

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA HIDRAULICA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE  
FRECUENCIA NO ESTACIONARIO EN CUENCAS CHILENAS**

**LUCAS OLIVARES<sup>1</sup>  
ÁLVARO OSSANDÓN<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

Las proyecciones de eventos hidrológicos extremos en Chile y el mundo indica que estos aumentaran su frecuencia y magnitud en los próximos años. En este contexto, el supuesto de estacionariedad, comúnmente utilizado en el diseño de obras hidráulicas, pierde validez. Por esta razón, se han desarrollado métodos que permiten incluir la no estacionariedad en el análisis de frecuencia. Este trabajo aplica tres de estos métodos a 11 cuencas chilenas, delimitadas a partir de estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA), ubicadas entre la región de Coquimbo y La Araucanía, con el objetivo de evaluar su desempeño y comparar sus resultados. Se utilizaron diversas covariables basadas en datos climatológicos locales e índices climáticos de gran escala para modelar, como funciones lineales, los parámetros de localización y escala de diversas distribuciones de probabilidad. Los mejores ajustes de cada método se compararon con el caso estacionario empleando el gráfico de Nivel de Vida de Diseño (DLL, Design Life Level). Los resultados muestran que, en la mayoría de los casos, los ajustes no estacionarios estiman caudales mayores que los obtenidos en el caso estacionario.

---

<sup>1</sup>Alumno, Depto. de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María – [lucas.olivares@sansano.usm.cl](mailto:lucas.olivares@sansano.usm.cl)

<sup>2</sup>Profesor Asistente, Depto. de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María – [alvaro.ossandon@usm.cl](mailto:alvaro.ossandon@usm.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde 1950 se han observado cambios en diversos eventos climáticos extremos, algunos de estos cambios han sido asociados al desarrollo humano. Entre ellos se incluyen descensos en las temperaturas mínimas, incrementos en las temperaturas máximas, aumentos en el nivel y temperatura del mar, y mayores precipitaciones máximas diarias (IPCC, 2014; AghaKouchak et al., 2013). A nivel hidrológico y global, diversos estudios indican aumentos en tormentas de corta duración, con el potencial de aumentar la magnitud y frecuencia de “crecidas repentinas” (flash floods) (Westra et al., 2014). En el mismo sentido, el incremento proyectado de la ocurrencia de olas de calor en regiones como Europa, Asia y Australia (IPCC, 2014) conlleva un mayor riesgo de eventos de precipitación extrema, ya que, por cada grado Celsius que aumenta la temperatura del aire, su capacidad de retener humedad aumenta en un 7% (Trenberth, 2011). Así, tormentas, alimentadas por una mayor humedad, pueden generar impactos aún más devastadores.

En el contexto local, Chile, no está exento de estas condiciones cambiantes. Los efectos de la denominada “megasequía”, que afectó al centro y norte del país durante la última década, aún persisten. Esta ha sido catalogada como la peor sequía de la que se tenga registro, y no se vislumbra una pronta recuperación del régimen de precipitaciones en la zona central (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia CR2, 2015). Sin embargo, la sequía no es el único fenómeno relevante, ya que, aunque se proyecta una disminución general en las precipitaciones, se espera que los eventos que ocurran sean de mayor intensidad. Por ejemplo, el estudio de Pinto (2022) proyecta aumentos de hasta un 20% en la precipitación máxima diaria anual hacia finales del siglo, incrementos de hasta un 191 % en los caudales medios diarios máximos durante la época de lluvias, y reducciones de hasta un 66 % en el periodo de deshielo, debido a una menor acumulación nival como consecuencia de un aumento de temperatura de hasta 3°C.

Diversos estudios han reportado teleconexiones entre variables hidrológicas con eventos climáticos naturales como el fenómeno de El Niño. Quintana & Aceituno (2006) reportaron que hay una clara variabilidad decadal en el régimen de precipitación del Chile central, asociada a cambios en la intensidad del anticiclón del Pacífico Suroriental (SPSA, por sus siglas en inglés), cuya fase seca coincidió con el periodo 2010–2015. En el sur del país, se ha detectado una correlación negativa significativa entre la oscilación Antártica (AAO por sus siglas en inglés) y los eventos extremos de precipitación estacional, y una correlación positiva con la temperatura superficial del mar en el pacífico ecuatorial central (SST en inglés) (González-Reyes et al., 2021).

Estas nuevas condiciones, donde las zonas secas se vuelven más áridas y las zonas húmedas más propensas a inundaciones, obligan a la comunidad ingenieril a reevaluar uno de los supuestos más importantes en el diseño de obras hidráulicas: la estacionariedad. Si el consenso científico indica que el clima será cada vez más extremo, surge entonces la necesidad de incorporar el cambio climático en dichos diseños. En respuesta a esta necesidad, se han desarrollado diversas técnicas que permiten incluir la no estacionariedad en los análisis de frecuencia. Entre estas destacan los métodos de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood; Strupczewski et al., 2001), GAMLSS (Rigby & Stasinopoulos, 2005) y el enfoque en dos etapas (Two-Stage; Strupczewski et al., 2016), los cuales permiten incorporar la variabilidad climática en la estimación de valores de diseño. Investigaciones recientes, como las de Carreño (2021) y Staplefield (2023), han evaluado la aplicabilidad de algunos de estos métodos como herramientas para la verificación del diseño de obras hidráulicas, destacando su flexibilidad para integrar múltiples variables explicativas.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo comparar el desempeño de los tres métodos mencionados, aplicando análisis de frecuencia no estacionario en diversas cuencas de Chile. Para ello, se utilizarán variables hidrometeorológicas e índices climatológicos de gran escala, con el fin de comprender mejor las fortalezas y limitaciones de cada método, y cómo se comparan sus resultados con los de un enfoque estacionario tradicional. Los resultados obtenidos permitirán avanzar hacia criterios de diseño más robustos y realistas, que respondan mejor a las condiciones cambiantes del clima y a las exigencias de seguridad y sostenibilidad en la infraestructura hidráulica.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. ZONA DE ESTUDIO Y RECOPIACIÓN DE DATOS

Para comparar los métodos no estacionarios, es ideal aplicarlos en cuencas con diferentes regímenes hidrológicos, de modo que sea posible identificar eventuales sesgos o relaciones entre el tipo de cuenca analizada y el desempeño del método utilizado. Para la selección de cuencas, se revisaron las estaciones fluviométricas de la DGA, seleccionando aquellas con al menos 35 años de datos y una completitud mínima del 95%. Se seleccionan 11 cuencas que cumplen con estos criterios, distribuidas entre las regiones de Coquimbo La Araucanía, lo que permite abarcar distintos regímenes hidrológicos. La Figura 1 muestra sus ubicaciones, características climáticas y regímenes hidrológicos y caudales medios de las cuencas seleccionadas, evidenciando un gradiente latitudinal en temperatura y precipitación, así como una distribución diversa de regímenes hidrológicos. Los datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas anuales fueron obtenidos de los productos grillados del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), que abarcan el periodo 1960-2021.

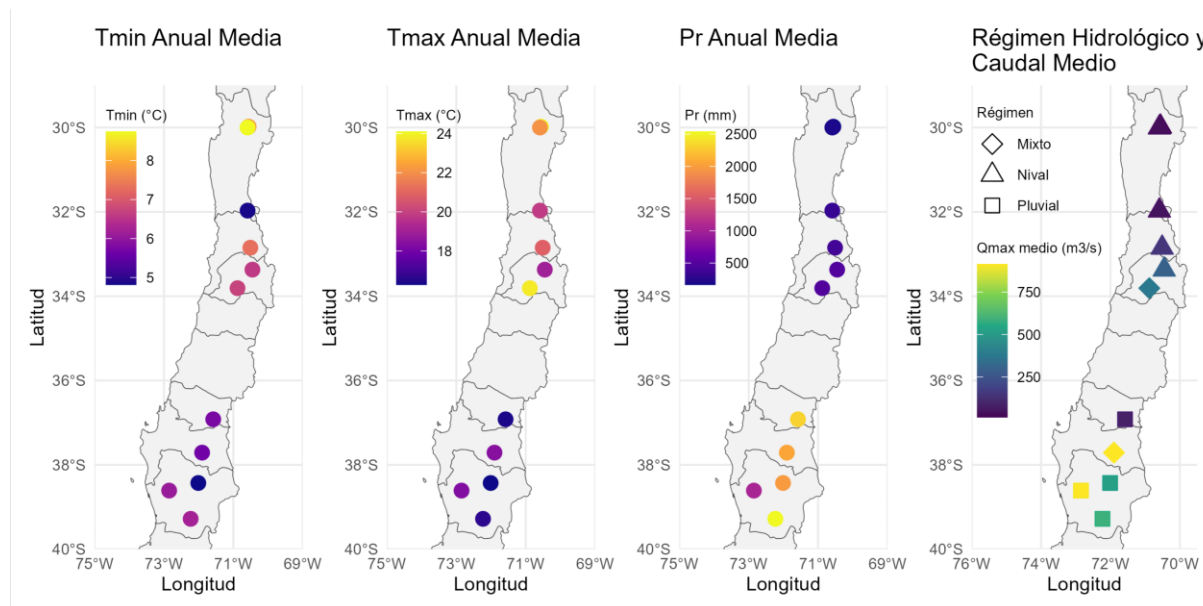


Figura 1: Ubicación de las cuencas y características climáticas e hidrológicas promedio (1960-2021).

### 2.2. VARIABLES PREDICTORAS

A partir de los datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas se calcularon 27 indicadores climáticos estandarizados propuestos por el *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI; World Research Programme [WCRP], sf). Estos indicadores fueron evaluados por su potencial como variables predictoras de crecidas de caudal. Los nombres, descripciones y unidades de cada indicador se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1. Índices ETCCDI.**

Indicador	Nombre	Descripción
PRCPTOT	Precipitación Total	Suma de precipitación sobre 1 mm
R1mm	Días con precipitación	Número de días con precipitación sobre 1 mm
R10mm	Días con precipitación sobre 10 mm	Número de días con precipitación sobre 10 mm
R20mm	Días con precipitación sobre 20 mm	Número de días con precipitación sobre 20 mm
Rx1day	Precipitación máxima en 1 día	Precipitación máxima en 24 horas
Rx5day	Precipitación máxima en 5 días	Suma máxima de precipitación en 5 días
CWD	Días húmedos consecutivos	Máximo de días consecutivos con lluvia sobre 1 mm
CDD	Días secos consecutivos	Máximo de días consecutivos con lluvia menor a 1mm
TXx	Día más caluroso	Valor máximo de la temperatura máxima diaria
TNx	Noche más calurosa	Valor máximo de la temperatura mínima diaria
TXn	Día más frío	Valor mínimo de la temperatura máxima diaria
TNn	Noche más fría	Valor mínimo de la temperatura mínima diaria
TN	Promedio de la temperatura mínima	Promedio anual de la temperatura mínima diaria
TX	Promedio de la temperatura máxima	Promedio anual de la temperatura máxima diaria
TR	Noches tropicales	Días con temperatura mínima mayor a 20°C
SU	Días de verano sobre 25°C	Días con temperatura máxima mayor a 25°C
TN10p	Noches frías	Porcentaje de tiempo cuando la temperatura mínima diaria está bajo el percentil 10
TX10p	Días fríos	Porcentaje de tiempo cuando la temperatura máxima diaria está bajo el percentil 10
TN90p	Noches cálidas	Porcentaje de tiempo cuando la temperatura mínima diaria esta sobre el percentil 90
TX90p	Días cálidos	Porcentaje de tiempo cuando la temperatura mínima diaria esta sobre el percentil 90

Además de los indicadores del ETCCDI, se utilizaron índices climáticos de gran escala cuyas variaciones han demostrado estar asociadas a fenómenos que afectan el clima en Chile (Hernandez et al., 2022; Quintana & Aceituno, 2006). En particular, se consideraron el ENSO, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y la Oscilación Antártica (AAO), cuyos valores mensuales fueron obtenidos desde de la página oficial de la National Oceanic and Atmospheric Administration. Para cada índice se calcularon los valores máximos, mínimos y medios en los periodos de verano, invierno y a escala anual. Adicionalmente, con el fin de capturar posibles efectos diferidos, se evaluó la correlación entre los caudales máximos de un año  $i$  y los valores de los índices correspondientes al año  $i - 1$ .

### 2.3. DETECCIÓN DE NO ESTACIONARIEDAD

Se realizó un análisis exploratorio de la serie de caudales máximos anuales, así como de sus medias y desviaciones estándar móviles, utilizando ventanas de 5 años para suavizar las fluctuaciones propias de las series de tiempo (Carreño, 2021). Mediante la prueba de Mann-Kendall y el estimador de Theil-Sen se identificaron posibles tendencias, evaluando su significancia estadística y el valor de la pendiente asociada. Además, se estima el punto de cambio utilizando la prueba de Pettitt.

### 2.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE FRECUENCIA NO ESTACIONARIO

#### 2.4.1. MÁXIMA VEROSIMILITUD (ML)

Este método consiste en maximizar la función de verosimilitud  $L(\theta)$ , definida como el producto de las densidades de probabilidad de una muestra de  $n$  observaciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , dada una distribución  $f(x|\theta)$  con parámetros  $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p\}$ , como se muestra en la ecuación (1):

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \quad (1)$$

Dado que trabajar con sumas es más conveniente que con productos, se utiliza comúnmente el logaritmo de la función de verosimilitud, obteniéndose la log-verosimilitud (Ecuación 2):

$$\ln(L(\theta)) = \sum_{i=1}^n \ln(f(x_i|\theta)) \quad (2)$$

La maximización se lleva a cabo derivando esta función con respecto a cada parámetro de  $\theta$  y resolviendo el sistema de ecuaciones que resulta de igualar las derivadas a cero. Esto permite obtener los estimadores óptimos de los parámetros.

#### 2.4.2. GAMLSS

Los modelos aditivos generalizados para ubicación, escala y forma (GAMLSS) son modelos de regresión semi-paramétricos que permiten modelar hasta cuatro parámetros de una distribución —ubicación ( $\mu$ ), escala ( $\sigma$ ) y parámetros de forma ( $\nu$ ,  $\tau$ )— como funciones de covariables (Rootzén & Katz, 2013). Estos modelos asumen que la variable aleatoria  $Y$  sigue una distribución  $D$  específica:

$$Y \sim D(\mu, \sigma, \nu, \tau) \quad (3)$$

Cada parámetro  $\theta_j \in \{\mu, \sigma, \nu, \tau\}$  puede expresarse mediante una función de enlace  $g_j(\theta_j)$ , compuesta por términos lineales y funciones de suavizado aplicadas a las covariables:

$$g_j(\theta_j) = \mathbf{X}^T \boldsymbol{\beta} + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_p(x_p) \quad (4)$$

donde  $\mathbf{X}^T \boldsymbol{\beta}$  representa la parte lineal del modelo y  $f_i(x_i)$  son funciones de suavizado que permiten modelar relaciones no lineales entre las covariables y los parámetros.

#### 2.4.3. TWO-STAGE

El método Two-Stage (Kochanek et al., 2013) es una adaptación del análisis de frecuencia utilizando L-Momentos (Hosking, 1990) que permite incorporar no estacionariedad. A diferencia del enfoque tradicional, este método conserva la información cronológica, fundamental en contextos no estacionarios, y se desarrolla en dos fases:

##### Fase 1 – Eliminación de tendencia:

Se asume que la media y la desviación estándar varían linealmente con el tiempo, es decir,  $\mu_t = at + b$  y  $\sigma_t = ct + d$ , cuyos parámetros se estiman mediante regresión ponderada, minimizando:

$$WLS = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} (X_i - \hat{\mu}(t_i))^2 \quad (5)$$

La serie original  $x_t$  se estandariza usando estas funciones para eliminar la tendencia, obteniendo la serie normalizada:

$$y_t = \frac{x_t - \mu_t}{\sigma_t} \quad (6)$$

##### Fase 2– Estimación y reimposición de tendencia:

Con la serie sin tendencia, se estiman los parámetros de una distribución de probabilidad. Luego, los cuantiles estandarizados se ajustan nuevamente incorporando la tendencia, generando así los cuantiles no estacionarios:

$$Q_x^M(F, t) = \mu_t + \sigma_t \cdot Q_y^M(F) \quad (7)$$

donde  $Q_y^M(F)$  es el cuantil (estacionario) para una probabilidad de no excedencia  $F$  para la distribución  $M$  y  $Q_x^M(F, t)$  es su versión ajustada al tiempo  $t$ .

### 2.5. SELECCIÓN DE PREDICTORES Y MEJOR AJUSTE

La correlación de Spearman se utilizó como criterio principal para seleccionar los predictores en los análisis no estacionarios, mediante un proceso estructurado en tres fases:

- 1) **Filtrado por correlación:** Se calcula la correlación de Spearman entre cada predictor potencial y el caudal máximo anual. solo se conservan aquellos con un valor absoluto de correlación igual o superior a 0.3 y un p-value menor o igual a 0.05.
- 2) **Reducción por subgrupos climáticos:** Para evitar la redundancia de índices relacionados con los mismos procesos climáticos, se selecciona solo un índice por subgrupo, conservando aquel con mayor correlación absoluta. Los subgrupos y sus respectivos índices se presentan en la Tabla 2.
- 3) **Evaluación de colinealidad:** Finalmente, se analiza la colinealidad entre los índices seleccionados. Si dos o más presentan una correlación superior al 90%, se retiene únicamente la variable con mayor correlación absoluta respecto al caudal.

**Tabla 2.** División de subgrupos.

Variables ETCCDI		Índices climáticos de gran escala	
Subgrupo	Variables	Subgrupo	Variables
Precipitación total	PRCPTOT	Anual	MaxAnual, MinAnual, MeanAnual
Intensidad de lluvia	Rx1day, Rx5day	Verano	MaxWinter, MinWinter, MeanWinter
Días con precipitación	R1mm, R10mm, R20mm	Invierno	MaxSummer, MinSummer, MeanSummer
Temperaturas mínimas	TNx, TNn, TN, TN10p, TN90p, TR		
Temperaturas máximas	TXx, TXn, TX, TX10p, TX90p, SU		
CWD	CWD		
CDD	CDD		

Dado que el uso de covariables genera múltiples combinaciones posibles de predictores en el caso de los métodos ML y GAMLSS, es necesario contar con un criterio objetivo para comparar los ajustes y seleccionar la mejor opción. Para ello, se utiliza el Criterio de Información de Akaike (AIC; Akaike, 1974), complementado con una inspección gráfica de los parámetros obtenidos.

## 2.6. NIVEL DE VIDA DE DISEÑO

Rootzén & Katz (2013) introdujeron el concepto de *Design Life Level* (DLL), que permite cuantificar el riesgo de diseño considerando la vida útil proyectada de una obra hidráulica. El enfoque consiste en calcular el riesgo acumulado de excedencia de un umbral durante un periodo de  $n$  años, usando un modelo no estacionario. Para una probabilidad anual de excedencia variable  $p_t$ , el riesgo acumulado no estacionario se expresa como:

$$R_{ns} = 1 - \prod_{t=1}^n (1 - p_t) \quad (8)$$

Este riesgo representa la probabilidad de que un evento de cierta magnitud sea superado al menos una vez durante la vida útil del proyecto. Al igualar el riesgo obtenido con el correspondiente a un modelo estacionario, es posible derivar el periodo de retorno equivalente para un evento en condiciones no estacionarias.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. DETECCIÓN DE NO ESTACIONARIEDAD

A partir de las series de caudales máximos anuales descritas en la sección 2.1, se aplicaron los tests de tendencia (Mann-Kendall y Theil-Sen) y una prueba de punto de cambio (Pettitt). Los resultados se presentan en la tabla 3. El sombreado de las celdas indica el nivel de significancia estadística: color violeta para  $p\text{-value}<0.05$ , verde para  $0.05 \leq p\text{-value} \leq 0.1$ , y celeste para  $p\text{-value}>0.1$  (no significativo).

Se observa una tendencia general negativa en las tres métricas analizadas (caudales máximos, medias móviles y desviaciones estándar móviles), según las pruebas de Mann-Kendall y Theil-Sen. En tres cuencas, la significancia de la prueba de Mann-Kendall aplicada a los caudales máximos se ubicó levemente por encima del umbral de 0.05, aunque sin superar el 0.1.

En cuanto a la prueba de Pettitt, se identifican cambios estructurales en las series de caudales máximos en la mayoría de las estaciones entre los años 2006 y 2009, lo que sugiere una posible ruptura en el comportamiento central de las series, coincidente con los años previos al inicio de la megasequía nacional en 2010 (González et al., 2018). Este patrón también se observa en las medias móviles, con excepción del Río Aconcagua. En el caso de la desviación estándar móvil, los años de cambio son más dispersos, lo que indica una mayor variabilidad en la estructura de la variabilidad interanual.

**Tabla 3.** Resultados de las pruebas de tendencia (Mann-Kendall, Theil-Sen) y de punto de cambio (Pettitt) aplicadas a caudales máximos, medias móviles y desviaciones estándar móviles. El color de las celdas indica el nivel de significancia: violeta ( $p\text{-value}<0.05$ ), verde ( $0.05 \leq p\text{-value} \leq 0.1$ ) y celeste ( $p\text{-value} > 0.1$ ).

Estación	Caudales Máximos			Media Móvil			Desviación Estándar Móvil		
	Mann-Kendall	Theil-Sen	Pettitt	Mann-Kendall	Theil-Sen	Pettitt	Mann-Kendall	Theil-Sen	Pettitt
<b>NORTE</b>									
Río Claro en Rivadavia	-0.163	-0.077	2008	-0.337	-0.230	2004	-0.319	-0.190	2004
Río Elqui en El Algarrobal	-0.130	-0.176	2008	-0.246	-0.424	2008	-0.289	-0.476	2008
Río Choapa en Cuncumén	-0.340	-1.286	2009	-0.630	-1.377	2007	-0.656	-1.025	2004
<b>CENTRO</b>									
Río Aconcagua en Chacabuquito	-0.196	-1.208	2008	-0.314	-1.733	1995	-0.355	-1.049	1998
Río Mapocho en Los Almendros	-0.185	-0.648	2009	-0.300	-1.478	2010	-0.343	-1.512	1995
Río Angostura en Valdivia de Paine	-0.267	-5.604	2009	-0.425	-6.502	2007	-0.295	-3.054	2004
Río Diguillin en San Lorenzo	-0.179	-2.523	2008	-0.275	-2.596	2008	0.122	0.664	1988
<b>SUR</b>									
Río Bio Bio en Rucalhue	-0.323	-42.945	2006	-0.390	-41.387	2005	0.039	1.180	2008
Río Cautín en Rari-Ruca	-0.220	-4.127	2006	-0.329	-3.676	2008	-0.266	-1.412	2008
Río Cholchol en Cholchol	-0.310	-11.057	2008	-0.467	-12.102	2008	-0.288	-3.817	2000
Río Toltén en Villarrica	-0.145	-4.098	2009	-0.229	-3.397	2008	-0.129	-1.219	2010

### 3.2. AJUSTES ESTACIONARIOS Y NO ESTACIONARIOS

Para cada cuenca se realizaron ajustes estacionarios y no estacionarios utilizando cinco distribuciones de probabilidad (cuatro en el caso de GAMLSS): Log-Normal, Pearson tipo III, Gumbel, GEV y Weibull 3. La selección del mejor modelo para cada método se hizo en base al menor valor de AIC, según lo descrito en la Sección 2.6. Dado que el método Two-Stage (TS) no requiere selección de covariables, no se incluye en esta parte del análisis. La Tabla 4 presenta las distribuciones con mejor ajuste (menor AIC) para cada cuenca, junto con las covariables utilizadas en los modelos ML y GAMLSS.

En todas las cuencas analizadas, el modelo con menor AIC corresponde al obtenido mediante GAMLSS, mientras que el modelo estacionario presentó los peores ajustes. Esta diferencia no es lineal: tomando como referencia el AIC del método GAMLSS, los valores de ML fueron, en

promedio, un 3.4% superiores, mientras que los del modelo estacionario mostraron un aumento promedio del 12.3%.

En cuanto a las distribuciones seleccionadas, GAMLSS no muestra una tendencia clara derivada según la ubicación geográfica, a diferencia de ML, donde la distribución Weibull 3 aparece únicamente en cuencas del sur. Además, no se observa una coincidencia sistemática entre los métodos: el modelo estacionario coincide con ML y GAMLSS en solo una y tres cuencas, respectivamente, mientras que ML y GAMLSS coinciden entre sí en apenas dos casos, lo que refleja diferencias relevantes en los procesos de ajuste.

Respecto al uso de covariables, también se observan contrastes. En GAMLSS, 10 de las 11 cuencas obtuvieron su mejor ajuste utilizando tres covariables, mientras que, en ML, esto solo ocurrió en tres cuencas. Ambos métodos utilizan un conjunto similar de 10 índices, aunque distribuidos de forma distinta entre cuencas: PDO, AAO, Nino1+2, Nino3.4, PRCPTOT, Rx1day, Rx5day, TN, CWD. Además de TX90p (solo en ML) y CDD (solo en GAMLSS).

Es importante destacar que la diferencia entre el menor y el segundo menor valor de AIC nunca supera el 3%. Por ello, el menor valor de AIC no garantiza necesariamente un ajuste superior, motivo por el cual se evaluó adicionalmente la precisión de los modelos mediante gráficos Q-Q, siguiendo la metodología de Carreño (2021).

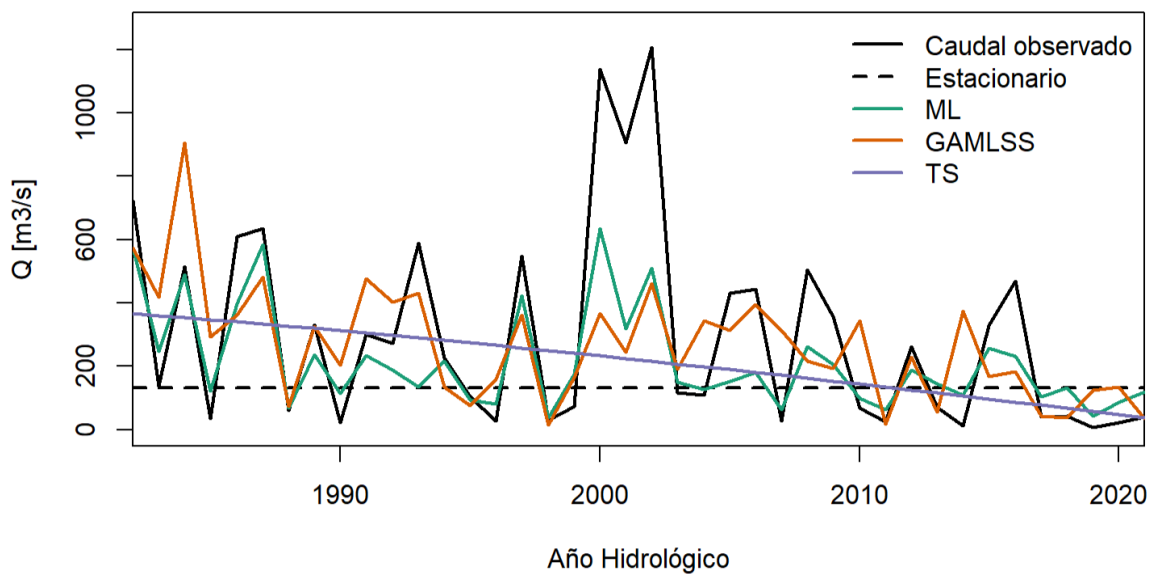
**Tabla 4.** Distribuciones y covariables asociadas al mejor ajuste según AIC para cada cuenca, en los modelos estacionario, ML y GAMLSS002E

Cuenca	Estacionario		ML			GAMLSS		
	Distr.	AIC	Distr.	Covariables	AIC	Distr.	Covariables	AIC
Rio Claro	GEV	355	LN	PDO_MeA+N12_MeA+ AAO_MeS-1	298	GEV	AAO_MaA+PDO_MaA-1+ PRT	306
Rio Elqui	GEV	454	LN	PRT	406	LN	N12_MaA-1+N12_MaS-1+ PRT	428
Rio Choapa	LN	414	P3	PRT	339	Gumbel	N3_MaW+PRT+CDD	358
Rio Aconcagua	LN	613	GEV	AAO_MiS-1+Rx5	544	Gumbel	PRT+Rx5+CWD	558
Rio Mapocho	GEV	460	GEV	PRT	419	LN	N12_MeA+Rx5+TN	428
Rio Angostura	W3	548	LN	Rx5+TN	497	LN	AAO_MaW-1+Rx5+TN	503
Rio Diguillín	W3	683	P3	Rx1	642	Gumbel	PRT+Rx1	651
Rio Bio Bio	Gumbel	938	GEV	AAO_MeA-1+Rx5	862	Gumbel	N34_MiA+AAO_MeS-1+Rx5	883
Rio Cautín	W3	559	GEV	AAO_MeA-1+ N12_MiS-1+N12_MaW-1	510	W3	AAO_MiW-1+N12_MaW-1+ PRT	531
Rio Cholchol	Gumbel	718	LN	Rx5+TX90p	632	W3	AAO_MeS-1+PRT+Rx5	661
Rio Toltén	W3	558	Gumbel	N34_MiA+CWD	503	W3	N34_MiA+N12_MiS-1+Rx5	528

### 3.3 MAGNITUDES DE RETORNO

A partir de los modelos ajustados, se estimaron las magnitudes de caudal asociadas a distintos periodos de retorno. En esta sección se presentan tanto los resultados del modelo estacionario, cuya magnitud se mantiene constante en el tiempo, como los derivados de los enfoques no estacionarios. En estos últimos, las magnitudes varían año a año, ya que los parámetros de las distribuciones se modelan como función de covariables climáticas.

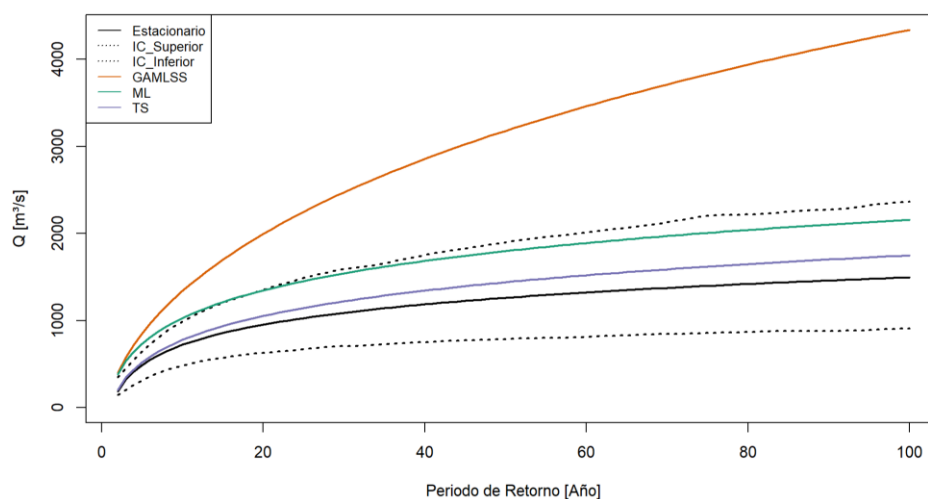
La magnitud de retorno no estacionaria se obtiene evaluando el cuantil correspondiente en función de los parámetros ajustados, los cuales cambian en el tiempo de acuerdo con las covariables seleccionadas. Este comportamiento se refleja claramente en la Figura 2, donde se observa que las curvas no estacionarias presentan variaciones que siguen de forma similar la evolución de los caudales máximos observados. Este patrón es coherente con la selección de covariables, realizada a partir de su correlación con la serie de caudales máximos. En particular, en el caso del método TS, se aprecia claramente el efecto de la tendencia lineal impuesta sobre los parámetros de la distribución.



**Figura 2.** Magnitudes de caudal máximo instantáneo anual para un periodo de retorno de 2 años en el río Angostura según diferentes métodos de ajuste.

### 3,4, NIVEL DE VIDA DE DISEÑO

El enfoque del Nivel de Vida de Diseño permite convertir magnitudes de retorno variables en el tiempo a valores únicos asociados a un periodo de retorno determinado. Esto facilita la comparación directa entre los métodos no estacionarios y el enfoque estacionario tradicional. Para ello, se generan gráficos que comparan los mejores ajustes de cada método no estacionario con el modelo estacionario, incluyendo además los intervalos de confianza del 95% para este último. Las figuras 3 y 4 ilustran estos resultados para las cuencas de los ríos Angostura y Biobío, donde se observa que los métodos no estacionarios tienden a estimar caudales mayores que el enfoque estacionario, especialmente en periodos de retorno elevados.



**Figura 3.** Curvas de periodo de retorno para el río Angostura según distintos métodos de ajuste.

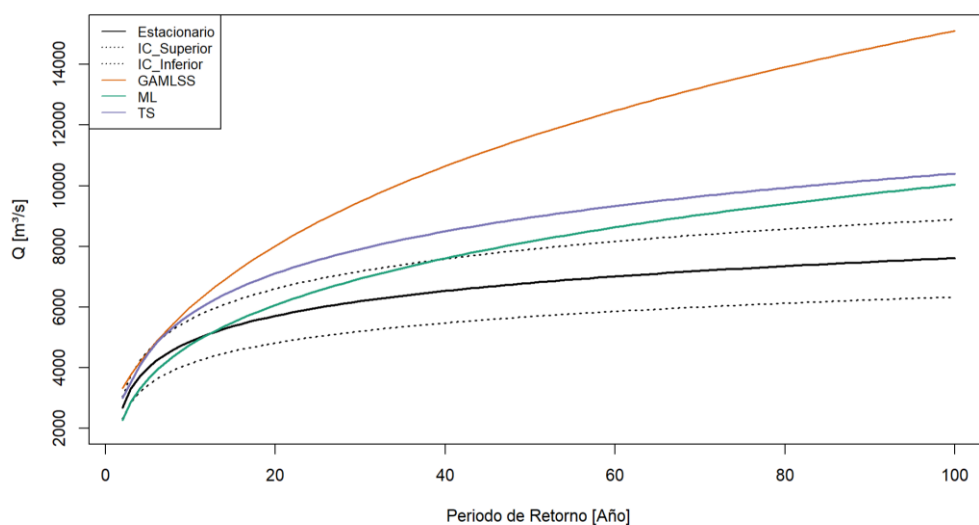


Figura 4. Igual que en la Figura 3, pero correspondiente al río Biobío.

**Tabla 5.** Caudales [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] esperados por método. ICI y ICS corresponden a los intervalos de confianza del 95% inferior y superior, respectivamente.

Cuenca	T=50 años						T=100 años					
	Estacionario			GAMLSS	ML	TS	Estacionario			GAMLSS	ML	TS
	ICI	Esperado	ICS				ICI	Esperado	ICS			
Río Claro	29	62	112	85	684	96	34	94	197	120	1999	144
Río Elquí	74	191	339	259	348	555	96	301	583	419	568	854
Río Choapa	106	192	277	147	156	279	124	241	358	154	187	365
Río Aconcagua	307	444	582	503	423	484	352	531	710	686	504	581
Río Mapocho	212	407	717	869	996	474	236	545	1070	1539	1567	641
Río Angostura	780	1261	1890	3180	1797	1440	888	1495	2361	4339	2158	1749
Río Diguillín	614	706	818	838	798	862	634	750	870	929	883	960
Río Biobío	5691	6800	7910	11628	8164	8956	6340	7615	8890	15108	10039	10402
Río Cautín	751	845	953	809	876	840	783	885	1011	836	926	879
Río Cholchol	1630	1929	2227	2162	2236	1920	1799	2141	2485	2259	2520	2130
Río Toltén	848	956	1068	921	3775	3242	885	999	1139	958	4760	3935

La Tabla 5 presenta los caudales de diseño para periodos de retorno de 50 y 100 años por método, se destaca con celeste los caudales mínimos y con naranja los caudales máximos para cada estación y periodo de retorno, no se considera el intervalo de confianza inferior siendo el menor valor en todos los casos y periodos. Para un periodo de retorno de 100 años, en 9 de las 11 estaciones fluviométricas, al menos un modelo no estacionario supera el límite superior del intervalo de confianza. Esta tendencia también se mantiene para periodos de retorno de 50. En contraste, el enfoque estacionario arroja los valores más bajos en alrededor de la mitad de los casos analizados, para los dos periodos de retorno mencionados.

#### 4, CONCLUSIONES Y DISCUSSION DE RESULTADOS

Este estudio evaluó 11 cuencas chilenas, desde la región de Coquimbo hasta La Araucanía, aplicando tres métodos de análisis de frecuencia no estacionario para los caudales máximos anuales. Se evaluaron diferentes distribuciones de probabilidad, modelando sus parámetros como funciones lineales de covariables relacionadas con fenómenos climáticos relevantes para Chile.

El análisis de tendencia reveló señales de no estacionariedad en todas las cuencas analizadas. Aunque en algunos casos los caudales máximos no presentaron una significancia estadística clara según la prueba de Mann-Kendall, las series de medias móviles —y en la mayoría de los

casos también las desviaciones estándar móviles— evidenciaron tendencias significativas. En todos los casos, las tendencias detectadas fueron negativas. Sin embargo, es importante considerar que estos análisis son sensibles al período observado. Por ejemplo, desde 2010 en adelante, el impacto de la megasequía redujo de forma prolongada los caudales máximos anuales, lo que sin duda afecta los resultados de los tests de tendencia y la obtención de tendencias negativas.

En este contexto, el uso de covariables para modelar los parámetros de las distribuciones cobra relevancia. Algunas de estas covariables corresponden a índices definidos por el ETCCDI, que cuantifican los efectos del cambio climático; otras reflejan señales de variabilidad climática a gran escala con tendencias sostenidas en el tiempo, como ENSO o AAO, lo que permite incorporar indirectamente el efecto acumulativo de las tendencias climáticas globales.

La elección de la distribución y las covariables adecuadas es crítica y requiere un proceso más robusto para garantizar resultados confiables. En este estudio se utilizó el AIC como criterio principal de selección, aunque sus diferencias entre modelos fueron generalmente pequeñas. Por ello, se recomienda complementar su uso con una inspección visual de los parámetros obtenidos, priorizando ajustes que presenten una evolución suave de sus valores, y descartando casos con desviaciones puntuales significativas. Esto se evidenció, por ejemplo, en las cuencas de los ríos Claro y Toltén, donde ciertos valores atípicos en las covariables podrían haber influido en estimaciones poco realistas.

El impacto de seleccionar una u otra distribución también merece atención. Aunque en muchas cuencas los tres métodos coincidieron en la mejor distribución, en otros casos hubo diferencias sin una clara justificación, dadas las pequeñas variaciones en el AIC. Además, imposibilidad de ajustar la distribución de Weibull de 3 parámetros con el paquete GAMLSS en R limita la comparación directa entre este método y ML, considerando que dicha distribución fue la más adecuada para ML en tres cuencas y para el enfoque estacionario en cuatro.

Finalmente, los niveles de vida de diseño (DLL) obtenidos mediante los métodos no estacionarios muestran que los caudales asociados a distintos periodos de retorno tienden a ser mayores que aquellos obtenidos con el enfoque estacionario, superando en muchos casos incluso el límite superior del intervalo de confianza estacionario del 95%. Aunque este resultado puede parecer contradictorio con la tendencia negativa en los caudales máximos, se explica por el hecho de que—el riesgo corresponde a un producto de las probabilidades de ocurrencia de un evento proveniente de distintas funciones de distribuciones, una para cada instante de tiempo, por lo tanto, es indiferente al tiempo al que corresponde cada distribución. Esto provoca que, al tener valores elevados de caudal al inicio, aun cuando se tenga tendencia negativa, se obtengan magnitudes de retorno de caudal más elevadas para el caso no estacionario. Esto se hace totalmente evidente bajo las condiciones de megasequía de la última década, lo que también invalida el supuesto de estacionariedad, considerado para el ajuste estacionario y tiende a generar magnitudes de retorno estacionarias más bajas para el periodo de retorno.

En la figura 5 se presenta el cambio temporal de las distribuciones de probabilidades resultantes utilizando el método ML. La línea negra corresponde al caso estacionario y las líneas segmentadas a los caudales máximos anuales. Se observa como las primeras distribuciones se ubican a la derecha del caso estacionario y gradualmente se desplazan hacia la izquierda, demostrando el cambio en el comportamiento de los caudales. Esta transición y que el riesgo solo corresponde al producto de probabilidades asociadas a eventos independientes es lo que provoca caudales no estacionario mayores en comparación al caso estacionario. Resultados similares se observan en los trabajos de Carreño (2021) y Staplefield (2023), donde los cálculos

de nivel de vida de diseño entrega valores superiores al estacionario en todos los casos, incluso cuando se encuentran tendencias negativas.

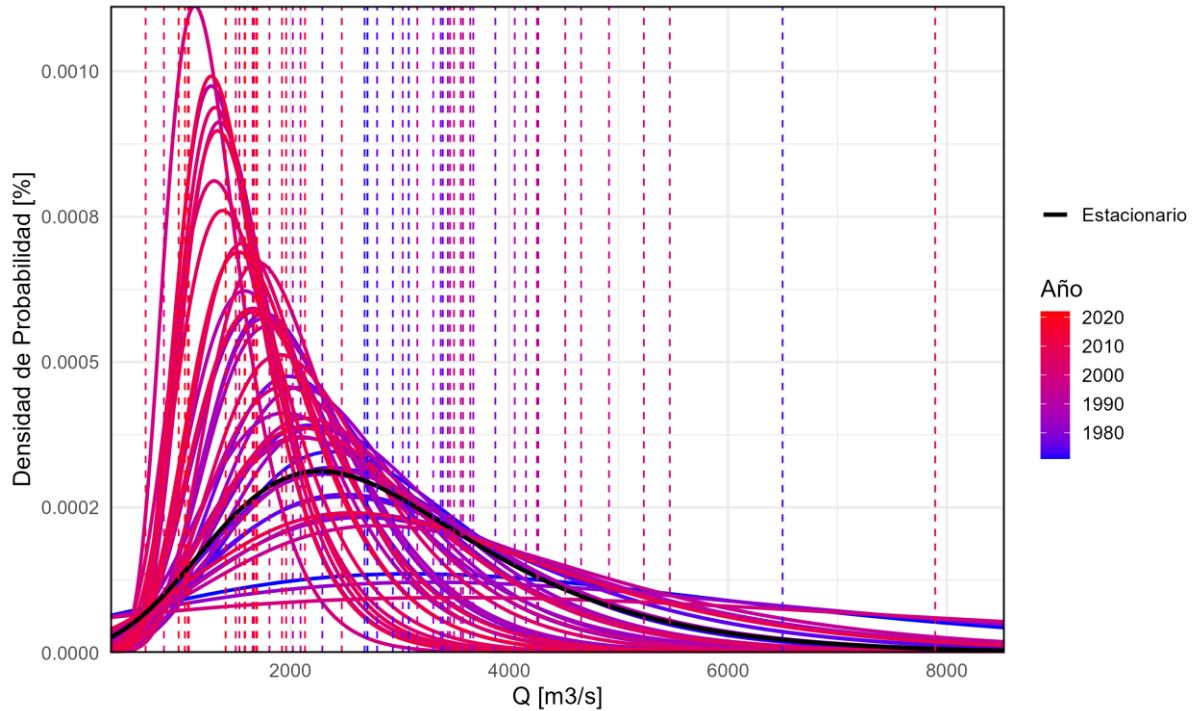


Figura 5: Las líneas continuas representan las distribuciones del caso estacionario y el mejor ajuste del método ML, y las líneas segmentadas los valores de caudal máximo anual, Río Biobío.

Para verificar que las magnitudes de retorno no estacionarias no sean sobrestimadas, se recomienda en trabajos futuros, realizar un análisis detallado de las covariables seleccionadas, este análisis puede incluir la detección de tendencias y la proyección sus valores en base a los modelos de cambio climático actuales, lo que permitiría entender mejor el comportamiento de los resultados, especialmente al momento de aplicar estas herramientas en el diseño y la verificación de obras hidráulicas que deben responder de manera robusta a escenarios de cambio climático.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el proyecto ANID FONDECYT de Iniciación N.º 11250238 y por el proyecto interno de investigación PI\_LIR\_24\_01 de la Universidad Técnica Federico Santa María.

## REFERENCIAS

- AghaKouchak, A., Easterling, D., Hsu, K., Schubert, S., & Sorooshian, S. (2013). *Extremes in a Changing Climate*. <http://www.springer.com/series/6689>
- Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., & Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9–10), 4309–4330. <https://doi.org/10.1007/S00382-020-05231-4/FIGURES/13>
- Carreño, F. (2021). *Verificación del Diseño de Obras Hidráulicas Considerando Análisis de Frecuencia No Estacionario*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2015). *Informe a la Nación: La megasequía en Chile: Una lección para el futuro*. <https://www.cr2.cl/megasequia/>
- González, M. E., Gómez-González, S., Lara, A., Garraud, R., & Díaz-Hormazábal, I. (2018). The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(8). <https://doi.org/10.1002/ECS2.2300>

- González-Reyes, Á., Jacques-Coper, M., & Muñoz, A. A. (2021). Seasonal precipitation in south-central Chile: Trends in extreme events since 1900. *Atmósfera*, 34(4), 371–384. <https://doi.org/10.20937/ATM.52871>
- Hernandez, D., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., & Ricchetti, F. (2022). Hydrologic Sensitivities and ENSO Variability Across Hydrological Regimes in Central Chile (28°–41°S). *Water Resources Research*, 58(9). <https://doi.org/10.1029/2021WR031860>
- Hoskingt, J. R. M. (1990). L-moments: Analysis and Estimation of Distributions using Linear Combinations of Order Statistics. In *J. R. Statist. Soc. B* (Vol. 52, Issue I). <https://academic.oup.com/jrssb/article/52/1/105/7027905>
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Kristin Seyboth (USA)*. Gian-Kasper Plattner. <https://epic.awi.de/id/eprint/37530/>
- Kochanek, K., Strupczewski, W. G., Bogdanowicz, E., Feluch, W., & Markiewicz, I. (2013). Application of a hybrid approach in NFFA—a Polish perspective [www.nat-hazards-earth-syst-sci-discuss.net/1/6001/2013/](http://www.nat-hazards-earth-syst-sci-discuss.net/1/6001/2013/) Application of a hybrid approach in nonstationary flood frequency analysis—a Polish perspective Application of a hybrid approach in NFFA—a Polish perspective Application of a hybrid approach in NFFA—a Polish perspective. *Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 1, 6001–6024. <https://doi.org/10.5194/nhessd-1-6001-2013>
- Marquet, P. A. (2020). *Biodiversidad y cambio climático en Chile: evidencia científica para la toma de decisiones*. Comité Científico COP25. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32249>
- Pinto, D. A. (2022). *Proyecciones de eventos extremos bajo nuevos escenarios de cambio climático CMIP6 en la zona central de Chile para el periodo 2025-2085* [Universidad de Chile]. <https://doi.org/10.58011/J6XW-FJ96>
- Quintana, J., & Aceituno, P. (2006). *Trends and interdecadal variability of rainfall in Chile*. 371–372. [http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/adm\\_conf/2005/10.31.19.35/doc/371-372.pdf](http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/adm_conf/2005/10.31.19.35/doc/371-372.pdf)
- Rigby, R. A., & Stasinopoulos, D. M. (2005). Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 54(3), 507–554. <https://doi.org/10.1111/J.1467-9876.2005.00510.X>;
- Rootzén, H., & Katz, R. W. (2013). Design Life Level: Quantifying risk in a changing climate. *Water Resources Research*, 49(9), 5964–5972. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20425>
- Spearman, C. (1904). The Proof and Measurement of Association between Two Things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72. <https://doi.org/10.2307/1412159>
- Staplefield, C. (2023). *Análisis de frecuencia no estacionario como una herramienta para la verificación del diseño de obras hidráulicas bajo un escenario climático cambiante*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Strupczewski, W. G., Kochanek, K., Bogdanowicz, E., Markiewicz, I., & Feluch, W. (2016). Comparison of Two Nonstationary Flood Frequency Analysis Methods within the Context of the Variable Regime in the Representative Polish Rivers. *Acta Geophysica*, 64(1), 206–236. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0070>
- Strupczewski, W. G., Singh, V. P., & Feluch, W. (2001). Non-stationary approach to at-site flood frequency modelling I. Maximum likelihood estimation. *Journal of Hydrology*, 248(1–4), 123–142. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00397-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00397-3)
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/CR00953>
- Westra, S., H. J. Fowler, J. P. Evans, L. V. Alexander, P. Berg, F. Johnson, E. J. Kendon, G. Lenderink, and N. M. Roberts (2014), Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall, *Rev. Geophys.*, 52, 522–555. doi:10.1002/2014RG000464.