


UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

# Análisis de la oferta natural de recursos hídricos en la Isla Robinson Crusoe, comuna de Juan Fernández

Memoria de Título presentada por

**Esteban Andres Hinostroza Lambert**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía
Álvaro Humberto Ossandón Álvarez

NOVIEMBRE, 2025

# CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

**1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO**

**Tipo de monografía (marcar una opción):** x Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** Análisis de la oferta natural de recursos hídricos en la Isla Robinson Crusoe, comuna de Juan Fernández.

**Nombre del candidato(a):** Esteban Andres Hinostroza Lambert.

**Carrera / Grado:** Ingeniería Civil.

**Campus:** Casa Central **Departamento:** Obras Civiles.

**2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS**

Yo, Álvaro Humberto Ossandón Álvarez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

**3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)**

X El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**

_____

_____

_____

**4.- FIRMAS**

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

**Fecha:** 03/11/2025 **Firma:** _____

**Estudiante o Candidato(a):**

**Fecha:** 03/11/2025 **Firma:** _____

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

# AGRADECIMIENTOS

Es difícil poder resumir tanta gratitud a todo este proceso. En primer lugar quiero agradecer a toda mi familia, desde mis abuelos que ya no están en este mundo y se han convertido en los grandes gestores de las nuevas generaciones hasta mis primos que siempre hemos sido muy unidos, todos han sido un gran apoyo tanto físico como mental. Quiero agradecer a mi madre por enseñarme la valentía y coraje que existe dentro de uno, ya que, aunque todo se ponga cuesta arriba, siempre es posible salir adelante. Gracias por ser mi lugar seguro y acompañarme siempre que lo he necesitado, gracias por cuidarme, por comprenderme y escucharme. Agradecer a mi padre, mi ídolo, que ha sido un ejemplo desde que soy niño. Gracias por enseñarme el fútbol, una gran pasión que nos une, por llevarme a cada partido, por pasar frío, calor y hambre con tal sólo de estar ahí gritando para que los delanteros no me pasen jajaja. Gracias a los dos por no dejarnos solos nunca y darnos la educación y calidad de vida que tenemos hoy en día. Agradecer a mi hermano que ha sido un compañero de vida desde que tenemos memoria, gracias por acompañarme siempre en mis locuras y estar siempre para mi. Gracias por bancarme en todas... sabes que siempre puedes contar conmigo, en las buenas, en las malas y en las peores.

Por otro lado, me siento muy afortunado de la vida que llevo y las personas que me rodean. Mis amigos han tomado un rol fundamental, sobretodo cuando uno está lejos de casa, gracias a cada uno de ustedes. Gracias al equipo de voleibol de la universiad que desde que ingresé me recibieron de la mejor forma posible en donde he crecido tanto como persona como deportista. No dejen que la pelota caiga.

Ademas, quiero agradecer a la Ilustre Municipalidad de Juan Fernández, a sus colaboradores y a los profesores del departamento que han sido un apoyo enorme, sin la oportunidad que se dio de esta investigación, no estaría donde estoy hoy en día.

Quiero agradecer a mi compañera de vida durante estos últimos años. Sin duda ha sido de lo mejor que me ha pasado en mucho tiempo, me abriste los ojos y mi vida giró en 180 grados para mejor, sos el paisaje más soñado. Gracias por estar siempre para mí por apoyarme, por darme amor y cariño y ser un apoyo fundamental durante este proceso, sin ti esto no sería posible. Gracias por cada cariño, por cada mimo, por cada olor y por todo lo que se viene... esto sólo es el comienzo.

Finalmente, quiero agradecerme a mi "yo" del pasado, por no bajar los brazos nunca, por nunca permitir rendirme por más feo que se ponga todo. Haz crecido enormemente desde que te fuiste de tu pequeña ciudad en el sur, con una maleta llena de sueños forjando tu propio camino. Todo ha valido la pena, nunca dejes de soñar.

*Gracias totales,*

**Esteban Hinostroza.**

## Resumen

La Isla Robinson Crusoe, ubicada en la comuna de Juan Fernández (Chile), enfrenta una disponibilidad hídrica limitada y altamente variable, condicionada por su relieve abrupto, su aislamiento geográfico, la escasez de registros meteorológicos y la vulnerabilidad frente al cambio climático. Este estudio evalúa la oferta natural de recursos hídricos mediante la aplicación de dos modelos hidrológicos conceptuales (SAC-SMA y TUW), calibrados en la cuenca continental del río Cauquenes y transferidos a la isla mediante regionalización de parámetros a través del índice de disimilitud. Se integraron registros históricos, productos satelitales IMERG y bases climáticas del CR2, permitiendo simular caudales en ausencia de observaciones locales. Los resultados muestran que ambos modelos, calibrados con la métrica KMoments, lograron un buen desempeño, reproduciendo adecuadamente la variabilidad temporal de los caudales. En la isla, las simulaciones evidencian un régimen marcadamente estacional, con mayores aportes entre abril y octubre y una reducción significativa en verano. Además, el análisis de tendencias reveló disminuciones estadísticamente significativas tanto en los períodos parciales evaluados como en la serie completa, lo que confirma una reducción progresiva de la oferta hídrica. Estos hallazgos refuerzan la condición de vulnerabilidad de la isla ante sequías y eventos extremos, aportando evidencia científica relevante para la gestión y planificación del recurso hídrico.

*Palabras claves*: modelación hidrológica, regionalización, recursos hídricos, Robinson Crusoe, SAC-SMA, TUW.

## Abstract

Robinson Crusoe Island, part of the Juan Fernández Archipelago (Chile), faces limited and highly variable freshwater availability due to its steep topography, geographic isolation, scarce meteorological records, and climate change vulnerability. This study assesses the island's natural water supply using two conceptual hydrological models (SAC-SMA and TUW), calibrated in the continental Cauquenes River catchment and transferred to the island through parameter regionalization based on a dissimilarity index. Historical records, IMERG satellite products, and CR2 climate datasets were integrated to simulate streamflows in the absence of local observations. Results indicate that both models, calibrated with the KMoments metric, achieved good performance, accurately reproducing streamflow variability. On the island, simulations revealed a strongly seasonal regime, with flows concentrated between April and October and marked reductions during summer. Furthermore, trend analysis showed statistically significant negative tendencies in both partial periods and the full record, confirming a progressive reduction in water availability. These findings highlight the island's vulnerability to droughts and extreme events, providing critical scientific evidence to inform resilient and sustainable water resource management under climate change scenarios.

*Keywords*: hydrological modeling, regionalization, water resources, Robinson Crusoe, SAC-SMA, TUW.

## Glosario de variables

- $T$: Temperatura (°C)
- $P$: Precipitación (mm)
- $Q$: Caudal ($m^3/s$)
- $IA$: Índice de aridez
- $PA$: Precipitación media anual (mm)
- $TA$: Temperatura media anual (°C)
- $CC$: Coeficiente de compacidad.
- $PM$: Pendiente media.
- $S_{i,j}$: Índice de disimilitud
- $ETP$: Evapotranspiración potencial
- $n$: Número de observaciones.
- $X_{s,i}$: Variable simulada en el tiempo $i$.
- $X_{o,i}$: Variable observada en el tiempo $i$.
- $\overline{X_o}$: Promedio de las observaciones.
- $r$: Coeficiente de correlación de Pearson entre los valores simulados y observados, para KGE.
- $\beta$: Relación entre las medias de los valores simulados y observados.
- $\gamma$: Relación entre las desviaciones estándar de los valores simulados y observados.
- $w_i$: Pesos asignados a cada métrica.
- $c_1$: Coeficiente de correlación de Pearson entre las series simuladas y observadas, para KMoments.
- $c_2$: Relación de dispersión ponderada.
- $c_3$: Relación entre las medias de las series simuladas y observadas.
- $Sesgo$: Sesgo.
- $\hat{X}_i$: Valor estimado.
- $X_i$: Valor observado.
- $\overline{\hat{X}}$: Media de los valores estimados.
- $RMSE$: Error cuadrático medio.
- $e_i = \hat{X}_i - X_i$: Error para cada observación.

- $\overline{e}$: Media de los errores $e_i$.
- $S$: Estadístico de prueba de Mann-Kendall.
- $\hat{\beta}$: estimador de Theil-Sen.

## Glosario de siglas

- TUW: Technische Universität Wien Hydrological Model.
- IREN: Intituto de Investigación de Recursos Naturales.
- CORFO: Corporación de Fomento de la Producción.
- DGA: Dirección General de Aguas.
- IMERG: Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM.
- NASA: National Aeronautics and Space Administration.
- CIREN: Centro de Información de Recursos Naturales.
- IDW: Inverse Distance Weighting.
- DEM: Digital Elevation Model.
- SRTM: Shuttle Radar Topography Mission.
- QGIS: Quantum Geografic Information System.
- DMC: Dirección Meteorológica de Chile.
- CR2: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia
- IQR: Rango intercuartil.
- SAC-SMA: Sacramento Soil Moisture Accounting Model.
- NWS: National Weather Service.
- SCE-UA: Shuffled Complex Evolution – University of Arizona.
- TUW: Tübingen University Water Balance Model.
- NSE: Eficiencia de Nash-Sutcliffe.
- KGE: Eficiencia Kling-Gupta.
- KMoments: Knowable Moments.
- F.O: Función objetivo.

# Índice

**Resumen** **2**

**Abstract** **2**

**Glosario de variables** **3**

**Glosario de siglas** **5**

**1. Introducción** **10**

**2. Objetivos** **11**
2.1. Objetivo general . . . . . 11
2.2. Objetivos específicos . . . . . 11

**3. Zona de estudio** **11**
3.1. Antecedentes . . . . . 11
3.2. Imágenes satelitales . . . . . 13
3.3. Bases de datos . . . . . 14
3.4. Caracterización climatológica . . . . . 15
3.4.1. Temperatura (T) . . . . . 15
3.4.2. Precipitación (P) . . . . . 16

**4. Métodos** **20**
4.1. Índice de disimilitud . . . . . 20
4.2. Modelo SAC-SMA . . . . . 20
4.3. Modelo TUW . . . . . 22
4.4. Criterios de eficiencia de calibración . . . . . 23
4.4.1. Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) . . . . . 23
4.4.2. Índice de Eficiencia Kling-Gupta (KGE) . . . . . 24
4.4.3. Índice KGE(Q) + NSE(log(Q)) . . . . . 25
4.4.4. Índice KMoments . . . . . 26
4.5. Métricas de perfomance . . . . . 26
4.6. Análisis de tendencia . . . . . 28

**5. Resultados** **29**
5.1. Selección de cuenca donante . . . . . 29
5.2. Calibración y validación de modelos en cuenca donante . . . . . 30
5.3. Simulación en Isla Robinson Crusoe . . . . . 34
5.4. Caracterización fluviométrica de la isla . . . . . 37
5.5. Análisis de tendencias . . . . . 38

**6. Análisis y discusión de resultados** **40**
6.1. Calibración en cuenca donante . . . . . 40
6.2. Simulaciones en la Isla Robinson Crusoe . . . . . 41

**7. Conclusiones y recomendaciones** **44**

**A. Caudales Simulados en Isla Robinson Crusoe** **48**

**B. Caudales medios historicos** **52**

**C. Analisis de tendencias por captación** **52**

# Índice de tablas


1. Caracterización precipitación total anual - Estación J. Fernández. . . . . 17
2. Precipitación entre 1992-1995 en la Isla Robinson Crusoe. Fuente: Cereceda et al. (1996) 19
3. Parámetros del modelo SAC-SMA. Fuente: Liang et al. (2001) . . . . . 22
4. Parámetros del modelo TUW. Fuente: Parajka et al. (2007) . . . . . 23
5. Criterios de evaluación de rendimiento del NSE. Fuente: Ritter y Muñoz-Carpena (2013) 24
6. Criterios de evaluación de rendimiento del KGE. Fuente: Kling et al. (2012) . . . . . 25
7. Cuencas candidatas. . . . . 29
8. Valores de cada función objetivo de los modelos SAC-SMA y TUW. . . . . 31
9. Métricas de performance - Modelo SAC-SMA. . . . . 32
10. Métricas de performance - TUW Model. . . . . 33
11. Parámetros calibrados de los modelos SAC-SMA y TUW. . . . . 34
12. Áreas y coordenadas de las captaciones de agua. . . . . 35
13. Factor de ponderación. . . . . 35
14. Estadísticas de captaciones. . . . . 37
15. Tendencias de precipitación por período. . . . . 39
16. Tendencias de temperatura por período. . . . . 39
17. Tendencias de caudales por métrica, período y modelo hidrológico. . . . . 39

B.1. Caudales medios históricos ($m^3/s$) - Calibración. . . . . 52

C.1. Tendencias de métricas hidrológicas por período y modelo - Captación El Guindal. . 52
C.2. Tendencias de métricas hidrológicas por período y modelo - Captación Damajuana. . 53
C.3. Tendencias de métricas hidrológicas por período y modelo - Captación Juan Bueno. . 54
C.4. Tendencias de métricas hidrológicas por período y modelo - Captación Cortafuegos. . 55

# Índice de figuras


1. Relieve sector Bahía Cumberland. Fuente: Aquaterra (2025). . . . . 12
2. Captaciones de agua. Fuente: Aquaterra (2025). . . . . 13
3. Estaciones DMC - Isla Robinson Crusoe. . . . . 14
4. Grilla de puntos IMERG. . . . . 15
5. Temperatura media anual - Estación J. Fernández. . . . . 16
6. Variación mensual de temperatura. . . . . 16
7. Precipitación total anual - Estación J. Fernández. . . . . 17
8. Boxplot - Precipitación total mensual IMERG 2x2 y DMC. . . . . 18
9. Densidad de frecuencia - Precipitación total mensual IMERG 2x2 y DMC. . . . . 18
10. Estaciones de muestreo. Fuente: Cereceda et al. (1996) . . . . . 19
11. Interpolación IDW - Datos IMERG. . . . . 19
12. Diagrama conceptual de flujo del modelo SAC-SMA y representación esquemática de la salida del modelo. Fuente: NOAA NWS (2002). . . . . 21
13. Comparación variables climatológicas. . . . . 30
14. Índice de disimilitud. . . . . 30
15. Caudales cuenca donante - SAC-SMA. . . . . 31
16. Caudales cuenca donante - TUW. . . . . 32
17. Curvas de variacion estacional de caudal. . . . . 33
18. Caudales captación Carbonera - KMoments y NSE. . . . . 36
19. Curvas de variación estacional. . . . . 38
20. Curvas de duración de caudales. . . . . 38
21. Variabilidad estacional por captación. La línea negra segmentada corresponde a la demanda de agua para consumo humano de la isla. . . . . 42
22. Crecida N°5. . . . . 43

A.1. Caudales simulados - KMoments . . . . . 48
A.2. Caudales simulados - KGE. . . . . 49
A.3. Caudales simulados - NSE. . . . . 50
A.4. Caudales simulados - KGE_logNSE. . . . . 51

# 1. Introducción

Las islas oceánicas constituyen territorios particularmente sensibles desde el punto de vista ambiental, ya que su aislamiento geográfico, la limitada disponibilidad de recursos naturales y la alta vulnerabilidad frente a impactos climáticos y antrópicos configuran entornos frágiles donde las dinámicas ecológicas, sociales y económicas se pueden ver afectadas, provocando riesgos elevados (Nurse et al., 2014). Bajo este contexto, la Isla Robinson Crusoe, ubicada a 670 km de la costa continental de Chile, representa un caso paradigmático de estas problemáticas, donde la gestión de los recursos hídricos resulta crucial para garantizar la sostenibilidad de su población y ecosistema.

Con una superficie de 47.7 $km^2$ y una población estimada de aproximadamente 1.000 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas (INE), 2018), concentrados principalmente en el poblado de San Juan Bautista, la isla presenta condiciones geográficas y climáticas que dificultan considerablemente la administración de sus recursos hídricos. Su relieve volcánico, compuesto por suelos delgados y de baja permeabilidad, la ausencia de cursos fluviales permanentes y la limitada capacidad de almacenamiento subterráneo complican significativamente la captación y el resguardo del recurso hídrico (IREN & CORFO, 1982).

La precipitación, principal fuente de agua dulce en la isla, se caracteriza por una alta variabilidad espacial y estacional (Marzol et al., 1996), lo que da lugar a zonas semiáridas que contrastan con sectores de mayor pluviometría. Esta heterogeneidad genera discontinuidades en la disponibilidad del recurso, especialmente durante los períodos de sequía, afectando no solo el consumo humano, sino también actividades económicas como la pesca artesanal y la ganadería de subsistencia, así como el equilibrio ecológico de los sistemas naturales (Cereceda et al., 1996).

Además de esta compleja realidad, la infraestructura de abastecimiento hídrico presenta un estado de precariedad estructural y operativa. El sistema actual depende mayoritariamente de captaciones superficiales en quebradas como Villagra, Juanango y Dama Juana, cuyos caudales son estacionales y altamente sensibles a los eventos extremos, evidenciando una baja capacidad de regulación, deficiencias en las redes de conducción y una limitada cobertura territorial, lo cual incrementa la vulnerabilidad del sistema ante la creciente incertidumbre climática (Ilustre Municipalidad de Juan Fernández, 2025).

Asimismo, la escasez y fragmentación de registros meteorológicos limita considerablemente la posibilidad de caracterizar con precisión el régimen hidrológico local. En la actualidad, la isla cuenta con solo dos estaciones meteorológicas (Juan Fernández y La Punta), cuyos registros son incompletos o discontinuos. Esta carencia, sumada a la complejidad topográfica y la variabilidad climática, hace imprescindible el uso de enfoques metodológicos que permitan modelar con mayor fidelidad el comportamiento del recurso hídrico.

Diversas investigaciones han propuesto soluciones innovadoras para superar estas limitaciones. Por ejemplo, estudios desarrollados por la Dirección General de Aguas (DGA) y la Universidad de Chile (2022) destacan el uso de técnicas de regionalización hidrológica, mediante las cuales es posible transferir parámetros desde cuencas bien instrumentadas hacia zonas con escasa información, como Robinson Crusoe. Estas metodologías pueden complementarse con el uso de datos satelitales —como los productos IMERG de la NASA— que permiten generar series temporales de precipitación en regiones remotas, fortaleciendo así los procesos de estimación y modelación.

Este estudio se plantea ante la necesidad de cuantificar la oferta hídrica natural de la Isla Robinson Crusoe, considerando el contexto climático actual y las restricciones existentes en cuanto a la disponibilidad de datos. Para ello, se recurre a la modelación hidrológica como herramienta clave, integrando información histórica, observaciones satelitales y modelos que se ajustan a las condiciones del territorio. La información generada busca aportar evidencia científica que contribuya a una gestión del recurso hídrico más eficiente, equitativa y resiliente, especialmente en un escenario de cambio climático que impone nuevas incertidumbres sobre la disponibilidad futura de agua. En este sentido, los resultados obtenidos pueden ser determinantes para fortalecer las estrategias de manejo hídrico, garantizar el acceso equitativo al recurso para la población local y fomentar la resiliencia del ecosistema insular frente a eventos extremos y condiciones climáticas adversas.

# 2. Objetivos

## 2.1. Objetivo general

Evaluar las condiciones fluviométricas de la Isla Robinson Crusoe en su periodo histórico mediante el uso de dos modelos hidrológicos, con el fin de estimar caudales para la planificación del recurso hídrico.

## 2.2. Objetivos específicos

- Identificar una cuenca continental en Chile con similitudes climáticas a la isla para la transferencia de parámetros.
- Generar un registro de caudales diarios forzando con datos meteorológicos de la isla los modelos hidrológicos calibrados en la cuenca continental.
- Caracterizar la variabilidad temporal de los caudales de la Isla Robinson Crusoe.

# 3. Zona de estudio

## 3.1. Antecedentes

El Archipiélago de Juan Fernández, ubicado a 670 km de la costa continental de Chile, pertenece a la Región de Valparaíso y está conformado por las islas Santa Clara, Alejandro Selkirk y Robinson Crusoe. Estas emergen como fragmentos volcánicos de la dorsal de Juan Fernández, formación geológica originada por la interacción entre la placa de Nazca y un punto caliente (hotspot) de actividad volcánica profunda (CIREN, 2021).

La Isla de Robinson Crusoe, donde se concentra la población en San Juan Bautista, presenta un relieve volcánico con distintos pisos altitudinales: cumbres altas con farellones rocosos, laderas medias con vegetación autóctona (Figura 1), relieves bajos con pendientes fuertes a moderadas y el piso deposicional derivado de procesos aluvionales y aluviales y depósitos eólicos activos (IREN & CORFO, 1982). Ademas, no se registran eventos eruptivos históricos, por lo que se clasifica como geológicamente inactiva (Aquaterra, 2025).

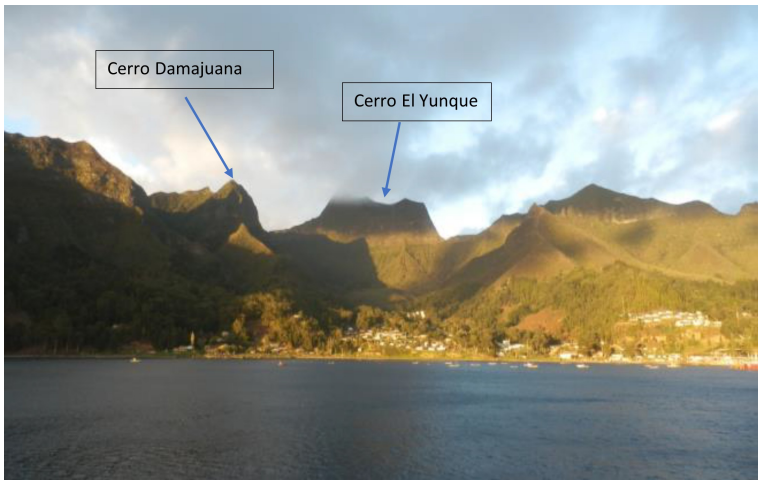



Figura 1: Relieve sector Bahía Cumberland. Fuente: Aquaterra (2025).

En cuanto al clima y temperatura, el archipiélago presenta un clima templado cálido con una estación seca de alrededor de 4 a 5 meses aproximadamente. De esta forma, las temperaturas presentan una amplitud anual de 6.4 °C, en donde los inviernos registran un promedio de 7.3 °C y en verano alcanzan los 18.7 °C (CIREN, 2021). Por otro lado, las precipitaciones son de carácter frontal en invierno y convectivas en verano, presentando una distribución mensual concentrada en su mayoría entre los meses de abril a octubre, registrando un valor climatológico anual de 1041.5 milímetros y un valor máximo concentrado en el mes de junio de 173.4 milímetros como promedio (CIREN, 2021).

La red hidrológica de Robinson Crusoe depende de precipitaciones y almacenamiento subterráneo, sin ríos permanentes, solo cauces de escurrimiento (IREN & CORFO, 1982). El drenaje, orientado de oeste-este y suroeste-noreste, incluye 17 cuencas principales, cuatro de las cuales drenan a la Bahía Cumberland: Piedra con Letra (2.22 $km^2$), La Pólvora (0.62 $km^2$), Lord Anson (0.68 $km^2$) y El Palillo (0.37 $km^2$) (Aquaterra, 2025). Las quebradas Villagra y Juanango, en áreas de fuertes pendientes, y las captaciones superficiales (Carbonera, Dama Juana, El Guindal, Cortafuegos y Juan Bueno), las cuales se presentan en la Figura 2, son críticas para el abastecimiento de San Juan Bautista (Aquaterra, 2025). Los acuíferos, limitados a depósitos sedimentarios de 3-4 m de espesor y rocas fracturadas, tienen baja capacidad de almacenamiento, con recarga superficial que retorna a los cauces mediante afloramientos (IREN & CORFO, 1982).

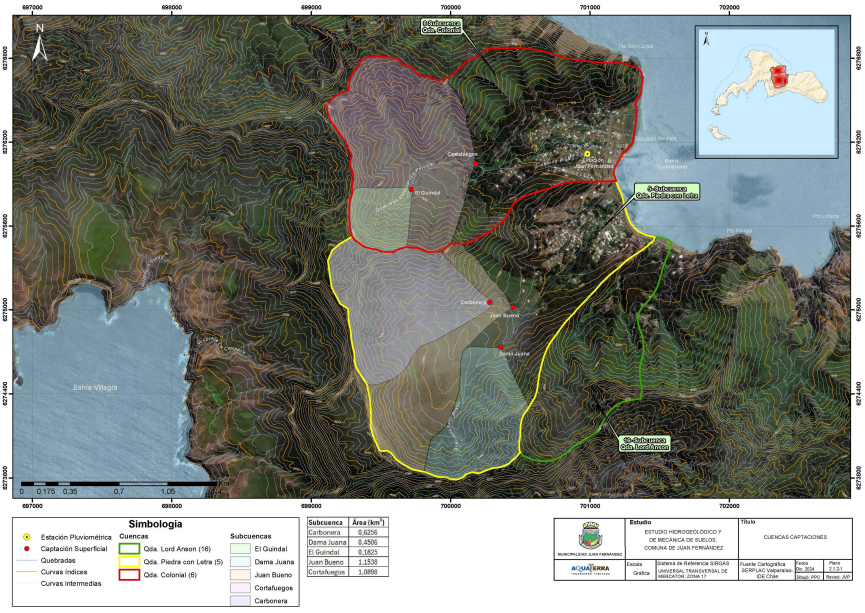



Figura 2: Captaciones de agua. Fuente: Aquaterra (2025).

Los suelos, de origen volcánico, son delgados, no arables y altamente susceptibles a la erosión debido a las fuertes pendientes, la intervención antrópica y la presencia de especies alóctonas, es decir, aquellas fuera de su área natural de distribución (IREN & CORFO, 1982). Los depósitos de remoción en masa y los materiales aluviales presentes en las principales quebradas —como las que drenan hacia la Bahía Cumberland— son poco consolidados, lo que incrementa la inestabilidad general del terreno. En conjunto, la alta compacidad de las cuencas y su morfología abrupta potencian los riesgos de deslizamientos y aluviones.(Aquaterra, 2025).

La vegetación dentro del archipiélago cuenta con una gran variación, este alberga 716 especies de plantas vasculares, con un 64,3 % de endemismo, incluyendo la familia endémica de 12 géneros endémicos y 137 especies endémicas, el mayor endemismo por unidad de área entre islas. Sin embargo, 367 especies alóctonas forman parches densos que inhiben la regeneración de flora nativa, afectando la retención de agua y la estabilidad de las cuencas (CIREN, 2021). La vegetación nativa en laderas medias es clave para mitigar la erosión, pero su degradación por actividades antrópicas y especies invasoras compromete la capacidad de las cuencas para regular el escurrimiento (Aquaterra, 2025).

En términos de las amenazas naturales, se puede comentar que las precipitaciones intensas no generan inundaciones fluviales significativas debido a la ausencia de ríos, pero las quebradas pueden causar anegamientos, como el evento de mayo de 2018 en San Juan Bautista (124 mm en 4 horas) (Radio Agricultura, 2018). Los tsunamis, como el de 2010 que causó 12 muertes, y las remociones en masa, como la de Alejandro Selkirk en 2012, son amenazas significativas. Por otro lado, no se registraron incendios forestales entre 2015 y 2020 (CIREN, 2021).

## 3.2. Imágenes satelitales

En este estudio, se utilizaron imágenes satelitales provenientes de la plataforma NASA Earthdata Search. En particular, se emplearon Modelos Digitales de Elevación (DEM) derivados del producto

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), los cuales fueron fundamentales para la delimitación de cuencas, la caracterización morfológica del terreno y la generación de parámetros espaciales en los modelos hidrológicos utilizados.

El procesamiento y análisis de estos datos se realizó mediante el software QGIS (Quantum Geografic Information System), donde se integraron las capas geográficas necesarias para definir el área de estudio, analizar el relieve y relacionar la topografía con el escurrimiento superficial en las principales quebradas de la isla.

### 3.3. Bases de datos

La caracterización del área de estudio se sustentó en la integración de múltiples fuentes de datos, las cuales permitieron abordar la escasez y discontinuidad de registros en la isla.

**a) Datos meteorológicos locales:** Se utilizaron registros de precipitación diaria provenientes de las estaciones meteorológicas Juan Fernández (Código 330031) y La Punta (Código 330066), administradas por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). La estación Juan Fernández presenta datos desde 1964 hasta 2025, mientras que la estación La Punta, activa desde 2013 hasta 2024, posee registros incompletos.

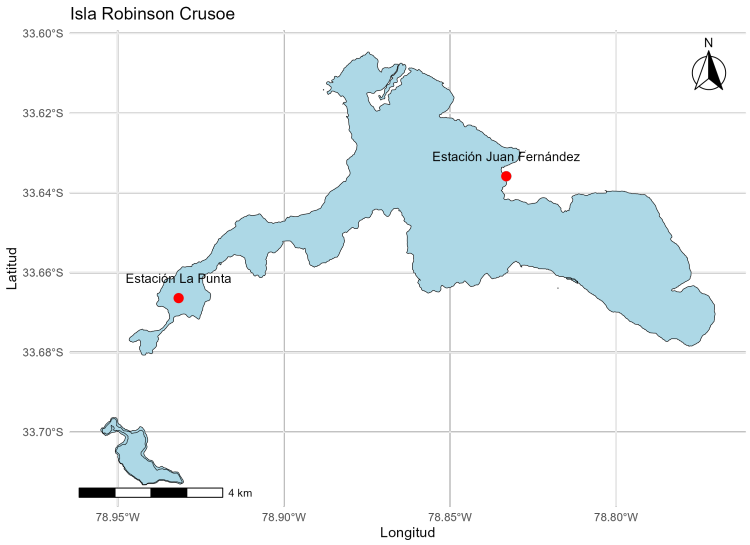



Figura 3: Estaciones DMC - Isla Robinson Crusoe.

**b) Datos satelitales de precipitación (IMERG):** Para complementar las deficiencias en la cobertura temporal y espacial de los datos locales, se incorporó el producto IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) desarrollado por la NASA, el cual proporciona estimaciones de precipitación a alta resolución espacial (0,1°) y temporal (30 minutos) a nivel global (NASA Global Precipitation Measurement Mission, s.f.). Se extrajeron series temporales de precipitación para el período 2009–2023, mediante la construcción de una grilla de nueve puntos distribuidos sobre la isla, lo que permitió representar la heterogeneidad espacial del régimen de precipitaciones en el área de estudio.

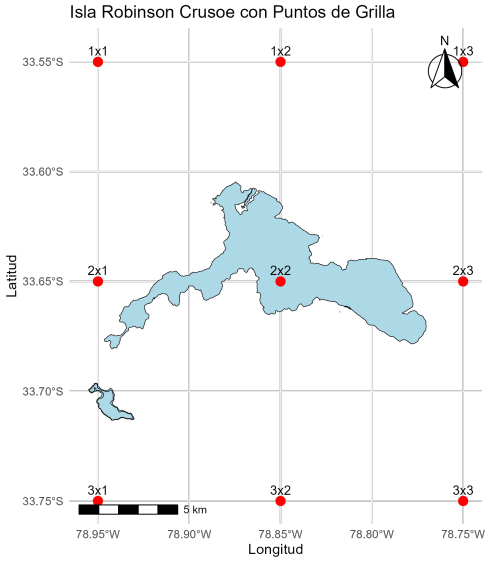



Figura 4: Grilla de puntos IMERG.

**c) Datos climáticos integrados:** Además, se utilizaron productos del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), los cuales ofrecen bases de datos integradas de variables hidrometeorológicas como temperatura, precipitación y caudal, generadas a partir de observaciones y modelaciones provenientes de la DMC, la DGA y plataformas internacionales. En particular, se empleó información disponible en el Explorador Climático del CR2, para obtener las forzantes de la modelacion hidrológica en la cuenca donante de los parámetros.

## 3.4. Caracterización climatológica

La caracterización climática de la Isla Robinson Crusoe resulta fundamental para la implementación de modelos hidrológicos, siendo la temperatura y la precipitación las variables meteorológicas más relevantes para este propósito. Dado el contexto insular y la escasez de estaciones meteorológicas, se recurrió al uso combinado de registros históricos provenientes de la estación Juan Fernández de la DMC y estimaciones satelitales del producto IMERG.

### 3.4.1. Temperatura (T)

Para el caracterización térmica se utilizó la serie de tiempo proveniente de la estación Juan Fernández, ubicada en las cercanías del poblado de San Juan Bautista. La Figura 5 presenta la evolución de la temperatura media anual durante los años 1965 y 2023. Se observa una marcada variabilidad interanual, con un valor máximo de 15.84 °C y un mínimo de 14.44 °C, promediando 15.14 °C en el período.

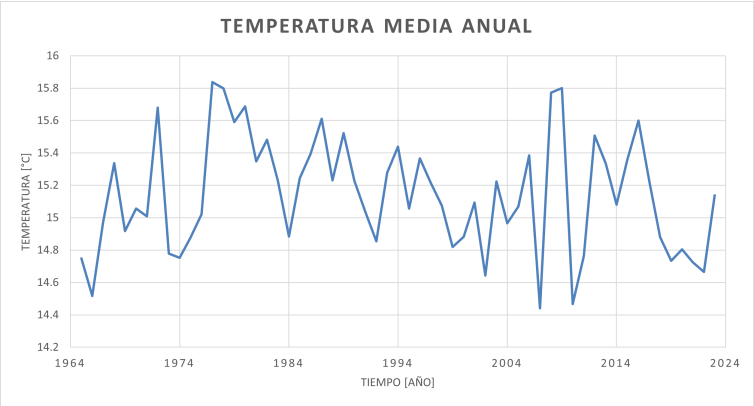



Figura 5: Temperatura media anual - Estación J. Fernández.

Por otro lado, la Figura 6 muestra la distribución mensual de temperatura para el mismo período, lo que permite identificar los patrones estacionales característicos del clima local. Las temperaturas más altas se concentran entre septiembre y marzo, alcanzando un valor máximo de 23.8 °C, mientras que los valores más bajos se registran entre abril y agosto, con un mínimo de 8 °C. Este patrón térmico es coherente con la clasificación climática templado-cálida del archipiélago, con una estación seca definida durante los meses de verano.

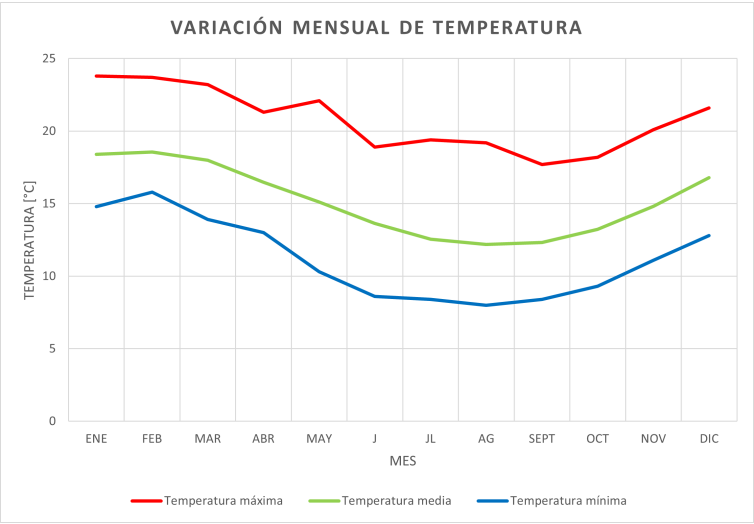



Figura 6: Variación mensual de temperatura.

### 3.4.2. Precipitación (P)

La precipitación en Robinson Crusoe se caracteriza por su alta variabilidad tanto temporal como espacial, un fenómeno intensamente condicionado por la morfología abrupta de la isla y su régimen de vientos. Para caracterizar esta variable se emplearon registros históricos de la estación DMC Juan Fernández, series del producto satelital IMERG y antecedentes bibliográficos.

Los registros de la estación DMC muestran una marcada variabilidad interanual, con una precipi-

tación media anual cercana a 891.2 mm. Destacando que desde 1994 se observa una mayor presencia de años secos o muy secos, sumado a la constante alternación entre años secos y húmedos (Figura 7). Las bandas incluidas en el gráfico corresponden a los quintiles presentados en la Tabla 1, los cuales permiten clasificar cada año en categorías de precipitación (muy lluvioso, lluvioso, normal, seco o muy seco). La estacionalidad de la lluvia se manifiesta en un mayor aporte entre los meses de abril y octubre, concordante con el patrón invernal característico del clima en la isla.

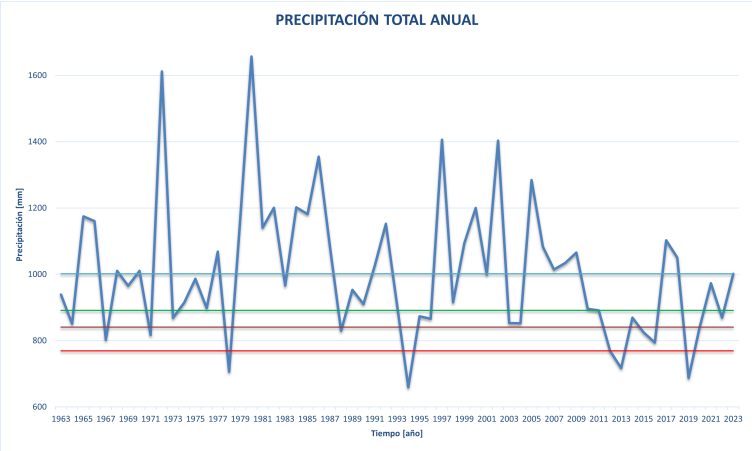


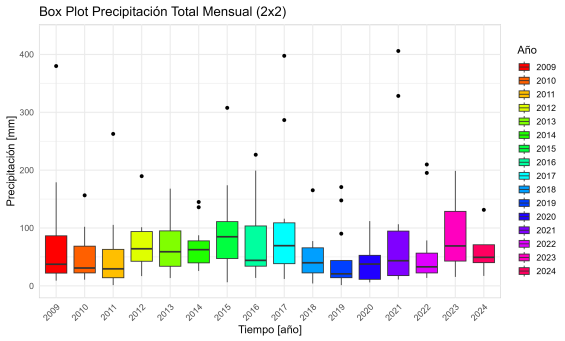

Figura 7: Precipitación total anual - Estación J. Fernández.

Tabla 1: Caracterización precipitación total anual - Estación J. Fernández.

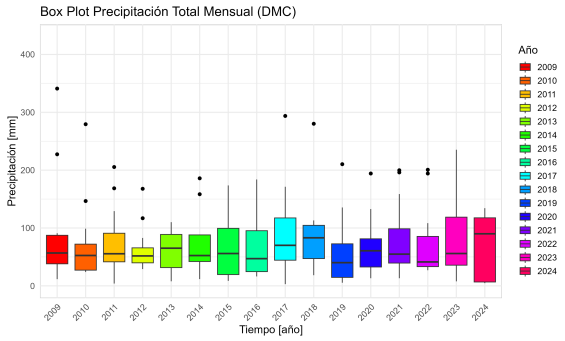
| **Quintil** | **Límite** | **Tipo** |
|---|---|---|
| 0.20 | 769.4 | Muy seco |
| 0.40 | 840.7 | Seco |
| 0.60 | 891.2 | Normal |
| 0.80 | 1001.6 | Lluvioso |
| 1.00 | 1102.8 | Muy lluvioso |

De manera complementaria, se procesaron los datos IMERG correspondientes al punto ubicado dentro del área insular (punto 2×2 de la grilla), obteniéndose una precipitación media anual de 874,1 mm, valor muy cercano al estimado con los registros de la estación DMC, lo que respalda la consistencia entre ambas bases de datos.

El análisis estadístico, representado en los boxplots (Figura 8a para IMERG y Figura 8b para DMC) y en las distribuciones de densidad de probabilidad (Figura 9a y 9b, respectivamente), revela que, si bien existe una leve variabilidad entre ambas bases de datos, los resultados son similares. En los boxplots, los valores medios se ubican en rangos similares, mientras que en las curvas de densidad de frecuencia se observa la misma tendencia, con la particularidad de que los datos de la DMC se encuentran desplazados hacia valores más altos de precipitación. En ambos casos se detecta la presencia de valores atípicos, asociados a eventos extremos, y distribuciones asimétricas positivas, lo que concuerda con la recurrencia de precipitaciones de baja magnitud frente a episodios puntuales de alta intensidad.

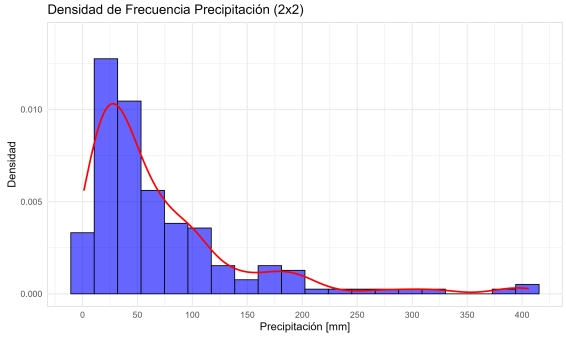



(a) Boxplot - Precipitación total mensual IMERG 2x2

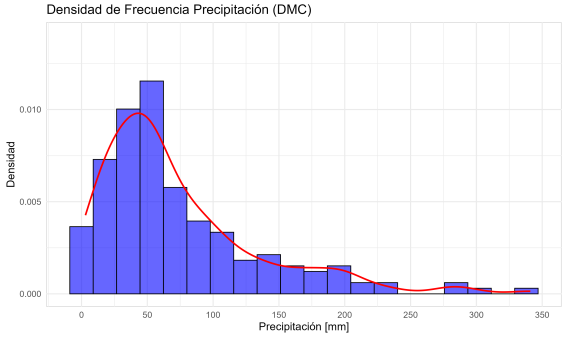



(b) Boxplot - Precipitación total mensual DMC

Figura 8: Boxplot - Precipitación total mensual IMERG 2x2 y DMC.




(a) Densidad de frecuencia - Precipitación total mensual IMERG 2x2




(b) Densidad de frecuencia - Precipitación total mensual DMC

Figura 9: Densidad de frecuencia - Precipitación total mensual IMERG 2x2 y DMC.

En cuanto a la variabilidad espacial de la precipitación, estudios anteriores como el de Cerecedа et al., 1993 ya habían evidenciado patrones heterogéneos, explicables por efectos orográficos y microclimáticos. En dicho estudio, se instalaron cinco estaciones pluviométricas entre 1992 y 1995, ubicadas estratégicamente en diferentes puntos de altitud (Figura 10). En la Tabla 2 se observa que estaciones ubicadas en cotas intermedias (como Villagra a 440 m o La Virgen a 390 m) registraron mayores precipitaciones que la estación Mirador (560 m), lo cual se atribuye a la disminución de acumulación directa por efecto de viento en zonas de cumbre.

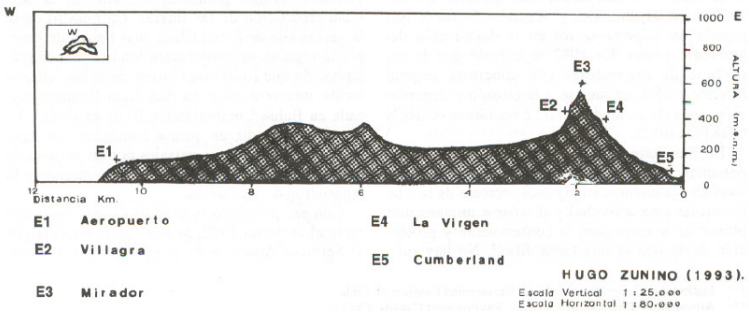



Figura 10: Estaciones de muestreo. Fuente: Cereceda et al. (1996)

Tabla 2: Precipitación entre 1992-1995 en la Isla Robinson Crusoe. Fuente: Cereceda et al. (1996)

| **Estación** | **Altitud** | **Precipitación** | |
|---|---|---|---|
| | | **1992 a 1995** | **1992 a 1994** |
| E1 Aeropuerto | 110 | 104 | - |
| E2 Villagra | 440 | 311 | 259 |
| E3 Mirador | 560 | 175 | 123 |
| E4 La Virgen | 390 | 339 | 259 |
| E5 Cumberland | 30 | 223 | 149 |

Para validar y profundizar esta variabilidad espacial en la actualidad, se aplicó una interpolación IDW (Inverse Distance Weighting) a partir de nueve puntos IMERG distribuidos sobre la isla. Esta grilla de 100x100 puntos fue generada utilizando un Modelo Digital de Elevación (DEM) para delimitar los valores dentro del contorno insular. Los resultados (Figura 11) muestran que el centro de la isla concentra los mayores aportes pluviométricos, mientras que los extremos este y oeste presentan valores significativamente más bajos, en algunos casos por debajo de 60 mm mensuales. Esta distribución corrobora lo señalado en estudios previos y valida la representatividad espacial de los datos utilizados. La interpolación, realizada en RStudio y aplicada a escala mensual con un parámetro $\alpha$ igual a 2, logró captar con claridad el gradiente de precipitación inducido por la topografía.

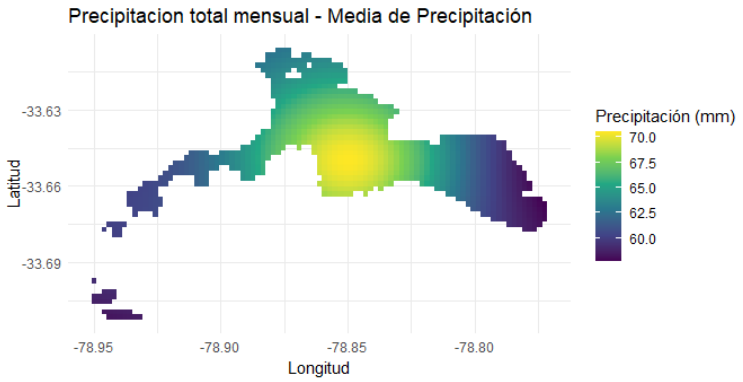



Figura 11: Interpolación IDW - Datos IMERG.

# 4. Métodos

## 4.1. Índice de disimilitud

Dado que en la Isla Robinson Crusoe no existen registros de caudales que permitan la calibración directa de modelos hidrológicos, se optó por una estrategia de transferencia de parámetros desde cuencas donantes previamente calibradas. Este procedimiento se basa en la regionalización de parámetros, la cual consiste en identificar, a partir de una clasificación de píxeles según atributos fisiográficos y climáticos, la cuenca más similar al área de interés. La cuenca seleccionada es aquella que presenta la menor disimilitud en relación con el píxel receptor, de acuerdo con el índice de disimilitud (Beck et al., 2016).

Para esta investigación, este índice considera tanto variables climáticas como fisiográficas, específicamente: índice de aridez (IA), precipitación media anual (P), temperatura media anual (TA), coeficiente de compacidad (CC) y pendiente media (PM). La expresión matemática que define el índice de disimilitud $S_{i,j}$ es:

$$S_{i,j} = \sum_{p=1}^{n_p} \frac{|Z_{p,i} - Z_{p,j}|}{IQR_p} \tag{1}$$

Donde:

- $n_p$: número total de atributos considerados.
- $Z_{p,i}$ y $Z_{p,j}$: valores del atributo $p$ para el píxel objetivo y la cuenca candidata, respectivamente.
- $IQR_p$: rango intercuartil del atributo $p$, utilizado como factor de normalización.

Este índice permite comparar múltiples atributos heterogéneos en una misma escala, otorgando mayor objetividad a la selección de cuencas donantes. En el presente estudio, se consideraron únicamente cuencas completamente costeras ubicadas entre la Región de Coquimbo y la Región del Bíobío; en total, se seleccionaron ocho cuencas candidatas, provenientes de la base de datos del CR2. La cuenca con el menor valor de $S$ fue utilizada como donante para la transferencia del set de parámetros, que posteriormente fue aplicado en la simulación hidrológica de la Isla Robinson Crusoe.

## 4.2. Modelo SAC-SMA

El modelo Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) es un modelo hidrológico conceptual desarrollado por el National Weather Service (NWS) de Estados Unidos (Burnash et al., 1973). Su estructura se basa en el balance hídrico del suelo, representando los procesos de almacenamiento y transferencia de agua mediante cinco reservorios interconectados que simulan la humedad superficial, subterránea y los flujos resultantes. Esta configuración lo hace adecuado para cuencas con información limitada, como es el caso de la Isla Robinson Crusoe.

El modelo opera en una configuración lumped, considerando valores promediados a nivel de cuenca de precipitación, temperatura y opcionalmente, evapotranspiración potencial (ETP) para cada intervalo de simulación. El núcleo del modelo incluye los siguientes módulos funcionales:

- **Hidrosim:** Módulo maestro encargado de coordinar los componentes del modelo, administrar las entradas meteorológicas y generar la simulación del caudal de salida final de la cuenca.
- **Módulo SAC-SMA (Taner, 2019):** Procesa la precipitación líquida, el derretimiento (si aplica) y la ETP para simular evapotranspiración, escorrentía superficial y flujo de aguas subterráneas. Este módulo utiliza cinco reservorios (Figura 12): dos "estanques en tensión" (Upper Zone: Tension Water y Free Water) y tres "estanques libres" (Lower Zone: Tension Water, Primary Free Water y Supplemental Free Water), que contribuyen a la escorrentía y el flujo base a diferentes tasas. La Figura 12 ilustra cómo el agua en los estanques en tensión se pierde principalmente por evapotranspiración, mientras que los estanques libres generan escorrentía directa, interflujo y baseflow, reflejando los flujos de salida de la cuenca.

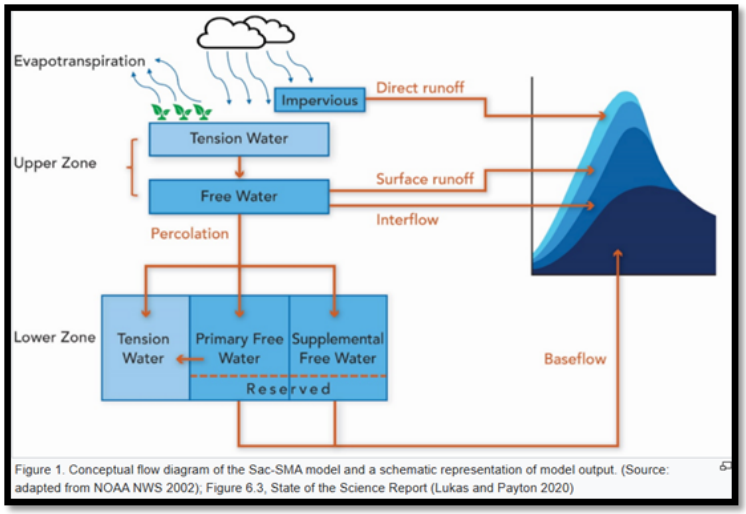



Figura 12: Diagrama conceptual de flujo del modelo SAC-SMA y representación esquemática de la salida del modelo. Fuente: NOAA NWS (2002).

- **Módulo de enrutamiento (Lohmann et al., 1996):** Se utiliza una distribución gamma para calcular la respuesta hidrológica agregada de la cuenca, sin aplicar ecuaciones de Saint-Venant debido a la naturaleza lumped del modelo.
- **Módulo de ETP (Hamon, 1960):** El modelo hidrológico SAM-SMA incorpora el método de Hamon (1960) para la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP). Este método, basado en una ecuación de alta simplicidad, calcula la ETP a partir de variables climáticas como la temperatura media diaria, la latitud y el día juliano del año. En el proceso de modelación, se incluye un coeficiente que se calibra durante las etapas de calibración y validación, permitiendo ajustar las estimaciones a las condiciones específicas del área de estudio.
- **Módulo de nieve SNOW-17 (Anderson, 1976, 2006):** Separa la precipitación en líquida y sólida, simula procesos de acumulación y derretimiento de nieve. Dado que las temperaturas en la isla se mantienen por sobre los 0 °C, este módulo no fue considerado en el estudio.

La calibración del modelo se realizó mediante el algoritmo Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA) (Duan, 1992), que optimiza automáticamente los parámetros minimizando la función objetivo asociada al índice de eficiencia seleccionado. En total se calibraron 16 parámetros,

agrupados según los principales procesos hidrológicos representados en el modelo: almacenamiento y percolación en las zonas superior e inferior del suelo, drenaje lateral y flujo base, generación de escorrentía y evapotranspiración potencial.

La Tabla 3 presenta los parámetros considerados en la calibración, junto con su descripción y unidades. Cabe destacar que los parámetros del módulo SNOW-17 no fueron incluidos, debido a que las condiciones térmicas de la isla impiden la acumulación de nieve.

Tabla 3: Parámetros del modelo SAC-SMA. Fuente: Liang et al. (2001)

| **Parámetro** | **Descripción** | **Unidad** |
|---|---|---|
| UZTWM | Almacenamiento máximo de agua de tensión en la zona superior | mm |
| UZFWM | Almacenamiento máximo de agua libre en la zona superior | mm |
| LZTWM | Almacenamiento máximo de agua de tensión en la zona inferior | mm |
| LZFPM | Almacenamiento máximo primario de agua libre en la zona inferior | mm |
| LZFSM | Almacenamiento máximo suplementario de agua libre en la zona inferior | mm |
| ADIMP | Área impermeable adicional, expresada como fracción decimal | - |
| LZPK | Tasa de depleción de agua libre primaria en la zona inferior | $day^{-1}$ |
| UZK | Tasa de depleción lateral de agua libre en la zona superior | $day^{-1}$ |
| ZPERC | Tasa máxima de percolación | - |
| REXP | Exponente de la ecuación de percolación | - |
| LZSK | Tasa de depleción de agua libre suplementaria en la zona inferior | $day^{-1}$ |
| PCTIM | Fracción impermeable del área de la cuenca | - |
| PFREE | Fracción de agua que percola directamente desde la zona superior al almacenamiento de agua libre en la zona inferior | - |
| N | Forma del hidrograma | - |
| K | Dispersión del hidrograma | - |
| HAMON | PENDIENTE | - |

## 4.3. Modelo TUW

El modelo TUW (Tübingen University Water Balance Model) es un modelo hidrológico conceptual desarrollado por la Universidad Técnica de Viena (TU Wien) para simular el balance hídrico y la escorrentía en cuencas a partir de datos diarios de precipitación y evapotranspiración potencial (Parajka et al., 2012). Implementado en R mediante el paquete `TUWmodel`, su diseño lo hace especialmente adecuado para cuencas con disponibilidad limitada de datos, como ocurre en la Isla Robinson Crusoe.

El modelo adopta una estructura lumped y consta de tres componentes funcionales principales:

- **Módulo de precipitación y evapotranspiración:** Controla la entrada de agua al sistema y su pérdida por ETP, considerando el nivel de humedad del suelo para ajustar la eficiencia de la evapotranspiración.
- **Módulo de almacenamiento:** Representa la retención de agua en el perfil del suelo mediante dos compartimentos (superficial y subterráneo), con parámetros que regulan la capacidad

máxima de almacenamiento y la distribución del agua en el perfil vertical.

- **Módulo de escorrentía**: Simula los flujos de salida, incluyendo escorrentía superficial, intermedia y base, mediante un conjunto de ecuaciones empíricas que responden a umbrales de saturación y tasas de percolación predefinidas.

La calibración del modelo se realizó utilizando el algoritmo Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA), al igual que en el modelo SAC-SMA. Este método permitió ajustar los parámetros clave del modelo a partir de los datos hidrometeorológicos disponibles en la cuenca donante seleccionada, optimizando la concordancia entre los caudales simulados y observados.

La calibración del TUW Model se realizó considerando un total de 15 parámetros (Parajka et al., 2007), los cuales controlan los procesos principales del balance hídrico, como la generación de escorrentía superficial y subterránea, la percolación, la evapotranspiración dependiente de la humedad del suelo y la respuesta del sistema ante las precipitaciones, destacando que en este estudio las condiciones térmicas de la isla no permiten acumulación de nieve.

La Tabla 4 resume los parámetros utilizados en la calibración, junto con su descripción y unidades, los cuales abarcan los procesos mencionados anteriormente.

Tabla 4: Parámetros del modelo TUW. Fuente: Parajka et al. (2007)

| **Parámetro** | **Descripción** | **Unidad** |
|---|---|---|
| SCF | Factor de corrección de nieve | - |
| DDF | Representa la tasa de fusión de nieve por grado de temperatura | mm/°C/día |
| Tr | Temperatura umbral por encima de la cual la precipitación se considera lluvia | °C |
| Ts | Temperatura umbral por debajo de la cual la precipitación se considera nieve | °C |
| Tm | Temperatura umbral por encima de la cual comienza la fusión | °C |
| LPrat | Parámetro relacionado con el límite de evaporación potencial | - |
| FC | Capacidad de campo, es decir, almacenamiento máximo de humedad del suelo | mm/°C/día |
| BETA | Parámetro no lineal para la producción de escorrentía | - |
| k0 | Coeficiente de almacenamiento para respuesta muy rápida | día |
| k1 | Coeficiente de almacenamiento para respuesta rápida | día |
| k2 | Coeficiente de almacenamiento para respuesta lenta | día |
| lsuz | Estado umbral de almacenamiento, es decir, el inicio de la respuesta muy rápida si se excede | mm/°C/día |
| cperc | Tasa constante de percolación | mm/día |
| bmax | Indica el máximo tiempo de base para caudales bajos | día |
| croute | Parámetro de escalado libre, ajusta la escala del enrutamiento | día/mm |

## 4.4. Criterios de eficiencia de calibración

### 4.4.1. Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

El Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es uno de los criterios más ampliamente utilizados en hidrología para evaluar el desempeño de modelos de simulación. Este indicador, propuesto por

Nash y Sutcliffe (1970), cuantifica la precisión de un modelo al comparar los valores simulados con los valores observados de una variable hidrológica, típicamente el caudal.

El NSE es una métrica adimensional que varía en el intervalo $]-\infty, 1]$, donde un valor de 1 representa un ajuste perfecto entre los datos simulados y observados, mientras que valores cercanos o inferiores a 0 indican una baja capacidad predictiva del modelo. Conceptualmente, el NSE puede interpretarse como la mejora relativa del modelo con respecto al promedio de los datos observados, es decir, un NSE de 0 implica que el modelo es tan preciso como usar simplemente la media observada como predicción, y valores negativos implican que la media observada proporciona una mejor predicción que el modelo.

Se define según la siguiente expresión:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{s,i} - X_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(X_{o,i} - \overline{X_o})^2} \tag{2}$$

Donde:

- $n$: número de observaciones.
- $X_{s,i}$: variable simulada en el tiempo $i$.
- $X_{o,i}$: variable observada en el tiempo $i$.
- $\overline{X_o}$: promedio de las observaciones.

La interpretación de los valores de NSE se suele clasificar en rangos de desempeño del modelo, tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Criterios de evaluación de rendimiento del NSE. Fuente: Ritter y Muñoz-Carpena (2013)

| **Rendimiento** | **NSE** |
|---|---|
| Muy bueno | $\geq 0.90$ |
| Bueno | $0.80 - 0.90$ |
| Aceptable | $0.65 - 0.80$ |
| Insatisfactorio | $< 0.65$ |

### 4.4.2. Índice de Eficiencia Kling-Gupta (KGE)

El Índice de Eficiencia Kling-Gupta (KGE) es una métrica compuesta desarrollada para mejorar la interpretación y diagnóstico del ajuste entre valores simulados y observados en modelos hidrológicos. Propuesto por Kling et al. (2012), este índice integra tres componentes clave del rendimiento de un modelo: la correlación lineal, el sesgo y la relación entre las desviaciones estándar, ofreciendo así una visión más robusta y desglosada del comportamiento del modelo en comparación con el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

La formulación del KGE busca equilibrar estos tres aspectos mediante la siguiente expresión:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \tag{3}$$

Donde:

- $r$: coeficiente de correlación de Pearson entre los valores simulados y observados.
- $\beta$: relación entre las medias de los valores simulados y observados.
- $\gamma$: relación entre las desviaciones estándar de los valores simulados y observados.

El valor óptimo del KGE es 1, lo que representa un ajuste perfecto entre las series simulada y observada en los tres componentes evaluados. A medida que el valor se aleja de 1, el desempeño del modelo se considera menos satisfactorio.

La clasificación del desempeño del KGE puede interpretarse según lo presentado en la siguiente tabla.

Tabla 6: Criterios de evaluación de rendimiento del KGE. Fuente: Kling et al. (2012)

| **Rendimiento** | **KGE** |
|---|---|
| Bueno | $\geq 0.75$ |
| Intermedio | $0.50 - 0.75$ |
| Bajo | $0.00 - 0.50$ |
| Muy bajo | $< 0.00$ |

### 4.4.3. Índice KGE(Q) + NSE(log(Q))

La métrica compuesta KGE(Q) + NSE(log(Q)) corresponde a una función objetivo diseñada para optimizar simultáneamente el desempeño del modelo hidrológico en diferentes rangos de caudal. Específicamente, combina dos de las métricas más utilizadas en calibración de modelos de caudal: el Índice de Eficiencia Kling-Gupta (KGE) aplicado directamente sobre los caudales simulados y observados, y el Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) aplicado a la transformación logarítmica del caudal.

Esta estrategia de combinación tiene como objetivo mejorar el ajuste global del modelo sin descuidar la simulación de caudales bajos (Araya et al., 2023), los cuales suelen ser difíciles de modelar y son particularmente relevantes en estudios de disponibilidad hídrica, caudales ecológicos, o gestión en contextos de escasez.

La función objetivo puede representarse como una combinación lineal ponderada:

$$\text{KGE + NSE(log(Q))} = w_1 \cdot KGE(Q) + w_2 \cdot NSE(\log Q) \tag{4}$$

Donde:

- $Q$: caudal observado o simulado.
- $\log Q$: transformación logarítmica del caudal, utilizada para dar mayor peso a los caudales bajos.
- $w_1$ y $w_2$: pesos asignados a cada métrica, comúnmente tomados como 0.5 para igual importancia, aunque pueden ajustarse según los objetivos del estudio.

Esta métrica se ha utilizado en diversos estudios recientes para mejorar la robustez del proceso de calibración, ya que permite considerar simultáneamente la eficiencia general del modelo y su capacidad de representar con precisión eventos de bajo caudal, sin necesidad de sacrificar una métrica en favor de otra.

### 4.4.4. Índice KMoments

El índice KMoments (Knowable Moments) corresponde a una función objetivo estadística avanzada, desarrollada recientemente en hidrología para la calibración de modelos de precipitación-escorrentía. Propuesto como una variante del Índice de Eficiencia Kling-Gupta (KGE), esta métrica fue utilizada por Pizarro y Jorquera (2024) como una mejora para representar con mayor precisión las respuestas hidrológicas de las cuencas bajo condiciones de alta variabilidad climática. KMoments se basa en momentos de orden superior de la distribución de caudales, como un momento ponderado $k_2$, que permite capturar características estadísticas más allá del promedio y la varianza, incluyendo propiedades relacionadas con la asimetría y la estructura de eventos extremos.

A diferencia de métricas tradicionales como el NSE o el KGE, que evalúan el ajuste punto a punto entre datos observados y simulados, KMoments mide la similitud entre las propiedades estadísticas de ambas series (correlación, dispersión ponderada y relación de medias), ofreciendo una caracterización más robusta del régimen hidrológico. Esta característica lo hace particularmente valioso en entornos con distribuciones no normales de caudal o donde los extremos hidrológicos tienen alta relevancia para la gestión del recurso hídrico, como en estudios de escasez o inundaciones.

La formulación matemática a minimizar en el contexto de optimización es:

$$\text{KMoments} = 1 - \sqrt{(c_1 - 1)^2 + (c_2 - 1)^2 + (c_3 - 1)^2} \tag{5}$$

Donde:

- $c_1$: coeficiente de correlación de Pearson entre las series simuladas y observadas.
- $c_2$:relación de dispersión ponderada, derivada del momento $k_2$.
- $c_3$: relación entre las medias de las series simuladas y observadas, indicando el sesgo sistemático.

En el contexto de esta investigación, el uso de KMoments fortalece la calibración del modelo hidrológico al garantizar que las simulaciones reproduzcan no solo los caudales medios, sino también la variabilidad y los patrones estadísticos observados en los caudales, lo cual resulta especialmente relevante en escenarios de alta variabilidad climática.

## 4.5. Métricas de perfomance

Las métricas de performance permiten evaluar los caudales simulados en términos de magnitud, variabilidad, persistencia temporal, estacionalidad y ocurrencia de extremos hidrológicos, aportando información clave para validar su coherencia física y estadística. En este estudio, se seleccionaron métricas específicas para analizar el rendimiento de los modelos en la Isla Robinson Crusoe, considerando que no existen registros de caudales observados para una validación directa.

A continuación, se presentan las métricas utilizadas en esta investigación:

- Error cuadrático medio (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{X}_i - X_i)^2} \tag{6}$$

Donde:

- $\hat{X}_i$: valor estimado.
- $X_i$: valor observado.
- $n$: número de observaciones.

- Correlacion de Pearson (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{X}_i - \overline{\hat{X}})(X_i - \overline{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\hat{X}_i - \overline{\hat{X}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}} \tag{7}$$

Donde:

- $\hat{X}_i$: valor estimado.
- $X_i$: valor observado.
- $\overline{\hat{X}}$: media de los valores estimados.
- $\overline{X}$: media de los valores observados.
- $n$: número de observaciones.

- Bias:

$$\text{Bias} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{X}_i - X_i) \tag{8}$$

- P Bias :

$$\text{P Bias} = 100 \cdot \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{X}_i - X_i)}{\bar{X}} \tag{9}$$

Donde:

- $\hat{X}_i$: valor estimado.
- $X_i$: valor observado.
- $\bar{X}$: media de los valores observados, $\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i$.
- $n$: número de observaciones.

## 4.6. Análisis de tendencia

Con el fin de evaluar la existencia de cambios sistemáticos en los caudales simulados a lo largo del tiempo, se aplicaron dos métodos estadísticos comúnmente utilizados en hidrología para el análisis de tendencias en series temporales: la prueba de Mann-Kendall y el estimador de Theil-Sen.

La prueba de Mann-Kendall (Kendall, 1975) es una herramienta no paramétrica ampliamente utilizada para detectar la presencia de tendencias monótonas (ascendentes o descendentes) en series temporales sin requerir que los datos se ajusten a una distribución específica. Su robustez frente a valores atípicos y su aplicabilidad a datos hidrológicos hacen de esta prueba una opción adecuada en contextos como el presente estudio.

La hipótesis nula de la prueba establece que no existe una tendencia significativa en la serie temporal, mientras que la hipótesis alternativa postula la existencia de una tendencia monótona (ascendente o descendente). El estadístico de prueba $S$ se define como:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \text{sign}(x_j - x_i) \tag{10}$$

Donde:

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

Este estadístico $S$ contabiliza el número de pares ordenados que reflejan incrementos o disminuciones en la serie.

Para series de tiempo con un tamaño muestral grande (n $>$ 10), el estadístico $S$ se aproxima a una distribución normal con media cero y varianza ajustada que toma en cuenta posibles empates. El estadístico normalizado $Z$ se determina mediante:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \tag{11}$$

La significancia estadística de la tendencia se evalúa comparando $|Z|$ con el valor crítico de la distribución normal estándar para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$:

- Si $|Z| > Z_{\alpha/2}$, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existe una tendencia significativa en la serie.
- Si $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$, no se rechaza la hipótesis nula, indicando que no se detecta una tendencia estadísticamente significativa.

Para cuantificar la magnitud de dicha tendencia, se utilizó el estimador de Theil-Sen (Sen, 1968), un método que estima la pendiente como la mediana de todas las pendientes calculadas entre pares de puntos de la serie, el cual se define como:

$$\hat{\beta} = \text{mediana}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \quad \forall\, i < j \tag{12}$$

Este enfoque permite obtener una estimación confiable de la tasa de cambio en la variable analizada, siendo menos sensible a la presencia de valores extremos que otros métodos tradicionales de regresión lineal.

# 5. Resultados

## 5.1. Selección de cuenca donante

Tal como se estableció en el apartado 4.1, la isla no se encuentra cercana a otras cuencas que, si cumplan las condiciones para la calibración del modelo, por lo que se optó por el criterio de la similitud climática.

En base a lo anterior, se seleccionaron cuencas hidrográficas (Tabla 7) ubicadas entre las regiones de Coquimbo y Bio Bío, considerando los siguientes criterios: tamaño moderado, disponibilidad de datos hidrológicos y climáticos de entre cinco y diez años, ausencia visible de flujo base y ubicación en zonas costeras.

Tabla 7: Cuencas candidatas.

| **Cuenca** | **Código** |
|---|---|
| Estero Culebrón | 4400001 |
| Estero Punitaqui | 4556001 |
| Estero Quintero | 5320001 |
| Estero Puangue | 5741001 |
| Estero Alhue | 6043001 |
| Estero Bellavista | 8210003 |
| Estero Nilahue | 6132001 |
| Río Cauquenes | 7336001 |

Esto permitió calcular el índice de disimilitud entre la Isla Robinson Crusoe y las cuencas seleccionadas, utilizando distintos atributos fisiográficos y climáticos. La Figura 13 muestra la comparación de cada variable entre la isla (en color rojo) y las cuencas candidatas. Se observa que, en los paneles correspondientes al índice de aridez (IA) y la pendiente media (PM), la isla se distancia considerablemente del resto de las cuencas, lo que refleja sus condiciones más extremas en términos climáticos y geomorfológicos. En contraste para las demás variables, las diferencias son menores, evidenciando una mayor similitud con algunas cuencas continentales. Particularmente, en el panel de precipitación media anual (P), la cuenca del Río Cauquenes presenta la mayor cercanía a los valores de la isla, seguida por el Estero Bellavista. En el caso de la temperatura media anual (TA), las cuencas más próximas son Estero Culebrón y Estero Punitaqui, mientras que, para el índice de compacidad (CC), nuevamente el Río Cauquenes muestra una alta similitud.

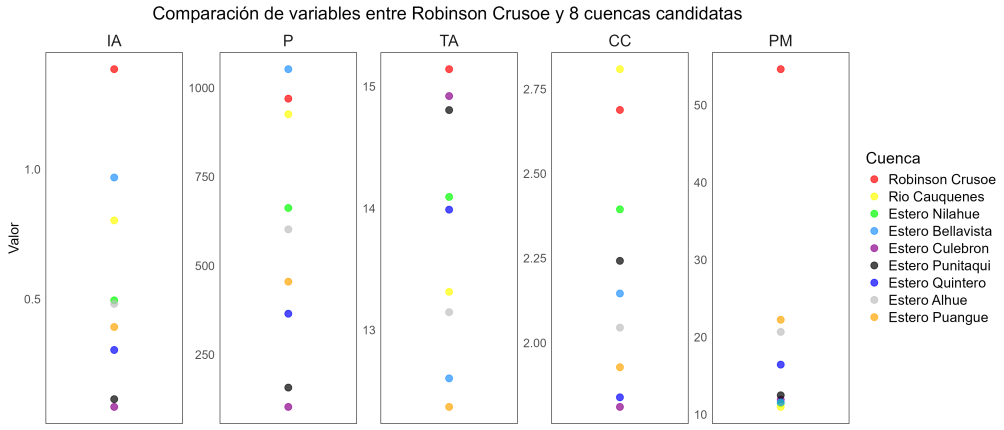



Figura 13: Comparación variables climatológicas.

Finalmente, la Figura 14 presenta los valores del índice de disimilitud, donde se confirma que la cuenca del Río Cauquenes (-36.02 ° S, -72.38 ° O) registra el menor valor, con un área de 622.1 km$^2$ y una elevación media de 308 m.s.n.m., consolidándose como la cuenca donante para el proceso de calibración y transferencia.

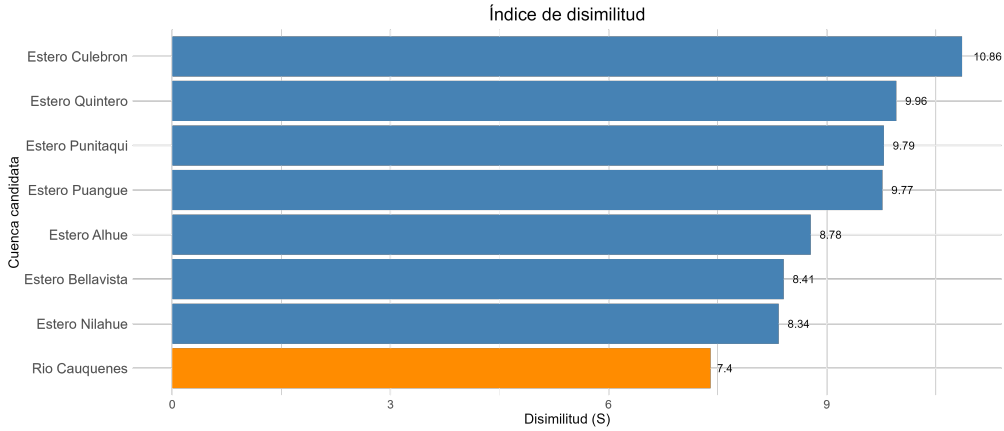



Figura 14: Índice de disimilitud.

## 5.2. Calibración y validación de modelos en cuenca donante

En esta sección se presentan los resultados de la calibración de los modelos hidrológicos SAC-SMA y TUW en la cuenca donante seleccionada, cuyas principales características se expusieron previamente. El propósito de este proceso es determinar un conjunto de parámetros óptimos que representen de manera adecuada el comportamiento hidrológico de la cuenca, para luego transferirlos a la Isla Robinson Crusoe, y poder generar registros sintéticos de escorrentía superficial, debido a la ausencia de registros hidrométricos directos en el área de estudio.

A continuación, se describen los tres períodos establecidos en función de la disponibilidad y calidad de las forzantes:

- **Período de warm-up:** 01/04/1979 – 31/03/1983.

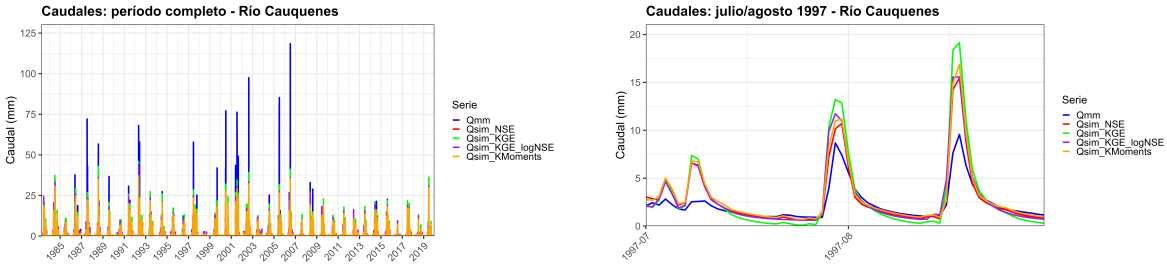
- **Período de calibración:** 01/04/1983 – 31/03/1999.
- **Período de validación:** 01/04/1999 – 31/12/2019.

En la Tabla 8 se presentan los valores obtenidos para cada función objetivo (F.O) durante la calibración de los modelos hidrológicos. Se observa que la métrica KMoments alcanzó los valores más altos tanto para el modelo SAC-SMA como para el TUW, manteniendo este comportamiento en los periodos de calibración (C) y validación (V).

Tabla 8: Valores de cada función objetivo de los modelos SAC-SMA y TUW.

| **F.O** | **SAC-SMA** | | **TUW** | |
|---|---|---|---|---|
| | **Calibración** | **Validación** | **Calibración** | **Validación** |
| KGE | 0.827 | 0.727 | 0.762 | 0.653 |
| KGE_logNSE | 0.808 | 0.643 | 0.773 | 0.688 |
| KMoments | 0.833 | 0.727 | 0.787 | 0.730 |
| NSE | 0.694 | 0.643 | 0.625 | 0.555 |

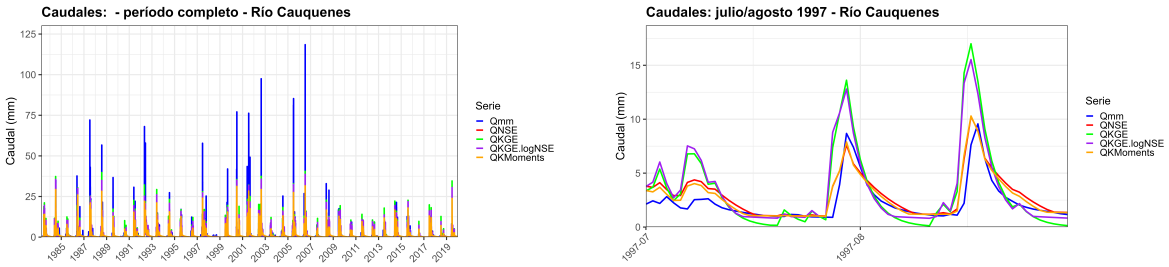
En la Figura 15a se presentan los caudales observados junto con los simulados por el modelo SAC-SMA para cada índice de calibración, mientras que la Figura 16a muestra los resultados correspondientes al TUW Model. En ambos casos, las simulaciones logran reproducir adecuadamente la dinámica general de la cuenca, aunque tienden a subestimar los valores máximos durante eventos de alta precipitación. En términos comparativos, el modelo TUW presenta un comportamiento similar al SAC-SMA, pero con una respuesta más atenuada en caudales bajos, donde se observa la presencia de un flujo base (Figura 16b); en cambio, el SAC-SMA (Figura 15b) tiende a generar pulsos más marcados, sin una representación sostenida de dicho flujo base.




(a) Período completo

(b) Julio/agosto 1997

Figura 15: Caudales cuenca donante - SAC-SMA.




(a) Período completo

(b) Julio/agosto 1997

Figura 16: Caudales cuenca donante - TUW.

En la Tabla 9 se presentan las métricas de performance obtenidas para cada función objetivo en el modelo SAC-SMA, tanto para los periodos de calibración como de validación. Los resultados indican que la función KMoments alcanzó el menor valor de RMSE y el mayor coeficiente de correlación en ambas etapas, evidenciando un ajuste global superior y un comportamiento más estable al simular fuera del periodo de calibración.

Durante la calibración, todas las métricas —excepto KGE_logNSE— presentaron sesgos negativos, lo que sugiere una ligera subestimación de los caudales simulados. En la validación, en cambio, solo NSE mantuvo este sesgo negativo, mientras que KMoments mostró un leve sobreajuste positivo, aunque dentro de márgenes aceptables. Finalmente, con respecto al P Bias, se observa que KGE y KMoments obtuvieron las menores magnitudes absolutas, destacando nuevamente la estabilidad de estas métricas frente a las variaciones temporales del caudal.

Tabla 9: Métricas de performance - Modelo SAC-SMA.

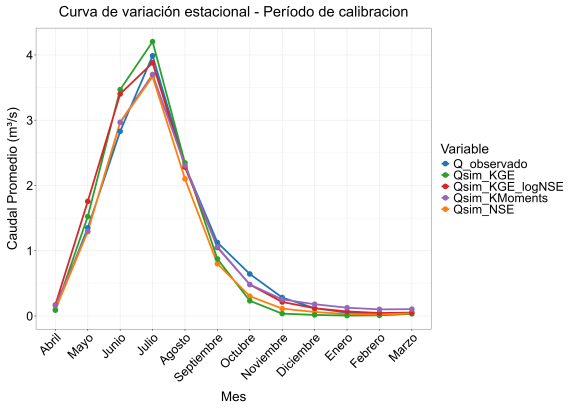
| **Simulación** | **RMSE** | | **Coef. Correlación** | | **Bias** | | **P Bias** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **C** | **V** | **C** | **V** | **C** | **V** | **C** | **V** |
| NSE | 0.187 | 0.215 | 0.993 | 0.987 | -0.114 | -0.074 | -10.620 | -7.312 |
| KGE | 0.257 | 0.312 | 0.990 | 0.981 | -0.002 | 0.031 | -0.168 | 3.053 |
| KGE_logNSE | 0.214 | 0.334 | 0.989 | 0.969 | 0.055 | 0.091 | 5.122 | 8.990 |
| KMoments | 0.115 | 0.147 | 0.997 | 0.994 | -0.010 | 0.022 | -0.907 | 2.217 |

Análogamente, en la Tabla 10 se presentan las métricas de performance obtenidas para el modelo TUW, considerando los periodos de calibración y validación. Los resultados muestran que la función NSE alcanzó los menores valores de RMSE en ambas etapas, evidenciando un buen ajuste general en la representación de los caudales simulados. Por su parte, la métrica KGE_logNSE registró los coeficientes de correlación más altos, destacando su capacidad para reproducir la variabilidad temporal de los flujos. En cuanto al sesgo, todas las métricas arrojaron valores positivos, lo que indica una ligera sobrestimación de los caudales por parte del modelo. Entre ellas, KGE presentó los menores valores de Bias y P Bias, seguida de KMoments, reflejando una mayor estabilidad y un comportamiento más equilibrado durante la validación.

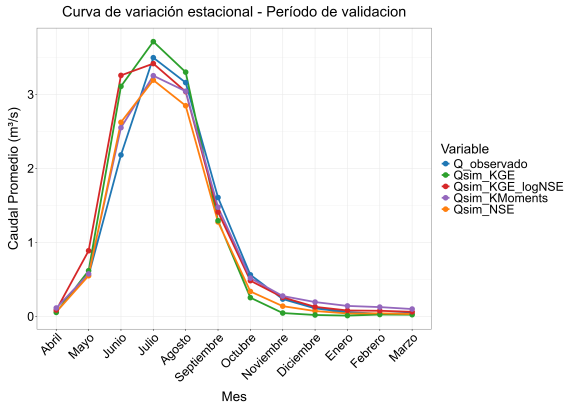
Tabla 10: Métricas de performance - TUW Model.

| Simulación | RMSE | | Coef. Correlación | | Bias | | P Bias | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | V | C | V | C | V | C | V |
| NSE | 0.176 | 0.201 | 0.993 | 0.991 | 0.082 | 0.110 | 7.592 | 10.959 |
| KGE | 0.314 | 0.345 | 0.991 | 0.988 | 0.004 | 0.033 | 0.395 | 3.304 |
| KGE_logNSE | 0.256 | 0.287 | 0.996 | 0.995 | 0.101 | 0.126 | 9.399 | 12.531 |
| KMoments | 0.248 | 0.257 | 0.991 | 0.989 | 0.017 | 0.044 | 1.620 | 4.397 |

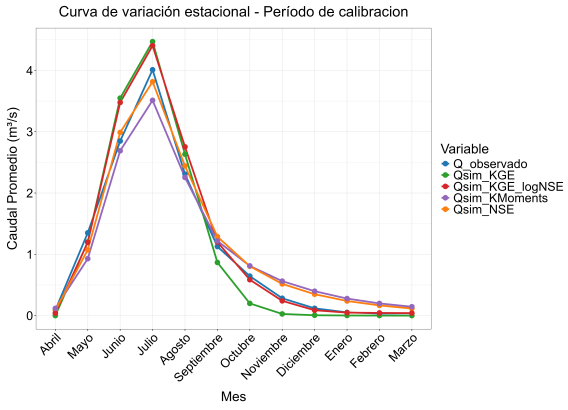
Adicionalmente, la Figura 17 muestra las curvas de variación estacional de caudal, donde se comparan los valores observados en la cuenca donante (curva azul) con los caudales simulados a partir de cada función objetivo. La comparación se presenta para ambos modelos y en los periodos de calibración y validación, evidenciando que tanto el SAC-SMA como el TUW reproducen de manera adecuada magnitudes cercanas a las observadas.



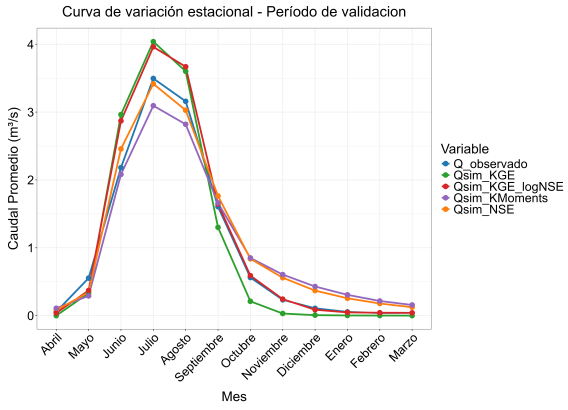

(a) Calibración - SAC-SMA.




(b) Validación - SAC-SMA.




(c) Calibración - TUW Model.




(d) Validación - TUW Model.

Figura 17: Curvas de variacion estacional de caudal.

Los resultados evidencian que KMoments presenta el mejor ajuste global en términos de RMSE y correlación, además de un bajo bajo sesgo, especialmente en SAC-SMA. Como segunda métrica a presentar se consideró NSE, cuya curva logró reproducir adecuadamente la variación estacional.

Si bien presentó un sesgo moderado, mantiene un desempeño competitivo en términos de RMSE y correlación, respaldando su uso su análisis.

En la Tabla 11 se presentan los valores de los parámetros obtenidos en las calibraciones de ambos modelos en la cuenca donante. En general, los parámetros se mantienen dentro de rangos físicamente aceptables, definidos según los intervalos sugeridos por Liang et al. (2001) para el modelo SAC-SMA y por Parajka et al. (2007) para el TUW Model. En el caso del SAC-SMA, los parámetros UZTWM, PFREE y N se aproximan a sus límites superiores, lo que evidencia una alta sensibilidad del modelo frente a los procesos de almacenamiento superficial y a la forma del hidrograma. En el TUW Model, en tanto, el parámetro BETA alcanzó un valor cercano a su cota máxima al emplear KMoments, reflejando una mayor no linealidad en la generación de escorrentía; mientras que con NSE, el parámetro LPrat fue el que se aproximó a su límite superior, indicando una respuesta más restringida del modelo ante la disponibilidad de humedad para la evapotranspiración potencial.

Tabla 11: Parámetros calibrados de los modelos SAC-SMA y TUW.

(a) Modelo SAC-SMA

| **Parámetro** | **Valor mínimo** | **Valor máximo** | **KMoments** | **NSE** |
|---|---|---|---|---|
| UZTWM | 1 | 150 | 149.670 | 149.999 |
| UZFWM | 1 | 150 | 65.844 | 50.527 |
| LZTWM | 1 | 500 | 65.210 | 58.842 |
| LZFPM | 1 | 1000 | 138.700 | 277.236 |
| LZFSM | 1 | 1000 | 133.255 | 764.790 |
| ADIMP | 0.1 | 0.5 | 0.287 | 0.330 |
| LZPK | 0.0001 | 0.025 | 0.010 | 0.0201 |
| UZK | 0.01 | 0.25 | 0.158 | 0.166 |
| ZPERC | 1 | 250 | 103.892 | 115.433 |
| REXP | 1 | 5 | 3.124 | 4.293 |
| LZSK | 0 | 0.6 | 0.005 | 0.0000316 |
| PCTIM | 0 | 0.1 | 0.047 | 0.0433 |
| PFREE | 0 | 0.4 | 0.374 | 0.399 |
| N | 0.9 | 10 | 9.988 | 9.999 |
| K | 0.1 | 1 | 0.215 | 0.221 |
| HAMON | 0.1 | 2 | 1.635 | 1.939 |

(b) Modelo TUW

| **Parámetro** | **Valor mínimo** | **Valor máximo** | **KMoments** | **NSE** |
|---|---|---|---|---|
| SCF | 0.5 | 2 | 1.009 | 1.096 |
| DDF | 0 | 5 | 1.710 | 1.726 |
| Tr | 1 | 5 | 2.501 | 3.536 |
| Ts | -3 | 1 | -0.255 | -1.489 |
| Tm | -2 | 4 | 0.460 | 1.734 |
| LPrat | 0 | 1 | 0.938 | 0.999 |
| FC | 0.01 | 1000 | 279.873 | 260.763 |
| BETA | 0 | 20 | 19.999 | 15.305 |
| k0 | 0 | 2 | 0.331 | 0.348 |
| k1 | 2 | 30 | 7.125 | 7.279 |
| k2 | 30 | 500 | 88.918 | 75.872 |
| lsuz | 1 | 100 | 42.311 | 45.276 |
| cperc | 0 | 10 | 2.645 | 2.239 |
| bmax | 0 | 30 | 13.244 | 16.732 |
| croute | 0 | 50 | 39.986 | 27.346 |

## 5.3. Simulación en Isla Robinson Crusoe

La modelación hidrológica se centró en las cinco captaciones de agua que abastecen a la población de la Isla Robinson Crusoe, las cuales se diferencian principalmente por su tamaño y volumen de aporte hídrico. En la Tabla 12 se presenta la información de cada captación, incluyendo su área y ubicación geográfica. Estos datos resultan esenciales tanto para la representación espacial de las cuencas como para el cálculo del factor de ponderación empleado en la incorporación de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación.

Tabla 12: Áreas y coordenadas de las captaciones de agua.

| **Captación** | **Área (km²)** | **Latitud (°)** | **Longitud (°)** |
|---|---|---|---|
| Carbonera | 0.626 | -33.6454 | -78.8403 |
| Cortafuegos | 1.090 | -33.6366 | -78.8413 |
| Dama Juana | 0.451 | -33.6480 | -78.8398 |
| El Guindal | 0.183 | -33.6381 | -78.8462 |
| Juan Bueno | 1.154 | -33.6461 | -78.8389 |

Las principales forzantes consideradas en la modelación corresponden a la precipitación (P) y la temperatura (T). Para generar las series de entrada, se utilizó la información disponible de la DMC. Con el fin de reflejar las diferencias espaciales en la distribución de la lluvia sobre la isla, las captaciones fueron georreferenciadas y ubicadas en el mapa de la interpolación IDW, a partir del cual se extrajeron las series temporales correspondientes. Posteriormente, se aplicó un factor de ponderación calculado a partir del cociente entre el promedio mensual de precipitación obtenido mediante dicha interpolación en cada captación y el promedio registrado en la estación Juan Fernández durante el mismo período.

En la Tabla 13 se presentan las precipitaciones medias mensuales estimadas y los factores de ponderación calculados para cada captación, los cuales fueron aplicados a la serie base de la estación Juan Fernández de la DMC para ajustar la variabilidad espacial en las simulaciones hidrológicas.

Tabla 13: Factor de ponderación.

| **Captación** | **Precipitación media mensual (mm)** | **Factor de ponderación** |
|---|---|---|
| Cortafuegos | 68.663 | 1.015 |
| El guindal | 69.296 | 1.025 |
| Juan Bueno | 69.599 | 1.029 |
| Carbonera | 69.751 | 1.031 |
| Dama juana | 69.780 | 1.032 |
| Estación JF | 67.639 | 1 |

Luego, a partir de las forzantes de la isla, se definieron dos periodos en función de la disponibilidad de los datos:

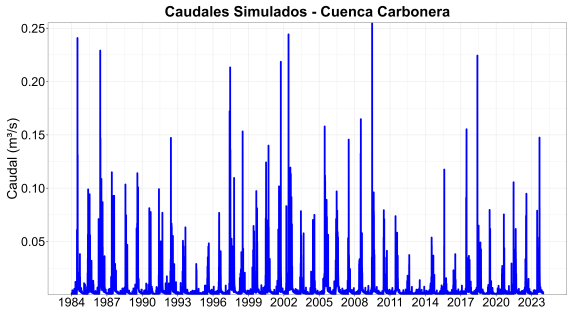
- **Periodo de warm-up:** 01/04/1979 – 31/12/1983.
- **Periodo de simulación:** 01/01/1984 – 31/12/2023.

Posteriormente, se ejecutó la modelación hidrológica transfiriendo los parámetros calibrados correspondiente a cada función objetivo, lo que implicó la realización de cuatro simulaciones por modelo, sumando un total de ocho simulaciones.

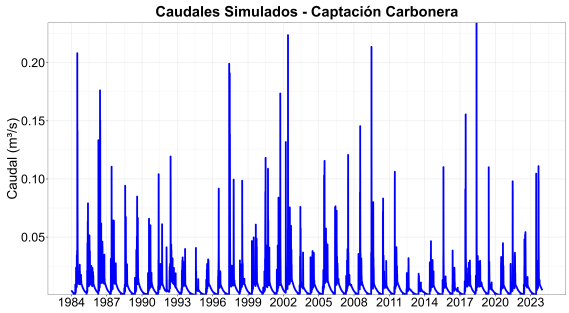
Dada la cantidad de escenarios generados, se presentan únicamente los resultados obtenidos con las funciones objetivo KMoments y NSE, considerando como caso representativo la captación Carbonera del sistema Lord Anson (Figura 18). Esta fuente fue seleccionada por ser la principal de abastecimiento durante el verano y una de las captaciones de mayor tamaño en la isla (Aquaterra, 2025). Los resultados correspondientes al resto de las funciones objetivo y captaciones se incluyen

en el Anexo A.

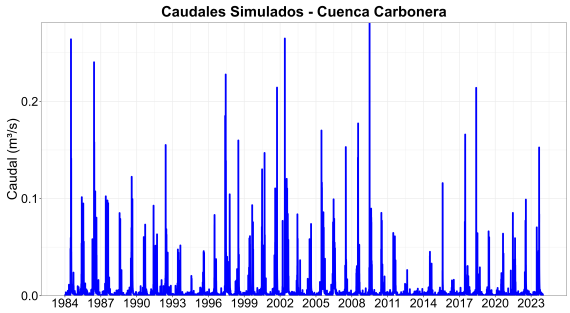
En la figura se observa la evolución temporal de los caudales simulados por ambos modelos, destacando una marcada variabilidad interanual. Visualmente, se aprecia que los valores máximos tienden a disminuir progresivamente a partir de mediados de 2009, lo que sugiere una posible reducción de los eventos de mayor magnitud. Además, los caudales bajos muestran diferencias notables entre modelos: TUW presenta una respuesta más atenuada, con una representación más continua del flujo base, mientras que SAC-SMA reproduce pulsos más abruptos, evidenciando una menor persistencia de caudales en periodos secos. Este contraste ilustra las diferencias estructurales entre ambos enfoques de modelación y refuerza la necesidad de considerar su comportamiento complementario al analizar la dinámica hidrológica de la isla.



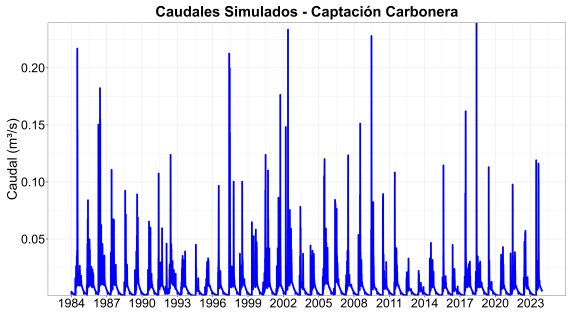

(a) KMoments - SAC-SMA.




(b) KMoments - TUW Model.




(c) NSE - SAC-SMA.




(d) NSE - TUW Model.

Figura 18: Caudales captación Carbonera - KMoments y NSE.

En la Tabla 14 se presentan los valores de caudal máximo, medio y desviación estándar obtenidos para cada captación con las funciones objetivo KMoments y NSE, aplicadas en ambos modelos. En el caso de SAC-SMA, la captación Cortafuegos registró los mayores caudales medios y máximos, mientras que El Guindal presentó la menor desviación estándar. Para el TUW Model, la captación Juan Bueno alcanzó los mayores valores de caudal medio y máximo en ambas métricas, seguida por Cortafuegos en el caso de KMoments.

Tabla 14: Estadísticas de captaciones.

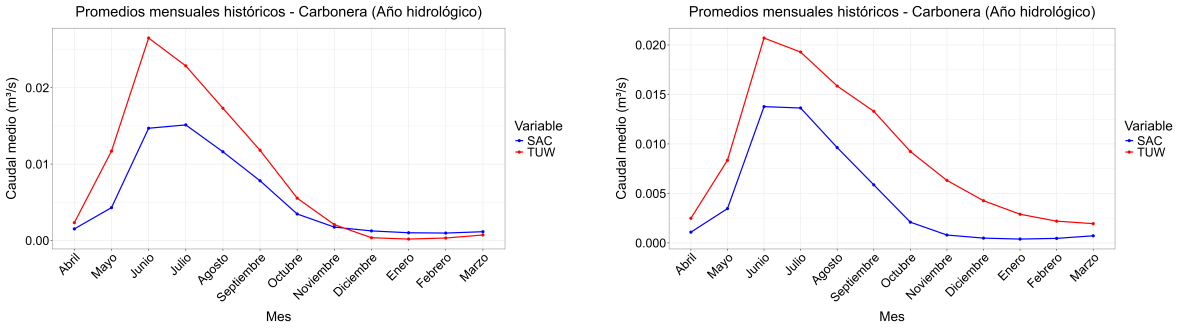
| **Captación** | **Estadística** | **SAC-SMA ($m^3/s$)** | | **TUW ($m^3/s$)** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **KMoments** | **NSE** | **KMoments** | **NSE** |
| Carbonera | Caudal Máximo | 0.255 | 0.281 | 0.341 | 0.240 |
| | Caudal Medio | 0.005 | 0.004 | 0.009 | 0.009 |
| | Desviación Estándar | 0.014 | 0.014 | 0.020 | 0.014 |
| Juan Bueno | Caudal Máximo | 0.432 | 0.473 | 0.431 | 0.407 |
| | Caudal Medio | 0.009 | 0.007 | 0.015 | 0.015 |
| | Desviación Estándar | 0.023 | 0.023 | 0.025 | 0.024 |
| Dama juana | Caudal Máximo | 0.184 | 0.203 | 0.169 | 0.173 |
| | Caudal Medio | 0.004 | 0.003 | 0.006 | 0.006 |
| | Desviación Estándar | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| El Guindal | Caudal Máximo | 0.074 | 0.081 | 0.068 | 0.069 |
| | Caudal Medio | 0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.003 |
| | Desviación Estándar | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.004 |
| Cortafuegos | Caudal Máximo | 0.469 | 0.516 | 0.399 | 0.440 |
| | Caudal Medio | 0.010 | 0.008 | 0.014 | 0.016 |
| | Desviación Estándar | 0.025 | 0.025 | 0.023 | 0.027 |

## 5.4. Caracterización fluviométrica de la isla

En esta sección se presenta la caracterización fluviométrica de la Isla Robinson Crusoe, abarcando el análisis de su climatología y las firmas hidrológicas obtenidas a partir de las simulaciones realizadas. Asimismo, se incluye el análisis de tendencias aplicado a las series de datos, con el fin de identificar posibles cambios en el régimen hidrológico de la isla.

En la Figura 19 se presentan las curvas de variación estacional para la captación Carbonera, considerando las funciones objetivo KMoments y NSE. Con KMoments, el modelo SAC-SMA simula caudales menores que el TUW Model durante la mayor parte del año, aunque entre noviembre y marzo proyecta valores superiores. En este caso, SAC-SMA alcanza su máximo en julio y su mínimo en febrero, mientras que TUW registra el máximo en junio y el mínimo en enero. Con NSE se observa un patrón estacional similar, pero SAC-SMA nunca supera a TUW: ambos modelos presentan su máximo en junio, aunque el mínimo ocurre en enero para SAC-SMA y en marzo para TUW.

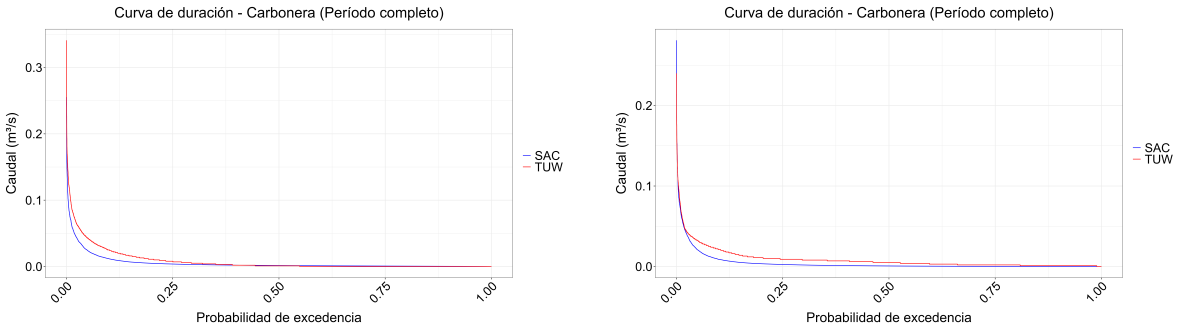
Este comportamiento, consistente con los contrastes observados en la calibración de la cuenca donante, será discutido en mayor detalle en la sección de Análisis y discusión de resultados.




(a) KMoments (b) NSE

Figura 19: Curvas de variación estacional.

Las firmas hidrológicas para ambas metricas se presentan en la Figura 20. En términos generales, para una misma probabilidad de excedencia, TUW simula caudales superiores a los de SAC-SMA, en concordancia con lo observado en las curvas de variación estacional. En ambas casos, la curva del TUW Model muestra una forma más escalonada que la del SAC-SMA. Por otro lado, con KMoments las curvas tienden a converger alrededor de una probabilidad de excedencia de 38 % aproximadamente, en cambio en NSE esto sucede para valores mayores al 75 %.




(a) KMoments (b) NSE

Figura 20: Curvas de duración de caudales.

## 5.5. Análisis de tendencias

En esta sección se presentan los resultados del análisis de tendencias de las principales variables forzantes de los modelos hidrológicos —precipitación y temperatura—, junto con los caudales simulados. Para cada variable se aplicó el test de Mann-Kendall y el estimador de pendiente de Theil-Sen, considerando tanto el período histórico completo (1984–2023) como intervalos de diez años, con el objetivo de identificar posibles cambios en el comportamiento de las series a distintas escalas temporales.

En la Tabla 15 se muestran los resultados correspondientes a la precipitación, donde se observa una tendencia negativa en el período histórico y también entre los años 2004–2013, ambas estadísticamente significativas. En cuanto a la Tabla 16, que presenta los resultados para la temperatura, se detecta una tendencia significativa únicamente en el período 2014–2023, también de carácter negativo.

Tabla 15: Tendencias de precipitación por período.

| Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen (mm/año) |
|---|---|---|---|
| 1984-1993 | No significativa | 0.107 | -33.08 |
| 1994-2003 | No significativa | 0.283 | 48.59 |
| 2004-2013 | Significativa | 0.032 | -52.35 |
| 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 11.63 |
| 1984-2023 | Significativa | 0.022 | -5.13 |

Tabla 16: Tendencias de temperatura por período.

| Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen (C/año) |
|---|---|---|---|
| 1984-1993 | No significativa | 0.592 | -0.0045 |
| 1994-2003 | No significativa | 0.210 | -0.0585 |
| 2004-2013 | No significativa | 0.592 | 0.0332 |
| 2014-2023 | Significativa | 0.049 | -0.0605 |
| 1984-2023 | No significativa | 0.079 | -0.0078 |

En la Tabla 17 se presentan los resultados del test de Mann-Kendall y del estimador de Theil-Sen aplicados a los caudales simulados en la captación Carbonera, considerando tanto el período completo como intervalos de diez años. Se observó que entre 2004 y 2013 ambos modelos hidrológicos presentan una tendencia negativa, patrón que también se repite en el período completo, aunque con algunas excepciones: en la métrica NSE, la tendencia significativa solo se detectó en los datos del TUW Model, mientras que en la métrica KGE se identificó una tendencia descendente en el SAC-SMA durante 1984–1993. Dado que en el resto de las captaciones se obtuvieron los mismos resultados, únicamente se presentan aquí los de Carbonera, mientras que los demás se incluyen en Anexos C por motivos de extensión.

Tabla 17: Tendencias de caudales por métrica, período y modelo hidrológico.

| Métrica | Modelo | Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen |
|---|---|---|---|---|---|
| NSE | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.107 | -0.0003 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0005 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0006 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0010 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0007 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0009 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0003 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0002 |
| | SAC | 1984-2023 | No significativa | 0.055 | -0.0001 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.028 | -0.0001 |

| Métrica | Modelo | Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen |
|---|---|---|---|---|---|
| KGE | SAC | 1984-1993 | Significativa | 0.049 | -0.0004 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.210 | -0.0006 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0006 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0009 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0009 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0010 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0003 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.474 | 0.0003 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.033 | -0.0001 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.048 | -0.0001 |
| KGE_logNSE | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.074 | -0.0003 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0006 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.152 | 0.0008 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0009 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.020 | -0.0008 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0010 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0003 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.474 | 0.0002 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.018 | -0.0001 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.035 | -0.0001 |
| KMoments | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.074 | -0.0004 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.210 | -0.0006 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0007 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0009 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0008 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0010 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0003 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.474 | 0.0003 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.026 | -0.0001 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.048 | -0.0001 |

# 6. Análisis y discusión de resultados

Los resultados obtenidos a partir de la calibración de modelos hidrológicos en la cuenca donante y su posterior aplicación en la Isla Robinson Crusoe permiten analizar la capacidad de transferencia de parámetros y la representatividad de los caudales simulados en un territorio con limitaciones de datos. Es por esto que en esta sección se discute los principales hallazgos de los procesos involucrados, comparando y evaluando la relación de los resultados obtenidos con la realidad de la isla.

## 6.1. Calibración en cuenca donante

La calibración de los modelos SAC-SMA y TUW en la cuenca del río Cauquenes evidenció desempeños satisfactorios en todas las métricas aplicadas. En términos generales, KMoments presentó el mejor comportamiento, al registrar los menores valores de RMSE y los coeficientes de correlación

más altos en ambos períodos, logrando así una representación más precisa de las características estadísticas de los caudales simulados frente a las demás métricas evaluadas.

En el caso del SAC-SMA, los resultados muestran un ajuste global más consistente, aunque con sesgos negativos en varios escenarios que sugieren una ligera subestimación de los caudales. Por su parte, el TUW Model alcanzó un desempeño más balanceado: si bien registró valores de RMSE algo superiores, mantuvo un sesgo positivo en todas las métricas, reflejando una leve sobrestimación de los flujos. En conjunto, ambos modelos reprodujeron de manera adecuada la dinámica hidrológica, diferenciándose principalmente en la magnitud de los caudales simulados.

Si bien el índice NSE entregó valores de la función objetivo más bajos, esto no es del todo comparable con los demas índices, aun así presentó un sesgo moderado, mantuvo un rendimiento competitivo en términos de RMSE y correlación. Además, visualmente demostró una adecuada capacidad para representar la variación estacional, especialmente en los períodos húmedos, lo que justifica su consideración en los análisis posteriores.

## 6.2. Simulaciones en la Isla Robinson Crusoe

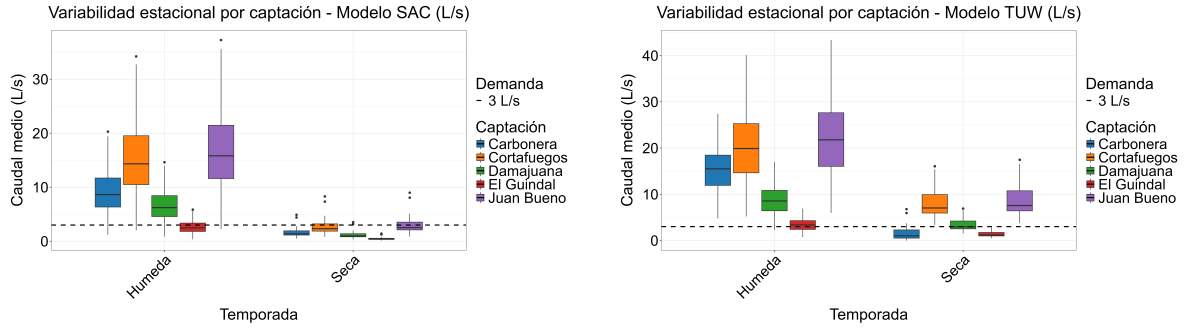
Los datos simulados muestran una marcada estacionalidad, con máximos asociados a los meses de mayor precipitación (invierno) y mínimos en los períodos secos (verano). Entre las captaciones destacan Juan Bueno y Cortafuegos, que presentaron caudales medios superiores debido a sus mayores áreas de aporte, mientras que El Guindal mostró valores más reducidos, coherentes con su menor superficie. De todas formas, la captación Carbonera adquiere especial relevancia por ser la principal de abastecimiento durante el verano, cuando la oferta hídrica es más crítica, y por constituir una de las captaciones de mayor tamaño en la isla.

En términos generales, los caudales obtenidos se mantienen dentro de rangos consistentes con los antecedentes pluviométricos disponibles y estudios previos sobre la disponibilidad hídrica en la isla. Sin embargo, la ausencia de registros observados impide validar directamente la magnitud de los flujos, lo que introduce una limitación relevante en la interpretación de los resultados. Bajo esta premisa, ningún modelo puede considerarse plenamente correcto, por lo que lo esencial es identificar y cuantificar la incertidumbre asociada a las simulaciones.

En la Figura 21 se muestra la variabilidad estacional de los caudales medios por captación, diferenciando entre la temporada húmeda (abril–septiembre) y la seca (octubre–marzo). En esta figura se incorpora una línea negra segmentada que representa la demanda estimada de agua, calculada para una dotación de 200 L/persona/día y una población de 1000 habitantes, equivalente a aproximadamente 3 L/s.

Los resultados obtenidos con el modelo SAC-SMA muestran que, durante la temporada húmeda, los caudales medios de todas las captaciones superan la demanda, a excepción de El Guindal, que se mantiene justo en el umbral de consumo. En cambio, durante la temporada seca, solo Juan Bueno logra aproximarse a cubrir la demanda, mientras que las demás captaciones permanecen por debajo de esta, evidenciando un escenario crítico de disponibilidad hídrica para dicho período. Por su parte, el TUW Model presenta un comportamiento más favorable: en la temporada húmeda, todos los caudales medios superan ampliamente la demanda —en concordancia con la tendencia de este modelo a simular mayores volúmenes que SAC-SMA—, mientras que en la estación seca solo

Carbonera y El Guindal se mantienen por debajo del umbral. Este resultado sugiere que, a pesar de considerarse la captación más estable durante el verano, Carbonera podría también experimentar déficits hídricos bajo condiciones de sequía prolongada, lo que refuerza la necesidad de un manejo preventivo y adaptativo de los recursos disponibles.




(a) SAC-SMA (b) TUW

Figura 21: Variabilidad estacional por captación. La línea negra segmentada corresponde a la demanda de agua para consumo humano de la isla.

Tal como se ha visto anterioremente, la comparación entre modelos muestra que TUW genera caudales mayores que SAC-SMA, lo que resulta coherente con el comportamiento observado en la cuenca donante, pero ¿Cómo se podría explicar este fenómeno?

En primer lugar, en el Anexo B se observa que, bajo la métrica KMoments, TUW supera a SAC-SMA en siete de los doce meses del año, mientras que con NSE lo hace en diez meses. Esto ya anticipa una tendencia hacia valores más altos en el modelo TUW.

Para complementar el análisis, la Figura 22 ilustra la evoluacion temporal de variables hidrometeorológicas para dos eventos de crecida simulados entre el 11 y el 25 de junio de 1997, utilizando la función objetivo KMoments en los modelos SAC-SMA y TUW. En la figura se presentan cinco paneles que muestran el hidrograma, la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración y la percolación obtenidas en las simulaciones de SAC-SMA y TUW (exceptuando la precipitación y temperatura, que son comunes a ambos casos).

En el hidrograma se observa que el modelo TUW responde más rápidamente al inicio del evento, concentrando la escorrentía en un intervalo de tiempo más corto. En este caso particular, genera un peak ligeramente menor que el de SAC-SMA; sin embargo, en la mayoría de los eventos analizados, TUW tiende a producir picos de caudal más altos, lo que refleja su menor capacidad de amortiguamiento frente a precipitaciones intensas. En contraste, SAC-SMA, cuya respuesta está asociada a funciones de distribución gamma, atenúa y dispersa los picos, generando hidrogramas más amplios y suavizados.

En cuanto a la percolación, SAC-SMA presenta un comportamiento más dinámico y de mayor magnitud, producto de su estructura multicapa que simula procesos diferenciados de infiltración, recarga y flujo subterráneo. TUW, en cambio, representa la percolación como un proceso constante en el tiempo, debido a su formulación más simplificada, lo que implica una conversión más directa

de la precipitación en escorrentía superficial.

Por último, la diferencia en los caudales también se explica por el tratamiento de la evapotranspiración (ETP). En TUW, esta se mantiene relativamente constante y con valores menores, reduciendo las pérdidas y aumentando el volumen de escorrentía disponible. En SAC-SMA, en cambio, la ETP afecta directamente el contenido de agua en los almacenamientos en tensión, desde donde el agua se pierde principalmente por evapotranspiración cuando está disponible, lo que contribuye a una reducción más significativa de los caudales simulados.

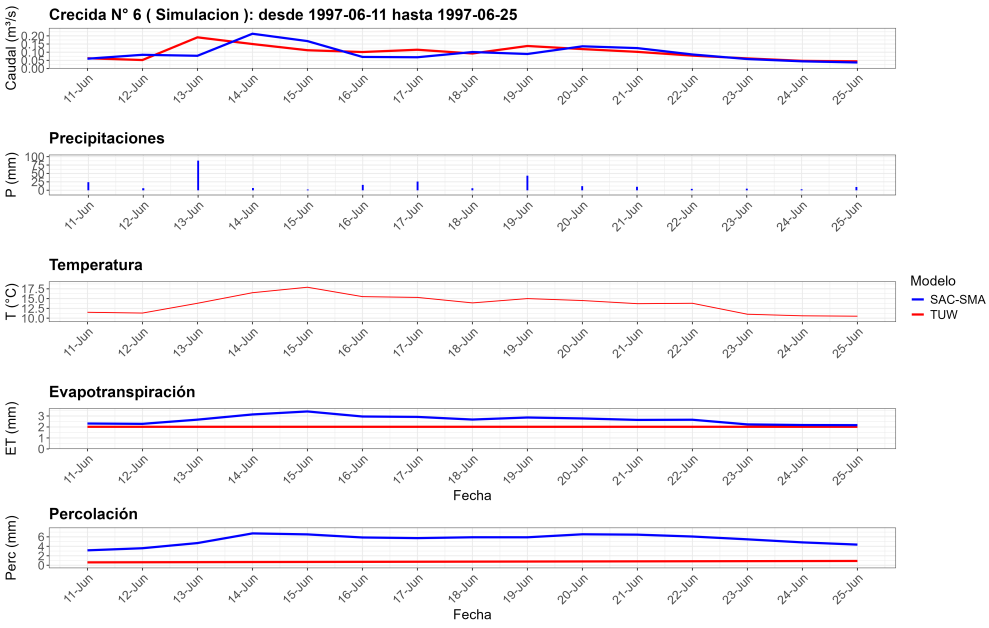



Figura 22: Crecida N°5.

Finalmente, respecto al análisis de tendencias, los resultados obtenidos mediante las pruebas de Mann–Kendall y Theil–Sen evidencian la presencia de tendencias negativas en ciertos periodos, particularmente entre 2004 y 2013, así como al considerar el periodo completo de estudio. Este comportamiento coincide con la Megasequía que afecta a la zona central de Chile desde aproximadamente 2008, caracterizada por una reducción sostenida de las precipitaciones cercana al 25 % respecto de los promedios históricos y considerada el episodio seco más extenso y severo del último siglo (Garreaud et al., 2020). Además, la Figura 7 muestra una tendencia descendente en los registros pluviométricos locales que se hace manifiesta a partir de mediados de la década de 2000, lo que refuerza la interpretación de que la disminución de caudales simulados obedece a cambios en las forzantes meteorológicas de la isla y no un fenómeno producido por la transferencia de parámetros desde la cuenca continental. En este contexto, las tendencias negativas detectadas apuntan a una reducción progresiva de la oferta hídrica en el mediano y largo plazo, con claras implicancias para la seguridad y la resiliencia hídrica de la Isla Robinson Crusoe.

# 7. Conclusiones y recomendaciones

La presente investigación tuvo como objetivo general cuantificar la oferta hídrica natural de la Isla Robinson Crusoe mediante la implementación de los modelos hidrológicos SAC-SMA y TUW, considerando la escasez de datos meteorológicos disponibles. Para superar esta limitación, se aplicó una estrategia de transferencia de parámetros desde una cuenca donante, utilizando criterios de similitud climática y fisiográfica basados en el índice de disimilitud. El enfoque adoptado permitió integrar información de diversas fuentes (registros históricos de la DMC, productos satelitales IMERG y modelos digitales de elevación) con el fin de generar simulaciones hidrológicas representativas de la dinámica insular.

En términos de calibración en la cuenca donante, ambos modelos alcanzaron desempeños satisfactorios, destacando el uso de las métricas KMoments y NSE, que ofrecieron ajustes consistentes en la representación de caudales observados. En el caso del SAC-SMA, algunos parámetros (UZTWM, PFREE y N) se ajustaron muy próximos a sus límites superiores, lo que refleja una alta sensibilidad en los procesos de almacenamiento y percolación. En contraste, el TUW Model presentó un ajuste más equilibrado, con parámetros dentro de rangos intermedios y menor sesgo en la mayoría de los escenarios evaluados.

Al aplicar estos modelos a la Isla Robinson Crusoe, se observaron diferencias relevantes entre ellos. El SAC-SMA tendió a simular caudales medios menores, aunque en la estación estival proyectó mayores valores que TUW en algunos casos. Por su parte, el TUW Model reprodujo caudales medios superiores y firmas hidrológicas más escalonadas, coherentes con su estructura conceptual. Sin embargo, el análisis de los procesos internos (precipitación efectiva, percolación y evapotranspiración potencial) sugiere que SAC-SMA podría ofrecer una representación más fidedigna de la realidad insular al plantear escenarios más críticos, conviertiéndose en una herramienta útil para evaluar condiciones de escasez hídrica extrema.

El análisis de tendencias, basado en las pruebas de Mann–Kendall y Theil–Sen, reveló una disminución significativa en la disponibilidad hídrica de la Isla Robinson Crusoe, evidenciada por las tendencias negativas observadas en los caudales simulados durante el período 2004–2013 y en el intervalo completo de estudio (1984–2023). Este comportamiento concuerda con lo observado en las forzantes meteorológicas locales: en la Tabla 15 y en la Figura 7, ambas correspondientes a las precipitaciones, se aprecia una tendencia significativamente negativa en los mismos intervalos, reflejando una reducción sostenida de los montos pluviométricos a partir de mediados de la década de 2000. De forma complementaria, la Tabla 16, asociada a la temperatura, muestra una tendencia significativa y también negativa durante el período 2014–2023, lo que sugiere un enfriamiento leve en la etapa más reciente. En conjunto, estos resultados confirman que la disminución de los caudales simulados responde a cambios en las condiciones climáticas locales, más que a la transferencia de parámetros desde la cuenca continental. Este patrón coincide con la Megasequía que afecta a la zona central de Chile desde aproximadamente 2008, caracterizada por una reducción promedio de las precipitaciones del orden del 25 % respecto de los valores históricos (Garreaud et al., 2020). Esta prolongada escasez hídrica —considerada el evento seco más extenso y severo del último siglo— ha afectado la recarga de los sistemas hídricos superficiales y subterráneos, reflejándose en la dinámica hidrológica insular. En conjunto, los resultados evidencian un escenario de reducción progresiva de la oferta hídrica, lo que plantea un desafío crítico para la seguridad y resiliencia hídrica de la isla, y subraya la necesidad de estrategias de gestión adaptativa y planificación sostenible del recurso.

La investigación también pone de manifiesto ciertas limitaciones, principalmente asociadas a la escasez de datos meteorológicos y la necesidad de emplear técnicas de transferencia de parámetros. En este sentido, se recomienda incorporar mediciones de campo que permitan calibrar directamente los modelos: instalar estaciones meteorológicas adicionales y realizar campañas de aforo en captaciones clave como Carbonera y El Guindal. Además, es pertinente explorar nuevas cuencas donantes en territorios insulares con condiciones comparables, tanto en el hemisferio sur (e.g., Islas Malvinas o Nueva Zelanda) como en el hemisferio norte (e.g., islas del Caribe o Hawái), con el fin de mejorar la transferencia de parámetros y adaptarlos a las características particulares de Robinson Crusoe.

Finalmente, se propone fomentar campañas de medición de caudal en la isla, involucrando a la comunidad local y a especialistas en hidrología, para generar series de datos confiables que fortalezcan la calibración y validación de modelos hidrológicos en este entorno insular. Resulta fundamental resguardar las captaciones más críticas para el abastecimiento de agua y promover la conservación de la vegetación nativa, dado su rol clave en la regulación del ciclo hidrológico, la estabilidad del suelo y la mitigación de procesos erosivos que podrían comprometer la sostenibilidad del recurso.

En conjunto, los resultados de esta investigación constituyen una base técnica sólida para la gestión sostenible del recurso hídrico en la Isla Robinson Crusoe, aportando lineamientos que refuerzan la resiliencia del ecosistema frente a escenarios de creciente incertidumbre climática.

# Referencias


Anderson, E. A. (1976). *A point energy and mass balance model of a snow cover* (NOAA Technical Report NWS 19). National Weather Service, NOAA. Silver Spring, MD.

Anderson, E. A. (2006). *Snow accumulation and ablation model - SNOW-17: User's guide* (inf. téc.). National Weather Service, NOAA. Silver Spring, MD.

Aquaterra. (2025). *Estudio hidrogeológico y de mecánica de suelos, Comuna de Juan Fernández* (Versión B). Aquaterra. Santiago, Chile.

Araya, D., Mendoza, P. A., Muñoz-Castro, E., & McPhee, J. (2023). Towards robust seasonal streamflow forecasts in mountainous catchments: impact of calibration metric selection in hydrological modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, *27*, 4385-4408. https://doi.org/10.5194/hess-27-4385-2023

Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., de Roo, A., Miralles, D. G., McVicar, T. R., Schellekens, J., & Bruijnzeel, L. A. (2016). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, *52*(6), 4178-4202. https://doi.org/10.1002/2015WR018247

Burnash, R. J. C., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). *A generalized streamflow simulation system: Conceptual modeling for digital computers* (inf. téc.). Joint Federal-State River Forecast Center. Sacramento, CA.

Cereceda, P., Castro, C., & Osses Z., P. (1996). Comportamiento de las precipitaciones en cinco sectores de la Isla Robinson Crusoe durante los inviernos de los años 1992 a 1995. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, *41*, 37-48.

Cereceda, P., Schemenauer, R., & Zunino, H. (1993). Distribución de la precipitación en isla Robinson Crusoe. *Revista de Geografía Norte Grande*, *21*, 33-36.

CIREN. (2021). *Recursos naturales comuna de Isla de Juan Fernández*. Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Santiago, Chile.

Duan, Q. (1992). *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models* [Unpublished doctoral dissertation]. University of Arizona.

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

Hamon, W. R. (1960). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division*, *86*(3), 107-120.

Ilustre Municipalidad de Juan Fernández. (2025, febrero). *Mejoramiento de Captaciones y Aducciones, Comuna de Juan Fernández* (inf. téc.) (Programa de Mejoramiento de Barrios – PMB 2024, SUBDERE). Secretaría Comunal de Planificación. Isla Robinson Crusoe, Archipiélago Juan Fernández.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2018). Censo de Población y Vivienda 2017: Resultados Definitivos, Comuna de Juan Fernández [Disponible en: https://www.censo2017.cl/].

IREN & CORFO. (1982). *Estudio de los recursos físicos Archipiélago Juan Fernández* (Informe IREN N45). Secretaría Regional de Planificación y Coordinación de la Región de Valparaíso. Santiago, Chile.

Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods* (4.ª ed.). Charles Griffin.

Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, *424-425*, 264-277. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (2001). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *99*(D7), 14415-14428. https://doi.org/10.1029/2000WR900207

Lohmann, D., Nolte-Holube, R., & Raschke, E. (1996). A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parameterization schemes. *Tellus A*, *48*(5), 708-721. https://doi.org/10.3402/tellusa.v48i5.12200

Marzol, M. V., Cereceda, P., Schemenauer, R., & Castro, C. (1996). Characteristics of the precipitation of Bahía Cumberland (Robinson Crusoe Island, Chile). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, *22*, 97-114. https://doi.org/10.18172/cig.1045

NASA Global Precipitation Measurement Mission. (s.f.). *IMERG: Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*. Consultado el 2 de agosto de 2025, desde https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/IMERG

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, *10*(3), 282-290. https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6

Nurse, L. A., McLean, R. F., Agard, J., Briguglio, L. P., Duvat-Magnan, V., Pelesikoti, N., Tompkins, E., & Webb, A. (2014). Small islands. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*, 1613-1654. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386.029

Parajka, J., Koffler, D., & Blöschl, G. (2012). *TUWmodel: A conceptual hydrological model for R* [Accessed: 2025-08-02]. Institute of Hydraulic Engineering y Water Resources Management, Vienna University of Technology. https://www.hydro.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-hydro/Publikationen/bloeschl_2012_TUWmodel_Manual.pdf

Parajka, J., Merz, R., & Blöschl, G. (2007). Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modeling: Case study in 320 Austrian catchments. *Hydrological Processes*, *21*(4), 435-446. https://doi.org/10.1002/hyp.6253

Pizarro, A., & Jorquera, J. (2024). Advancing objective functions in hydrological modelling: Integrating knowable moments for improved simulation accuracy. *Journal of Hydrology*, *634*, 131071. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131071

Radio Agricultura. (2018). *Aluvión afecta a Juan Fernández tras intensas lluvias* [20 mayo]. Consultado el 2 de agosto de 2025, desde https://www.radioagricultura.cl

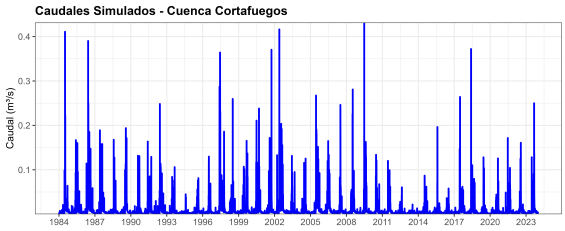
Ritter, A., & Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, *480*, 33-45. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, *63*(324), 1379-1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

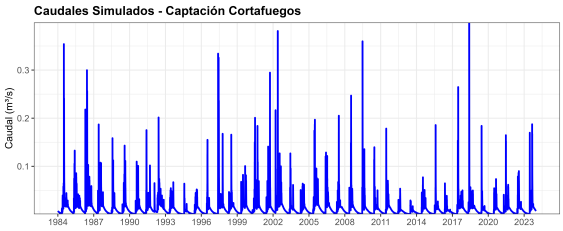
Taner, M. Ü. (2019). *sacsmaR: Sacramento Soil Moisture Accounting Model in R*. https://github.com/tanerumit/sacsmaR

# Anexos

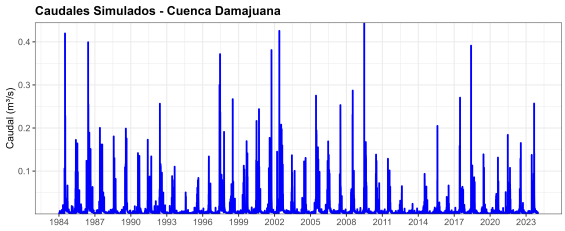
# A. Caudales Simulados en Isla Robinson Crusoe



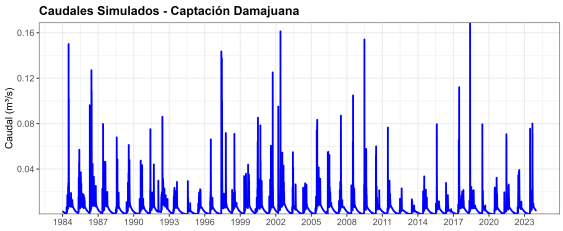

(a) Cortafuegos - SAC-SMA.



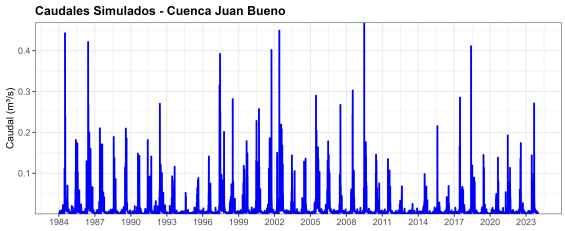

(b) Cortafuegos - TUW Model.



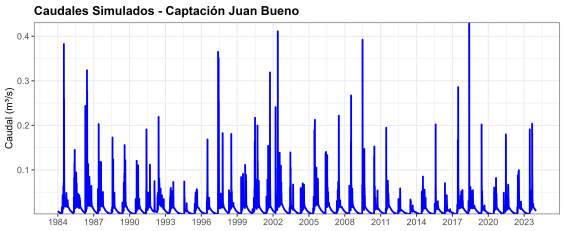

(c) Damajuana - SAC-SMA.



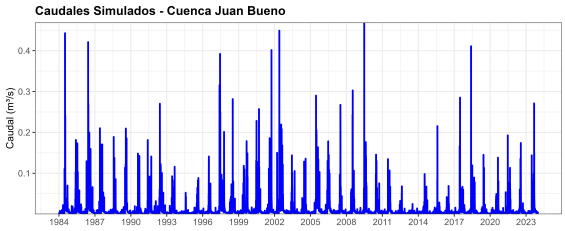

(d) Damajuana - TUW Model.



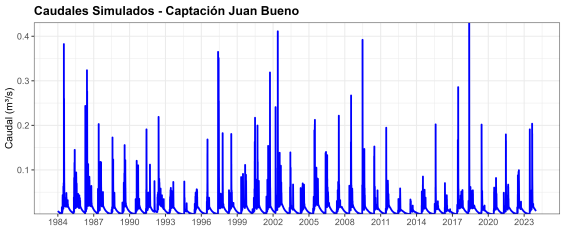

(e) Juan Bueno - SAC-SMA.




(f) Juan Bueno - TUW Model.

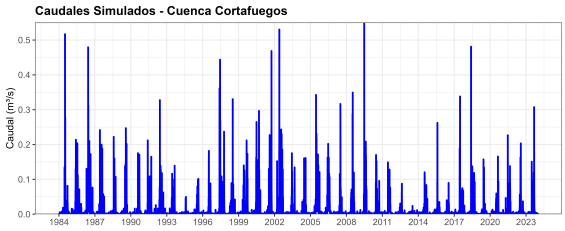



(g) El Guindal - SAC-SMA.

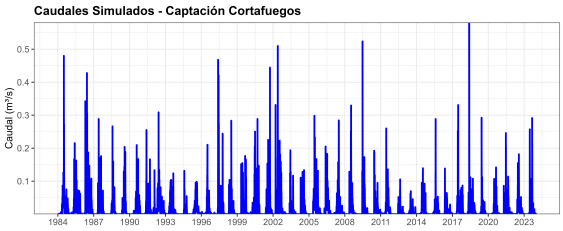



(h) El Guindal - TUW Model.

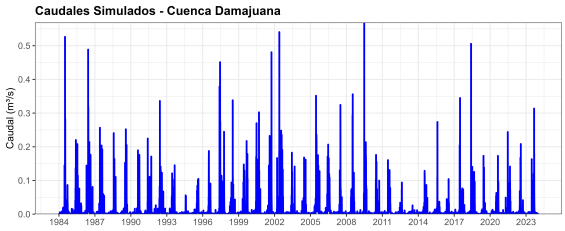
Figura A.1: Caudales simulados - KMoments.



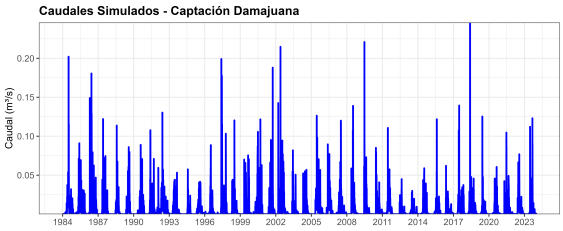

(a) Cortafuegos - SAC-SMA.



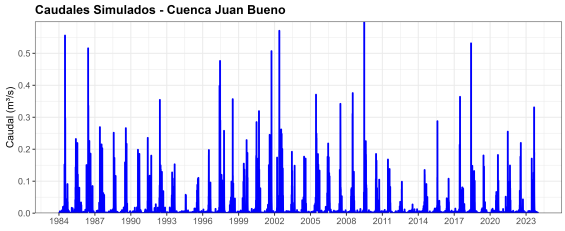

(b) Cortafuegos - TUW Model.



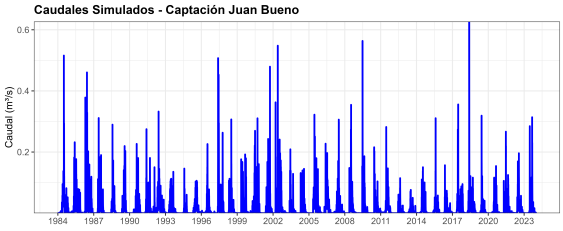

(c) Damajuana - SAC-SMA.



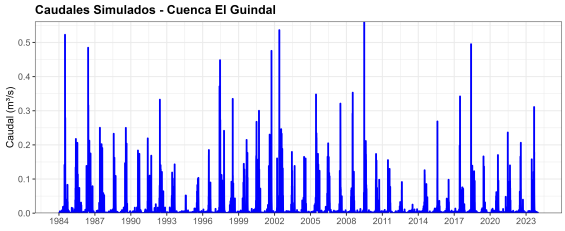

(d) Damajuana - TUW Model.



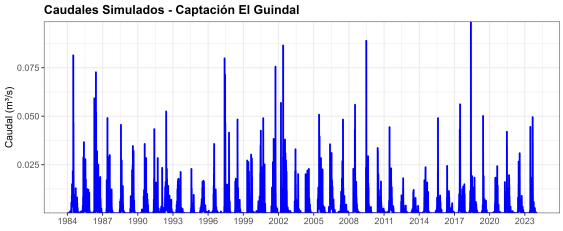

(e) Juan Bueno - SAC-SMA.



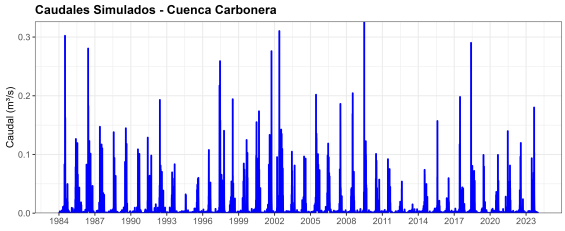

(f) Juan Bueno - TUW Model.



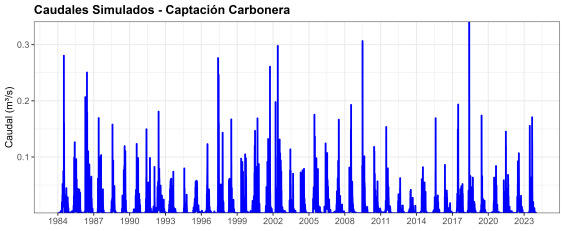

(g) El Guindal - SAC-SMA.




(h) El Guindal - TUW Model.

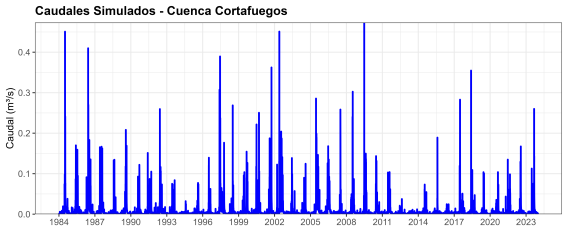



(i) Carbonera - SAC-SMA.

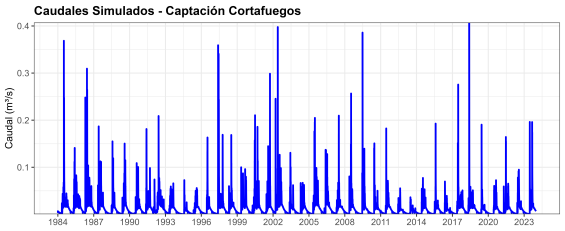



(j) Carbonera - TUW Model.

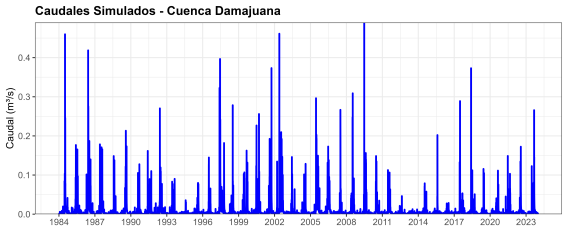
Figura A.2: Caudales simulados - KGE.



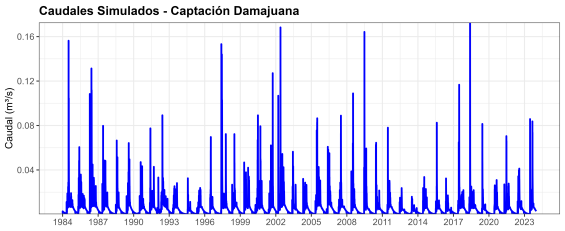

(a) Cortafuegos - SAC-SMA.



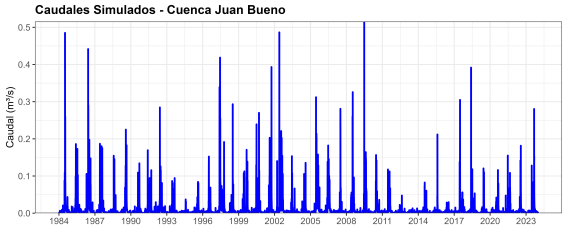

(b) Cortafuegos - TUW Model.



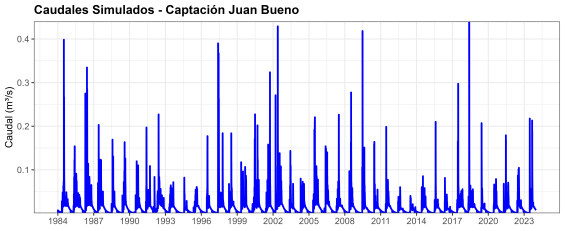

(c) Damajuana - SAC-SMA.



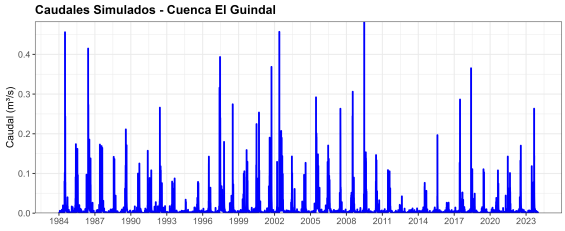

(d) Damajuana - TUW Model.



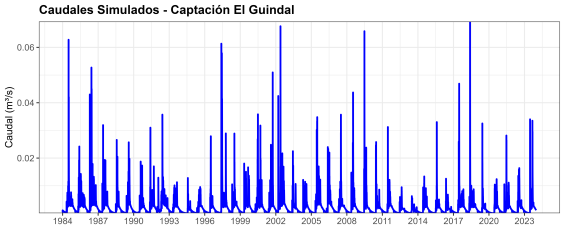

(e) Juan Bueno - SAC-SMA.




(f) Juan Bueno - TUW Model.

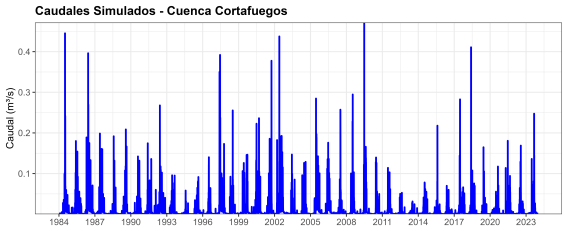



(g) El Guindal - SAC-SMA.

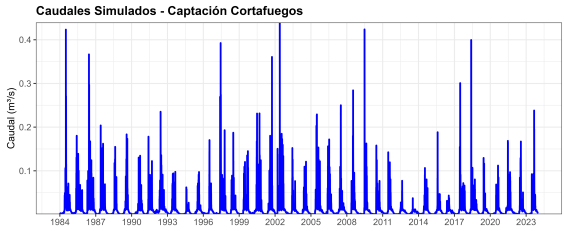



(h) El Guindal - TUW Model.

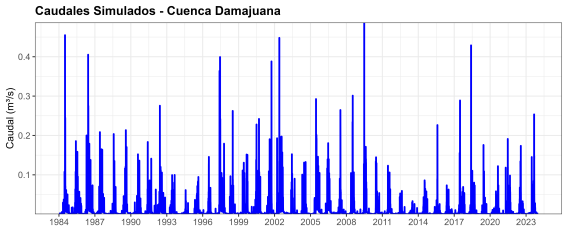
Figura A.3: Caudales simulados - NSE.



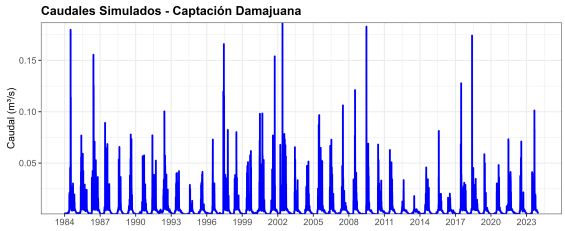

(a) Cortafuegos - SAC-SMA.



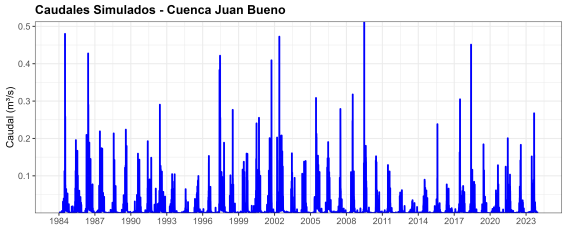

(b) Cortafuegos - TUW Model.



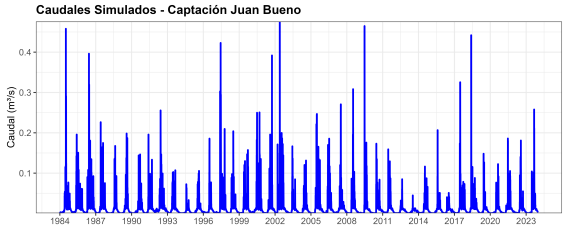

(c) Damajuana - SAC-SMA.



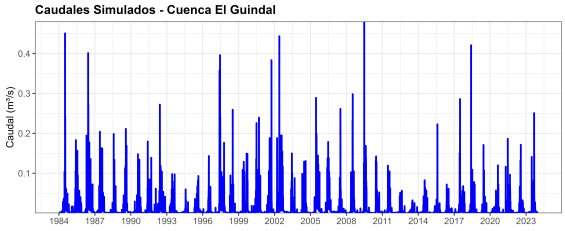

(d) Damajuana - TUW Model.



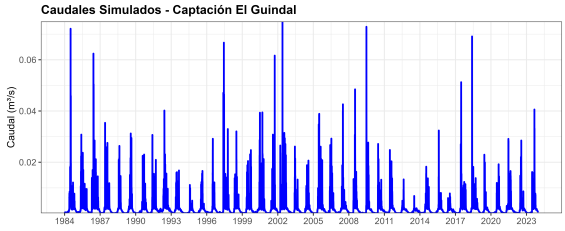

(e) Juan Bueno - SAC-SMA.



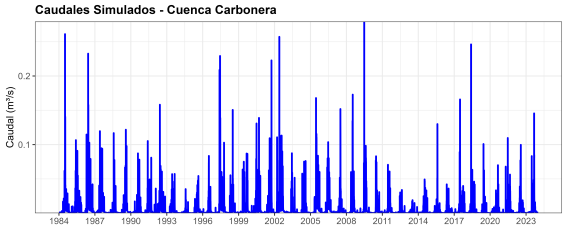

(f) Juan Bueno - TUW Model.



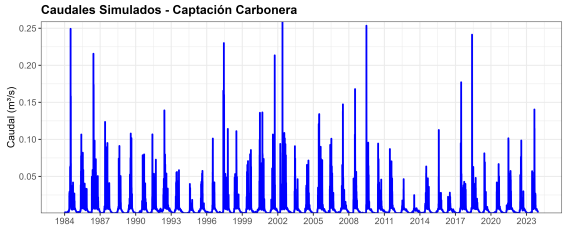

(g) El Guindal - SAC-SMA.




(h) El Guindal - TUW Model.




(i) Carbonera - SAC-SMA.




(j) Carbonera - TUW Model.

Figura A.4: Caudales simulados - KGE_logNSE.

# B. Caudales medios historicos

Tabla B.1: Caudales medios históricos ($m^3/s$) - Calibración.

| Mes | SAC-SMA | | TUW | |
|---|---|---|---|---|
| | KMoments | NSE | KMoments | NSE |
| 1 | 0.127 | 0.030 | 0.278 | 0.239 |
| 2 | 0.102 | 0.023 | 0.199 | 0.166 |
| 3 | 0.105 | 0.041 | 0.145 | 0.116 |
| 4 | 0.160 | 0.099 | 0.119 | 0.087 |
| 5 | 1.299 | 1.292 | 0.929 | 1.073 |
| 6 | 2.969 | 2.964 | 2.689 | 2.988 |
| 7 | 3.700 | 3.668 | 3.512 | 3.815 |
| 8 | 2.308 | 2.102 | 2.254 | 2.441 |
| 9 | 1.059 | 0.800 | 1.217 | 1.288 |
| 10 | 0.484 | 0.304 | 0.811 | 0.806 |
| 11 | 0.254 | 0.113 | 0.563 | 0.517 |
| 12 | 0.181 | 0.062 | 0.398 | 0.349 |

# C. Analisis de tendencias por captación

Tabla C.1: Tendencias de métricas hidrológicas por período y modelo - Captación El Guindal.

| Métrica | Modelo | Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen |
|---|---|---|---|---|---|
| NSE | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.107 | -0.0001 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0001 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0002 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0003 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0002 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.032 | -0.0003 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0001 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0001 |
| | SAC | 1984-2023 | No significativa | 0.058 | -0.00002 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.022 | -0.00003 |
| KGE | SAC | 1984-1993 | Significativa | 0.049 | -0.0001 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.178 | -0.0002 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0002 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0003 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0002 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0003 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0001 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0001 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.033 | -0.00002 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.040 | -0.00003 |

| Métrica | Modelo | Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen |
|---|---|---|---|---|---|
| KGE_LOGNSE | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.074 | -0.0001 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.210 | -0.0002 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.152 | 0.0002 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0003 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.020 | -0.0002 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0003 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0001 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0001 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.018 | -0.00002 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.035 | -0.00003 |
| KMOMENTS | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.074 | -0.0001 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0001 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0002 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0003 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0002 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0003 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0001 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.474 | 0.0001 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.028 | -0.00002 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.019 | -0.00003 |

Tabla C.2: Tendencias de métricas hidrológicas por período y modelo - Captación Damajuana.

| Métrica | Modelo | Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen |
|---|---|---|---|---|---|
| NSE | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.107 | -0.0002 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0004 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0005 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0007 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0005 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.032 | -0.0007 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0002 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0002 |
| | SAC | 1984-2023 | No significativa | 0.055 | -0.00004 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.025 | -0.00007 |
| KGE | SAC | 1984-1993 | Significativa | 0.049 | -0.0003 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.210 | -0.0004 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0004 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0007 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0006 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0007 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0002 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0002 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.033 | -0.00006 |

| Métrica | Modelo | Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen |
|---|---|---|---|---|---|
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.041 | -0.00007 |
| KGE_LOGNSE | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.074 | -0.0002 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0004 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.152 | 0.0006 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0006 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.020 | -0.0006 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0007 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0002 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0002 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.018 | -0.00006 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.035 | -0.00006 |
| KMOMENTS | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.074 | -0.0003 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0004 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0005 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0007 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0006 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.032 | -0.0007 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0002 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.721 | 0.0002 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.026 | -0.00005 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.019 | -0.00007 |

Tabla C.3: Tendencias de métricas hidrológicas por período y modelo - Captación Juan Bueno.

| Métrica | Modelo | Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen |
|---|---|---|---|---|---|
| NSE | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.107 | -0.0006 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0009 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0012 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0018 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0012 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0017 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0005 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0005 |
| | SAC | 1984-2023 | No significativa | 0.055 | -0.00011 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.026 | -0.00017 |
| KGE | SAC | 1984-1993 | Significativa | 0.049 | -0.0007 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.210 | -0.0010 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0011 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0017 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0016 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0018 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0005 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.474 | 0.0005 |

| Métrica | Modelo | Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen |
|---|---|---|---|---|---|
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.033 | -0.00014 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.041 | -0.00017 |
| KGE_LOGNSE | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.074 | -0.0006 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0010 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.152 | 0.0014 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0016 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.020 | -0.0015 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0018 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0005 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0004 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.018 | -0.00016 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.029 | -0.00016 |
| KMOMENTS | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.074 | -0.0007 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0009 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0014 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0019 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0014 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0017 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0005 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.721 | 0.0005 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.028 | -0.00013 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.023 | -0.00019 |

Tabla C.4: Tendencias de métricas hidrológicas por período y modelo - Captación Cortafuegos.

| Métrica | Modelo | Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen |
|---|---|---|---|---|---|
| NSE | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.107 | -0.0006 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0008 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0011 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0016 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0011 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0016 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0004 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.474 | 0.0004 |
| | SAC | 1984-2023 | No significativa | 0.061 | -0.00010 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.028 | -0.00017 |
| KGE | SAC | 1984-1993 | Significativa | 0.049 | -0.0006 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.210 | -0.0010 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0011 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0016 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0014 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0017 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0005 |

| Métrica | Modelo | Período | Tendencia | P value | Pendiente - Theil-Sen |
|---|---|---|---|---|---|
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.474 | 0.0004 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.031 | -0.00013 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.044 | -0.00016 |
| KGE_LOGNSE | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.074 | -0.0006 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0009 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.152 | 0.0013 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0015 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.020 | -0.0014 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0016 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0004 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0004 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.018 | -0.00015 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.029 | -0.00015 |
| KMOMENTS | SAC | 1984-1993 | No significativa | 0.074 | -0.0006 |
| | TUW | 1984-1993 | No significativa | 0.152 | -0.0008 |
| | SAC | 1994-2003 | No significativa | 0.107 | 0.0012 |
| | TUW | 1994-2003 | No significativa | 0.074 | 0.0018 |
| | SAC | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0013 |
| | TUW | 2004-2013 | Significativa | 0.049 | -0.0016 |
| | SAC | 2014-2023 | No significativa | 0.371 | 0.0005 |
| | TUW | 2014-2023 | No significativa | 0.592 | 0.0004 |
| | SAC | 1984-2023 | Significativa | 0.029 | -0.00012 |
| | TUW | 1984-2023 | Significativa | 0.022 | -0.00017 |