierde capacidad en escala mayor a la anual y en escalas de tiempo menor a la semana.

La distribución de los índices hidrológicos a lo largo de las series temporales de los ríos estudiados presentan valores dentro del rango aceptado en la literatura (cuando no consideramos los valores atípicos), y al comparar los 3 ríos, es el río Puelo el que presenta los mejores resultados (Figura 3.4.1). Esto puede ser debido a que en este río los datos faltantes en la estación fluviométrica de la DGA, fueron rellenados con datos de una estación cercana (Ver tabla 2.2.1) y, por tanto, hay una mayor cantidad de datos disponibles al momento de calcular los índices hidrológicos además en el río Puelo se utilizaron 2 años más para realizar la validación, y puede que esto esté afectando en los resultados de los índices. Luego del río Puelo el mejor desempeño fue alcanzado por el río Palena, presentando valores de NSE, sesgo porcentual y de error cuadrático medio, mas aceptables que el río Aysen, pero no tan buenos como el río Puelo, aunque el río Palena es el

que presenta la menor correlación de los tres ríos. Esto puede deberse a que las series temporales del río Puelo y el río Aysen, fueron construidas utilizando una estación principal, y otra estación cercana para rellenar los datos faltantes, y en el río Palena se ignora las fechas en las cuales no había registro de caudal.

El sesgo negativo que se observa en la figura, se puede interpretar como fechas en las cuales FLOW subestimó los datos observados (22), y es por esto que en la figura se presentan valores atípicos con sesgo negativo.

En cuanto al error cuadrático medio estandarizado de las series temporales, el río Palena es el que presenta los valores atípicos con más desviación, seguido por el río Aysén, y el río Puelo es el que presenta los mejores resultados, y tal como se mencionó anteriormente, este comportamiento puede ser debido a la manera en que se construyó la serie de datos observados, ya que el río Aysen y Puelo fueron construidos mediante 2 estaciones DGA y el río Palena solo se construyó con una y además se ignoraron las fechas en las cuales no había datos observados, para poder realizar los cálculos.

Capítulo 5

Discusión

Los resultados obtenidos nos exhiben un comportamiento que parece repetirse en las tres cuencas estudiadas, donde FLOW subestima las grandes crecidas de caudal, y sobrestima los caudales de primavera. También al separar las series temporales observadas y simuladas vimos que las mayores coherencias se dan a escalas semanales y anuales, y la coherencia se pierde a escala diaria y escala anual. Es decir, FLOW no es capaz de reproducir eventos de escala muy corta y eventos de escala muy largas (al menos en la escala de 3 años que se utilizó en los wavelet). Esto podría explicar porque tenemos fechas en las cuales las estaciones de la DGA calcula un gran aumento en el caudal, y FLOW simula una cantidad mucho menor de agua para esa fecha, ya que son eventos de baja escala temporal.

El periodo de sobreestimación de las series de FLOW coincide con los periodos de derretimiento de glaciación. En los parámetros de FLOW no se consideran datos de aporte glaciación, por tanto, es necesario considerar algún parámetro extra para compensar el caudal en estos periodos.

Lo que más destaca de los resultados es el buen desempeño obtenido a través de los índices hidrológicos calculados. Todos los índices muestran la puntuación más alta descrita en la literatura para cada índice, y solo con estos parámetros podríamos tener una idea general del comportamiento de FLOW, el cual es muy bueno, pero estaríamos obviando los detalles que nos describen porque FLOW tiene ese comportamiento (7).

En el trabajo realizado por (7), en la cuenca del río Bío Bío, los valores de NSE calculados variaron de acuerdo a la resolución espacial utilizada en los datos de precipitación y temperatura que fueron generados utilizando WRF. En el caso de ellos los valores de NSE y correlación variaron entre sub cuencas y también variaban de acuerdo a la resolución espacial y temporal utilizada. Se encontró que la mayor eficiencia se encontró cuando la resolución espacial es mayor. En el caso de FLOW, los datos de precipitación y temperatura fueron regionalizados para alcanzar una mayor resolución espacial, además FLOW posee una resolución temporal diaria que es generada promediando valores horarios de caudal. El hecho que FLOW posea altos valores de eficiencia (NSE) y de correlación, puede deberse a que los datos de entrada de VIC tienen una alta resolución.

Para futuros estudios se recomienda considerar una mayor cantidad de cuencas y ahondar más dentro de las características más específicas de cada cuenca y comparar esto con los parámetros utilizados para construir FLOW, ya que yo creo que los parámetros utilizados son muy generales y no son capaces abarcar las características más específicas de cada cuenca (como la cantidad de dosel vegetal) y quizás se puede encontrar un mejor parámetro para mejorar representar las cuencas y obtener así un mejor desempeño.

Capítulo 6

Conclusión

Tras realizar la validación de FLOW, se concluye que VIC tuvo la capacidad de representar de manera adecuada los ríos estudiados, alcanzando valores óptimos en los estudios realizados, dichos valores variaron de acuerdo a la cuenca que se estudió, la cantidad de datos utilizados, y la forma en la que se obtuvieron los datos observados, ya que las series de datos observados que se construyeron utilizando dos estaciones, presentaron un comportamiento diferente a la serie que se construyó solo con una estación. Esto nos indica que al momento de realizar la validación es necesario conocer los datos con los cuales estamos comparando la salida del modelo.

Desempeño de Flow

Cantidad de agua simulada

La cantidad de agua simulada varía mensualmente y estacionalmente para cada río. En el caso del río Puelo y el río Palena la mayor subestimación se da en el mes de marzo y la mayor sobreestimación del caudal se da para el mes de septiembre. No así para el río Aysen, donde la mayor subestimación se da para el mes de enero y la mayor sobreestimación se da para el mes de agosto.

Estacionalmente, los tres ríos tienen su mayor sobreestimación en la estación de primavera, y la mayor subestimación en el caso de los ríos Palena y Aysen se alcanza en el verano, mientras que en el río Puelo se alcanza en otoño.

Este comportamiento puede deberse a las diferencias en la ubicación y

características físicas de las cuencas de cada río, y la forma en que se genera la escorrentía en cada río, puede ser que los parámetros con los que se configuró FLOW (DEM, Vegetación, Temperatura, Precipitación) no alcanzan para representar de una manera más realista cada cuenca de estudio, no alcanzando a representar ciertos eventos que provocan variabilidad en el caudal del río, como puede ser un desprendimiento glaciar o cambios dentro del terreno de la cuenca.

Otro factor que puede estar afectando la validación, son las estaciones de la DGA con las cuales se está trabajando, ya que pueden presentarse errores al momento de calcular grandes crecidas de caudal o disminución de este.

Distribución de los datos.

La comparación entre los datos de FLOW y los de la DGA muestra que los cuantiles bajos de caudal (los cuales varían en cada río), son bien representados. Mientras que los cuantiles altos tienden a ser subestimados por FLOW. Aunque hay que mencionar que estos valores de subestimación alcanzan un máximo del 15 % en el río Puelo y un mínimo del 6 % en el río Aysen.

Wavelets

Las series estudiadas mostraron las mayores coherencias para eventos de periodos mayores a una semana y no superiores a un año. Los eventos menores a una semana y mayores a un año, muestran coherencias no significantes. Este comportamiento se repite en las 3 series temporales estudiadas.

Comentarios finales

Flow tiene un buen desempeño al compararlo con las series de tiempo de valores observados, y los resultados del estudio muestran que las diferencias con los datos observados se presentan para eventos de crecidas de caudal. Los valores de eficiencia alcanzados nos dice que FLOW es un buen representante de las cuencas estudiadas, y, por tanto, es apto para ser utilizado.

Las diferencias en las grandes crecidas de caudal presentes en el modelo, se podrían explicar con errores en las estaciones de medición, como también por eventos que VIC no es capaz de representar, como es el caso de los desprendimientos glaciares.

Para un estudio futuro, se recomienda utilizar una mayor variedad de cuencas,

para ver si el comportamiento de FLOW es el mismo, y a la vez se recomienda realizar un estudio más exhaustivo de la geografía de cada cuenca, para tener una mejor idea de como las características particulares de cada cuenca puede afectar al momento de realizar la modelación con VIC, además en una nueva versión de FLOW sería necesario incorporar algún parámetro que permita agregar el aporte glaciar extra que se produce en las estaciones de deshielo.

Bibliografía

- [1] Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P., and Casassa, G. (1996). The use of satellite and airborne imagery to inventory outlet glaciers of the southern patagonia icefield, south america. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*.
- [2] Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, M., Fuentes, M., Kållberg, P., Kobayashi, S., Uppala, S., and Simmons, A. (2011). The era-interim archive version 2.0.
- [3] Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., and Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile.
- [4] Bozkurt, D., Rojas, M., Valdivieso, J., and Falvey, M. (2015). Climate change impact on hydroclimate regimes and extremes over andean basins in the central-southern chile.
- [5] Flores, R. P., Lara, C., Saldías, G. S., Vásquez, S. I., and Roco, A. (2022). Spatio-temporal variability of turbid freshwater plumes in the inner sea of chiloé, northern patagonia. *Journal of Marine Systems*.
- [6] Fuenzalida, H. (1965). Biogeografía. en: Geografía económica de chile. texto refundido.corporación de fomento de la producción,santiago. *biblioteca nacional digital*.
- [7] Fustos, I., del Río, R. A., Artal, O., Alvial, F., and Sepúlveda, H. (2022). Impact on discharge modelling using different spatial and temporal resolution scenarios in south of chile. *Journal of South American Earth Sciences*.
- [8] Grinsted, A., Moore, J. C., and Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*.
- [9] Hamman, J. J., Nijssen, B., Bohn, T. J., Gergel, D. R., and Mao, Y. (2018). The variable infiltration capacity model version 5 (vic-5): infrastructure improvements for new applications and reproducibility. *Geoscientific Model Development*.
- [10] Hernández-Lalinde, J., Espinosa-Castro, J.-F., Peñaloza Tarazona, M., Rodríguez, J., Chacón, J., Carrillo Sierra, S., Pirela, V., and Toloza, C.

- (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*.
- [Khamis et al.] Khamis, K., Sorensen, J. P. R., Bradley, C., Hannah, D. M., Lapworth, D. J., and Stevens, R. In situ tryptophan-like fluorometers: assessing turbidity and temperature effects for freshwater applications. *Environ. Sci.: Processes Impacts*.
- [12] Krause, P., Boyle, D., and Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrologic models. *Advances in Geosciences*, 5.
- [13] Köppen, W. (1918). Klassifikation der klimate nach temperatur, niederschlag und jahresablauf. *Band 2 Allgemeine Klimageographie*.
- [14] Lara, A., Villalba, R., and Urrutia, R. (2008). A 400-year tree-ring record of the puelo river summer–fall streamflow in the valdivian rainforest eco-region, chile. *Climatic Change*.
- [15] Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.
- [16] Lu, G.-H., Xiao, H., Wu, Z., Zhang, S.-L., and Li, Y. (2012). Assessing the impacts of future climate change on hydrology in huang-huai-hai region in china using the precis and vic models. *Journal of Hydrologic Engineering*.
- [17] Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., and Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*.
- [18] Nash, J. and Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part i — a discussion of principles. *Journal of Hydrology*.
- [19] Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., and Williams, J. (2005). Soil and water assessment tool. *Theoretical Documentation Version*.
- [20] Niel, H., Paturel, J.-E., and Servat, E. (2003). Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. *Journal of Hydrology*.
- [21] Pérez, T., Mattar, C., and Fuster, R. (2018). Decrease in snow cover over the aysén river catchment in patagonia, chile. *Water*.
- [22] Simonoff, J. S. (1993). The relative importance of bias and variability in the estimation of the variance of a statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*.
- [23] Sridhar, V., Ali, S., and Lakshmi, V. (2019). Assessment and validation of total water storage in the chesapeake bay watershed using grace. *Journal of Hydrology: Regional Studies*.

-
- [24] Tarboton, D. (2001). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*.
- [25] Vera Arévalo, H. and Felipe-Obando, O. (2011). Modelización de los caudales medios mensuales en la cuenca del río ramis. *SENAMHI-Institucional*.
- [26] Wolter, K. (1987). The southern oscillation in surface circulation and climate over the tropical atlantic, eastern pacific, and indian oceans as captured by cluster analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
- [27] Yang, L., Meng, X., and Zhang, X. (2011). Srtm dem and its application advances. *International Journal of Remote Sensing*.
- [28] Yarrow, M. and Chambel-Leitão, P. (2007). Simulating nothfagus forests in the chilean patagonia: A tes t and analysis of tree growth and nutrient cycling in swat.
- [29] Zamora, M. E. C. and Santana, A. A. (1979). Características climaticas de la costa occidental de la patagonia entre las latitudes 46 40' y 56 30' s. *Anales Del Instituto De La Patagonia*.