

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**VERIFICACIÓN DEL DISEÑO DE OBRAS HIDRÁULICAS CONSIDERANDO
ANÁLISIS DE FRECUENCIA NO ESTACIONARIO**

FERNANDO CARREÑO M.¹
ÁLVARO OSSANDÓN Á.²

RESUMEN

La práctica común para el diseño de obras hidráulicas en Chile considera el comportamiento de las variables hidrológicas analizadas como estacionario. Este supuesto, debido a factores como el cambio climático, es ahora cuestionable. En cuencas sin información fluviométrica, los caudales de diseño se determinan de manera indirecta a través de un análisis de frecuencia estacionario de la serie de precipitaciones máximas diarias anuales. Debido a lo anterior, en este trabajo se realiza un análisis no estacionario de las precipitaciones máximas diarias anuales en las estaciones pluviométricas del embalse El Yeso, El Tepual y Quinta Normal, ubicadas en las macrozonas centro y sur, con el fin de determinar el impacto que la no estacionariedad, debida al cambio climático, pueda tener sobre el diseño de obras hidráulicas que han considerado un comportamiento estacionario de los datos. Se asumió que las series de precipitaciones máximas diarias (PMD) se distribuyen de acuerdo con una distribución general de valores extremos (GEV de acuerdo con sus siglas en inglés), en la que la no estacionariedad es modelada a través de los parámetros de la distribución, los que varían linealmente en función de índices climatológicos de gran escala o locales. Para determinar las diferencias entre ambos tipos de análisis, se comparan los resultados entregados por funciones estacionarias comúnmente usadas como Pearson o logNormal, con los valores entregados por el análisis no estacionario, empleando el gráfico Nivel de Vida del diseño (DLL, Design Life Level). Los resultados muestran que, en el caso de El Tepual y Embalse El Yeso, los valores de precipitación de diseño no estacionarios son menores que los estacionarios. En el caso de Quinta Normal se obtienen valores no estacionarios de precipitación de diseño con mínimas diferencias a los obtenidos de forma estacionaria.

¹Alumno, Depto. de Obras Civiles, Universidad Santa María – fernando.carreno.14@sansano.usm.cl

²Instructor Académico, Depto. de Obras Civiles, Universidad Santa María – alvaro.ossandon@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones debido a precipitaciones extremas, incendios forestales producto de elevadas temperaturas, además de la pérdida de cosechas y biodiversidad generadas por fuertes heladas o prolongadas sequías, son de las consecuencias más graves que el cambio climático está generando a nivel mundial. Según diversas proyecciones climáticas (Hirabayashi et al., 2013; Winsemius et al., 2016), habrá un aumento global en la frecuencia de inundaciones extremas, principalmente en Asia (Arnell & Gosling, 2016), mientras que en el sur de Sudamérica se proyecta una disminución en las frecuencias de inundación (Hirabayashi et al., 2008). En cuanto a las proyecciones de temperaturas máximas y mínimas, en específico en el caso de Chile, se calcula un aumento de más de 6°C y 2°C, respectivamente, en el caso de que las emisiones de gases de efecto invernadero no sean abatidas (Araya-Osses et al., 2020). Las proyecciones de precipitaciones a nivel nacional tampoco son alentadoras, pronosticándose menores niveles de precipitaciones desde las regiones de Coquimbo hasta La Araucanía (Araya-Osses et al., 2020; Fernández & Gironás, 2021). Este fenómeno ha sido muy evidente en el último tiempo, ya que hemos sido testigos de la peor sequía de la que se tiene registro (CR2, 2015).

La causa de la mega sequía en Chile es en parte natural y artificial. Durante los años 2008 a 2015, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) estuvo en su fase fría, provocando un fortalecimiento del anticiclón del Pacífico y reduciendo las precipitaciones en la zona central de Chile (CR2, 2015), lo que explicaría, aproximadamente, la mitad de las tendencias negativas vistas durante ese periodo (Boisier et al., 2016). También se ha detectado la presencia de una zona del Pacífico Sur-Oeste subtropical en la que la temperatura superficial del mar se ha calentado significativamente en los últimos 10 años, lo que podría favorecer a los patrones climáticos que generan condiciones áridas en la zona central del país (Garreaud et al., 2020). La actividad humana y aumento de emisiones de gases de efecto invernadero también ha sido responsable de la mega sequía, pero en menor medida que los efectos naturales, sin embargo, en el escenario de continuar con este ritmo de emisión de gases de efecto invernadero, las sequías en la zona central pueden pasar a ser un fenómeno más frecuente, además de que la recuperación de la mega sequía del 2010 puede ser solo parcial y tardar décadas (Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2020).

Teniendo en cuenta que las proyecciones del calentamiento global indican que las temperaturas globales promedio seguirán aumentando durante el siglo 21, calentando los océanos y produciendo grandes variaciones en las precipitaciones (Krinner et al., 2013; CR2, 2015) es urgente analizar el desempeño de las diversas obras hidráulicas existentes en el país, con el fin de determinar el impacto del cambio climático en el diseño de las mismas, más aún teniendo en cuenta que el análisis tradicional de las series de tiempo para obtener las magnitudes de diseño de una obra se realiza de forma estacionaria, es decir, que las propiedades de una serie tiempo permanecen invariantes en el tiempo.

Los métodos tradicionales de diseño consisten en la estimación de una única función de distribución bajo el concepto de estacionariedad, siendo comúnmente usadas las distribuciones log-Normal, Pearson, log-Pearson y Gumbel. Sin embargo, dado que la función Generalizada de Valores Extremos (GEV, por sus siglas en inglés) puede modelar con mayor facilidad los comportamientos de los valores extremos de la serie de datos, siendo a la vez consistente con la teoría de valores extremos (Ossandón et al., 2021), se usará ésta como función de ajuste de las series de precipitaciones máximas diarias anuales. Es así como, mediante la modelación de los

parámetros de la GEV en función de covariables locales, tales como indicadores obtenidos a partir de las temperaturas máxima y mínima, o globales, como los patrones atmosféricos El Niño Southern Oscillation (ENSO) y PDO, se realiza un análisis de frecuencia no estacionario de precipitaciones extremas anuales, determinando qué tan alejado está el valor original de precipitación de diseño con respecto a su homólogo estacionario.

En las siguientes secciones se exponen los índices climáticos utilizados en la modelación del comportamiento no estacionario del clima, para posteriormente explicar la metodología seguida, desde la recopilación de información hasta el ajuste y selección de modelos, terminando con las conclusiones.

2. METODOLOGÍA

Zona de estudio y recopilación de datos

Las zonas de Chile en las que se realiza el análisis corresponden a la Zona Central y Zona Sur, con el fin de abarcar zonas del país con climas distintos. Para cada zona se seleccionó una estación meteorológica que tuviese un registro continuo y completo de precipitaciones y temperaturas durante, al menos, 30 años, escogiéndose así a la estación Quinta Normal, ubicada en la ciudad de Santiago, en la Zona Central; la estación Embalse El Yeso, ubicada a un costado del Embalse El Yeso, en la Cordillera de los Andes de la Zona Central, comuna de San José de Maipo; y la estación El Tepual, ubicada a 13 kilómetros de la ciudad de Puerto Montt, Región de Los Lagos, Zona Sur. Las coordenadas geográficas, elevaciones y rango de mediciones de cada estación se muestran en la Tabla 1.

Las observaciones diarias de precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas requeridas para el estudio están disponibles en la plataforma web del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), en donde se ha puesto a disposición toda la información meteorológica recopilada por las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) y la DMC.

Tabla 1. Nombre y coordenadas de ubicación de estaciones meteorológicas empleadas.

Estación	Lat [°S]	Long [°O]	Elevación [m]	Precipitación	Temperatura
Quinta Normal	33,4450	70,6828	527	1950-2020	1950-2020
Embalse El Yeso	33,6767	70,0886	2475	1962-2020	1962-1970 y 1977-2020
El Tepual	41,4350	73,0978	85	1950-2020	1950-1952 y 1960-2020

Índices climáticos ETCCDI y fenómenos océano-atmosféricos

A partir de las mediciones diarias de temperaturas y precipitaciones, se calculan, para los periodos temporales de mediciones mostrados en la Tabla 1, de forma anual, invernal (desde mayo a agosto) y estival (desde diciembre a marzo) los indicadores climáticos estandarizados existentes, de acuerdo con el Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI; World Climate Research Programme [WCRP], s.f.)¹ a emplear como covariables. Estos indicadores deben ser monitoreados de forma constante con el fin de detectar cambios que se

¹ <https://www.wcrp-climate.org/etccdi>

puedan producir a escala global en los eventos climáticos extremos. Los índices, mostrados en la Tabla 2, describen características particulares de los extremos, tal como frecuencia, amplitud y persistencia.

Tabla 2. Indicadores climáticos según ETCCDI.

Indicador	Nombre	Descripción
PRCPTOT	Precipitación total	Suma de precipitación total sobre 1 mm
R10mm	Días con precipitación sobre 10mm	Número de días con precipitación sobre 10 mm
R20mm	Días con precipitación sobre 20mm	Número de días con precipitación sobre 20 mm
CWD	Días húmedos consecutivos	Valor máximo de días consecutivos con lluvia ≥ 1 mm
CDD	Días secos consecutivos	Valor máximo de días consecutivos con lluvia ≤ 1 mm
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 temperatura mínima	Índice que corresponde al promedio de la temperatura mínima anual
TX	Promedio de temperatura máxima	Índice que corresponde al promedio de la temperatura máxima anual
SU	Días de verano	Días al año con temperatura máxima > 25 °C
TR	Noches tropicales	Días al año con temperatura mínima > 20 °C
DTR	Rango diurno de temperatura	Promedio entre la diferencia de la temperatura máxima y mínima diaria
TN10p	Noches frías	Porcentaje de tiempo cuando temperatura mínima diaria $<$ percentil 10
TX10p	Días fríos	Porcentaje de tiempo cuando temperatura máxima diaria $<$ percentil 10
TN90p	Noches cálidas	Porcentaje de tiempo cuando temperatura mínima diaria $>$ percentil 90
TX90p	Días cálidos	Porcentaje de tiempo cuando temperatura máxima diaria $>$ percentil 90

En conjunto con los indicadores anteriores, se emplean índices de fenómenos atmosféricos con carácter oscilatorio cuya relación con los eventos climáticos extremos en Chile es conocida, en sus valores mínimos, medios y máximos anuales. Los patrones climáticos seleccionados son: ENSO, PDO y el Modo Anular del Sur (SAM), que posee un efecto modulador sobre las temperaturas extremas y precipitaciones de la zona austral del país (Aceituno et al., 2021). Las series temporales de cada patrón se obtienen desde el sitio web de la National Oceanic and Atmospheric Administration (US Department of Commerce & NOAA, 2011). En la Figura 1 se muestra la variación media mensual de SAM, ENSO y PDO, calculados como la diferencia de cada fenómeno con su valor promedio correspondiente al periodo 1960-1989.

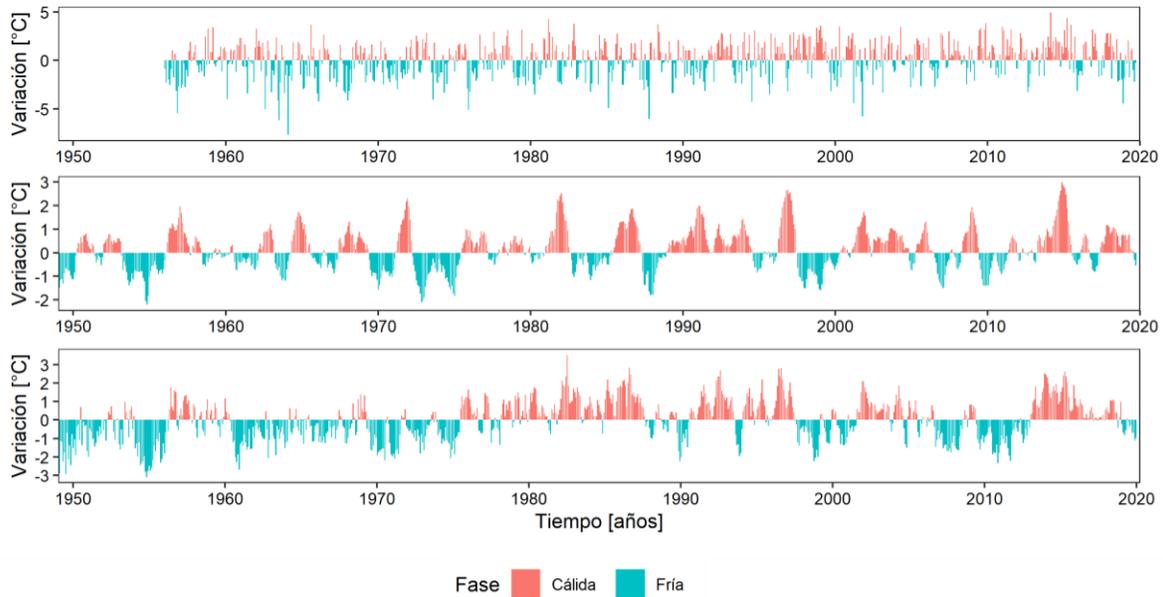


Figura 1. Cronología de los índices para los fenómenos meteorológicos utilizadas. En orden descendente: SAM, ENSO y PDO, entre los años 1950 – 2020.

Selección de potenciales covariables

A las series anuales de PMD de cada estación, se les realiza un análisis de medias y desviaciones estándar móviles, con una ventana de 15 años, aplicándoseles una prueba de Mann-Kendall para detectar posibles tendencias en los datos. Esta prueba se caracteriza por ser una de las pruebas no paramétricas más ampliamente usadas para la evaluación de tendencias en series temporales de tipo hidrometeorológicas (Puertas et al., 2011; Xavier et al., 2020), estando aconsejado su uso por la World Meteorological Organization (WMO). La prueba es capaz de detectar tendencias significativas en las series temporales, entregando un resultado positivo cuando son crecientes, o negativo, cuando son decrecientes. En el caso de que se detecte una tendencia temporal en los datos, el tiempo es incluido como otra posible covariable para el modelo no estacionario.

De los índices climatológicos descritos en la sección anterior, solo los que después de la prueba de correlación de Mann-Kendall posean un p-value menor a 0,05 y τ mayor a 0,1 serán utilizados como potenciales covariables.

Estructura general del modelo

De acuerdo con la Teoría de Valores Extremos, para una serie de extremos anuales, la función de distribución GEV es la designada para ser ajustada a las series de datos. Como se muestra a continuación.

$$P(X \leq q) \rightarrow G(x; \mu(t), \sigma(t), \xi(t)) \quad (1)$$

En donde μ , $\sigma > 0$ y ξ denotan los parámetros de ubicación, escala y forma, respectivamente. Dependiendo de los valores de ξ , la GEV puede ser de tipo I (Gumbel, $\xi=0$), tipo II (Fréchet, $\xi > 0$)

o tipo III (Weibull, $\xi < 0$). Cada uno de estos tres parámetros puede cambiar gradualmente en el tiempo, en función de las covariables proporcionadas, con el fin de representar la no estacionariedad que se desea analizar.

$$G(q; \mu(t), \sigma(t), \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \frac{\xi(q - \mu(t))}{\sigma(t)} \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (2)$$

Es común suponer que el comportamiento de los parámetros ubicación y escala varíen linealmente en función de un set de covariables consideradas, y que el parámetro de forma permanezca invariante en el tiempo (e.g., Bracken et al., 2016; Ossandón et al., 2021). Además, se considera el logaritmo de $\sigma(t)$ con el fin de asegurar que sus valores sean positivos. El parámetro de forma se define como constante debido principalmente a que es difícil de estimar con un nivel suficiente de seguridad (Park et al., 2019) y a que, en el caso de que no esté en el rango $-0,5 \leq \xi \leq 0,5$, puede dar lugar a valores físicamente imposibles y/o hacer que $\sigma(t)$ tienda al infinito (Panagoulia et al., 2014; Hochrainer-Stigler, 2020). Es así como un modelo predeterminando para los parámetros es

$$\mu(t) = \mu_0 + \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_n(t) \quad (3)$$

$$\ln(\sigma(t)) = \sigma_0 + \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot x_n(t) \quad (4)$$

Los términos μ_0 , σ_0 , μ_i y σ_i son los coeficientes de regresión de los parámetros de la GEV y $x_n(t)$ es el valor de la covariable n en el instante t .

Ajuste y selección del mejor modelo

Se consideran todas las posibles combinaciones existentes entre las potenciales covariables, donde cada combinación corresponde a una candidata a mejor modelo. Para cada candidata, los valores de los coeficientes de regresión de los parámetros de la distribución se obtienen mediante el método de Máxima Verosimilitud, en donde se busca minimizar el logaritmo negativo de la función de verosimilitud (nllh, por sus siglas en inglés) mediante métodos numéricos dados los parámetros μ_0 , σ_0 , μ_i y σ_i , de las ecuaciones 3 y 4 (Katz, 2013). Este procedimiento lo realiza automáticamente el paquete extRemes de R (Team, 2017), entregando los valores de los coeficientes que proporcionan el menor valor del logaritmo negativo de la función de verosimilitud. La elección del parámetro de la GEV (ubicación y escala) que será modelado de forma no estacionaria se basa en las pruebas de significancia de Mann-Kendall sobre las medias y desviaciones móviles.

Para seleccionar el mejor modelo se considera el Criterio de Información de Akaike (AIC; Akaike, 1974). Este criterio penaliza los modelos dependiendo de su cantidad de parámetros, como se muestra en la ecuación 5, donde k corresponde a la cantidad de parámetros, en este caso, coeficientes de regresión. El mejor modelo es aquel que posee el menor valor de AIC, por lo que,

si bien una mayor cantidad de parámetros tiende a entregar un mejor ajuste a costa de una mayor complejidad, este criterio equilibra ambos factores.

$$AIC(k) = 2 \cdot nllh(k) + 2 \cdot (k) \quad (5)$$

Magnitudes no estacionarias

Para poder obtener la magnitud de la precipitación y_p asociada a un periodo de retorno T ($P_{ex} = p$), a partir de la GEV, se debe usar su función inversa.

$$y_p = G^{-1}(1 - p; \mu(t), \sigma(t), \xi(t)) = \mu(t) + \left[\frac{\sigma(t)}{\xi(t)} \right] \cdot \{-\ln(1 - p)^{-\xi(t)} - 1\} \quad (6)$$

Estas magnitudes pueden ser fácilmente obtenidas con el comando `qgev` del paquete `fExtremes` de R, ingresando como argumento una probabilidad de ocurrencia y los parámetros μ , σ y ξ de la GEV.

Método de Nivel de Vida del Diseño

El método de Nivel de Vida del diseño (DLL, por sus siglas en inglés) se basa en la cuantificación del riesgo de diseño en función de los años de vida útil para los que fue construida una obra hidráulica. El procedimiento consiste en que, para un periodo de retorno estacionario y vida útil dados, se calcula el riesgo correspondiente a ese periodo de retorno usando la ecuación 7 (en donde n corresponde a la vida útil proyectada) y, mediante métodos iterativos, se obtiene la magnitud de diseño en el modelo no estacionario que tiene asociado el mismo nivel de riesgo, siendo entonces una herramienta útil para diseñar estructuras con grandes periodos de retorno bajo un enfoque no estacionario (Rootzén & Katz, 2013).

$$R = 1 - \prod_{t=1}^n (1 - p_t) \quad (7)$$

3. RESULTADOS

Precipitación Máxima Diaria y análisis de tendencias

Las precipitaciones máximas diarias para las estaciones en estudio se muestran en la Figura 2, junto con un ajuste lineal de Theil-Sen, representado por la recta de color azul. La Tabla 3 muestra los resultados para cada estación después de aplicar la prueba de Mann-Kendall en las series de medias y desviaciones estándar móviles.

Tabla 3. Valores de tau y p-value para las series de medias y desviaciones móviles.

Estación	Media		Desviación estándar	
	τ	p-value	τ	p-value
Quinta Normal	0,155	0,086	0,504	0,000
Embalse El Yeso	-0,630	0,000	-0,285	0,006
El Tepual	0,270	0,003	-0,037	0,687

A modo de ejemplo, la Tabla 4 muestra los valores de AIC de algunos de los modelos propuestos para el ajuste no estacionario de la estación Quinta Normal (5 valores más bajos de AIC) y, además, el valor de AIC para un ajuste estacionario. Para agilizar este proceso, se ocupa el comando leaps del paquete leaps de R, el que entrega una matriz con todas las combinaciones existentes, de todos los tamaños posibles, para un determinado vector (en este caso, un vector de covariables).

De la Tabla 4 se desprende que el mejor modelo corresponde al No Estacionario 3, cuyo valor de AIC es de 551,538. Es importante aclarar que, en el caso de utilizar una covariable calculada en el periodo invernal o estival, se utilizará un super índice indicando el periodo de cálculo.

La Tabla 5 muestra el modelo final no estacionario ajustado para todas las estaciones, además de la mejor distribución para el método estacionario. Es destacable cómo los modelos estacionarios presentan siempre un valor de AIC más alto que los no estacionarios.

Tabla 4. Valores de AIC para distintos modelos considerados para la estación Quinta Normal.

Modelo	$\mu(t)$	$\sigma(t)$	AIC
Estacionario	-	-	611,710
No estacionario 1	-	PRCPTOT+R10mm	600,942
No estacionario 2	-	DTR+PRCPTOT+R10mm	602,217
No estacionario 3	PRCPTOT+R10mm	-	551,538
No estacionario 4	CWD+R20mm+TN	CWD+R20mm+TN	567,055

Tabla 5. Modelos estacionarios y no estacionarios ajustados para cada estación.

Estación	Estacionario		No estacionario		
	Modelo	AIC	$\mu(t)$	$\sigma(t)$	AIC
Quinta Normal	Gamma	611,710	PRCPTOT+R10mm	-	551,538
Embalse El Yeso	Log-Normal	595,180	PRCPTOT+R20mm+CWD	-	399,074
El Tepual	Gumbel	503,825	PRCPTOT+ $ENSO_{min}^{invierno}$ +R20mm	-	487,170

Magnitudes de Retorno

Mediante la ecuación (6), se obtienen las magnitudes de precipitación asociadas a periodos de retorno de 10, 50 y 100 años en las tres estaciones. Los valores se muestran en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. junto a sus homólogos estacionarios para contrastar gráficamente ambos enfoques. Como se puede ver, existen muy marcadas diferencias entre las magnitudes de retorno no estacionarias y estacionarias. El análisis no estacionario logra reproducir la variabilidad de los datos, variando de forma similar a como lo hace la PMD.

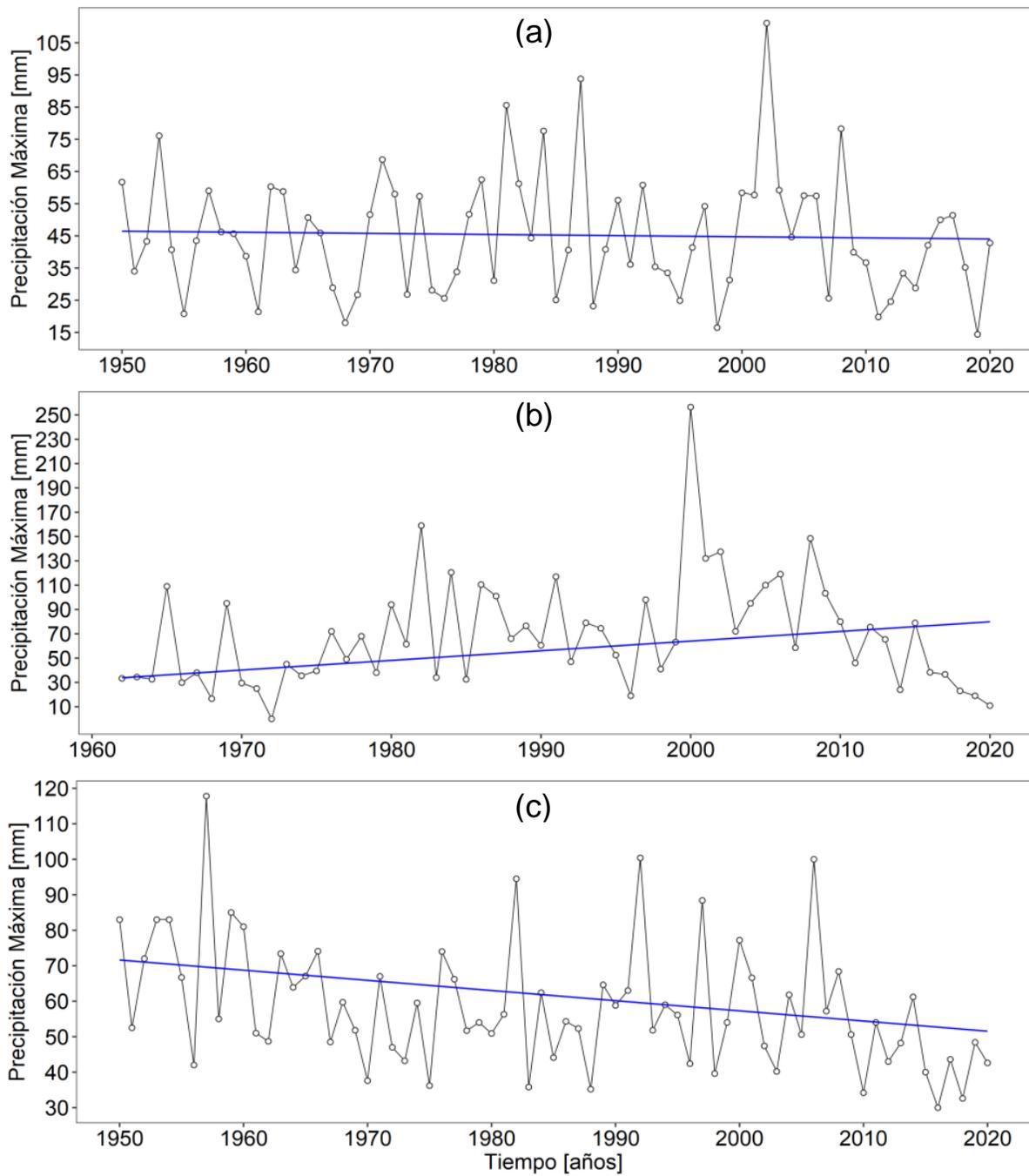


Figura 2. Precipitación máxima diaria para (a) Quinta Normal, (b) Embalse El Yeso y (c) El Tepual.

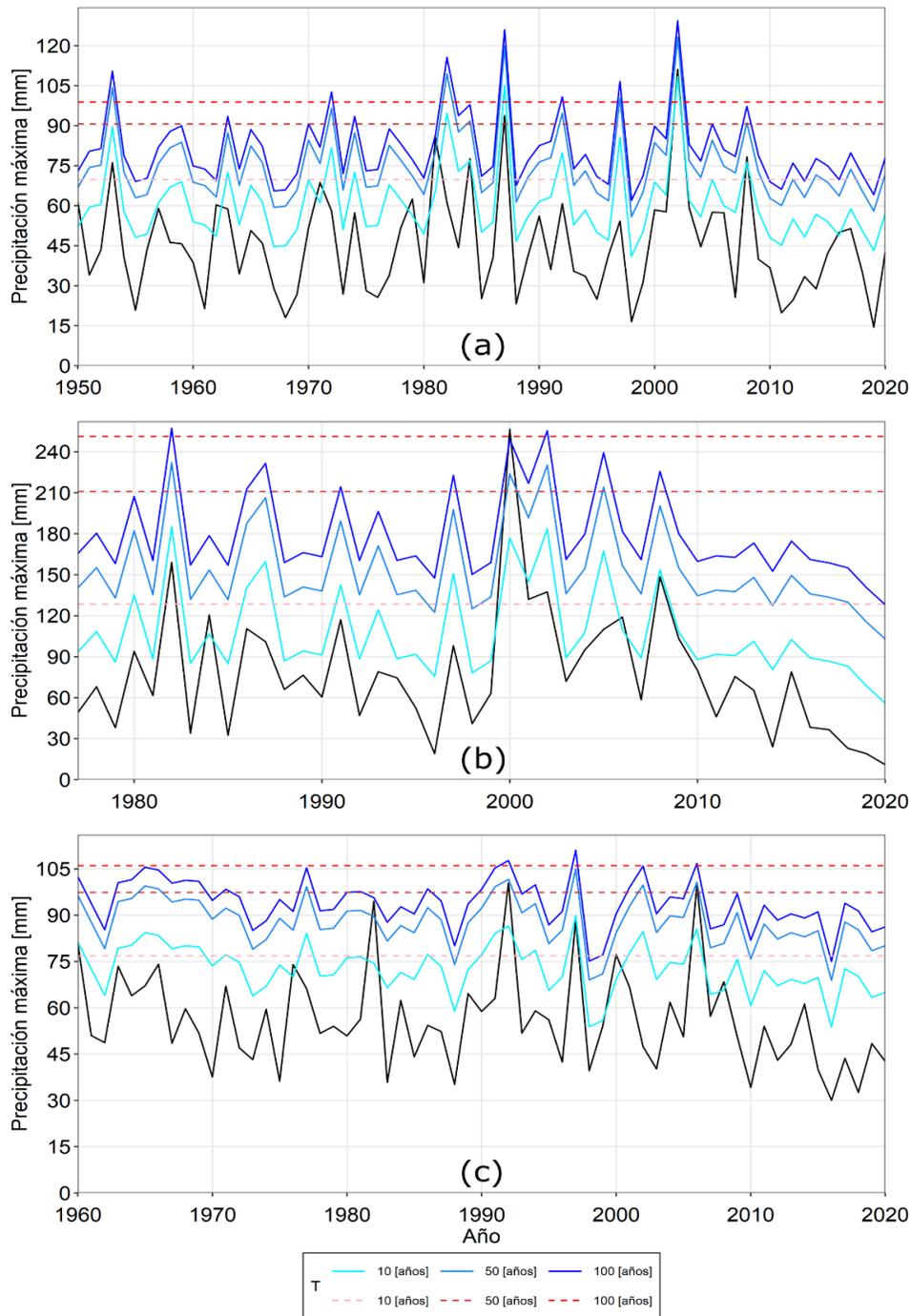


Figura 3. Magnitudes de retorno estacionarias y no estacionarias para las estaciones (a) Quinta Normal, (b) Embalse El Yeso y (c) El Tepual.

Método de Nivel de Vida del diseño

En la Figura 4 se observa que las magnitudes de diseño no estacionarias son, en su mayoría, menores que las estacionarias. Quinta Normal presenta un comportamiento mucho más estacionario que otras estaciones, debido a que ambas curvas muestran un comportamiento similar.

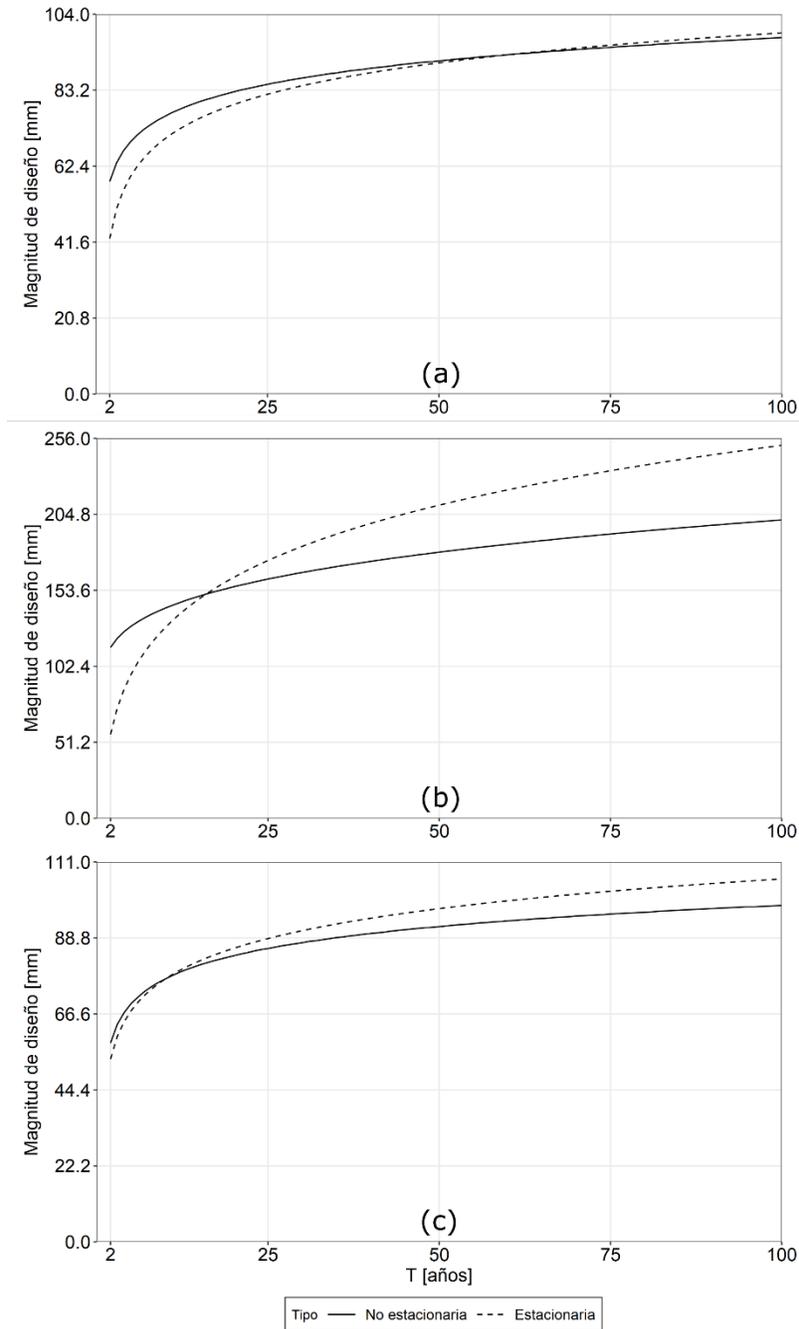


Figura 4. Curva de valores de diseño para las estaciones (a) Quinta Normal, (b) Embalse El Yeso y (c) El Tepual.

Es notorio como todas las estaciones, para un periodo de retorno de dos años, muestran un aumento en las magnitudes de diseño, especialmente en la estación Embalse El Yeso, donde la diferencia entre los dos métodos es de 58,3 milímetros. Sin embargo, en las estaciones Embalse El Yeso y El Tepual, a partir de los periodos de retorno de 16 años y 10 años, respectivamente, se observa una disminución de las magnitudes de diseño, lo que quiere decir que las obras hidráulicas construidas para periodos de retorno de 100 años o más, en las zonas estudiadas, presentan un sobre

dimensionamiento en su diseño, ya que las precipitaciones para las que fueron construidas son, en realidad, menores a lo estimado.

La estación Quinta Normal, si bien presenta una diferencia entre los enfoques estacionario y no estacionario en periodos de retorno menores a 50 años, esta diferencia tiende a desaparecer a medida que aumenta el periodo de retorno, alcanzándose magnitudes de diseño similares para ambos métodos. Este comportamiento indica que, si bien existe una tendencia en la serie de desviaciones móviles, la serie de PMD de Quinta Normal mantiene un comportamiento estacionario, el cual es replicado por el modelo no estacionario.

4. CONCLUSIONES

Se presentaron tres análisis de frecuencia no estacionarios para la precipitación máxima diaria anual en dos macrozonas de Chile: Centro y Sur, asumiendo que los datos se distribuyen de acuerdo de una función general de valores extremos (GEV). Los parámetros de cada GEV están en función de diversas covariables que guardan relación con las precipitaciones en cada zona.

Empleando la prueba de Mann-Kendall sobre las series de medias móviles, se detectaron tendencias significativas, crecientes en El Tepual y decrecientes en Embalse El Yeso. La misma prueba, empleada sobre las series de desviaciones estándar móviles, muestra tendencias significativas, crecientes en Quinta Normal y decrecientes en Embalse El Yeso.

Las diferencias entre las magnitudes de retorno asociadas a un análisis estacionario y no estacionario dependen de la zona en donde se haga el análisis. En Quinta Normal las mayores variaciones están entre $T = 0$ y $T = 50$ años, mientras que para $T = 100$ años la diferencia entre la magnitud estacionaria y no estacionaria es mínima (1,3 milímetros), lo que indica que la serie de tiempo es estacionaria. En el caso de la zona cordillerana en donde está ubicado el embalse El Yeso y la estación El Tepual, cercana a Puerto Montt, es en donde se presentan las mayores disminuciones de precipitaciones, observándose que estas diferencias aumentan junto con el periodo de retorno. Estas desigualdades pueden significar que las obras hidráulicas ya construidas están sub o sobre dimensionadas, dependiendo del periodo de retorno de diseño. Por este motivo, es conveniente realizar un análisis para cada obra en particular y evaluar qué tan alejado está su valor de diseño con respecto a lo obtenido considerando no estacionariedad en los datos.

En el caso de estar frente a una cuenca de tipo pluvial sin información fluviométrica, o con escaso registro, el análisis no estacionario de precipitaciones máximas diarias puede, mediante el uso de hidrogramas unitarios, servir para calcular los caudales de diseño no estacionarios. Esto puede ser muy útil para identificar las obras hidráulicas, tales como puentes, atraviesos o colectores de aguas lluvias en las ciudades, que puedan fallar producto de que los potenciales los efectos del cambio climático no hayan sido considerados en su diseño. También es importante remarcar que en cuencas donde se cuente con registro de caudales, un análisis de frecuencia no estacionario de caudales puede ser realizado directamente.

Para estudios futuros, se debe realizar un análisis mucho más detallado para determinar si las covariables candidatas son adecuadas para modelar los parámetros de cada GEV, además de la inclusión de covariables adicionales que tengan relación con las precipitaciones, tales como el viento o la humedad. Ambas covariables no pudieron ser incluidas en el análisis debido a que no

se encontró ningún registro lo suficientemente completo para ser usado. Además, resultaría interesante considerar la incertidumbre que tengan los datos y las covariables utilizadas, a través de la implementación de métodos bayesianos. Además, se debe realizar el mismo análisis para otras zonas de Chile, como la zona norte, en donde se ha detectado que las precipitaciones anuales muestran tendencias decrecientes para el Altiplano y crecientes para la precordillera, en lugares como San Pedro de Atacama y Poroma (Sarricolea et al., 2017).

REFERENCIAS

- Aceituno, P., Boisier, J. P., Garreaud, R., Rondanelli, R., & Rutllant, J. A. (2021). Climate and Weather in Chile (pp. 7–29). https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_2
- Akaike, H. (1974). A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- 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>
- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387–401. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Bracken, C., Rajagopalan, B., Cheng, L., Kleiber, W., & Gangopadhyay, S. (2016). Spatial Bayesian hierarchical modeling of precipitation extremes over a large domain. *Water Resources Research*, 52(8), 6643–6655. <https://doi.org/10.1002/2016WR018768>
- CR2. (2015). Informe a la Nación. La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. *Informe a La Nación*, 26. Retrieved from www.cr2.cl/megasequia
- Fernández, B., & Gironás, J. (2021). *Water Resources of Chile* (Vol. 8). Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-56901-3>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Hirabayashi, Y., Kanae, S., Emori, S., Oki, T., & Kimoto, M. (2008). Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 754–772. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.4.754>
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., et al. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816–821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>
- Hochrainer-Stigler, S. (2020). *Extreme and Systemic Risk Analysis*. Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-2689-3>
- Katz, R. W. (2013). Statistical Methods for Nonstationary Extremes, 15–37. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4479-0_2
- Krinner, G., Germany, F., Shongwe, M., Africa, S., France, S. B., Uk, B. B. B., et al. (2013). Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 9781107057, pp. 1029–1136). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.024>
- Ossandón, Á., Rajagopalan, B., & Kleiber, W. (2021). Spatial-temporal multivariate semi-Bayesian hierarchical framework for extreme precipitation frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 600(May), 126499. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126499>
- Panagoulia, D., Economou, P., & Caroni, C. (2014). Stationary and nonstationary generalized extreme value modelling of extreme precipitation over a mountainous area under climate change. *Environmetrics*, 25(1), 29–43. <https://doi.org/10.1002/env.2252>
- Park, J., Sung, J. H., Lim, Y. J., & Kang, H. S. (2019). Introduction and application of non-stationary standardized precipitation index considering probability distribution function and return period. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(1–2), 529–542. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2500-y>
- Puertas, O. L., Carvajal, Y., & Quintero, M. (2011). Study of Monthly Rainfall Trends in the Upper and Middle

- Cauca River Basin , Colombia. *Dyna*, 169, 112–120.
- 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>
- Sarricolea, P., Meseguer Ruiz, Ó., & Romero Aravena, H. (2017). TENDENCIAS DE LA PRECIPITACIÓN EN EL NORTE GRANDE DE CHILE Y SU RELACIÓN CON LAS PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO
PRECIPITATION TRENDS IN THE CHILEAN NORTE GRANDE AND ITS RELATIONSHIP WITH CLIMATE CHANGE PROJECTIONS. *Nº*, 54, 41–50.
- Team, R. C. (2017). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- US Department of Commerce, & NOAA. (2011). Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time Series. Retrieved September 19, 2021, from <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>
- Winsemius, H. C., Aerts, J. C. J. H., Van Beek, L. P. H., Bierkens, M. F. P., Bouwman, A., Jongman, B., et al. (2016). Global drivers of future river flood risk. *Nature Climate Change*, 6(4), 381–385. <https://doi.org/10.1038/nclimate2893>
- Xavier, A. C. F., Rudke, A. P., Fujita, T., Blain, G. C., de Moraes, M. V. B., de Almeida, D. S., et al. (2020). Stationary and non-stationary detection of extreme precipitation events and trends of average precipitation from 1980 to 2010 in the Paraná River basin, Brazil. *International Journal of Climatology*, 40(2), 1197–1212. <https://doi.org/10.1002/joc.6265>