

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA HIDRÁULICA**

**SIMULACIÓN CONTINUA DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO DEL ESTERO MARGA  
MARGA BAJO ESCENARIOS FUTUROS DE CLIMA NO ESTACIONARIO**

**JUAN DE DIOS GUZMÁN A.<sup>1</sup>**

**JORGE GIRONÁS L. <sup>2</sup>**

**Cristián Chadwick I.<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis hidrológico continuo de las crecidas en la cuenca Estero Marga Marga, tanto para un periodo histórico, como para escenarios de clima futuro, utilizando el *software* HEC-HMS. Se calibró el modelo en base a lluvias de diseño de 24 horas propuestas por el Plan Maestro del Gran Viña del Mar (Plan Maestro), para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 100 años obteniendo para todos ajustes buenos o muy buenos según estadísticos de bondad de ajuste ( $NSE > 0,75$ ;  $RSR < 0,3$ ;  $PBIAS \leq \pm 15$ ). Para modelar el continuo, en base a series meteorológicas diarias, se propone una desagregación horaria mediante distintos métodos según cada variable climática y se generan simulaciones de series históricas. Se construyeron diagramas de caja para caracterizar las crecidas, en donde se observa que la mayoría son menores a  $50m^3/s$  y con precipitaciones diarias menores o iguales a 17 mm. Se simularon también crecidas en base al escenario SSP5-8.5 de clima futuro descargando 8 GCMs, comprobando una adecuada corrección de sesgo en las variables de precipitación y temperatura. Luego, se analizan las frecuencias de caudales extremos. Se obtuvo una proyección a la disminución de los caudales máximos hacia finales de siglo en comparación al periodo histórico 1980-2014. Se realizó un análisis de frecuencia no estacionario para modelar la evolución de los caudales máximos esperados, llegando a la conclusión de que no pareciera un enfoque adecuado para la cuenca dada la alta incertidumbre en las proyecciones de los GCMs. Los resultados de esta investigación pueden ser útiles para la construcción de un sistema de alerta temprana en cuencas pluviales con tiempos de respuesta cortos y altos niveles de urbanización, así como de insumo para la integración de un modelo multiamenaza que sirva para la planificación urbana.

---

<sup>1</sup> Ingeniero de proyectos, Centro Interdisciplinario de Cambio Global UC – [jdguzman2@uc.cl](mailto:jdguzman2@uc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile; CEDEUS; CIGIDEN; CCG-UC – [jgironas@ing.puc.cl](mailto:jgironas@ing.puc.cl)

<sup>3</sup> Profesor, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez – [cristian.chadwick@uai.cl](mailto:cristian.chadwick@uai.cl)

## **1. INTRODUCCIÓN**

En el contexto de cambio global que se está experimentando, en diversas regiones del mundo ha existido un aumento de eventos climáticos extremos, ya sean olas de calor/frío, crecidas, marejadas, etc. (IPCC, 2021). Dado esto, es fundamental el asesoramiento hacia distintos asentamientos urbanos y rurales frente a la gestión del riesgo de desastres, y el eventual impacto del cambio climático en estos. Dependiendo de la ubicación geográfica, para realizar dicho asesoramiento puede ser relevante realizar un estudio hidrológico de crecidas que pueda permitir conocer tanto la respuesta de una cuenca frente a eventos puntuales, como el efecto de condiciones antecedentes de escorrentía en un continuo. En los últimos años han existido múltiples esfuerzos desde la literatura para proyectar caudales futuros por medio de la modelación hidrológica continua (Aryal et al., 2018; Lobanova et al., 2018; Shen et al., 2018).

Sin embargo, para construir un modelo hidrológico continuo y caracterizar el impacto del cambio climático se presentan numerosos desafíos. En primer lugar, disponer de datos que permitan caracterizar la topografía e hidrografía de la cuenca, lo que se ha podido resolver paulatinamente gracias a la mayor disponibilidad de información pública por medio de técnicas de vigilancia a distancia y bases de datos geoespaciales (Ogden et al., 2001). Del mismo modo, disponer de información de mediciones históricas de variables meteorológicas que sirvan de entrada para el modelo (temperaturas, precipitación, radiación, etc.) en una escala temporal adecuada, así como mediciones fluviométricas con las cuales calibrarlo. Este problema se ha abarcado también en la literatura desde distintos enfoques (García et al., 2008; Viviroli et al., 2009; Azmat et al., 2016). Un último desafío relevante es contar con una incorporación adecuada de proyecciones de clima futuro, dada la alta incertidumbre entre resultados reportados por distintos modelos (Aryal et al., 2018) y/o posibles errores en el escalamiento estadístico de estos, teniendo como consecuencia la incapacidad de preservar las tasas de cambio de los GCM (Chadwick et al., 2018; Lanzante et al., 2020).

Numerosas cuencas en el país todavía no cuentan con registros fluviométricos, lo que dificulta la calibración de un modelo hidrológico, a pesar de la necesidad de contar con dicha modelación. El objetivo de este estudio es construir un modelo hidrológico continuo en la cuenca del Estero Marga Marga a través del *software* HEC-HMS (USACE, 2000), incorporando proyecciones de cambio climático en un escenario de alta adversidad (SSP5-8.5) y realizando un análisis de frecuencias estacionario y no estacionario de los caudales máximos anuales.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. ÁREA DE ESTUDIO**

La cuenca del Estero Marga Marga, perteneciente a las Cuencas Costeras entre Aconcagua y Maipo (Ministerio de Obras Públicas, 2014), cubre una superficie de aproximadamente 424 km<sup>2</sup> y está ubicada en la zona central de Chile, naciendo en la cordillera de la costa y desembocando en el océano pacífico. Cuenta con el estero Quilpué y el que lleva su nombre, el estero Marga-Marga, como principales afluentes. Como cota máxima, alcanza los 1336 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m), descendiendo hasta los 0 m.s.n.m, alcanzando así una pendiente media de 2,4% y atravesando el eje urbano de la ciudad de Viña del. El sector en estudio tiene un clima templado-cálido según la clasificación de Köppen, recibiendo precipitaciones principalmente en los meses

de invierno, siendo los restantes 7 a 8 meses secos y presentando gran nubosidad a lo largo del año (Golder, 2019).

## 2.2. MODELO HIDROLÓGICO

Para la construcción del modelo hidrológico, se utilizó el *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS). Este es un *software* de modelación hidrológica que permite representar el proceso de transformación lluvia-escorrentía en una cuenca tanto para eventos como para series continuas (USACE, 2000). HEC-HMS requiere de información característica de la cuenca. En primer lugar, se debe entregar la topografía e hidrografía para delimitar las subcuencas que componen el sistema, así como los cursos de agua. En segundo lugar, se debe entregar una caracterización de la cuenca para dar con la transformación lluvia-escorrentía. Dicha caracterización incluye la definición de las pérdidas por abstracciones del terreno y por infiltración, el método de generación de escorrentía, el flujo base y el tránsito de hidrogramas. Para este estudio, se construyó un modelo hidrológico que se segmenta a través de distintas subcuencas; una práctica bastante común en la literatura (Fleming y Neary 2004; Singh & Jain, 2015; Bruce, 2010).

La topografía e hidrografía de la cuenca se construyó a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM) del recurso ALOS PALSAR (ASF, 2022). Para caracterizar las pérdidas por abstracciones del terreno que son intercepción y almacenamiento superficial, se reclasificaron capas ráster de uso de suelo para la primera (Bennet, 1998) y se estimó la pendiente media de cada subcuenca para la segunda (Fleming, 2002). Respecto de las pérdidas por infiltración, se modelaron según el método *Soil Moisture Accounting* (SMA) (USACE, 2010), el que requiere de 14 parámetros de entrada que guardan relación con características físicas de la cuenca. Una parte importante de estos fue estimada en base a capas ráster de contenido de suelo (Pogio et al., 2021). El proceso de transformación lluvia-escorrentía se modeló utilizando el método de Clark modificado (USACE, 2000). Al no tener mediciones de caudal en la cuenca, el flujo base se modeló como 2 reservorios lineales, correspondientes a cada capa de agua subterránea del método SMA, siendo parametrizados con valores iniciales recomendados en el manual de HEC-HMS. Finalmente, el tránsito de hidrogramas hacia la salida de la cuenca se representa por medio del método Muskingum (USACE, 2000), estimando sus parámetros según López (2006). Cabe destacar que todos los recursos SIG utilizados son de libre acceso.

## 2.3 CALIBRACIÓN MODELO

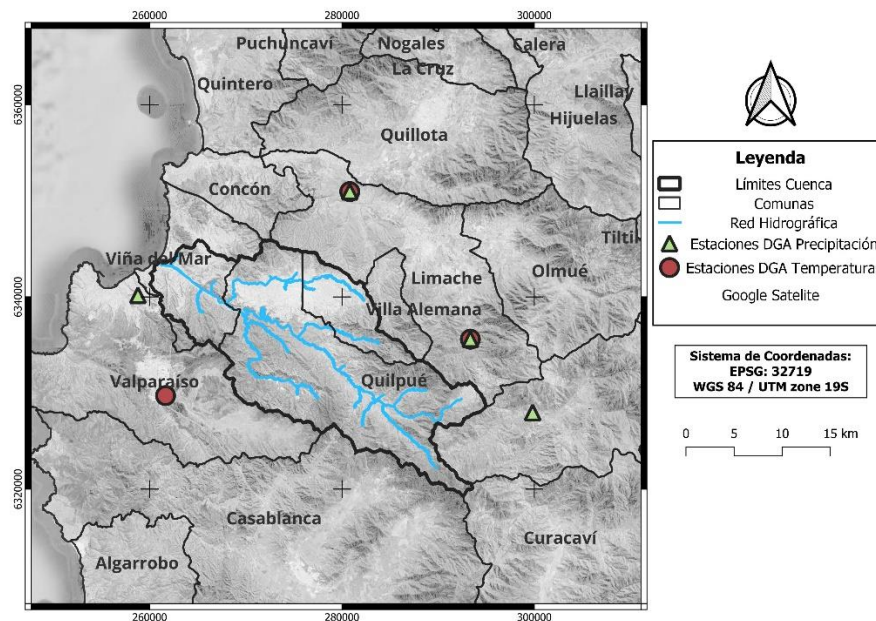
Para llevar a cabo la calibración del modelo y considerando que no existen mediciones de caudales en la cuenca en cuestión, se tomó como referencia lo desarrollado en el Plan Maestro de Viña del Mar. En este, se simuló caudales sintéticos en base a tormentas sintéticas de 24 horas y distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50 y 100). El objetivo de la calibración fue que los distintos caudales simulados bajo las tormentas sintéticas tuviesen un buen ajuste con aquellos caudales estimados en el Plan Maestro. Para esto, se buscó lograr similitudes en el volumen de escorrentía, caudal máximo y forma del hidrograma de salida, variando aquellos parámetros sensibles a cada ítem mencionado. Para evaluar el desempeño del modelo, se utilizan 4 estadísticos; La raíz del error cuadrático medio ( $RSR$ ), el porcentaje de sesgo ( $PBIAS$ ), el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe ( $NSE$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Estos métodos son tradicionalmente utilizados en hidrología para evaluar el rendimiento de las modelaciones (Assis et al., 2019).

**Tabla 1.** Intervalos de desempeño para estadísticos de bondad de ajuste.

Desempeño del Modelo	RSR	PBIAS (%)	NSE
Muy bueno	$0,0 \leq \text{RSR} \leq 0,50$	$\text{PBIAS} < \pm 10$	$0,75 < \text{NSE} \leq 1,00$
Bueno	$0,50 < \text{RSR} \leq 0,60$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 15$	$0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$
Satisfactorio	$0,60 < \text{RSR} \leq 0,70$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$	$0,50 < \text{NSE} \leq 0,65$
Insatisfactorio	$\text{RSR} > 0,70$	$\text{PBIAS} > \pm 25$	$\text{NSE} \leq 0,50$

## 2.4. FORZANTES METEOROLÓGICAS HISTÓRICAS

Las series de tiempo de precipitaciones y temperaturas históricas que funcionan como entrada para el modelo meteorológico, están disponibles a escala diaria y se obtienen de la base de datos de las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA). Se seleccionaron solo aquellas que tuvieran sobre un 80% de los datos de la ventana histórica (1979-2020). Corresponden a 3 estaciones que miden temperaturas extremas (misma ubicación) y 4 estaciones de precipitaciones, de las cuales 2 coinciden con estaciones de temperatura (Ver Figura 1 y Tabla 2). El relleno de los datos faltantes se hizo a través de regresiones lineales simples y múltiples para las temperaturas e implementando regresiones y el método del inverso de la distancia al cuadrado para las precipitaciones.



**Figura 1.** Área de estudio, red de drenaje y ubicación espacial de estaciones utilizadas.

**Tabla 2.** Datos generales estaciones meteorológicas utilizadas. P: Precipitación. Txn: Temperaturas máximas y mínimas.

ID	Estación DGA	Latitud	Longitud	Variable (s)
1	Colliguay	33,16° S	71,15° W	P
2	Lliu-Lliu Embalse	33,10° S	71,21° W	P y Txn
3	Los Aromos	32,95° S	71,35° W	P y Txn
4	Rodelillo	33,05° S	71,58° W	P

## 2.5. CLIMA FUTURO

Existe la intención de integrar los resultados de esta investigación en un modelo multiamenaza para la cuenca del Estero Marga Marga, por lo que los GCMs utilizados en la modelación hidrológica deben ser los mismos que se utilizarán para la modelación de oleaje. Se decidió utilizar los 8 modelos ya estudiados por Badriana & Lee (2021) en un escenario de baja mitigación de emisiones y desigual desarrollo de las naciones (SSP5-8.5). Estos se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3.** CMIP6 GCMs seleccionados para la modelación hidrológica futura.

Modelo	Resolución Espacial	Ensamble
BCC-CSM2-MR	1,12° x 1,125°	r1i1p1f1
IPSL-CM6A-LR	1,267° x 2,5°	r1i1p1f1
MIROC6	1,4° x 1,40625°	r1i1p1f1
MPI-ESM1-2-HR	0,9375° x 0,9375°	r1i1p1f1
MRI-ESM2-0	1,12 x 1,125°	r1i1p1f1
NESM3	1,865° x 1,875°	r1i1p1f1
CNRM-CM6-1	1,4° x 1,40625°	r1i1p1f2
CNRM-ESM2-1	1,4° x 1,40625°	r1i1p1f2

## 2.6. PROCESAMIENTO Y ESCALAMIENTO DE SERIES HISTÓRICAS Y FUTURAS

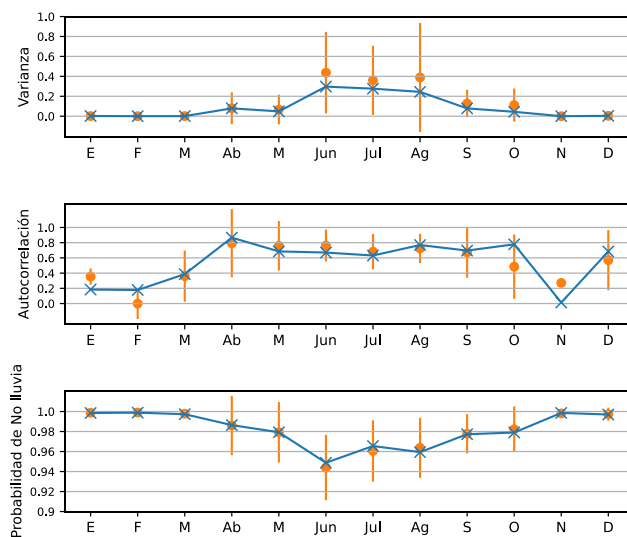
Se presenta la metodología de procesamiento y escalamiento de las series futuras, incluyendo un último paso que se debe implementar tanto para las series históricas como futuras, el cual es explicado en detalle. Una vez logrados estos pasos, se puede proceder a realizar simulaciones continuas del modelo hidrológico. A grandes rasgos, la metodología es la siguiente.

- 1) Se descargan las series, procurando ajustar las grillas en posición latitud, longitud. Luego, se realiza una desagregación espacial puntual de estas por medio de interpolación bilineal para que puedan ser asignadas a la ubicación de las estaciones históricas utilizadas en el trabajo.
- 2) Se procede a remover el sesgo de cada GCM respecto de las observaciones disponibles, mediante algún método de mapeo cuantil disponible en la librería *ClimQMBC* (Aedo et al., 2021), quedando así las series mensuales de clima histórico simulado y futuro proyectado con el sesgo corregido de forma estadística.
- 3) Si hay suficientes datos mensuales históricos, se realiza una desagregación temporal de paso mensual a diario por medio del método *k-Nearest Neighbour (kNN)*. En caso contrario, en base a las series meteorológicas históricas, se generan cientos de años de clima histórico y luego se implementa la desagregación de paso mensual a diario con *kNN*. En el presente estudio, se tuvo que realizar una generación de clima, debido a que los meses secos contienen una muestra muy pequeña de días análogos de lluvia.
- 4) Finalmente, dado el tamaño de la cuenca, su tiempo de respuesta es de tan solo horas por lo que para simular de forma adecuada la propagación del flujo es necesario disponer de información en un paso de tiempo fino (i.e. horario). Es por esto por lo que, a partir de los datos diarios disponibles, se implementaron diversas metodologías de desagregación horaria que se explican en detalle a continuación.

Para desagregar las series de temperaturas, se implementó un método basado en una descomposición de Fourier propuesto por Campbell y Norman (1998). Este asume que la temperatura mínima ocurre justo antes del amanecer y la máxima 2 horas después del paso cenital del sol. Para modelar la evapotranspiración se necesita de información de la radiación neta, para lo cual no se dispone de series extensas. Se modeló la radiación neta como el producto de una regresión no lineal, en que las variables regresoras son la temperatura y la hora del día. Los parámetros de la regresión se calibraron con datos horarios de la Estación Olmué, propiedad de la Red Agroclimática Nacional.

En cuanto a las precipitaciones, se realizó una desagregación estocástica de las series diarias en base al método de Socolofsky et al. (2001). Este considera funciones de probabilidad acumulada mensuales  $F_{mes}(d)$  de la magnitud de los distintos eventos 'd' de precipitación observados. Un evento está definido como una secuencia continua de precipitaciones horarias, separadas de otro evento por una o más horas secas. El único parámetro a calibrar del método es  $\epsilon$ , definido como la precipitación mínima para considerar que un evento es de duración una hora. Este parámetro se calibra para cada mes del año. Para calibrarlo, se utilizan los datos horarios de la Estación Olmué (cercano a 8 años de registros). Se iteró aumentando y disminuyendo el valor de  $\epsilon$ , evaluando valores de varianza, autocorrelación y probabilidad de no lluvia para cada mes.

Dado que la lluvia en periodos secos es muy escasa, se puso énfasis en lograr buenos resultados para meses húmedos, es decir, que no presenten un sesgo y estén dentro de la variabilidad natural observada (barras de error). En dicho marco, en la Figura 2 se puede ver un buen rendimiento de la varianza mensual, dentro de las barras de error de los valores observados. Cabe mencionar que existe una leve tendencia a subestimar en promedio la varianza, lo que probablemente significa una generación de tormentas más homogéneas. En cuanto a la autocorrelación en meses húmedos, se observa un buen ajuste, con variabilidad en la sobre y subrepresentación de la dependencia entre pulsos de precipitación observada para cada mes y dentro de las barras de error. La escasez de información horaria disponible, no permitió que exista un periodo de validación.



**Figura 2.** Estadísticos mensuales de la desagregación horaria de precipitaciones en comparación a series observadas. En azul valores medios mensuales de series horarias simuladas. En naranja

valores medios mensuales de series horarias observadas con sus barras respectivas de error (desviación estándar de la media).

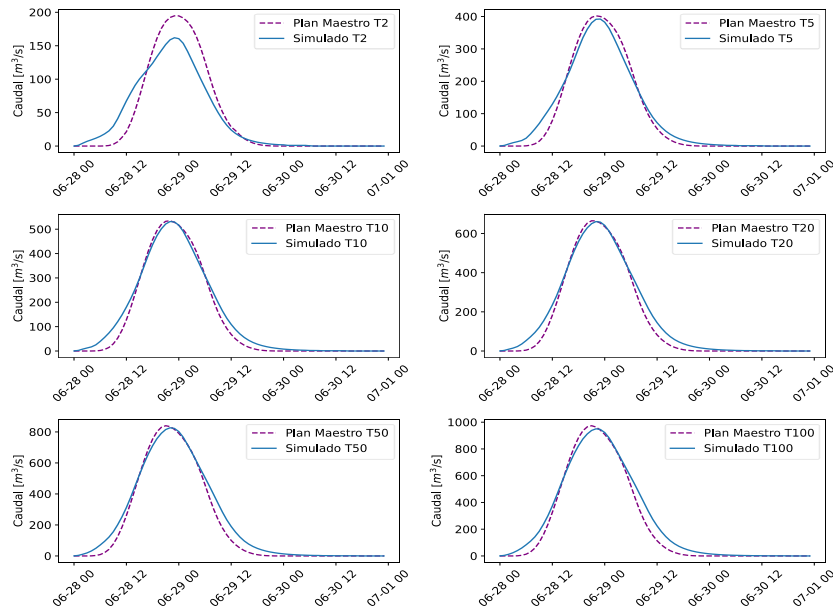
### 3. RESULTADOS

#### 3.1. COMPARACIÓN PLAN MAESTRO

Conocidos los parámetros más relevantes a modificar, se realizó la calibración de manera semi automática. La Tabla 4 muestra el desempeño del modelo para cada periodo de retorno. Se puede apreciar un muy buen ajuste para prácticamente todos los estadísticos a excepción del porcentaje de sesgo para periodos de retorno mayores o iguales a 20 años. Esto sucede principalmente, porque hay un mayor volumen de escorrentía generado que se reparte a la izquierda y derecha del *peak* del hidrograma, lo cual se puede apreciar en la Figura 3. Existe también una leve subrepresentación de los caudales máximos, que se hace evidente para los 2 años de periodo de retorno. Esta diferencia en particular, se cree que tiene relación a la construcción de modelos de distintas características, dado que no fue posible corregir mediante la calibración.

**Tabla 4.** Desempeño del modelo HEC-HMS para distintos periodos de retorno respecto de estimaciones Plan Maestro.

Periodo de Retorno	RSR	PBIAS (%)	NSE	R <sup>2</sup>
T = 2	0,3	-7,98	0,881	0,94
T = 5	0,2	4,01	0,971	0,99
T = 10	0,2	8,75	0,973	0,99
T = 20	0,2	10,34	0,968	0,99
T = 50	0,2	10,91	0,962	0,98
T = 100	0,2	10,73	0,957	0,97



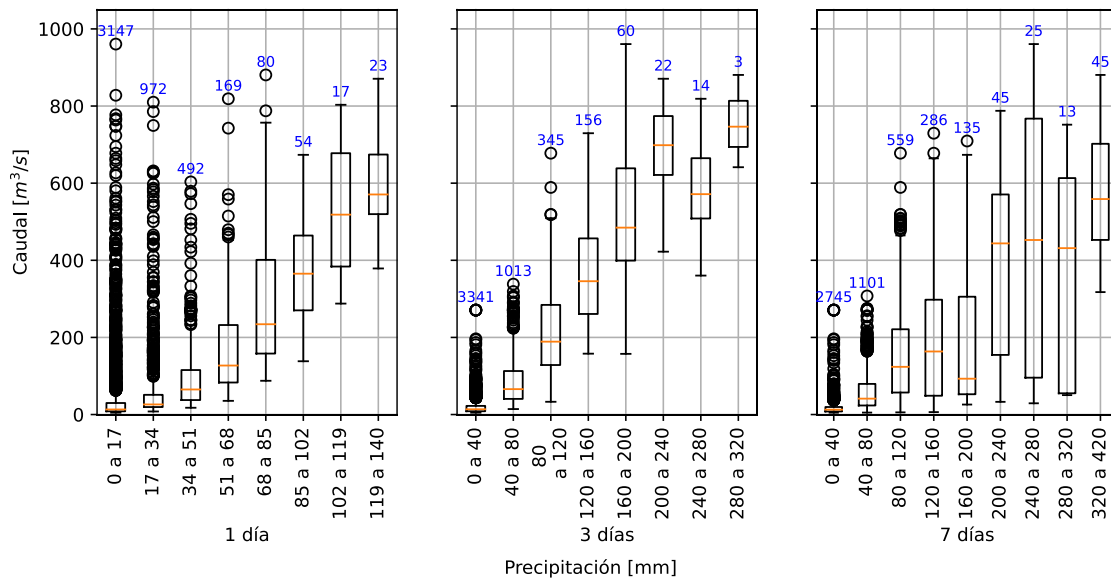
**Figura 3.** Caudales de salida Simulados vs Plan Maestro para distintos periodos de retorno.

#### 3.2. ANÁLISIS PERIODO HISTÓRICO

Para evaluar el desempeño del modelo en un continuo y poder contar con una medida de caracterización de los caudales máximos esperados según el clima histórico, se simularon 10 series de 40 años históricos (400 años en total), dado el carácter estocástico de la desagregación horaria de lluvias. Con los 400 años simulados se pueden estimar caudales de respuesta frente a distintos pronósticos, así como ajustar los caudales de distintos años de periodo de retorno asumiendo un clima estacionario. Cabe señalar que, para la consistencia de la evaluación del clima futuro, los análisis de frecuencia se harán respecto del periodo 1980-2014.

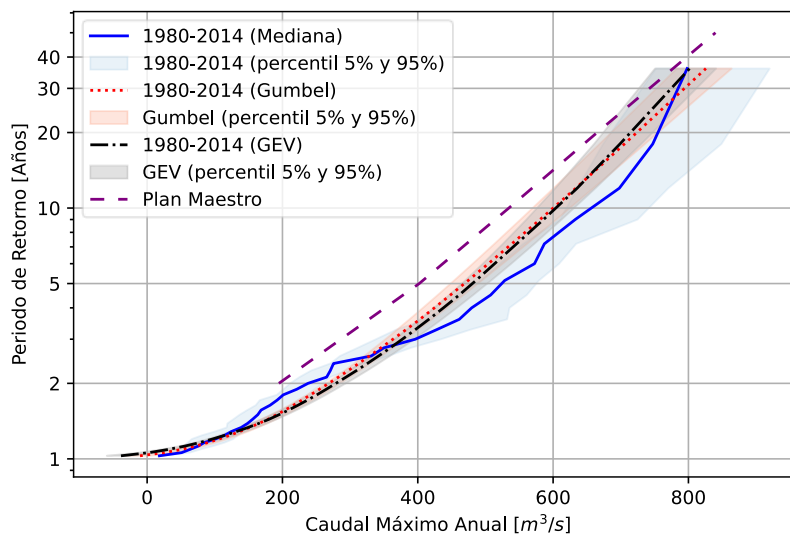
En primer lugar, se dio paso a ver la influencia de la humedad antecedente en las crecidas. El criterio utilizado para considerar una crecida como tal, es que se logre un caudal máximo diario mayor al caudal máximo medio simulado, equivalente a aproximadamente  $4,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . El segundo criterio, es que el caudal máximo diario sea mayor al del día anterior y posterior. La Figura 4 muestra la cantidad, distribución (diagrama de caja) y magnitud de crecidas asociadas a precipitaciones del mismo día, 3 días antecedentes y 7 días antecedentes. Bajo los criterios mencionados, se generaron 4954 crecidas en los 400 años simulados, de las cuales aproximadamente el 64% se relacionan con precipitaciones diarias menores a 17 mm (ver primer conjunto de diagramas de caja).

Se puede observar que, para precipitaciones del mismo día, a mayor magnitud, mayor es la crecida, lo cual es el efecto lógico. Los *outliers* probablemente se explican por crecidas que logran caudales máximos en horas de la madrugada por efecto de tormentas de altas magnitudes el día anterior. También, se ve que la mayoría de las crecidas ocurre producto de tormentas relativamente pequeñas y, por lo mismo, los caudales máximos se concentran hasta aproximadamente los  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . En el segundo conjunto de diagramas de caja, se puede ver una clara tendencia del efecto de la humedad antecedente en la magnitud esperada de las crecidas, en el cual lluvias de los 3 últimos días de mayor magnitud significan, en promedio, crecidas mayores. Para el caso de la acumulación de 7 días de lluvias (último conjunto de diagramas), dicha relación deja de ser tan clara.



**Figura 4.** Crecidas simuladas Estero Marga Marga, según precipitación acumulada de 1 (izquierda), 3 (centro) y 7 (derecha) días.

Un último análisis tiene relación con la comparación de la estimación de la recurrencia de eventos extremos simulada en el periodo histórico continuo respecto de los caudales sintéticos estimados por el Plan Maestro según un enfoque de simulación por eventos (Ver Figura 5). Se puede observar en primer lugar que, para periodos de retorno menores a 40 años, los caudales simulados son mayores a los del Plan Maestro. Luego, se ve una estimación de caudales mayores por parte del Plan Maestro, respecto de los cuales no se tiene una estimación empírica, dado que el continuo histórico corresponde a 35 años. Realizando 2 ajustes de probabilidad distintos (Gumbel y Valores Extremos Generalizados (GEV)) y estimando sus parámetros con el método de los momentos, se evalúa la similitud con el Plan Maestro. El modelo Gumbel estima caudales similares al Plan Maestro desde los 5 años de periodo de retorno y tiene un buen ajuste con aquellos valores que no se pueden estimar de forma empírica ( $> 40$  años). Por su parte, el modelo GEV ajusta mejor a la curva empírica, pero para estimaciones sobre los 40 años de periodo de retorno, sobreestima aquellos calculados en el Plan Maestro.

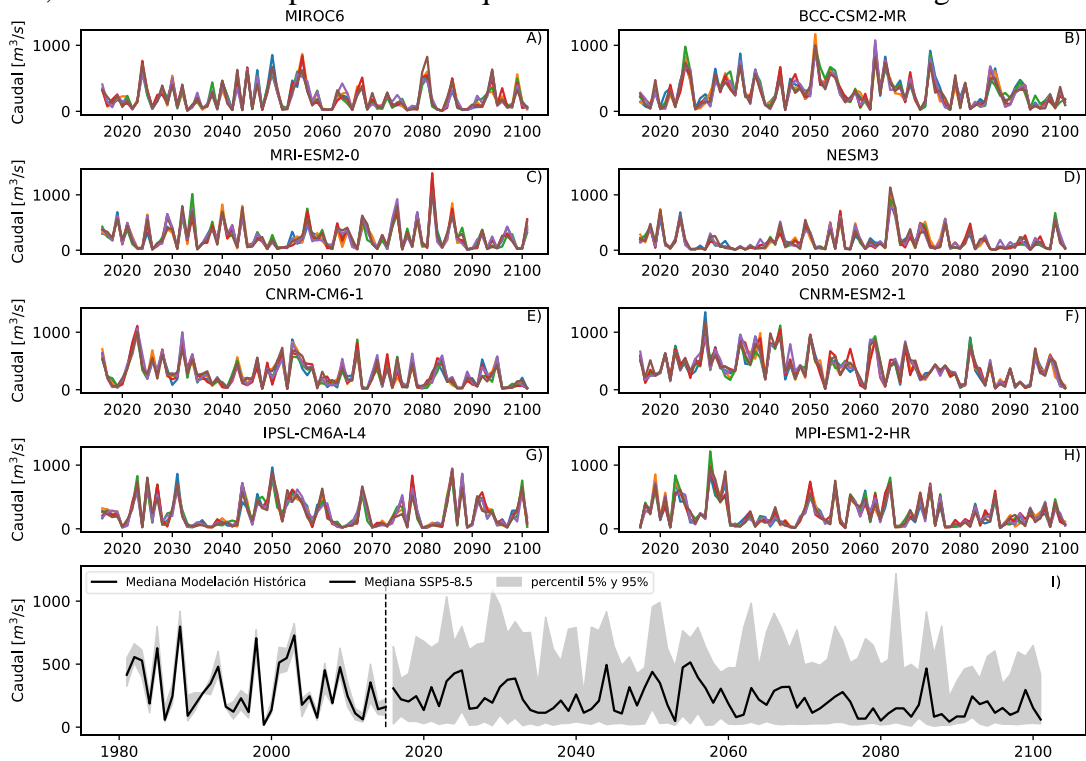


**Figura 5.** Probabilidad de no excedencia caudales máximos Estero Marga Marga según Plan Maestro, análisis empírico, ajuste Gumbel y ajuste GEV.

### 3.3. ANÁLISIS PERIODO FUTURO Y NO ESTACIONARIEDAD

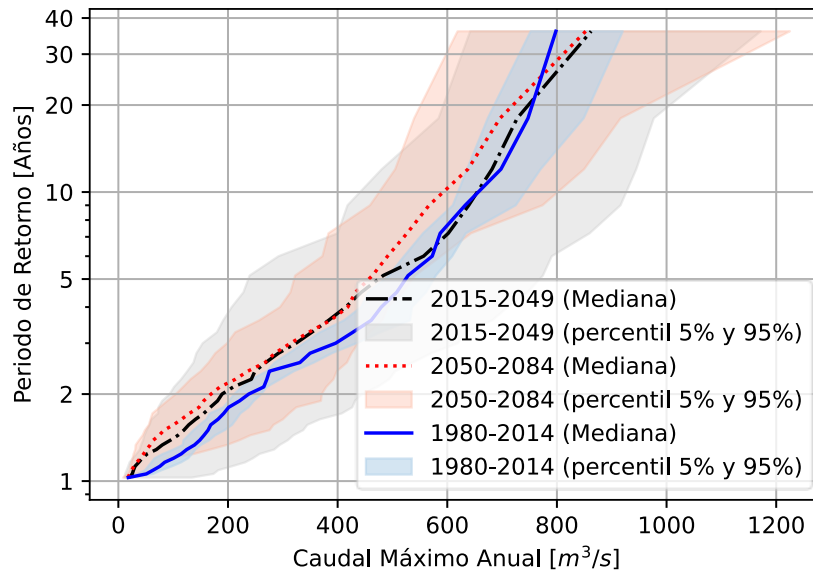
Se simularon 6 series de 85 años (2015-2100) para cada modelo completando un total de 48 simulaciones, bajo el escenario SSP5-8.5. Con esto, se pretende incorporar la incertidumbre de la desagregación horaria e incorporar la incertidumbre respecto de lo que proyecta cada modelo. La Figura 6 da cuenta de lo recién mencionado, en donde las primeras 8 series (A-F) corresponden a las respectivas 6 simulaciones hidrológicas de cada GCM. Finalmente, en el panel I se puede observar una serie continua que incluye la modelación histórica de caudales máximos anuales incorporando su incertidumbre (sombra gris) y la mediana de los caudales máximos anuales proyectados y su incertidumbre (sombra gris). Un primer elemento que cabe tomar en consideración, es que la incertidumbre que se le puede atribuir a la modelación estocástica de precipitaciones es pequeña en comparación a aquella que proviene de las proyecciones climáticas de cada GCM. Por otro lado, si sólo se considera la mediana de las proyecciones de caudales, se nota una disminución en el promedio de los caudales máximos anuales y también de los máximos

caudales máximos anuales. Sin embargo, al considerar la incertidumbre, existe la posibilidad de ocurran eventos de mayor magnitud en el futuro, a pesar de la disminución de la precipitación promedio, así como existe la posibilidad de que los caudales máximos anuales sigan disminuyendo.



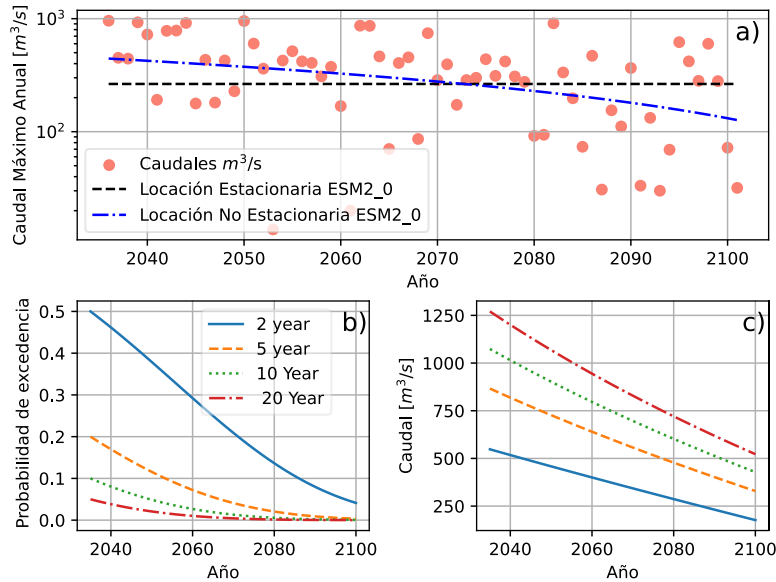
**Figura 6.** Proyecciones (y su incertidumbre) de caudales máximos anuales escenario SSP5-8.5. Letras A-H corresponden a las 6 series de simulaciones realizadas para cada modelo, mientras que I representa el continuo incorporando todos los modelos.

La Figura 7 busca dar cuenta del cambio en la frecuencia de la magnitud de eventos de caudales máximos anuales considerando 3 series estacionarias de 35 años de duración. Se considera la modelación histórica (1980-2014), la proyección futura en un horizonte intermedio (2015-2049) y la proyección futura en un horizonte lejano (2050-2084), realizando un ajuste de frecuencia empírico. Las curvas de no excedencia en todos los escenarios consideran la incertidumbre (percentiles 5 y 95), que reside en el eje x, es decir, para cada probabilidad de no excedencia hay un rango de caudales posibles. Nuevamente, se puede ver que la incertidumbre propia de la desagregación de precipitaciones no es muy alta (sombra celeste). Por otro lado, se ve que, para el horizonte de tiempo intermedio, la incertidumbre respecto de los caudales máximos anuales proyectados es muy grande (sombra gris), aunque la mediana es bastante similar al resultado de la modelación histórica. En particular, desde aproximadamente los 5 años de periodo de retorno en adelante, las curvas son prácticamente las mismas. En cuanto al horizonte lejano, se puede ver una reducción de la incertidumbre de los modelos (sombra roja), en la cual la posibilidad de caudales mayores para distintos periodos de retorno disminuye hasta aproximadamente los 20 años. Luego, la incertidumbre es similar a la del horizonte intermedio. Sumado a esto, la mediana de las proyecciones se aleja más de la curva empírica de la modelación histórica, proyectando para todos los periodos de retorno, caudales menores. La excepción son los caudales esperados para eventos extremos sobre los 20 años de periodo de retorno, en donde las 3 curvas son bastante similares.



**Figura 7.** Frecuencia (y su incertidumbre) caudales máximos anuales históricos y proyecciones escenario SSP5-8.5.

Finalmente, se exploró la realización de un análisis no estacionario de la frecuencia de los caudales máximos anuales proyectados para cada simulación de cada GCM (i.e. 48 ajustes). Para esto, se estimaron los parámetros de una función GEV no estacionaria por medio del método de máxima verosimilitud, según un enfoque de bloque máximo (Salas et al., 2018), en el cual solo el parámetro de forma se mantiene constante. Los parámetros de locación y escala varían según el tiempo y la función objetivo consiste en minimizar la máxima verosimilitud, a través de un método numérico (El Adlouni et al. 2007). En este trabajo se utilizó el algoritmo *Sequential Linear-Quadratic Programming (SLQP)*. Para cada simulación de cada modelo se optimizaron los parámetros y se realizó un *test* de radio de verosimilitud, estimando el estadístico de desviación  $D$  (Salas et al., 2014). Se compara la verosimilitud del ajuste estacionario de los parámetros *versus* el no estacionario. Bajo esta lógica, solo se identifican 2 GCM en los cuales para un nivel de confianza del 95%, el ajuste no estacionario es estadísticamente más adecuado en todas las simulaciones. Para visualizar las implicancias de considerar un enfoque no estacionario y siguiendo lo propuesto por Salas y Obeyesekera (2014), la Figura 8 muestra la evolución del parámetro de locación para una simulación del modelo CNRM-ESM2-1, así como el cambio en la probabilidad de excedencia del caudal de 2, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno estimado en el año 2030 y el cambio en la estimación del caudal de 2, 5, 10 y 20 años de periodo de retorno en el tiempo, dada la parametrización no estacionaria. Se puede observar que hacia el final del siglo es más frecuente la presencia de caudales máximos anuales menores a los  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  (a), lo que es consistente con la disminución detectada en el parámetro de locación, que tiene como consecuencia que la probabilidad de excedencia del mismo caudal de cierta recurrencia estimado el año 2030, tienda a disminuir (b). Lo mismo se ve en la evolución de las estimaciones de caudales para distintos periodos de retorno (c). De todos modos, no se debe ignorar que los caudales máximos anuales estimados desde 2030 hasta aproximadamente 2060 serían mayores que aquellos estimados en la modelación histórica de forma estacionaria.



**Figura 8.** Evolución del parámetro de locación (a), de distintos periodos de retorno (b) y de caudales según un mismo periodo de retorno (c), de acuerdo con análisis no estacionario para proyecciones de caudal del modelo CNRM-ESM2-1.

#### 4. CONCLUSIÓN

Contar con herramientas para poder caracterizar y predecir el comportamiento de crecidas es fundamental en cuencas altamente urbanizadas, dado el mayor riesgo de inundación asociado que tienen. En particular, la cuenca de estudio, Estero Marga Marga, tiene un tiempo de respuesta de tan solo horas y, además, en su cauce se desarrollan distintos usos comerciales y de esparcimiento. En este trabajo se desarrolló un modelo continuo en el *software* HEC-HMS para analizar las crecidas que se generan a la salida de la cuenca en cuestión. Se utilizaron series de precipitación, temperatura y radiación desagregadas en un paso horario, en base a mediciones históricas diarias y Modelos de Circulación Global (GCMs) con series históricas y de clima futuro bajo el escenario SSP5-8.5. Se analizó la ocurrencia de crecidas, relacionadas a precipitaciones del mismo día y de días anteriores como condición de humedad antecedente. Se analizó también las crecidas máximas bajo el clima histórico actual y bajo cambio global futuro, desde una perspectiva estacionaria y no estacionaria. Las principales conclusiones obtenidas de la presente investigación son:

- El modelo hidrológico construido en HEC-HMS es capaz de reproducir con un buen ajuste las tormentas de diseño del Plan Maestro, en donde para 10 años de periodo de retorno obtuvo los siguientes estadísticos de bondad de ajuste:  $RSR = 0,2$ ;  $PBIAS = 8,75\%$  y  $NSE = 0,973$ . Cabe señalar que el Plan Maestro es también un modelo sujeto a errores, por lo que otra alternativa de calibración del modelo podría ser a partir de cuencas observadas vecinas, lo que es una práctica común en la estimación de caudales para cuencas sin control fluviométrico. El escenario ideal sería que ocurra la instalación de una estación de medición de flujo cercana a la salida de la cuenca para poder recalibrar el modelo.
- Tanto para 1 y 3 días acumulados de precipitación se ve una clara relación entre mayores magnitudes que generan crecidas más grandes. Para 7 días es menos clara la relación, teniendo alta variabilidad. Si se puede aseverar, que hay influencia de la saturación del suelo precedente en los caudales resultantes.

- Bajo un escenario de clima futuro de baja mitigación y continuo aumento de emisiones (SSP5-8.5), la incertidumbre de los modelos es alta, pero se ve un claro descenso en la mediana de las proyecciones tanto de los caudales medios como en caudales máximos esperados. No obstante, para periodos de retorno sobre los 5 años la diferencia se hace más pequeña bajo un análisis de frecuencia estacionario empírico de un horizonte de tiempo medio y lejano comparado con el periodo de referencia (1980-2014).
- Un análisis de frecuencia no estacionario no es recomendable para todas las simulaciones. Solo 2 modelos muestran un mejor ajuste estadístico al utilizar este enfoque en todas sus simulaciones. En el ejemplo presentado de una simulación del modelo CNRM-ESM2-1, es clara la reducción de los caudales máximos hacia el final del siglo. Sin embargo, la incertidumbre y el comportamiento de la variabilidad de los resultados obtenidos con los distintos modelos, lleva a la conclusión de que para esta cuenca no es recomendable evaluar el riesgo de esta manera.
- Tomando en cuenta los resultados obtenidos respecto de las proyecciones de condiciones climáticas futuras se observa que, a pesar de la reducción en condiciones medias, seguirían existiendo eventos extremos que puedan afectar de forma negativa el entorno urbano de la cuenca, por lo que es recomendable incorporar estos resultados en un modelo hidráulico para tomar decisiones de diseño adecuadas.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por CIGIDEN (Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres). Agradecemos también a CEDEUS (Centro de Desarrollo Urbano Sostenible).

## REFERENCIAS

- Aedo, S., Chadwick, C., González-Leiva, F., and Gironás, J. (2021). climQMBC a new package to Bias Correct Climatic Variables While Preserving raw GCM Changes in the Mean and Standard Deviation For R, Python and Matlab. American Geophysical Union fall meeting, 2021.
- Alaska Satellite Facility (2022) *ASF Data Search*. Obtenido de ASF Data Search: <https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=11.355&center=-71.400,-33.110>
- Aryal, A., Shrestha, S., & Babel, M. S. (2018). Quantifying the sources of uncertainty in an ensemble of hydrological climate-impact projections. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1-2), 193-209. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2359-3>
- Assis, L., Barbosa, J., Fernandes & A., Lima, A. (2019). The influence of spatial discretization on HEC-HMS modeling: a case study. *International Journal of Hydrology*, 442-449.
- Azmat, M., Choi, M., Kim, T., & Liaqat, U. W. (2016). Hydrological modeling to simulate streamflow under changing climate in a scarcely gauged cryosphere catchment. *Environmental Earth Sciences*, 75(3). <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5059-2>
- Badriana, M. R. & Lee, H. S. (2021). Multimodel Ensemble Projections of Wave Climate in the Western North Pacific Using CMIP6 Marine Surface Winds. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 835. <https://doi.org/10.3390/jmse9080835>
- Bennett, T. (1998). *Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hec-HMS*. (M.S. Thesis). University of California, California.
- Bruce, M. (2010). Guidelines for continuous simulation of streamflow in Johnson County Kansas with Hec-HMS. *Johnson County public works and infrastructure stormwater management program*. University of Kansas, Department of Civil Environmental and Architectural Engineering.
- Campbell, G., y Norman, J. (1998). *An introduction to environmental biophysics* (2a ed.). NY: Springer-Verlag.

- Chadwick, C., Gironás, J., Vicuña, S., Meza, F., and McPhee, J. (2018) Using a Statistical Pre-Analysis Approach as an Ensemble Technique for the Unbiased Mapping of GCM Changes to Local Stations. *Journal of Hydrometeorology*, 19(9), 1447-1465
- El Adlouni, S., et al., 2007. Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model. *Water Resources Research*, 43 (3), 1–13. doi:10.1029/2005WR004545
- Fleming, M., y Neary, V. (2004). Continuous hydrologic modeling study with hydrologic modeling system. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(3), 175-183.
- García, A. J., Sainz, Á., Revilla, J. A., Álvarez, C., Juanes, J. A., & Puente, A. (2008). Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain. *Journal of Hydrology*, 356(3-4), 312-326. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.019>
- Golder. (2019). Estudio de Impacto Ambiental: Saneamiento del terreno las salinas. Valparaíso.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. En: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.
- Lanzante, J. R., Adams-Smith, D., Dixon, K. W., Nath, M., and Whitlock, C. E. (2020) Evaluation of some distributional downscaling methods as applied to daily maximum temperature with emphasis on extremes. *International Journal of Climatology*, 40, 1571–1585
- Lobanova, A., Liersch, S., Nunes, J. O. R., Didovets, I., Stagl, J., Huang, S., Koch, H., Del Rocío Rivas López, M., Maule, C. F., Hattermann, F. F., & Krysanova, V. (2018). Hydrological impacts of moderate and high-end climate change across European river basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 18, 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.05.003>
- López, M. I. (2006) *Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación a una cuenca mediterránea*. [Proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Cartagena]. [https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis\\_pfc/PFC\\_MinmaculadaLopez\\_2006.PDF](https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/PFC_MinmaculadaLopez_2006.PDF)
- Ogden, F. L., Garbrecht, J., Debarry, P. A., and Maidment, A. R. (2001). “GIS and distributed watershed models II: Modules, interfaces, and models.” *J. Hydrol. Eng.*, 6(6), 515–523.
- Poggio, L., de Sousa, L. M., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Kempen, B., Ribeiro, E. & Rossiter, D. (2021). SoilGrids 2.0: producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty. *SOIL*, 7(1), 217-240. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Salas, J. D., & Obeysekera, J. (2014). Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), 554-568. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)he.1943-5584.0000820](https://doi.org/10.1061/(ASCE)he.1943-5584.0000820)
- Salas, J. D., Obeysekera, J. & Vogel, R.M (2018) Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 63:3, 325-352, DOI: 10.1080/02626667.2018.1426858
- Shen, M., Chen, J., Zhuan, M., Chen, H., Xu, C., & Xiong, L. (2018). Estimating uncertainty and its temporal variation related to global climate models in quantifying climate change impacts on hydrology. *Journal of Hydrology*, 556, 10-24. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.004>
- Singh, W. R. & Jain, M. K. (2015). Continuous Hydrological Modeling using Soil Moisture Accounting Algorithm in Vamsadhara River Basin, India. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*, 4(4), 398-408. <https://doi.org/10.5963/jwrhe0404011>
- Socolofsky, S., Adams, E. E., y Entekhabi, D. (2001). Disaggregation of daily rainfall for continuous watershed modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(1), 300-309.
- US Army Corps of Engineers (USACE). (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS. Technical reference manual*. Hydrologic Engineering Center.
- Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., & Weingartner, R. (2009). Continuous Simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part II: Parameter regionalization and flood estimation results. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 208-225. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.022>