



ARTÍCULO

Simulación hidrológica del caudal del estero Huillinco en la microcuenca agroforestal Huillinco (Chonchi, región de Los Lagos, Chile) bajo condiciones climáticas históricas y futuras.

Victor Hormazábal Valderrama^{1*}; Victor Vargas Rojas¹; Rodrigo Abarca-del-Río²; Ignacio García Torres¹; Enrique Villalobos Volpi¹ & Héctor Ulloa Contreras¹

¹Instituto Forestal, Chile. vhormazabal@infor.cl

²Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción, Chile.

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.583>

Recibido: 27.12.2022; Aceptado: 25.04.2023

RESUMEN

La alteración del comportamiento de las precipitaciones es uno de los efectos más relevantes del cambio climático. Este modifica el balance y disponibilidad hídrica de las cuencas, disminuyendo la escorrentía superficial. En este trabajo se estima el comportamiento del caudal del estero Huillinco, en la microcuenca agroforestal homónima, de la comuna de Chonchi (Chiloé). Se simuló hidrológicamente la microcuenca en el periodo 1981-2100, usando el modelo y software WEAP (versión gratuita) y considerando el escenario de cambio climático SSP5-8.5. La información de entrada para estimar el caudal simulado provino de bases de datos, tanto *in situ* como de reanálisis cercano a la zona de estudio, así como de datos aproximados de consumo (habitantes y cultivos). Se crearon series temporales para la precipitación y temperatura con los datos *in situ*, que se usaron como base para una corrección de sesgo para ERA5-Land (histórico, 1981-2020) y el promedio bayesiano de modelos (futuro, 2021-2100). Se concluye que el caudal simulado del estero Huillinco marca una tendencia negativa en el periodo de estudio de $\approx -13,4$ L/s por decenio, para todas las temporadas del año. Las anomalías estandarizadas de los promedios por cada decenio, muestran en el periodo de 1981-1990 un valor de $\approx 1,2$ desviaciones estándar con respecto a la media de la serie, y de 1,6 en el periodo 2091-2100. Los resultados son preliminares, esperándose obtener una mejor proyección en el futuro mediante calibración con mediciones de caudal *in situ*.

Palabras Claves: Cambio climático, Microcuenca agroforestal, Chiloé, WEAP, SSP5-8.5

SUMMARY

The alteration of precipitation behavior is one of the most relevant effects of climate change. This modifies the water balance and availability of watersheds, reducing surface runoff. This work estimates the flow behavior of the Huillinco stream, in the agroforestry micro-watershed of the same name, in the commune of Chonchi (Chiloé). The microbasin was hydrologically simulated for the period 1981-2100, using the WEAP model and software (free version) and considering the climate change scenario SSP5-8.5. The input information for estimating the simulated flow came from databases, both *in situ* and from reanalysis near the study area, and from approximate consumption data (inhabitants and crops). Time series for precipitation and temperature were created with the *in situ* data, and then used as the basis for applying a bias correction for ERA5-Land (historical, 1981-2020) and Bayesian model averaging (future, 2021-2100). It is concluded that the simulated flow of the Huillinco estuary marks a negative trend over the study period of ≈ -13.4 L/s per decade, for all seasons of the year. The standardized anomalies of the averages for each decade, show in the period 1981-1990 a value ≈ 1.2 standard deviations with respect to the mean of the series, and of 1.6 in the period 2091-2100. The results are preliminary, and a better projection is expected to be obtained in the future through calibration with *in situ* flow measurements.

Keywords: Climate Change, Agroforestry microbasin, Chiloé, WEAP, SSP5-8.5

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es un bien esencial no solo para el consumo humano, sino también para las actividades productivas, tales como, la industria, la agricultura y la minería, entre otros. Además, esto no solo involucra al hombre o sus actividades productivas, sino que también impacta directamente los diferentes ecosistemas, donde pequeños cambios respecto a la disponibilidad de los recursos hídricos pueden causar alteraciones significativas.

Trenberth (2011) comenta que existe una influencia directa del calentamiento global sobre las precipitaciones, donde las áreas más secas podrían secarse aún más (generalmente en los subtropicos) y las áreas más húmedas incrementar esta característica, especialmente en latitudes medias a altas (asumiendo cambios moderados en los vientos). El periodo actual de sequía meteorológica en Chile central (30-38°S), conocido como “megasequía”, desde 2010 hasta la actualidad¹ (Garreaud *et al.*, 2020), posiblemente atribuible a una combinación de forzantes externas (antropogénicas) y a la variabilidad natural (Boisier *et al.*, 2016), podría implicar un cambio en la dinámica y disponibilidad hídrica dentro de las cuencas hidrográficas del país (Escenarios Hídricos 2030 Chile, 2018).

Según informa Montes (2021), la última actualización del informe del balance hídrico nacional (DGA, 2017), revela que algunos caudales de agua superficial de las mayores cuencas de la zona central hacia el sur han disminuido de 13 a 37% en los últimos 30 años. Las proyecciones en el mismo trabajo tampoco son alentadoras, pues se prevé incrementos de la temperatura de hasta los 2,5°C y disminución de precipitaciones en 50% entre 2030 y 2060.

Sin embargo, la extensión del territorio chileno da espacio a distintos tipos de climas dependiendo de la latitud (por ejemplo, siguiendo la clasificación climática de Kottke *et al.*, 2006), provocando que los posibles cambios en la disponibilidad hídrica superficial no sean homogéneos a lo largo del territorio, además de considerar las características geomorfológicas propias de cada lugar.

En el sur de Chile, la región de Los Lagos presentó problemas de escasez hídrica en el sector rural, aumentando la cantidad de afectados desde 18.164 personas el año 2013, hasta las 60.088 personas en 2016 (Frêne *et al.*, 2022). Entre abril y octubre del año 2021 se decretó escasez hídrica en la provincia de Chiloé (DGA, 2021). También, en Quintana-Ruedlinger (2020) se advierte que Chiloé está perdiendo sus más importantes reservorios de agua dulce debido a la extracción descontrolada del musgo *pompón*, el cual es muy importante para el ciclo hidrológico del territorio.

Fernández-Alberti *et al.* (2021) mencionan que un escaso conocimiento de la hidrología de una cuenca puede provocar que las demandas de agua de los usuarios no fueran satisfechas; que es necesario conocer la evolución del balance hídrico para desarrollar estrategias que eviten tal escenario; y que las evaluaciones a escala de cuenca proporcionan información esencial para la gestión de los recursos hídricos, en particular para predicciones del suministro y la demanda de agua. Una manera de caracterizar las cuencas y estimar su balance hídrico es a través de modelos o simulaciones. Estos modelos o simulaciones además de intentar representar la realidad hídrica en el presente, también permiten explorar su comportamiento en el pasado, y hacer proyecciones en el futuro (e.g., Davie, 2008; Orrego *et al.*, 2016). Se han realizado varios estudios relacionados con recursos hídricos en distintas partes del mundo, utilizando modelos hidrológicos (e.g., Duque-Yaguache & Zambrano-Vázquez, 2015; Fanta *et al.*, 2022; Ibrahim *et al.*, 2022), y algunos también en Chile (e.g., Mena-Pardo, 2009; Vargas, 2012; Río-La Mura, 2015; Fernández-Alberti *et al.*, 2021; Hormazábal *et al.*, 2021; Fustos *et al.*, 2022).

El Instituto Forestal (INFOR) en su línea de Ecosistemas Forestales y Agua, realizó una primera estimación de la disponibilidad hídrica superficial, bajo condiciones históricas y futuras, de la microcuenca agroforestal Batuco (ubicada en la región de Ñuble, en la comuna de Ránquil; Hormazábal *et al.*, 2021). En tal sentido, en el presente trabajo se hace una estimación de la disponibilidad hídrica superficial, bajo condiciones históricas y futuras, de la microcuenca agroforestal Huillinco (ubicada en la región de los Lagos, comuna de Chonchi), utilizando metodologías similares a las ya utilizadas en Hormazábal *et al.*

¹ 2018, en el caso del estudio de Garreaud *et al.* (2020).

(2021). Esta evaluación tiene por objetivo estimar el caudal del estero Huillinco, entre enero de 1981 y diciembre de 2100, explorar el comportamiento de la variabilidad por decenio y sus tendencias. Además, se busca profundizar en las temporadas del año (verano, otoño, invierno y primavera). Todo esto se desarrolla en el escenario de cambio climático SSP5-8.5.

MATERIAL Y MÉTODO

Área de Estudio

El área de estudio fue la microcuenca Huillinco, ubicada en el sur de Chile, en el centro-este de la Isla Grande de Chiloé (**Figura 1**). Se encuentra aproximadamente en las coordenadas UTM 18G X=593773 m; Y=5272967 m (centroide). Posee un área aproximada de 1.100 ha y pertenece a la subsubcuenca “Costera Vertiente Oeste Río Cucao y Río Medina” (MOP, 2014). La red de drenaje de la microcuenca Huillinco converge a un único estero (estero Huillinco), el cual nace en la parte este de la microcuenca a 92 msnm, mientras que desemboca finalmente al este del lago Huillinco a una altura de 5 msnm. El recorrido del estero Huillinco es de aproximadamente 6.000 m antes de desembocar en el lago Huillinco (**Figura 2**).

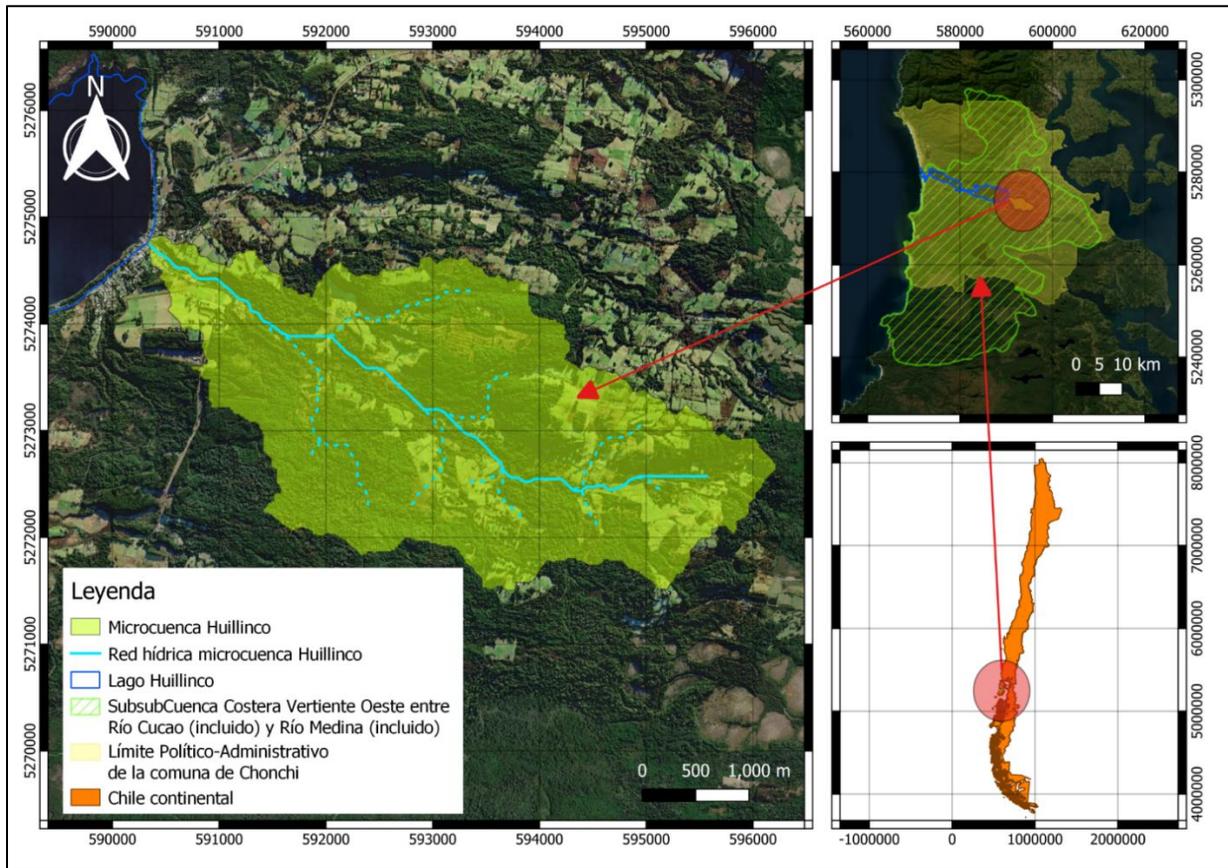


Figura 1. Zona de estudio

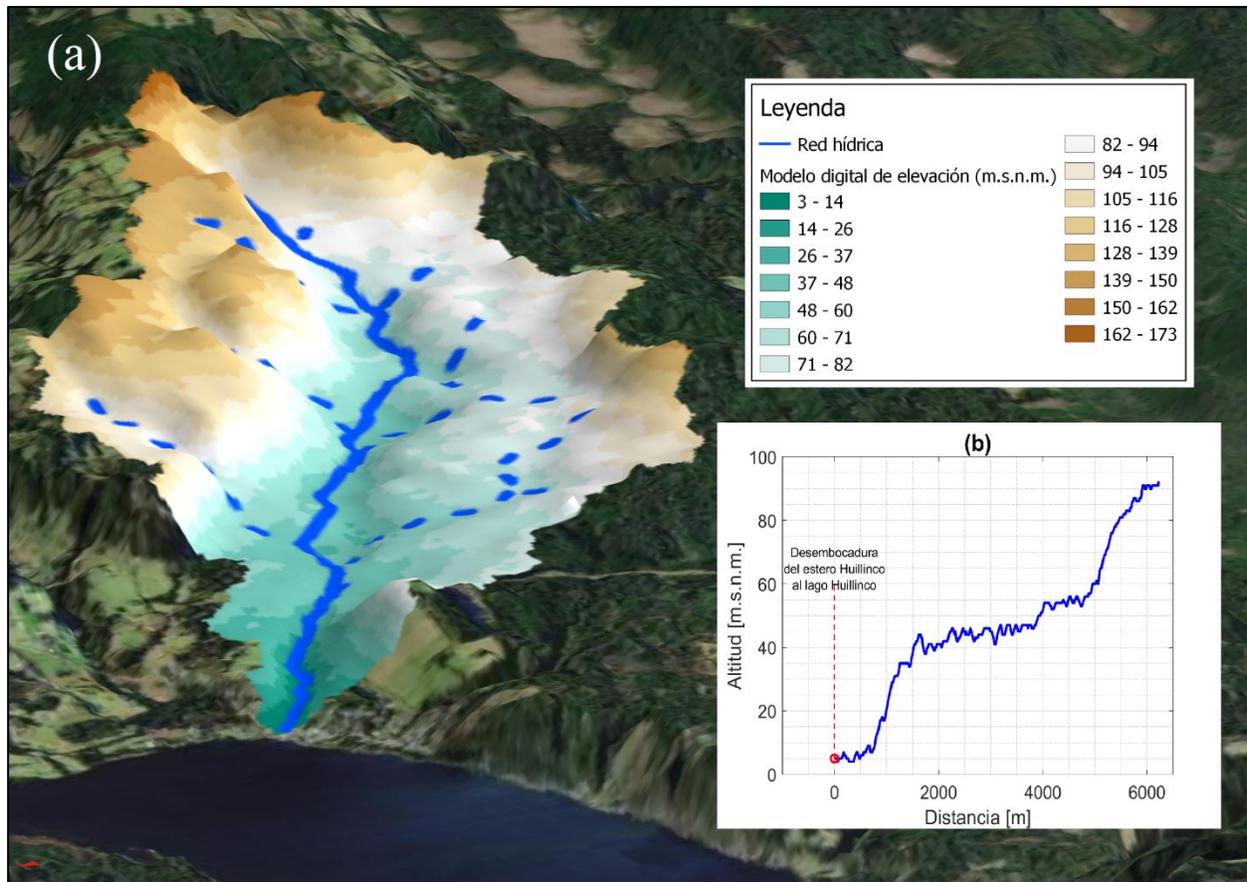


Figura 2. Modelo de elevación digital (a). Perfil vertical del estero huillinco (b).

Según [INFOR \(2021\)](#), la microcuenca Huillinco posee un comportamiento climático estacional. Presenta una temperatura media anual de 10,4°C y una precipitación acumulada anual de 1.650 mm. La mayor temperatura promedio mensual se da en el mes de febrero con 14,4°C, y la menor en julio con 6,6°C. La cantidad máxima de precipitación acumulada se concentra en el mes de junio con 243 mm, y la mínima en febrero con 63 mm. Según la clasificación climática de Köppen, la microcuenca Huillinco presentaría un clima Cfb ([Kottek et al., 2006](#)), en otras palabras, inviernos fríos o templados, veranos frescos y las precipitaciones estarían bien distribuidas a lo largo del año.

Información Disponible

En los alrededores de la zona de estudio, se recolectó información de 16 estaciones de monitoreo hidrometeorológicas extraídas en los sitios webs del explorador climático ([CR2 et al., 2022](#)) y la red agrometeorológica INIA ([INIA et al., 2022](#)). Esta información se resume en el **Cuadro 1**.

Adicionalmente se usaron los productos climatológicos ERA5 ([Hersbach et al., 2019](#)) y ERA5-Land ([Muñoz Sabater, 2019; 2021](#)), para extraer la variable de cobertura total de nubes (tcc); y las variables de temperatura y precipitación, respectivamente (**Cuadro 2**).

Cuadro 1. Lista de estaciones meteorológicas usadas.

N	Nombre	Latitud	Longitud	Altura	Inicio observación	Fin observación*	Variables extraídas	Fuente
1	Butalcura	-42.26	-73.65	148	10/2009	12/2020	T,pp, hr,v	INIA
2	Tenaún	-42.31	-73.39	130	10/2019	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
3	Pid-pid	-42.41	-73.78	81	02/2018	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
4	Huyar Alto	-42.40	-73.56	155	10/2009	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
5	Quilquico	-42.49	-73.70	109	02/2018	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
6	Isla Chelín	-42.58	-73.53	33	02/2018	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
7	Tara	-42.70	-73.78	145	02/2011	12/2020	T,pp,hr,v	INIA
8	Aeródromo Quellón	-43.13	-73.63	13	08/2019	12/2020	T,pp,hr,v	DMC
9	Liceo agrícola de Ancud	-41.86	-73.81	31	12/2018	12/2020	T,pp,hr,v	DMC
10	Ancud 1	-41.8625	-73.8192	20	03/1992	09/2019	Pp	DGA
11	Chepu	-42.0464	-73.9742	20	01/1999	09/2019	Pp	DGA
12	Quemchi	-42.1408	-73.4731	5	11/1999	05/2020	Pp	DGA
13	Castro 1	-42.4581	-73.7744	50	03/1992	04/2009	Pp	DGA
14	Cucao	-42.6186	-74.1081	12	12/1996	09/2019	Pp	DGA
15	Chonchi	-42.6228	-73.7728	30	05/2010	09/2019	Pp	DGA
16	Quellón	-43.1086	-73.6119	50	04/1992	05/2020	Pp	DGA

*Para el periodo en estudio
pp = precipitación; T = temperatura; v = velocidad del viento; hr = humedad relativa.

Cuadro 2. Lista de datos de re análisis utilizados.

N	Fuente	Tamaño Pixel	Latitud	Longitud	Inicio reanálisis/simulación	Fin reanálisis/simulación	Variables
1	ERA5	≈0.25°x0.25°	-42.6	-73.75	01/2011	12/2020	T _{cc}
2	ERA5-Land	≈0.1° x 0.1°	-42.6	-73.9	01/1950	12/2020	T,pp

Para las proyecciones de cambio climático, se utilizaron 2 simulaciones de 6 distintos modelos (**Cuadro 3**), participantes del proyecto *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6). Una simulación (para cada modelo) corresponde al experimento CMIP6-histórico (Eyring *et al.*, 2016), el cual abarca el periodo histórico desde 1850 a 2014; y la otra simulación corresponde al experimento SSP5-8.5¹ (O'Neill *et al.*, 2016), la cual corresponde al periodo futuro desde 2015 a 2100. Estas simulaciones pueden ser descargadas desde <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>.

Para crear la red hídrica de la microcuenca Huillinco se dispuso de un Modelo Digital de Elevación (DEM), ofrecido por la Infraestructura de Datos Geospaciales (IDE) de Chile para la región de Los Lagos, a una resolución espacial de 12,5 x 12,5 m a nivel global (CIREN, 2016).

Para crear la clasificación de uso de tipo de suelo, se utilizó el catálogo de CONAF correspondiente al uso de suelo del año 2019 (CONAF, 2021).

En la desembocadura de microcuenca Huillinco habitan cerca de 426 personas (INE, 2017), asumiéndose para efectos de la simulación hidrológica, que ellas se abastecen completamente de la microcuenca. Según se informa en Marticorena (2020), el consumo diario por persona en Chile es de 172 litros por día. En un ejemplo del SEI (2015), el consumo anual agrícola por hectárea fue de 3.500 m³.

¹ La proyección de cambio climático SSP5-8.5, corresponde a la combinación de trayectorias más extrema por parte de las Trayectorias socioeconómicas compartidas o SSP (Riahi *et al.*, 2017), similar a la proyección RCP8.5 de las vías de concentración representativas o RCP (van Vuuren *et al.*, 2011). Resumidamente, se basa en un futuro de alto desarrollo humano, sustentado principalmente en energías obtenidas por combustibles fósiles.

Cuadro 3. Modelos climáticos parte del CMIP6.

N°	Modelos Climáticos	Referencias	Variables	Simulación	Resolución (Lat. x Lon.)	Instituto
1	ACCESS-ESM1-5	Ziehn <i>et al.</i> , 2020	T, pp	r1i1p1f1	192x145	Australian Community Climate and Earth System Simulation
2	CESM2-WACCM	Danabasoglu <i>et al.</i> , 2020	T, pp	r1i1p1f1	288x192	Community Earth System Model
3	CNRM-CM6-1	Voldoire <i>et al.</i> , 2019	T, pp	r1i1p1f2	256x128	National Centre for Meteorological Research of France
4	GFDL-ESM4	Held <i>et al.</i> , 2019	T, pp	r1i1p1f1	288x180	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
5	MRI-ESM2-0	Yukimoto <i>et al.</i> , 2019	T, pp	r1i1p1f1	320x160	Meteorological Research Institute
6	Nor-ESM2-MM	Seland <i>et al.</i> , 2020	T, pp	r1i1p1f1	288x192	Norwegian Earth System Model

Estadísticos y Tratamiento de Datos

- *Anomalías Estandarizadas*

La anomalía estandarizada o “z” sirve para comparar variables con magnitudes muy dispares, convirtiéndolas en adimensionales. Tiene una media de 0 y una desviación estándar de 1. Se calcula de acuerdo a la **Expresión (1)**.

$$z = \frac{X - \bar{X}}{s_x} \quad (1)$$

Donde;

- z: valor individual estandarizado
- x: dato individual bruto
- \bar{X} : media muestral de los datos brutos
- s_x: desviación estándar muestral

Una forma de ver la anomalía estandarizada es como una medida de distancia (en unidades de desviación estándar), entre un valor de datos y su media. Además, al estandarizar los datos, estos serán adimensionales, lo cual permitiría compararlos con otros datos estandarizados, aunque su origen haya sido diferente (Wilks, 2005).

- *Tendencias*

El estimador Theil-Sen (Chervenkov & Slavov, 2019), es más robusto que el método de mínimos cuadrados, ya que es mucho menos sensible a valores atípicos. El estimador Theil-Sen se aplicó en este estudio utilizando el algoritmo desarrollado por Harynuk (2022), para el software MATLAB.

Por otro lado, para comprobar si existe realmente una tendencia en los datos de precipitación acumulada anual y de las temperaturas medias anuales, se utilizó el test de significancia Mann-Kendall (Glen, 2016). Tal test se utilizó a un 95% de confianza (*p-value* = 0,5). Este test se utilizó a través del algoritmo desarrollado por Thorvaldsen (2022), para el software MATLAB.

- *Coefficiente de Determinación*

Se usó el Coeficiente de Determinación o R^2 (2) para estimar la varianza compartida que existe entre 2 variables X e Y. En este estudio se estimó al calcular el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson.

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2} \quad (2)$$

Donde;

σ_{XY}^2 = covarianza,
 σ_X^2 = varianza de X
 σ_Y^2 es la varianza de Y.

- *Promedio bayesiano de modelos (BMA)*

El promedio bayesiano de modelos (BMA por sus siglas en inglés), obtiene ponderaciones para cada modelo, que a la vez producen combinaciones de modelos que tienen máxima probabilidad de coincidir con las observaciones históricas en comparación con otras combinaciones de modelos (Para una mayor información sobre esta metodología consultar [Hoeting et al. 1999](#) y [Hinne et al., 2020](#)).

En el contexto de este estudio, se usó los algoritmos MODELAVG ([Vrugt, 2018](#)) y DREAM ([Vrugt, 2016](#)) para el software MATLAB, para determinar los pesos de cada modelo descrito en el **Cuadro 3**. (Muchos estudios que involucran la meteorología y climatología han usado BMA, eg., [Raftery et al., 2005](#); [Slougher et al., 2007](#); [Bao et al., 2010](#); [Faidah et al., 2019](#); [Massoud et al., 2020](#); [Konapala et al., 2020](#)).

Modelo Weap

El presente estudio se llevó adelante mediante el empleo del código *Water Evaluation And Planning System* o WEAP ([SEI, 2015](#)), en su versión gratuita, el cual presenta un sistema integrado de planificación de los recursos hídricos conectando los procesos hidrológicos y sus operaciones en una única plataforma analítica.

- *Unidad Hidrológica*

Para efectos de este estudio y apoyándose en ([Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & SEI, 2009](#)), se determinó por simplicidad que sólo existirá una unidad hidrológica¹ o *catchment*, el cual cubriría toda la microcuenca Huillinco, ya que la red hídrica converge casi en su totalidad al final de la microcuenca Huillinco (de Este a Oeste) (**Figura 1**).

- *Simulación Hidrológica*

Se utilizó el método de humedad del suelo, que representa el proceso precipitación-escorrentía en una unidad de respuesta hidrológica (en este caso la microcuenca Huillinco) por medio de dos estanques, con los cuales se busca reproducir los flujos superficiales y subterráneos ([SEI, 2015](#)) a una escala mensual. Este método unidimensional (**Figura 3**) se basa en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, escorrentía superficial, escurrimiento subsuperficial (flujo intermedio), y percolación profunda.

¹ La Unidad hidrológica es un área que separa la cuenca o subcuenca por bandas de elevación

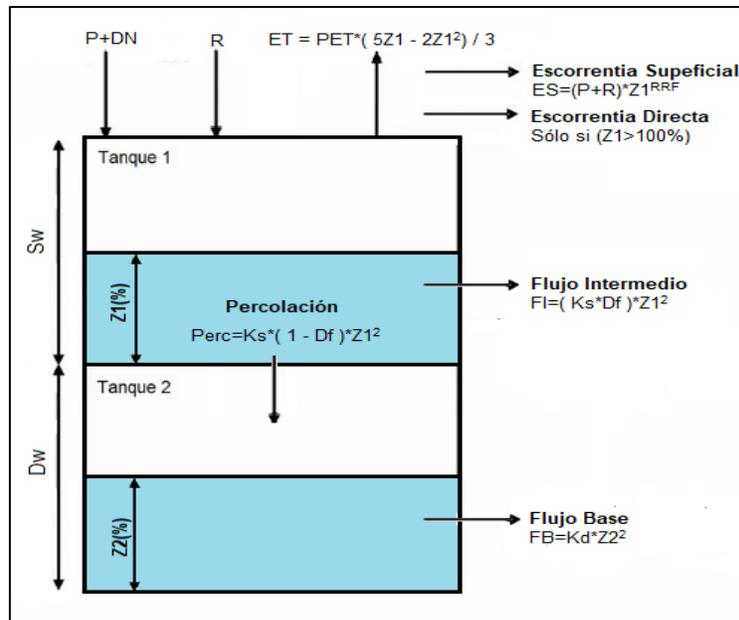


Figura 3. Representación esquemática del módulo hidrológico para el método de humedad del suelo en weap (en base a SEI, 2015). **P** es la precipitación (mm); **DN** es el derretimiento de nieve (mm); **R** es la recarga de riego (mm); **ET** es la evapotranspiración real (mm); **PET** es la evapotranspiración potencial; **Z1** es el porcentaje de agua en el estanque superior (%); **Z2** es el porcentaje de agua en el estanque inferior (%); **Ks** es la conductividad hidráulica del estanque superior ($mm \cdot mes^{-1}$); **Kd** es la conductividad hidráulica del estanque inferior ($mm \cdot mes^{-1}$); **Df** es la dirección preferencial del flujo (adimensional), que separa el flujo superficial del subterráneo; **RRF**: coeficiente de resistencia a la escorrentía de la cobertura del suelo (adimensional); **Sw** es la capacidad de estanque superior (mm) y **Dw** es la capacidad del estanque inferior (mm).

En la **Figura 3** se puede apreciar la conceptualización del método y las diferentes ecuaciones y criterios que se toman en cuenta al momento de representar la hidrología en una columna unidimensional.

De acuerdo con SEI (2015) las ecuaciones de balance en cada estanque son las de las **Expresiones (4)** y **(5)**

$$Sw \frac{dZ1}{dt} = \left[P(t) - PET(t) \frac{5Z1 - 2Z1^2}{3} \right] - Pe(t)Z1^{RRF} - Df(Ks)Z1^2 - K_2(1 - Df)Z1^2 \quad (4)$$

$$Dw \frac{dZ2}{dt} = Kd(1 - Df)Z1^2 - KdZ2^2 \quad (5)$$

Donde;

Pe = precipitación más derretimiento de nieve (mm).

Las demás expresiones son las detalladas en la **Figura 3**.

Estas ecuaciones son empíricas y describen la dinámica de flujo que acontece en los estanques, los mismos que conceptualizan los componentes superficiales, subsuperficial y de percolación profunda del ciclo hidrológico.

La evapotranspiración potencial (PET), se puede descomponer como se indica en la **Expresión (6)**.

$$PET = Kc \times ET_0 \quad (6)$$

Donde;

Kc = coeficiente de cultivo;

ET_0 = evapotranspiración potencial del cultivo de referencia.

La evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (ET_0), se obtiene de la fórmula de Penman-Monteith que es la base del método 56 de la FAO (Allen *et al.*, 1998).

- *Demandas Dentro del Modelo*

Una vez obtenido un caudal simulado por el método de la humedad del suelo en un mes determinado, se procedió a utilizar la característica de planificación denominada zonas de demanda, disponible dentro del código WEAP (SEI, 2015), con la intención de obtener una mejor estimación de la variación del caudal total liberado por la microcuenca Huillinco en la desembocadura del estero Huillinco.

Se agregaron 2 zonas de demanda llamadas zona agrícola y zona urbana. Las características de estas zonas de demanda se detallaron anteriormente en la subsección información disponible de esta misma sección (metodología). Finalmente, el balance hídrico quedaría como se indica en la **Expresión (7)**.

$$Q_{Simulado}(t) - Q_{Agricola}(t) - Q_{Urbano}(t) = Q_{total}(t) \quad (7)$$

Donde;

$Q_{Simulado}$ = caudal simulado por el método humedad del suelo;

$Q_{Agricola}$ = caudal usado por la agricultura;

Q_{Urbano} = el caudal consumido por la zona urbana;

Q_{total} = total de caudal que se libera en la desembocadura del estero Huillinco;

t corresponde a un mes determinado.

Se debe comentar que en $Q_{simulado}(t)$ también se incluye el aporte del mes anterior ($t-1$) que puede producir la microcuenca sin aportaciones de precipitación (flujo base), excepto para el principio de la simulación ($t=1$).

Caracterización Meteorológica y Climatológica

- *Precipitación y Temperatura*

Para la representatividad de la precipitación y la temperatura en la zona de estudio con los datos *in situ*, se utilizaron curvas de isoyetas e isotermas respectivamente, siguiendo la metodología explicada en Duque-Yaguache & Zambrano-Vázquez (2015), y usada anteriormente en Hormazábal *et al.* (2021). Se utilizó una distribución temporal mensual. En el **Anexo 1** se pueden ver más detalles de la metodología aplicada a este estudio.

Una vez obtenidas las series de precipitación y temperatura *in situ* u observadas en la zona de estudio, se procedió a usar el periodo 2010-2020 para corregir el sesgo de los productos climáticos ERA5-Land y las proyecciones de cambio climático (**Cuadro 3**) en el periodo 2010-2020. En el **Anexo 2** se pueden ver detalles de esta corrección de sesgo.

Una vez obtenidas las series corregidas para las proyecciones de cambio climático, se estimó sus pesos para obtener un promedio ponderado de la mejor combinación de modelos que se ajuste a los datos observados (**Cuadro 4**). Con ello se obtuvo una única serie de cambio climático (para la precipitación y temperatura), la cual fue vuelta a corregir por sesgo en forma posterior.

Cuadro 4. Ponderaciones de cada modelo para construir las series de proyecciones de cambio climático

N°	Modelos CMIP6	Ponderación Precipitación	Ponderación Temperatura
1	ACCESS-ESM1-5	0.266	0.005
2	CESM2-WACCM	0.315	0.003
3	CNRM-CM6-1	0.029	0.163
4	GFDL-ESM4	0.142	0.776
5	MRI-ESM2-0	0.099	0.032
6	Nor-ESM1-M	0.149	0.021
Total	-	1	1

Para mejorar la confianza en la selección de BMA sobre los demás modelos individualmente, se realizó un diagrama de Taylor (Taylor, 2001), como se muestra en la **Figura 4**, a través del algoritmo de Rochford (2022). En ella se compararon las distintas alternativas (incluyendo BMA), donde se puede observar (visualmente) que la mejor opción a seleccionar era BMA, tanto para la precipitación como para la temperatura (gráficos a y b de la **Figura 4**, respectivamente). Además, se agregó a ERA5-Land, para tener una idea visual de su distancia en torno a sus valores observados.

Una vez obtenidos las series de precipitación y temperatura para el periodo histórico 1950-2020 (**Figuras 5a y 6a**, respectivamente; mostrados visualmente para el periodo 1981-2020) y para las proyecciones futuras 2021-2022 (**Figuras 5b y 6b**, respectivamente) se creó la serie final de precipitación (**Figura 5c**) y la serie final de temperatura (**Figura 6c**)¹.

- *Otras Variables Meteorológicas*

Además de la precipitación y la temperatura, la simulación hidrológica necesita otras variables meteorológicas. Estas son la humedad relativa (**Figura 7a**) y la rapidez del viento (**Figura 7b**), las cuales fueron obtenidas desde las estaciones de monitoreo en Chiloé (**Cuadro 1**), siguiendo la misma metodología que la precipitación y temperatura (**Anexo 1**). Se usó la climatología obtenida entre 2010 y 2020 de estas dos variables, como una serie cíclica desde 1950 a 2100.

También se agregó como variable opcional la cobertura total de nubes (**Figura 7c**), con la intención de obtener una simulación más representativa. Esta variable se extrajo del producto ERA5 (**Cuadro 2**). Para la serie de cobertura total de nubes se usó la climatología obtenida entre 2010 y 2020, como una serie cíclica desde 1950 a 2100 (al igual que con la humedad relativa y la rapidez del viento).

¹ Se puede observar que la precipitación (**Figura 5c**) tiene una tendencia de -3,73 mm/decenio, mientras que la temperatura (**Figura 6c**) tiene una tendencia de 0,29 °C/decenio, para el periodo 1981-2100.

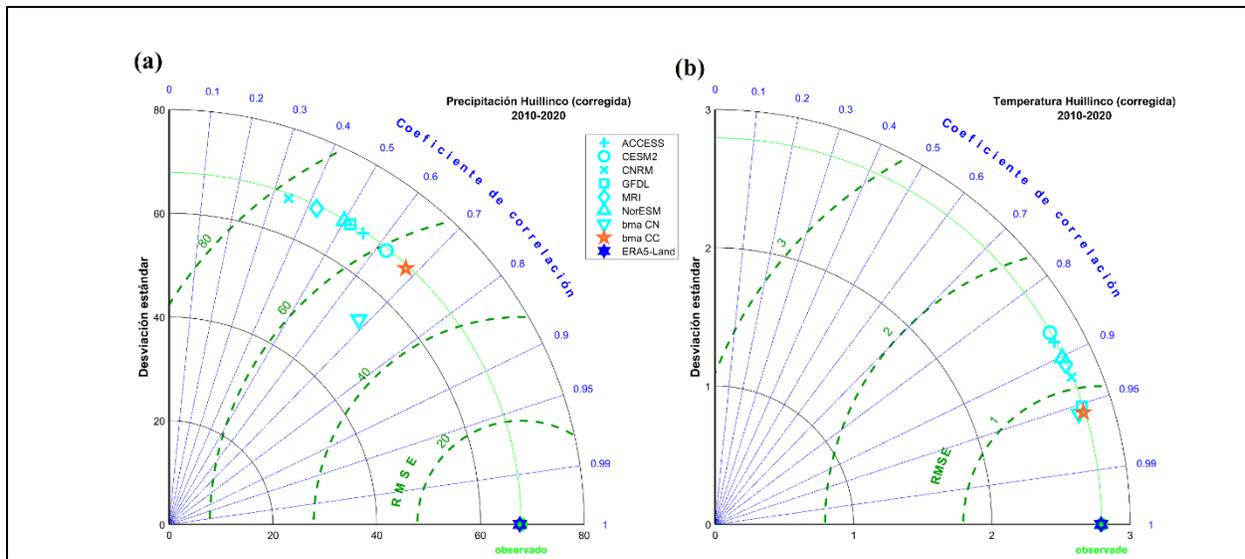


Figura 4. Diagrama de Taylor para precipitación (a) y la temperatura (b)

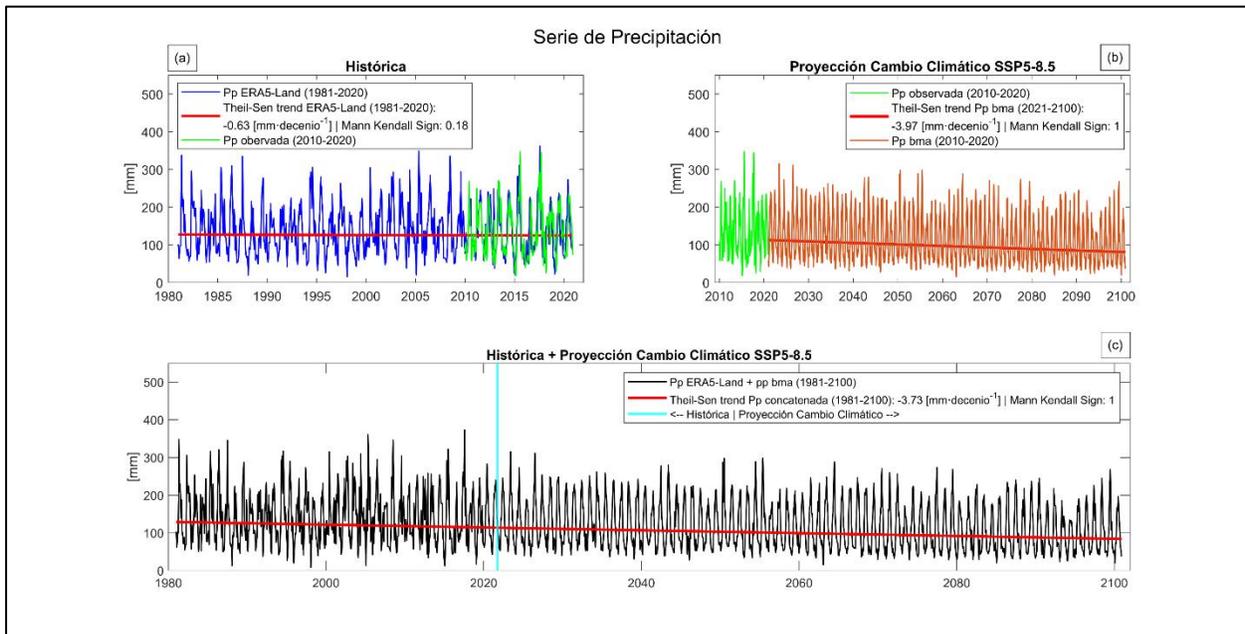


Figura 5. Precipitación resultante; histórica (a) y de la proyección BMA (b), integración precipitación histórica y proyectada (c)

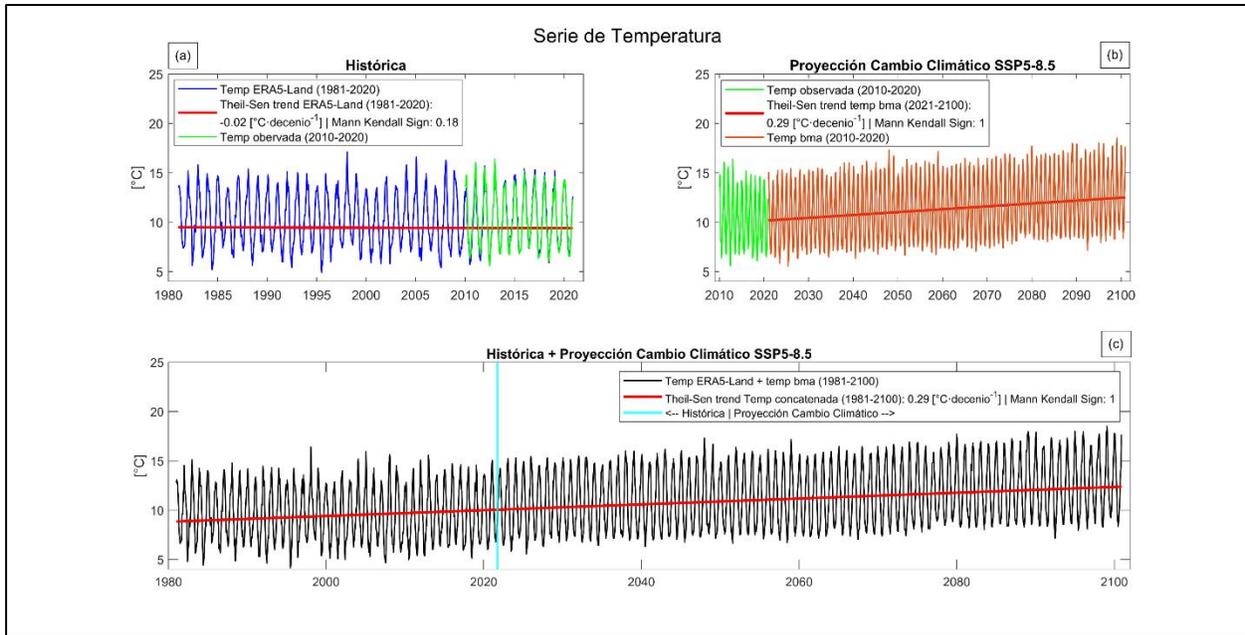


Figura 6. Temperatura resultante; histórica (a) y de la proyección BMA (b), integración temperatura histórica y proyectada (c)

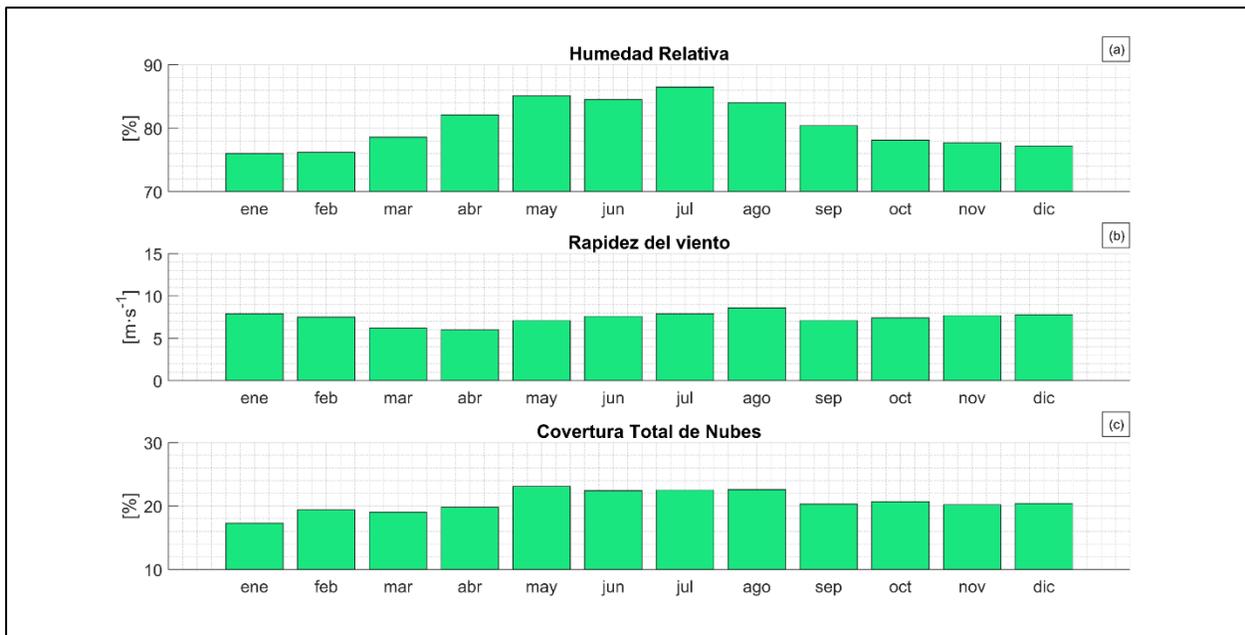


Figura 7. Variables meteorológicas promedio usadas en el modelo (2010-2020) para la simulación hidrológica

Parametrización del Modelo

- *Clases de Uso de Suelo*

En base al catastro de uso de suelo de CONAF 2019 (CONAF 2021), se separó la zona de estudio en 5 clases de usos de suelos, los cuales se pueden observar en el **Cuadro 5** en términos de área, mientras la distribución espacial se puede observar en la **Figura 8**.

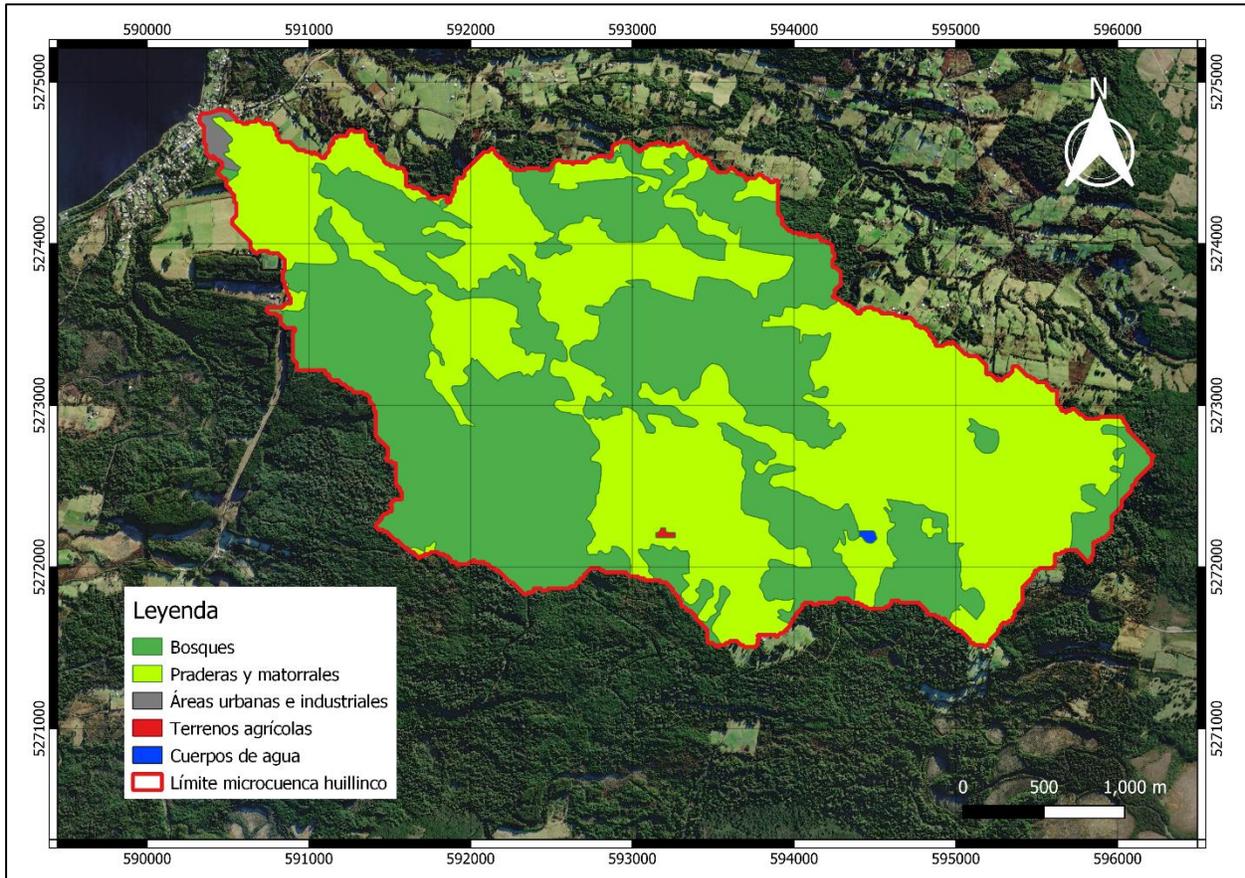


Figura 8. Clases de usos de suelo en la microcuenca Huillinco 2019

Cuadro 5. Clases de usos de suelo y sus superficies

N°	Clasificación uso de suelo	Área [ha]
1	Bosques	528.78
2	Praderas y matorrales	565.54
3	Áreas urbanas e industriales	4.71
4	Terrenos agrícolas	0.5
5	Cuerpos de agua	0.64
Total		1100.17

Consideraciones Antes y Durante la Simulación Hidrológica

Se consideró un periodo de prueba de 1950-1980 para el modelo hidrológico, donde se busca atenuar los efectos de las condiciones iniciales. Este periodo de tiempo no será incluido dentro de los resultados. El periodo analizado fue desde 1891 a 2100.

RESULTADOS

En la **Figura 9** el caudal simulado marcó una tendencia de $-13,42$ L/s por decenio. La varianza compartida (R^2) entre la precipitación y el caudal simulado fue de 0,46, mientras que el R^2 entre la temperatura y el caudal simulado fue de 0,51. En la misma figura se indica el promedio por cada decenio (1981-1990, ..., 2091-2100), donde el rango de estos valores fue desde 461,92 L/s (2001-2010) hasta 300,85 L/s (2091-2100).

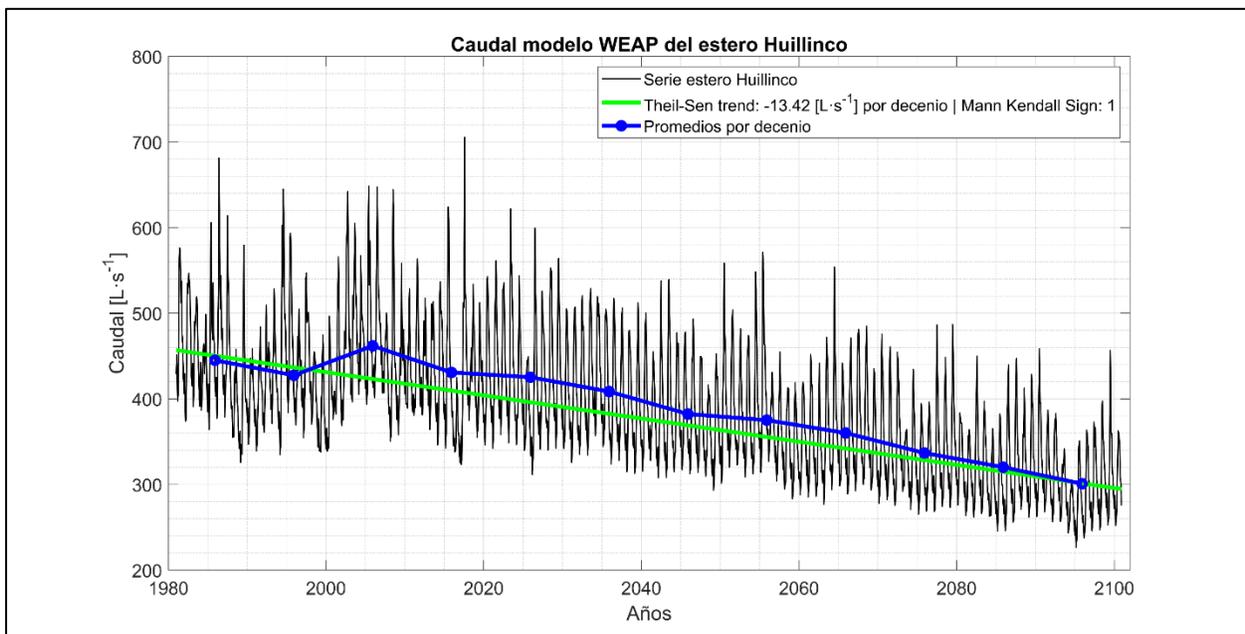


Figura 9. Series de caudal simulado del estero Huillinco (negro), tendencia (verde) y promedios cada 10 años (azul)

En los gráficos de la **Figura 10** se desglosa el caudal simulado del estero Huillinco en sus correspondientes temporadas del año. En el verano austral (Dic-Feb; **Figura 10a**) el caudal simulado marca una tendencia de $-11,8$ L/s por decenio, el R^2 entre la precipitación y el caudal simulado de verano fue de 0,39, mientras que el R^2 entre la temperatura y el caudal simulado de verano fue de 0,81. El promedio por decenio abarcó el rango desde 422,88 L/s (2001-2010) hasta 275,95 L/s (2091-2100).

En el otoño austral (Mar-May; **Figura 10b**) el caudal simulado marca una tendencia de $-13,16$ L/s por decenio, el R^2 entre la precipitación y el caudal simulado de otoño fue de 0,58, mientras que el R^2 entre la temperatura y el caudal simulado de otoño fue de 0,72. El promedio por decenio abarcó el rango desde 411,24 L/s (2001-2010) hasta 259,78 L/s (2091-2100).

En el invierno austral (Jun-Ago; **Figura 10c**) el caudal simulado marca una tendencia de $-13,63$ L/s por decenio, el R^2 entre la precipitación y el caudal simulado de invierno fue de 0,55, mientras que el R^2 entre

la temperatura y el caudal simulado de invierno fue de 0,43. El promedio por decenio abarcó el rango desde 525,19 L/s (2001-2010) hasta 351,39 L/s (2091-2100).

En la primavera austral (Sep-Nov; **Figura 10d**) el caudal simulado marca una tendencia de -13,58 L/s por decenio, el R^2 entre la precipitación y el caudal simulado de primavera fue de 0,68, mientras que el R^2 entre la temperatura y el caudal simulado de primavera fue de 0,69. El promedio por decenio abarcó el rango desde 488,15 L/s (2001-2010) hasta 316,25 L/s (2091-2100).

En el gráfico inferior de la **Figura 10** se pueden ver las anomalías estandarizadas de los promedios por decenio de cada estación del año. Se observó, al igual que en la serie completa, que existe un descenso sostenido a medida que avanzan los decenios para todas las temporadas del año, donde en el decenio 2091-2100 está entre -1,4 y -1,6 desviaciones estándar con respecto a las medias de cada serie.

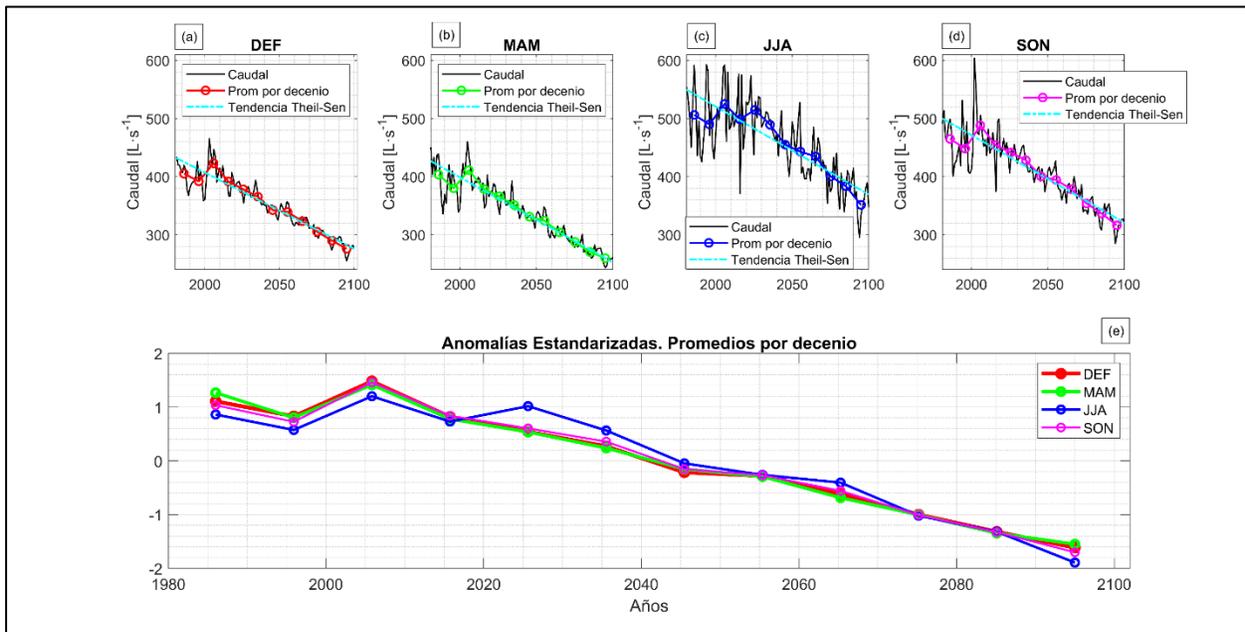


Figura 10. Caudal estacional y promedios por decenio (DEF a; MAM b; JJA c; SON d). Anomalías estandarizadas de los promedios por decenio (e).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La simulación indica una primera aproximación a lo que podría estar sucediendo o podría ocurrir en la microcuenca Huillinco, pero debería ser calibrada y validada con datos de caudal observado (SEI, 2015), datos que no existen de momento. Para ello existen opciones directas como instalar una estación fluviométrica en la desembocadura del estero Huillinco o realizar mediciones puntuales en un intervalo de tiempo semanal o mensual a lo largo de varios años (mínimo 3 años, para obtener una estimación de la variabilidad interanual). También se puede calibrar el caudal de forma indirecta con la instalación de estaciones de humedad del suelo, o más indirecto aun, usando una estación fluviométrica cercana, transformar de litros por segundo a milímetros, y comparar resultados, asumiendo que las características de las cuencas son similares.

Se debe tener precaución con la creación de las series de precipitación (**Figura 5**) y temperatura (**Figura 6**). En el periodo histórico, ni la precipitación ni la temperatura mostraron tendencias significativas (-0,63 mm/decenio y -0,02 °C/decenio, respectivamente). Por el contrario, las proyecciones de cambio climático

BMA sí muestran tendencias significativas (-3,97 mm/decenio y 0,29 °C/decenio, respectivamente), sugiriendo que las proyecciones de cambio climático no coinciden con lo que ocurre en la microcuenca Huillinco. Para profundizar este análisis debería aumentarse el número de modelos y simulaciones considerados, para estudiar de mejor manera cuanta su representatividad de la zona de estudio, ya que, por lo menos en el caso de precipitación no resultan muy certeros (**Figura 4**). También se podrían instalar estaciones meteorológicas en la microcuenca para calibrar con mayor exactitud los distintos modelos históricos y de proyección de cambio climático.

Sin embargo, por ahora, las simulaciones sin calibrar indican que el caudal del estero Huillinco muestra una tasa de cambio o pendiente negativa de -1,34 L/s por decenio, lo que de algún modo era esperable en el escenario del cambio climático SSP5-8.5.

También es interesante ver el comportamiento del caudal simulado en cada época del año (**Figura 10e**) y observar que no existe una gran diferencia de las anomalías estandarizadas entre ellas.

Para tener una idea del total de agua descargada por el estero Huillinco por cada metro cuadrado de la microcuenca, en cada decenio, se transformó las unidades desde L/s a mm/mes usando la **Expresión (8)**.

$$Q \text{ mm/mes} = \frac{Q[L \cdot s^{-1}] \times 100 \times (N^{\circ} \text{ de días en el mes}) \times 3600 \times 24}{\text{Área cuenca [m}^2\text{]}} \quad (8)$$

Los resultados en la **Figura 11a** muestran que desde 1981 a 2100 existe una tendencia de -463,93 mm/decenio, mientras que la **Figura 11b** muestra que para el decenio de 2091-2100 habrá un 30% menos de descarga de agua respecto del decenio 2011-2020, lo que da a entender que la disponibilidad hídrica por metro cuadrado tiene una tendencia progresiva a descender.

A pesar de la incertidumbre involucrada en el estudio, este se puede considerar como un interesante primer ejercicio para especular sobre el posible comportamiento hidrológico en la microcuenca Huillinco, y su posible evolución durante el siglo XXI, de manera de poder analizar o planificar a futuro ciertas medidas que puedan mitigar los efectos del cambio climático. Por ejemplo, ante el descenso sostenido del caudal evidenciado en la simulación, deberían reducirse prácticas que incrementan las pérdidas de caudal, como el incremento de cultivos forestales, deforestación o extracción del musgo *pompón* (Quintana-Ruedlinger, 2020). Comparando las climatologías 1981-2010 y 2071-2100, las proyecciones también prevén un aumento de temperatura del orden de 2,5°C para finales de siglo (en la proyección SSP5-8.5), comenzando desde 2011 hasta 2100; y una disminución de precipitaciones del 25,72%. Tales nuevas condiciones incrementarían la posibilidad de eventos de sequías, incendios forestales, aumento de la erosión, entre otros (aunque se debería investigar cada situación o proyección con más profundidad). Se debería complementar este estudio con proyecciones socioambientales, por ejemplo, de cambio de uso de suelo, buscando las opciones que mejor equilibren la mitigación del cambio climático y las actividades productivas de la población local.

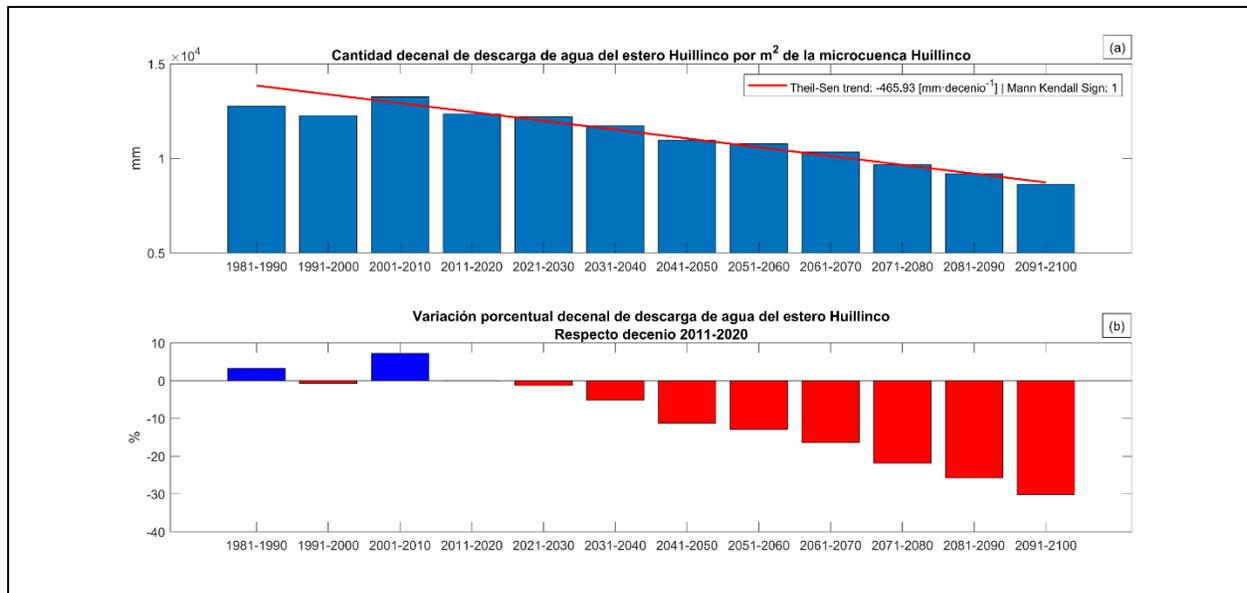


Figura 11. Cantidad (a) y variación porcentual (b) de la cantidad de descarga decenal por metro cuadrado en la microcuenca Huillinco.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al programa Minagri: “Monitoreo de cuencas y otros ecosistemas forestales vinculados al consumo humano del agua en la zona centro sur de Chile” (Código 3041331211), por permitir y apoyar la elaboración de esta investigación. También agradecer al Dr. Jasper A. Vrugt, por el desarrollo de los algoritmos MODELAVG y DREAM (para aplicar el promedio bayesiano de modelos), el cual se puede obtener en el enlace: <https://faculty.sites.uci.edu/jasper/software/>.

REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Guidelines for computing crop water requirements. En FAO. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Bao, L., Gneiting, T., Grimit, E.P., Guttorp, P., & Raftery, A.E. (2010). Bias correction and bayesian model averaging for ensemble forecasts of surface wind direction. *Monthly Weather Review*, 138(5). <https://doi.org/10.1175/2009MWR3138.1>
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, & SEI, S. E. I. (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. En Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en Ecuador, Ministerio del Ambiente de Ecuador y el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo de la Universidad de Cuenca, Ecuador. https://cambioglobal.uc.cl/images/publicacionesextension/9_2009_Guia-para-la-modelacion-con-la-plataforma-WEAP_CCG-SEI.pdf
- Chervenkov, H., & Slavov, K. (2019). Theil–Sen estimator vs. Ordinary least squares — Trend analysis for selected ETCCDI climate indices. *Comptes Rendus de L’Academie Bulgare des Sciences*, 72(1). <https://doi.org/10.7546/CRABS.2019.01.06>

- CIREN. (2016).** DEM Alos Palsar Región de Los Lagos. En IDE (Infraestructura de Datos Geoespaciales), Chile. <http://www.geoportal.cl/geoportal/catalog/search/resource/resumen.page?uuid=%7BCA9D8240-F412-4167-8F3F-151B0A533E4B%7D>
- CONAF. (2021).** Cartografía temática del Cambio de Uso de la Tierra para la Región de Los Lagos periodo 2001-2019, Escala 1:30.000. Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos de Chile (SIMEF). https://ide.minagri.gob.cl/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/%7BF8AE2DCFC-FB88-4760-82B7-B0F8D221EB4F%7D_100259_es
- CR2, DGA, MAM, NOAA & DMC. (2022).** Explorador Climático [Precipitación Mensual]. <https://explorador.cr2.cl/>
- Danabasoglu, G., Lamarque, J. F., Bacmeister, J., Bailey, D. A., DuVivier, A. K., Edwards, J., Emmons, L. K. et al. (2020).** The Community Earth System Model Version 2 (CESM2). Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(2). <https://doi.org/10.1029/2019MS001916>
- Davie, T. (2008).** Fundamentals of Hydrology, Second Edition. En Management (Número 10).
- DGA. (2017).** Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5796v1.pdf>
- DGA. (2021).** Nuevo Decreto de Escasez Hídrica para 3 Provincias de la Región de Los Lagos. <https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=750>
- Duque-Yaguache, F. L., & Zambrano-Vázquez, F. R. (2015).** Modelación de la Oferta Hídrica en una Cuenca de Montaña Tropical en Función de su Cobertura Del Suelo (Vol. 7). <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2015-v7-1-08>
- Escenarios Hídricos 2030 Chile. (2018).** Radiografía del agua: brecha y riesgo hídrico en Chile. <https://escenarioshidricos.cl/wp-content/uploads/2020/06/radiografia-del-agua-1.pdf>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016).** Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9(5). <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Faidah, D. Y., Kuswanto, H., & Suhartono. (2019).** The comparison of Bayesian model averaging with gaussian and gamma components for probabilistic precipitation forecasting. AIP Conference Proceedings, 2192. <https://doi.org/10.1063/1.5139173>
- Fanta, S. S., Namara, W. G., & Yesuf, M. B. (2022).** Assessment of water supply and demand in Gilgel Gibe watershed, southwest Ethiopia. Sustainable Water Resources Management, 8(4), 104. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00684-3>
- Fernández-Alberti, S., Abarca-del-Río, R., Bornhardt, C., & Ávila, A. (2021).** Development and Validation of a Model to Evaluate the Water Resources of a Natural Protected Area as a Provider of Ecosystem Services in a Mountain Basin in Southern Chile. Frontiers in Earth Science, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.539905>
- Frêne, C., Villarroel, F., Rojas, R., Sanzana, J., González, J., Alarcón, D., Gómez, F. et al. (2022).** Escasez de agua en Chiloé: Red Participativa de Agua como solución para el sector rural. Revista de geografía Norte Grande, 82, 375–396. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022022000200375>
- Fustos, I., Abarca-del-Río, R., Artal, O., Alvial, F., & Sepúlveda, H. H. (2022).** Impact on discharge modelling using different spatial and temporal resolution scenarios in South of Chile. Journal of South American Earth Sciences, 115. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103727>
- 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). <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009).** Present-day South American climate. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 281(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>

- Glen, S. (2016).** Mann Kendall Trend Test: Definition, Running the Test - Statistics How To. StatisticsHowTo.com. <https://www.statisticshowto.com/mann-kendall-trend-test/>
- Harynuk, J. (2022).** Theil-Sen Regression with intercept. MATLAB Central File Exchange. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71205-theil-sen-regression-with-intercept>
- Held, I. M., Guo, H., Adcroft, A., Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Krasting, J., Shevliakova, E. et al. (2019).** Structure and Performance of GFDL's CM4.0 Climate Model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(11). <https://doi.org/10.1029/2019MS001829>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J. et al. (2019).** ERA5 monthly averaged data on single levels from 1959 to present. En Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < 23-12-2022 >). <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>
- Hinne, M., Gronau, Q. F., van den Bergh, D., & Wagenmakers, E. J. (2020).** A Conceptual Introduction to Bayesian Model Averaging. Advances in Methods and Practices in Psychological Science, 3(2). <https://doi.org/10.1177/2515245919898657>
- Hoeting, J. A., Madigan, D., Raftery, A. E., & Volinsky, C. T. (1999).** Bayesian model averaging: A tutorial. Statistical Science, 14(4). <https://doi.org/10.1214/ss/1009212519>
- Hormazábal, V., Vargas Rojas, V., Abarca, R., Little Cárdenas, C., Rivera, D., Carrasco, N., & Villalobos Volpi, E. (2021).** Simulación hidrológica del caudal del estero Batuco en la microcuenca agroforestal Batuco (Ránquil, Región del Ñuble, Chile) bajo condiciones climáticas presentes y futuras. Ciencia & Investigación Forestal, 27(2): 3–22. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.546>
- Ibrahim, U. A., Dan'azumi, S., Bdiya, H. H., Bunu, Z., & Chiroma, M. J. (2022).** Comparison of WEAP and SWAT models for streamflow prediction in the Hadejia-Nguru Wetlands, Nigeria. Modeling Earth Systems and Environment, 8(4), 4997–5010. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01435-1>
- INE. (2017).** Aldeas Censo 2017. Geodatos abiertos. <https://www.ine.gob.cl/herramientas/portal-de-mapas/geodatos-abiertos>
- INFOR. (2021).** Análisis hidrológico comparativo para las cuencas Batuco y Huillinco: proyecciones, adaptación y manejo de cuenca en escenarios de cambio climático Parte 1: Recolección de datos microcuenca Huillinco.
- INIA, CEAZA & DMC. (2022).** Agrometeorología INIA [Temperatura mensual, Precipitación mensual, Humedad relativa, Velocidad del viento]. <https://agrometeorologia.cl/>
- Konapala, G., Mishra, A. K., Wada, Y., & Mann, M. E. (2020).** Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. Nature Communications, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006).** World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Marticorena, J. (2020).** Consumo de Agua Promedio por Persona en Chile Supera la Media de Europa, aunque está muy por debajo de la de Estados Unidos. El Mercurio. https://www.litoralpress.cl/paginaconsultas/Servicios_NClipSitio/Get_Imagen_Pagina.aspx?LPKey=LVISR6H4DB52E74KGLFSSNDHZAN3KR7H7FG7HH54BLBGYWWMBWKQ
- Massoud, E. C., Lee, H., Gibson, P. B., Loikith, P., & Waliser, D. E. (2020).** Bayesian model averaging of climate model projections constrained by precipitation observations over the contiguous United States. Journal of Hydrometeorology, 21(10). <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0258.1>
- Mena-Pardo, D. I. (2009).** Análisis de Impactos del Cambio Climático en la Cuenca Andina del Río Teno, Usando el Modelo Weap [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103570>
- Montes, C. (2021).** Balance Hídrico Nacional revela dramática situación: proyecta escasez de agua de hasta 50% y alza de temperatura de hasta 2,5°C. La tercera. <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/balance-hidrico->

nacional-revela-dramatica-situacion-proyecta-escasez-de-agua-de-hasta-50-y-alza-de-temperatura-de-hasta-25c/JOPGLFFSRRGTVNZNQNM73CGS6I/

- MOP. (2014).** Inventario de Cuencas, Subcuencas, y Subsubcuencas de Chile. <https://snia.mop.gob.cl/sad/CUH5690.pdf>
- Muñoz Sabater, J. (2019).** ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < 23-12-2022 >). <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb3>
- Muñoz Sabater, J. (2021).** ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to 1980. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on < 23-12-2022 >). <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb3>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R. et al. (2016).** The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geoscientific Model Development, 9(9). <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Orrego, R., Abarca-del-Río, R., Ávila, A., & Morales, L. (2016).** Enhanced mesoscale climate projections in TAR and AR5 IPCC scenarios: a case study in a Mediterranean climate (Araucanía Region, south central Chile). SpringerPlus, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3157-6>
- Quintana-Ruedinger, G. (2020).** Chiloé está perdiendo sus más importantes reservorios de agua dulce . Diario UCh.
- Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., & Polakowski, M. (2005).** Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. Monthly Weather Review, 133(5). <https://doi.org/10.1175/MWR2906.1>
- Reichle, R.H., & Koster, R.D. (2004).** Bias reduction in short records of satellite soil moisture. Geophysical Research Letters, 31(19). <https://doi.org/10.1029/2004GL020938>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N. et al. (2017).** The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environmental Change, 42. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Río-La Mura, P.A. del. (2015).** Análisis del impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la Cuenca de Pangal en Pangal [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/135204>
- Rochford, P. (2022).** PeterRochford/SkillMetricsToolbox (1.8.1). <https://github.com/PeterRochford/SkillMetricsToolbox>
- SEI. (2015).** WEAP Water Evaluation and Planning System User Guide. En *Stockholm Environment Institute*. https://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf
- Seland, Ø., Bentsen, M., Olivie, D., Toniazzo, T., Gjermundsen, A., Graff, L. S., Debernard, J. B. et al. (2020).** Overview of the Norwegian Earth System Model (NorESM2) and key climate response of CMIP6 DECK, historical, and scenario simulations. Geoscientific Model Development, 13(12). <https://doi.org/10.5194/gmd-13-6165-2020>
- Singh, A. (2020).** CDF matching bias correction method in MATLAB (1.0). <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/78784-cdf-matching-bias-correction-method-in-matlab>
- Singh, A., Gaurav, K., Meena, G. K., & Kumar, S. (2020).** Estimation of soil moisture applying modified Dubois model to Sentinel-1; A regional study from Central India. Remote Sensing, 12(14). <https://doi.org/10.3390/rs12142266>
- Sloughter, J. M. L., Raftery, A. E., Gneiting, T., & Fraley, C. (2007).** Probabilistic quantitative precipitation forecasting using bayesian model averaging. Monthly Weather Review, 135(9). <https://doi.org/10.1175/MWR3441.1>
- Taylor, K. E. (2001).** Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 106(D7). <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Thorvaldsen, S. (2022).** Cumulative Mann-Kendall trend test. MATLAB Central File Exchange.

- Trenberth, K. E. (2011).** Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1–2). <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C. et al. (2011).** The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1). <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vargas, X. (2012).** Disponibilidad futura de los recursos hídricos frente a escenarios de cambio climático en Chile. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/5691>
- Voldoire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., Colin, J. et al. (2019).** Evaluation of CMIP6 DECK Experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(7). <https://doi.org/10.1029/2019MS001683>
- Vrugt, J. A. (2016).** Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation. *Environmental Modelling and Software*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.013>
- Vrugt, J. A. (2018).** MODELAVG: A MATLAB Toolbox for Postprocessing of Model Ensembles. <https://faculty.sites.uci.edu/jasper/software/>
- Wilks, D. (2005).** *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2^a ed.). Academic Press.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H. et al. (2019).** The meteorological research institute Earth system model version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 97(5). <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>
- Ziehn, T., Chamberlain, M. A., Law, R. M., Lenton, A., Bodman, R. W., Dix, M., Stevens, L. et al. (2020).** The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 70(1). <https://doi.org/10.1071/ES19035>

ANEXO 1

Extracción de Información Meteorológica *In Situ* de la Zona de Estudio

Precipitación

Para construir el campo de isoyetas, o líneas de igual precipitación, (**Figura A1.1**), se escogió estaciones que tuvieran registro desde enero del 2012 hasta diciembre del 2018. Estas fueron las estaciones N° 1, 4, 5, 7, 10, 11, 14 y 16 del Cuadro 1. Luego a partir de la **Expresión A1.1** se calculó la precipitación anual de cada estación seleccionada, y con la **Expresión A1.2** se calculó la precipitación anual normal, que es el promedio de las precipitaciones anuales de cada estación seleccionada:

$$P_{(a,e)} = \sum_{m=1}^{12} P_{(m,a,e)}(m) \quad (\text{A1.1})$$

Donde:

$P_{(a,e)}$ = precipitaciones acumuladas en un año a en una estación e

$P_{(m,a,e)}$ = precipitación mensual en un mes m, en un año a y una estación e.

$$P_{(pa,e)} = \frac{\sum_{a=1}^n P_{(a,e)}(a)}{n} \quad (\text{A1.2})$$

Donde:

$P_{(pa,e)}$ = precipitación anual normal en una estación e

$P_{(a,e)}$ = precipitación anual en el año a y estación e

n = número de años (que sería desde el 2012 hasta el 2018)

Después de calcular la precipitación anual normal en cada estación meteorológica, se usó un sistema de información geográfica (SIG)¹ para generar un mapa interpolado de las precipitaciones anuales normales de las estaciones meteorológicas, dentro de la cuenca de la Isla de Chiloé y circundantes (**Figura A1.1**). Posteriormente se calculó el promedio de los píxeles que cubrían la microcuenca Huillinco, para obtener un valor representativo de la precipitación anual normal. Este valor fue de 1.610 mm.

¹ Qgis

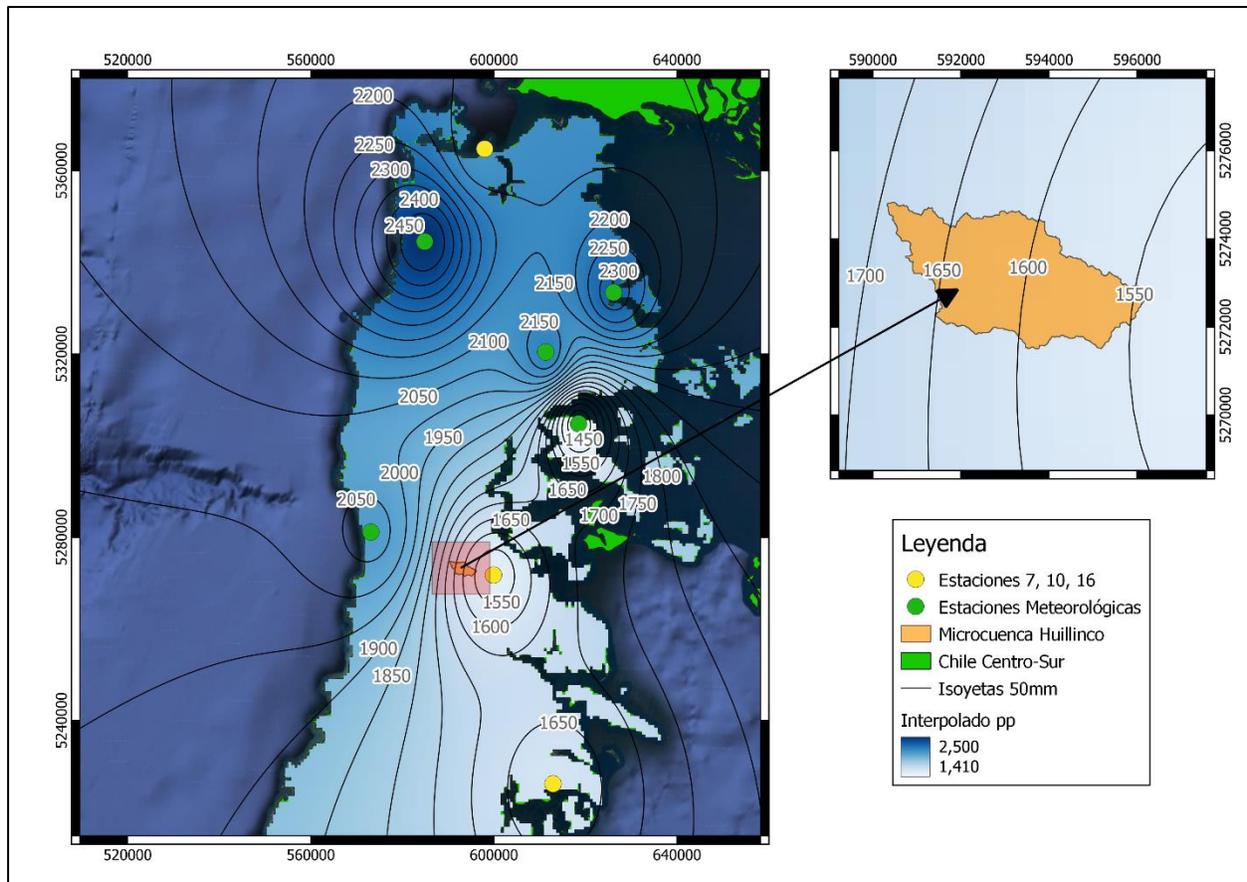


Figura A1. 1. Interpolación de la precipitación anual (por el método de isoyetas) en la Isla Grande de Chiloé

Para reconstruir la serie de precipitaciones para la microcuenca Huillinco se escogió la estación N° 7, 10 y 16 (**Cuadro 1**), ya que estas estaciones combinadas poseían datos desde marzo del 1992 hasta octubre del 2021.

A partir de la **Expresión (A1.3)** se calculó la precipitación a escala mensual en la microcuenca Huillinco:

$$Ph_{(m,a)} = Pc_{(m,a)} \times \frac{Ph_{(pa)}}{Pe_{(pa)}} \quad (\text{A1.3})$$

Donde:

- $Ph_{(m,a)}$ = Precipitación en la microcuenca Huillinco (zona de estudio) en el mes m y en el año a;
- $Pe_{(m,a)}$ = Precipitación en el mes m y el año a, de las estaciones de referencia (N° 7, 10 y 16; del **Cuadro 1**);
- $Ph_{(pa)}$ = Precipitación anual normal representativa (1.610 mm);
- $Pe_{(pa)}$ = Precipitación anual normal de las estaciones de referencia (N° 7, 10 y 16; del **Cuadro 1**).

Temperatura, Humedad Relativa y Rapidez del Viento.

Para construir el campo de isotermas (líneas de igual temperatura), isóhumas (líneas de igual humedad relativa), isotacas (líneas de igual rapidez del viento), se seleccionó a las estaciones que tuvieran registro desde enero del 2010 hasta diciembre del 2020, debido al registro más pobre de estas variables y el

número menor de ellas que las registran en comparación de la precipitación¹. En el caso de las isotermas e isóhumas se usó las estaciones 1, 2, 3, 6, 7, 8 y 9 (**Cuadro 1**), y para las isotacas las estaciones N° 1, 3, 6, 7, 8 y 9 (**Cuadro 1**).

A diferencia de la precipitación, donde se calculó un valor de precipitación anual normal representativo para cada estación (ecuaciones **A1.1**, **A1.2** y **A1.3**), para las otras variables meteorológicas se usó los valores mensuales del 2020 como valores representativos para cada estación. Luego con la ayuda de un sistema de información geográfica (SIG), se realizó un proceso similar al de la **Figura A1.1**, solo que ahora se obtuvo 12 valores representativos para cada variable (Figuras no mostradas).

Para reconstruir las series de temperatura, humedad relativa, rapidez del viento (en conjunto representadas por X), para la microcuenca Huillinco, se escogió la estación N° 1 y 7, ya que estas estaciones combinadas para la temperatura y la humedad relativa, poseían datos desde octubre del 2009 hasta octubre del 2021, mientras que para la rapidez del viento poseían datos desde mayo del 2010 hasta octubre del 2021.

Luego, a partir de la **Expresión (A1.4)** se calculó las series de cada variable a escala mensual en la microcuenca Huillinco:

$$Xh_{(m,a)} = Xn_{(m,a)} \times \frac{XCh_{(m)}}{XCn_{(m)}} \quad (\text{A1.4})$$

Donde:

$Xh_{(m,a)}$ = Variable meteorológica X en la microcuenca Huillinco en el mes m y el año a

$Xe_{(m,a)}$ = Variable meteorológica X en el mes m y el año a, de la estaciones de referencia (N° 1 y 7; **Cuadro 1**)

$XCh_{(m)}$ = Variable meteorológica X representativo (2020) en el mes m

$XCe_{(pa)}$ = Variable meteorológica X representativo (2020) de la estación de referencia (N° 1 y 7; **Cuadro 1**) en el mes m.

¹ Por ejemplo, para la temperatura, cuya variabilidad espacial es más homogénea que la de la precipitación, no existiría la necesidad de tantas estaciones de monitoreo, como en el caso de la precipitación. Esto se puede observar indirectamente en la Figura 1 de [Garreaud et al. \(2009\)](#).

ANEXO 2

Corrección de Sesgo

Los productos de precipitación y de temperatura de los modelos CMIP6 (histórico y SSP5-8.5) se interpolaron a un tamaño de grilla común de 1.0° (360 longitud x 180 latitud) de sus tamaños de grillas originales (**Cuadro 1**).

Luego se utilizó el periodo común de 2010-2020, para corregir el sesgo de la precipitación y la temperatura, en base a las series extraídas del **Anexo 1**, y que se pueden observar de las **Figuras 5 y 6**, respectivamente (color verde).

Las **Figuras A2.1 y A2.2** muestran la corrección de sesgo mediante la Función de Distribución Acumulada (CDF), para cada modelo descrito en el **Cuadro 3**, las series BMA (creada en base a **Cuadro 4** y mostradas en las **Figuras 5 y 6**) y el producto climatológico ERA5-Land (**Cuadro 2**). Esta corrección se realizó a través del algoritmo de [Singh \(2020\)](#). (Se puede obtener más información en [Singh et al., 2020](#) y [Reichle & Koster, 2004](#)).

En el **Cuadro A2.1** se presenta el sesgo antes y después de la corrección de cada modelo. En las **Figuras A2.3 y A2.4** se puede ver la transición de las series antes y después de la corrección de sesgo, para la precipitación y temperatura respectivamente (periodo 2010-2020). Posteriormente esta corrección de sesgo se extrapoló a los periodos de proyección climática (2021-2100).

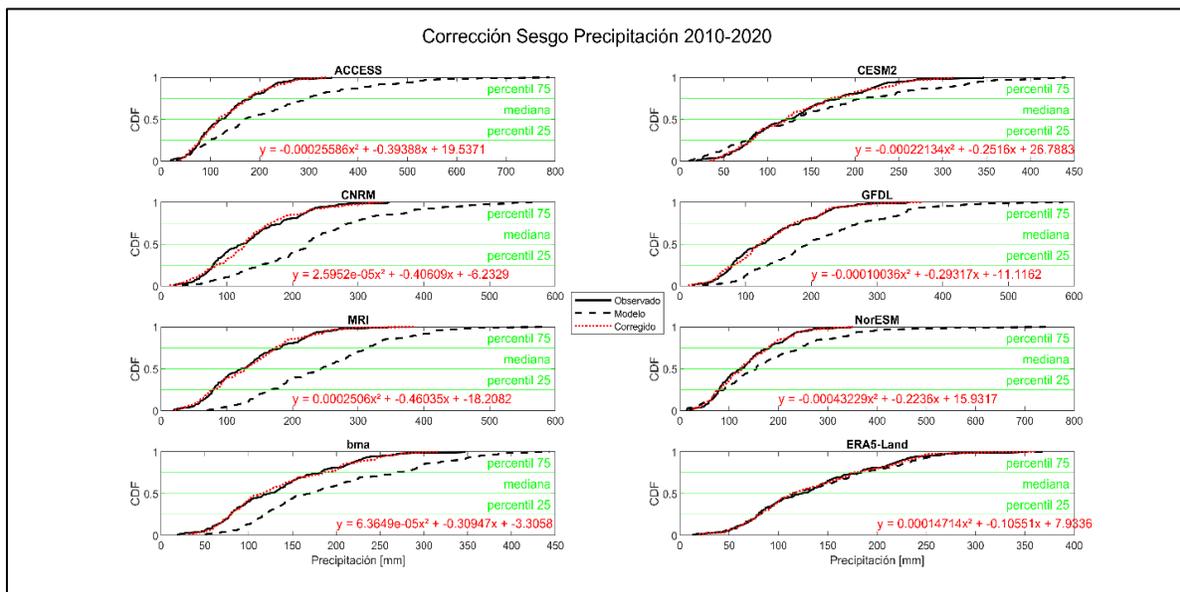


Figura A2.1. Corrección de sesgo de las simulaciones descritas en el Cuadro 3, del producto BMA (Cuadro 4) y de ERA5-land (Cuadro 2); para las precipitaciones.

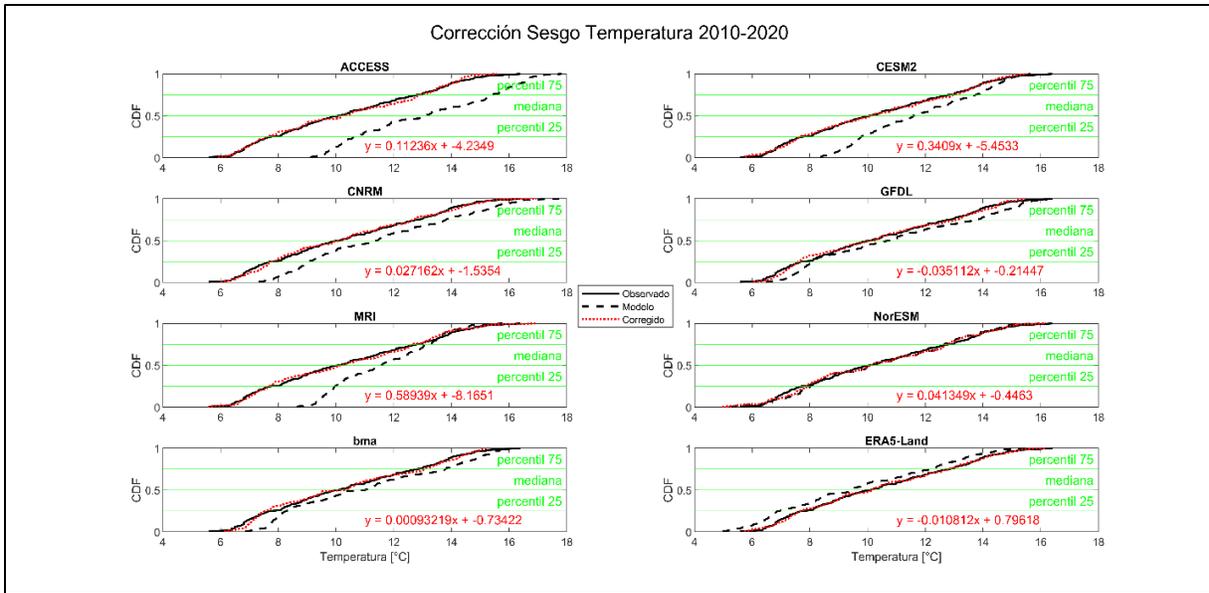


Figura A2.2. Corrección de sesgo de las simulaciones descritas en el Cuadro 3, del producto BMA (Cuadro 4) y de ERA5-land (Cuadro 2); para las temperaturas

Cuadro A2.1. Sesgo antes y después de la corrección

N°	Modelos	Precipitación		Temperatura	
		Sesgo antes [mm]	Sesgo después [mm] × 10 ⁻¹²	Sesgo antes [°C]	Sesgo después [°C] × 10 ⁻¹³
1	ACCESS-ESM1-5	84.33	0.2374	2.76	-0.0902
2	CESM2-WACCM	19.26	0.0398	1.43	-0.0982
3	CNRM-CM6-1	99.22	-0.0721	1.22	-0.0202
4	GFDL-ESM4	79.28	-0.0764	0.60	-0.0027
5	MRI-ESM2-0	114.75	0.0474	1.30	0.2900
6	Nor-ESM1-M	43.99	0	0.02	0.0148
7	BMA	60.55	0.0237	0.72	-0.0114
8	ERA5-Land	3.00	-0.0043	-0.69	-0.0040

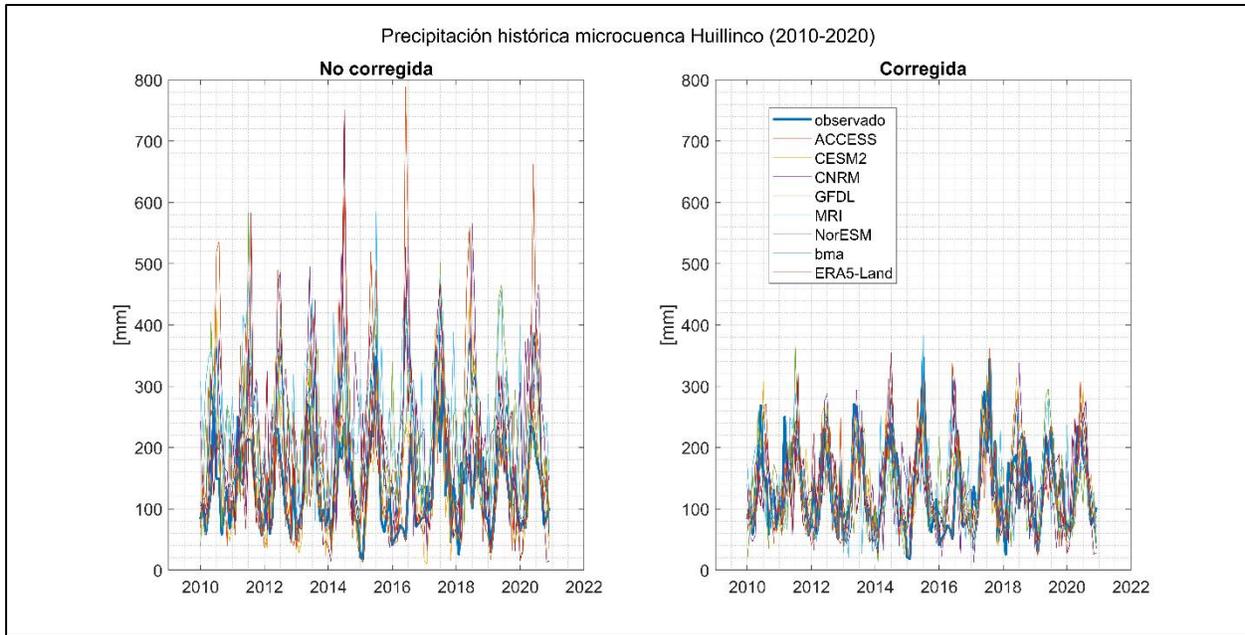


Figura A2.3. Series de precipitación antes (izquierda) y después (derecha) de ser corregidas

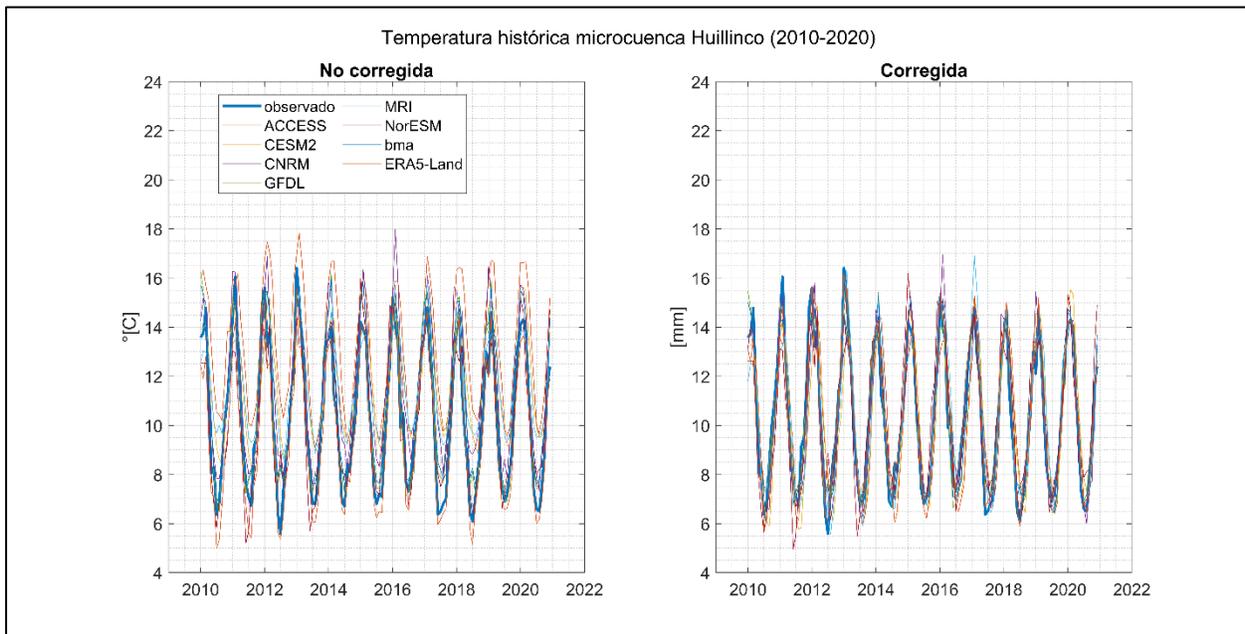


Figura A2.4. Series de temperatura antes (izquierda) y después (derecha) de ser corregidas