

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**EVALUACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA HIDROLOGÍA DE UNA CUENCA COSTERA DE CHILE CENTRAL**

**ALEJANDRA CORTÉS <sup>1</sup>**  
**HERNÁN ALCAYAGA<sup>2</sup>**  
**ROSSANA ESCANILLA<sup>3</sup>**  
**MAURICIO AGUAYO <sup>4</sup>**  
**MIGUEL AGUAYO <sup>5</sup>**

**RESUMEN**

El presente estudio evalúa el impacto del cambio climático en la hidrología de una cuenca costera con un bioclima mediterráneo llamada cuenca Río Andalién, utilizando el modelo hidrológico Soil & Water Assessment Tool (SWAT). Para las proyecciones climáticas se consideran diez modelos climáticos globales (GCM) bajo dos vías de concentración representativas (RCP), el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5. Para la corrección de sesgo se utiliza el método estadístico, el cual ajusta los GCM históricos y datos observados, posterior a esto se realizan las proyecciones de precipitaciones (PP), temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) que son ingresadas al modelo SWAT para simular los procesos hidrológicos que entregan los cambios en la hidrología de la cuenca. Los resultados indicaron que el modelo SWAT funciona bien en la cuenca de estudio, con una eficiencia mensual en NS de un 0,91 y 0,73, R2 de 0,91 y 0,75, un Pbias de -1,18 y -5,67, un KGE de 0,93 y 0,85, para calibración y validación respectivamente. Para la presentación de los resultados se obtienen valores para el futuro próximo (2005-2025), futuro medio (2005-2050) y futuro lejano (2005-2100). El conjunto de los múltiples GCM proyectan una disminución del PP de un 54,8%, un aumento de la Tmax de 4,1°C y de Tmin de 2,9°C para el RCP 8,5 en el futuro lejano, la estación más afectada en este periodo, por el cambio climático es el otoño, donde hay una disminución del PP de un 38% y 58%, un aumento de Tmax de 3,5°C y 5,2°, y de Tmin un 3,2° y un 4,9°, mientras que el caudal tiene una disminución del 16,8% y del 56%, en RCP 4.5 y RCP 8.5 respectivamente. Los hallazgos de este estudio podrían ser útiles para comprender el impacto que el cambio climático en la gestión y asignación de recursos hídricos en la zona.

---

1 Estudiante de Magister en ciencias de la ingeniería, Universidad Diego Portales- email: alejandra.cortesg@mail.udp.cl

2 Profesor Asociado, Escuela de Obras Civiles, Universidad Diego Portales- email: hernan.alcayaga@udp.cl

3 Ingeniería Civil, ERIDANUS LTDA.- email: rescannillam@gmail.com

4 Profesor Asociado, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción

5 Profesor Asistente, Facultad de Recursos Naturales, Universidad Católica de Temuco- email: miguel.aguayo@uct.cl

## **1. INTRODUCCIÓN**

Una de las manifestaciones más evidentes del cambio climático es su influencia en el balance hídrico y en los procesos hidrológicos en todo el mundo (Ha et al., 2019). La evaluación de los efectos del cambio climático, a escala local y regional, reflejan la necesidad de mejorar las capacidades de estimar la variabilidad del proceso hidrológico y sus componentes individuales a escala de cuenca (Lu et al., 2010). El uso de modelos hidrológicos desempeña una función esencial en la identificación de los efectos actuales y futuros del cambio climático, generando escenarios que nos permiten adoptar las medidas de mitigación adecuadas (Pérez-Sánchez et al., 2020).

En Chile, a partir del año 2010, se ha experimentado una de las sequías más severas del último siglo, la llamada mega-sequía (MD) (Garreaud et al., 2020), la cual combinada con actividades agrícolas intensivas y el actual sistema de gestión del agua, han provocado problemas de escasez hídrica en las regiones mediterráneas y semiáridas de Chile (Muñoz et al., 2020).

Por esto, es interesante estudiar el cambio climático para cuencas con influencia de un bioclima mediterráneo, como lo es la cuenca del Andalién, ya que estas experimentan una amplia gama de amenazas naturales y antropogénicas para la seguridad hídrica (Ludwig et al., 2010; Vozinaki et al., 2018). A escala local se puede observar, según los resultados del modelo PRECIS que las precipitaciones en el siglo XXI se reducirán entre un 60% y un 70% respecto a los valores actuales, entre las regiones del Maule y Los Lagos (Valdés-Pineda et al., 2014).

En este contexto, el objetivo de la presente investigación es evaluar los efectos del cambio climático en la hidrología de la cuenca del Río Andalién, perteneciente a la zona costera de Chile Central. Para esto se realiza una evaluación de la meteorología usando dos escenarios de cambio climático basados en una mediana (RCP 4.5) y alta (RCP 8.5) emisión de gases de efecto invernadero. Se generan diez Modelos de Circulación Global para cada escenario, entregando proyecciones de precipitación y temperatura, las dos variables climáticas antes mencionadas corresponden a datos de entrada del modelo hidrológico que estima el comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico. A partir de los resultados del modelo se evalúan los impactos asociados al cambio climático desde el año 2005 a un futuro próximo (2005-2025), medio (2005-2050) y lejano (2005-2100).

## **2. MATERIAL Y MÉTODOS**

### **2.1. ÁREA DE ESTUDIO**

La cuenca de estudio se ubica en la zona costera del centro-sur de Chile. Corresponde a la cuenca del río Andalién, la cual drena desde la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa, entre los 36° 42' y los 36°56' de latitud Sur y entre los 72°36' y los 73°04' de longitud oeste. El río Andalién posee un curso 36 km de longitud y un área 751,2 km<sup>2</sup> delimitada en la estación fluviométrica y meteorológica llamada Río Andalién Camino a Penco, con una altitud de 7 msnm, la cual corresponde a la estación más cercana a la desembocadura ((DGA), 2004) .

El Río Andalién desemboca en la Bahía de Concepción y atraviesa la conurbación de la ciudad de Concepción-Penco. Sus altitudes fluctúan entre 567 m.s.n.m. y el nivel del mar (Castillo, 2017).

Según la Dirección General de Aguas (DGA) la cuenca del Río Andalién se encuentra bajo la influencia de un bioclima mediterráneo ((DGA), 2004). Los meses entre mayo-agosto agrupan más del 70% de los montos de las precipitaciones anuales, estos alcanzan entre 1.200 y 1.400 mm y la temperatura media es de 13°C, con amplitudes térmicas de 8.1°C ((DGA), 2004).

Los principales tipos de suelo en la cuenca son rocas graníticas, que se caracterizan por su baja permeabilidad y por su porosidad abundante (Stolpe, 2006), estos son muy susceptibles a la erosión debido a la pendiente de la Cordillera de la Costa ((DGA), 2004). Según la clasificación de uso de suelo realizada por la CONAF (CONAF, 2015), sus usos principales del suelo corresponden a plantaciones adulta y joven (60,7%), seguido de bosque nativo y bosque mixto (17%) y terreno agrícola y agricultura de riego (8,3%).

## **2.2. MODELO HIDROLÓGICO**

El modelo hidrológico utilizado es el *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)(Arnold et al., 1998) el cual permite simular hidrología y calidad del agua, basado en procesos semi-distribuidos diseñados para calcular y enrutar el agua (Eckhardt et al., 2005). SWAT requieren dos tipos de datos de entrada distribuidos espacialmente y series temporales. Los datos espaciales incluyen un modelo de elevación digital (DEM), uso y tipo de suelo. Las series de tiempo corresponden a datos hidro-climáticos (precipitación, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura) (Welde & Gebremariam, 2017). En el modelo SWAT, una cuenca hidrográfica se divide en varias subcuencas, que luego se subdividen en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs) las cuales se componen de atributos de suelo, pendiente y de usos de suelo similares (Ayivi & Jha, 2018; Arnold & Fohrer, 2005).

## **3. DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO HIDROLÓGICO**

Las series de tiempo de caudales, precipitaciones y temperaturas a escala diaria, son obtenidas de la base de datos CAMELS-CL (CAMELS-CL, n.d.). Los datos espacialmente distribuidos son adquiridos de las fuentes que se indican a continuación. El modelo de elevación digital (DEM) se descargó de la base de datos *Alaska Satellite Facility* (ASF), con una resolución de 30m. El tipo de suelo proviene del Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN), (CIREN, n.d.) y según sus propiedades hidrológicas, estas fueron asignadas a las series de suelo de la bases de datos del modelo SWAT. El uso de suelo fue obtenido a través del análisis de imágenes satelitales de los sensores Landsat 5 y 8, con una resolución de 30 m., donde se realiza una clasificación de uso de suelo utilizando una clasificación supervisada (Rivas-Tabares et al., 2019)(Anjum et al., 2019) en el software ArcGIS 10.4.

### **3.1.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO**

El periodo de calibración consta de cinco años desde el 2003 al 2007, este se realiza modificando once parámetros más sensibles, que afectan todas las cuencas ya que se relacionan en con la cantidad de agua subterránea y agua que se infiltra, el cálculo de índices generales y las dimensiones del río, considerando estos datos se compara los datos de caudal modelados con los observados. Para evaluar el desempeño del modelo en este periodo se utilizan cuatro indicadores estadísticos; el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el sesgo de porcentaje (PBIAS) y la eficiencia de Kling-Gupta (KGE) (Brouziyne et al., 2017). Los criterios de ajuste asociados a estos cuatro indicadores son los mismo que clasificó Kouchi (Kouchi et al., 2017). La validación se efectuará para nueve años, desde 2008 a 2016, se utilizan los mismos cuatro indicadores y los mismos criterios de ajustes que para el proceso de calibración.

## **3.2. CAMBIO CLIMÁTICO**

### **3.2.1. SELECCIÓN DE RCP Y GCM**

Para este estudio se consideran dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: las medias (RCP 4.5) y las altas (RCP 8.5) (Luo et al., 2019). Por un lado, el escenario RCP 4.5 representan una tendencia media. Mientras que el escenario RCP 8.5 representa una tendencia crítica. (Verichev et al., 2020). Posterior a esto, se obtienen las proyecciones futuras de cambio climático a través de las simulaciones de Modelos de Circulación General (GCM). Luego se reduce el sesgo estadístico de las proyecciones climáticas mediante un escalamiento, para pasar de escala global a regional. Finalmente, se genera la hidrología futura a través del modelo SWAT.

### **3.2.2. ESCALAMIENTO**

El propósito es identificar los posibles sesgos entre variables climáticas observadas y simuladas, lo que constituye la base para corregir las futuras proyecciones del GCM (Chen et al., 2019), llegando hasta una proyección a escala de cuenca. Existen distintas metodologías para aplicar el escalamiento, en el caso de estudio se utiliza el método estadístico que intenta encontrar una función que mapea una variable climática modelada de tal manera que su nueva distribución espacial/estadística es igual a la distribución de la variable observada (Basheer et al., 2016; Escanilla-Minchel et al., 2020; Gudmundsson et al., 2012; Harald Cramér, 1999). Dentro del proceso de escalamiento se han denominado tres series de tiempo de datos meteorológicos i) periodo histórico observado, ii) periodo histórico simulado y, iii) periodo proyectado, que incluyen datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima. El primer periodo comprende datos observados desde el año 1979 al año 2005, estos se obtienen desde la estación meteorológica Río Andalién Camino a Penco. El segundo periodo incluye las mismas fechas que el primer periodo, pero representan las simulaciones de los GCM. El tercer periodo considera desde el año 2006 al año 2100 y corresponde a los datos climáticos proyectados por los GCM. Los dos últimos periodos se obtuvieron de la base de datos de *Infrastructure for the European Network for Earth System Modelling* (Is-Enes, 2021).

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN PARA EL MODELO SWAT

Para cada año de calibración se generó un modelo, con su respectivo mapa de usos de suelo y un set de parámetros de calibración, los cuales pasaron por un proceso de evaluación de índices estadísticos para que finalmente se escoja el grupo de parámetros con los mejores índices de rendimiento obtenidos en la calibración y evaluados en el periodo de validación.

Tabla 1: Indicadores Estadísticos del Set de Parámetros Final (Kouchi et al., 2017)

Indicadores Estadísticos	Set de Parámetros Finales			
	Calibración (2003 - 2007)		Validación (2008 - 2016)	
<b>R2</b>	91,19%	<i>Muy bueno</i>	74,72%	<i>Bueno</i>
<b>NSE</b>	91,17%	<i>Muy bueno</i>	73,03%	<i>Bueno</i>
<b>PBIAS</b>	-1,18	<i>Muy bueno</i>	-5,67	<i>Muy bueno</i>
<b>KGE</b>	93,89%	<i>Muy bueno</i>	85,22%	<i>Good</i>

En la Tabla 1 podemos observar un NSE de 91,17% que establece una buena concordancia con el flujo base, un R2 de 91,19% donde se puede ver que la diferencia es mínima entre el caudal observado y el simulado, y un PBIAS de -1,18 que indica que los resultados están sobre el sesgo estimado. Al realizar la validación los indicadores estadísticos disminuyeron, pero no lo suficiente para salir de la clasificación *Bueno*.

En la Figura 1 se muestra el hidrograma durante el periodo de calibración y validación en la estación Río Andalién Camino a Penco. Se puede observar que, para el periodo de calibración, durante el año 2003 al año 2004 y desde el año 2005 hasta el año 2007 se sobreestiman los caudales máximos. En el periodo de validación se puede ver que del año 2008 al año 2013, en los periodos húmedos también hay una sobrestimación del caudal y en los periodos secos hay una subestimación, en cambio del año 2013 al año 2015 hay una subestimación general de los caudales simulados.

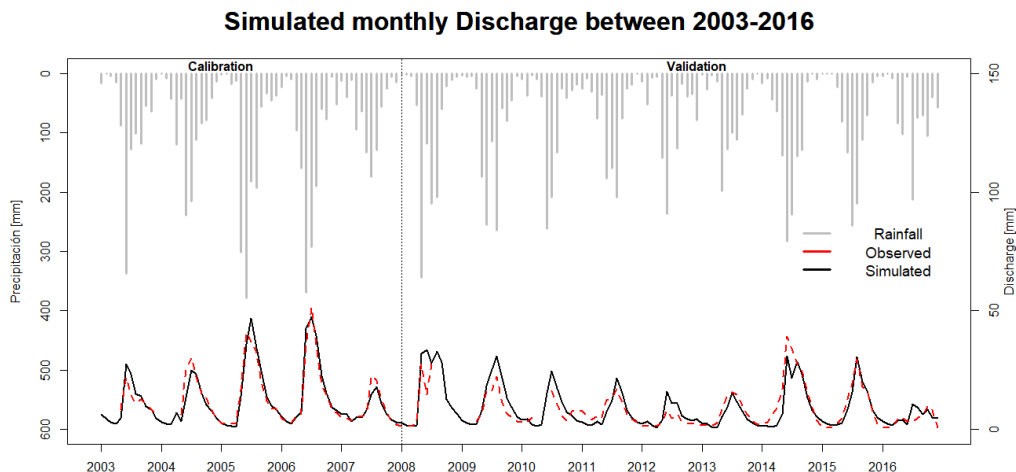


Figura 1: Datos observados y simulados en Calibración y Validación.

#### 4.2. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO SIN CONSIDERAR EVENTOS EXTREMOS

Es probable que el aumento de ocurrencia de los fenómenos extremos, como inundaciones, olas de calor y sequías, se intensifiquen debido al cambio climático (Githui et al., 2009), esto se evidencia en las proyecciones presentadas en la Figura 2, donde se pueden observar valores extremos de precipitación, los que influyen en los resultados de los elementos de la hidrología entregados en los modelos. Para tener en cuenta la incertidumbre asociada a los eventos extremos se utilizan los percentiles 5% y 95%, eliminando los valores que estén fuera de este rango, como se puede ver en la Figura 2a y 2b.

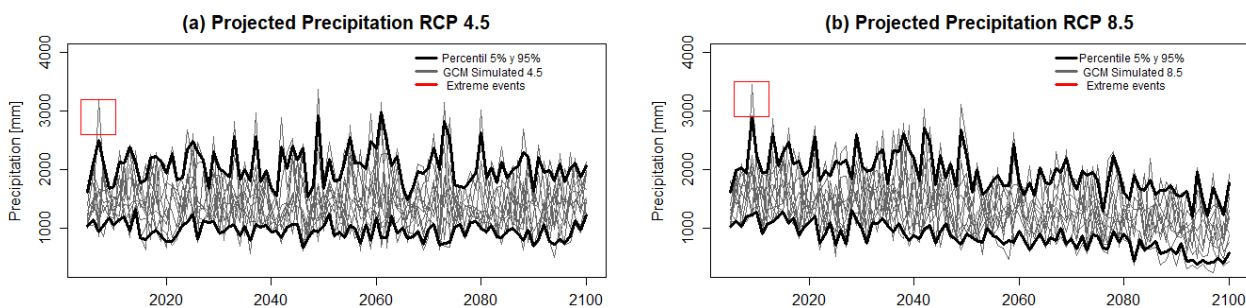


Figura 2: a) Precipitaciones Proyectadas de diez GCM en RCP 4.5 y b) Precipitaciones Proyectadas de diez GCM en RCP 8.5

También se definen cuatro tramos temporales que, en promedio, representen un año específico, como se ve en la Tabla 2, donde el año representativo 2005 son datos observados y los otros tres años representativos son datos simulados por los GCM. Posterior a esto, con la diferencia entre estos años representativos se definen tres periodos llamados futuro próximo (2005-2025), futuro medio (2005-2050) y futuro lejano (2005-2100).

Tabla 2: Año representativo con su respectivo promedio de años

Año Representativo	Promedio de años
2005	2001-2005
2025	2021-2025
2050	2046-2050
2100	2096-2050

#### 4.2.1. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA FUTURO PRÓXIMO (2025), FUTURO MEDIO (2050) Y FUTURO LEJANO (2100)

Los resultados de las proyecciones de precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas para los RCP 4.5 y 8.5 en el periodo 2005 – 2100 son presentados en la Figura 3. Tanto para el caudal como para las precipitaciones se estima una disminución (Figura 3a y Figura 3b). En el caso de las proyecciones de las temperaturas, las tendencias son al aumento tanto para las máximas como para las mínimas (Figura 3c y Figura 3d). También se puede observar que hay más variabilidad en precipitación y caudales, por causa de los periodos húmedos y secos entre RCP 4.5 y RCP 8.5. Mientras que, por otro lado, se puede ver que hay una diferencia de temperatura máxima mayor que de temperatura mínima para el año 2100.

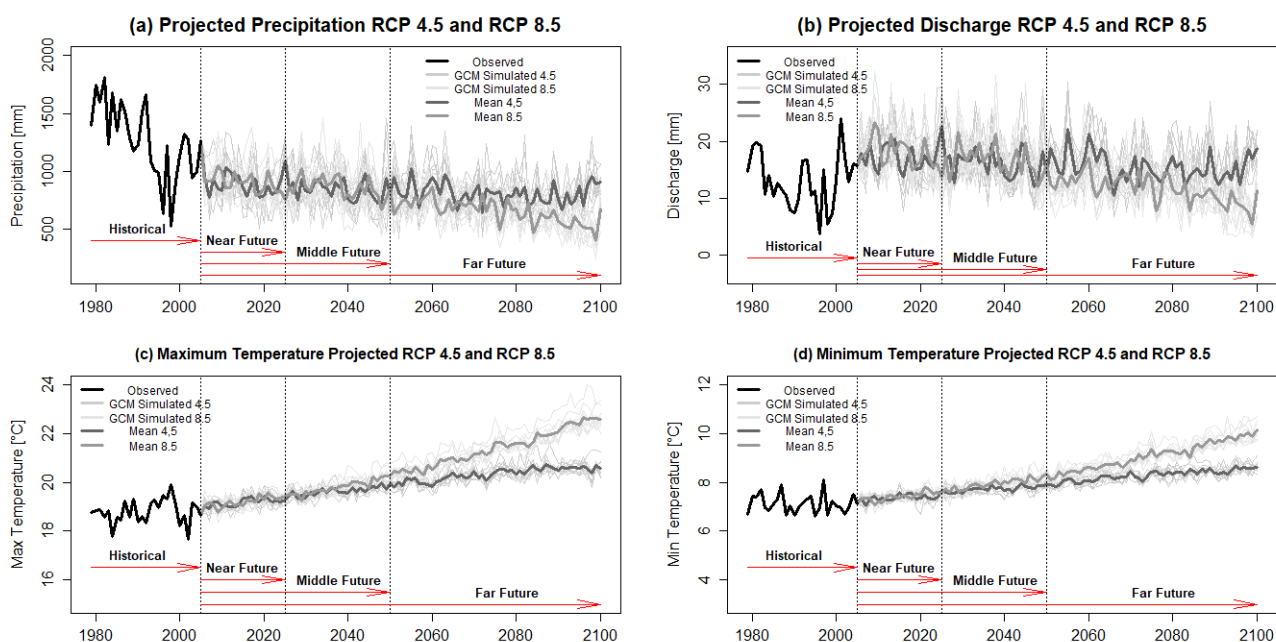


Figura 3: a) Proyecciones de precipitación RCP 4.5 y RCP 8.5, b) Proyecciones de caudales RCP 4.5 y RCP 8.5 c) Proyecciones de temperatura máxima RCP 4.5 y RCP 8.5 y, d) Proyecciones de temperatura mínima en RCP 4.5 y RCP 8.5

### 4.3. VARIACIONES INTERANUALES

#### 4.3.1. ESTACIONALIDAD DE LAS VARIACIONES (SEASONS)

En el análisis de las variaciones esperadas durante las diferentes estaciones del año solo se considera el futuro lejano (2005-2100), debido a que se espera una estabilización de los componentes de la hidrología a largo plazo. De esta manera se podrán evaluar las consecuencias para un periodo de tiempo extenso que corresponderá a la condición más desfavorable tanto para RCP 4.5 como para RCP 8.5.

Los resultados de la variación estacional son mostrados en la Tabla 3, donde podemos ver que para el verano austral las precipitaciones aumentan en un 15% en RCP 4.5 y disminuyen un 71% en RCP 8.5. En general, se espera un aumento de la temperatura máxima y mínima, independiente de los escenarios testeados. En otoño se espera que el incremento máximo de temperatura alcance 5,2°C en RCP 8.5, mientras que las variaciones de temperatura menos importantes pueden darse en invierno. Respecto a los caudales en verano para RCP 4.5 se estima un aumento del 104%, mientras que en invierno para RCP 8.5 se espera una disminución del caudal del 40%.

Tabla 3: Variación estacional para RCP 4.5 y RCP 8.5

Estaciones	Diferencias entre estaciones							
	Precipitación		Tmax (°C)		Tmin (°C)		Caudales	
	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
Verano	15%	-71%	1,7	4,4	1,2	3,0	104,2%	-23,7%
Otoño	-38%	-58%	3,5	5,2	3,2	4,9	-16,8%	-56,0%
Invierno	-5%	-43%	1,4	2,9	1,2	2,1	21,7%	-40,0%
Primavera	-24%	-67%	1,2	3,6	0,4	1,6	77,7%	-21,7%

#### 4.3.1.1. VARIACIONES MENSUALES ESPERADAS

Para precipitación se proyecta que las disminuciones más importantes se manifiesten entre febrero y junio para RCP 8.5, mientras que aumentan durante septiembre, diciembre y enero para RCP 4.5. Los mayores aumentos de temperaturas máximas y mínimas se estiman entre los meses de marzo y julio para ambos RCP, en tanto que para noviembre en el RCP 4.5 se proyecta una baja de 0,9 °C.

Los componentes de la hidrología obtenidos desde el modelo SWAT son la evapotranspiración (ET), percolación (PERC), escorrentía superficial (SURQ), escorrentía subsuperficial (LAT\_Q), aguas subterráneas (GW\_Q) y rendimiento o producción de agua (WYLD). En la Figura 4, se exponen en los paneles a la izquierda (Figura 4a y 4c) los componentes hidrológicos del año representativo observado (2005) en contraste con el caudal (gráfico de barras), mientras que a la derecha (Figura 4b y 4d) se tienen para el año representativo más desfavorable (2100). En general, se aprecia una relación directamente proporcional entre los componentes del balance hídrico y el caudal, por lo tanto, cualquier variación en alguno se manifiesta también en la descarga. Mientras que bajo el escenario RCP 8.5 se tiene una disminución importante en los caudales y, por consecuencia, en los



componentes. Respecto al escenario RCP 4.5, se tiene un desplazamiento de los caudales extremos, alcanzando el máximo en el mes de julio en lugar de junio.

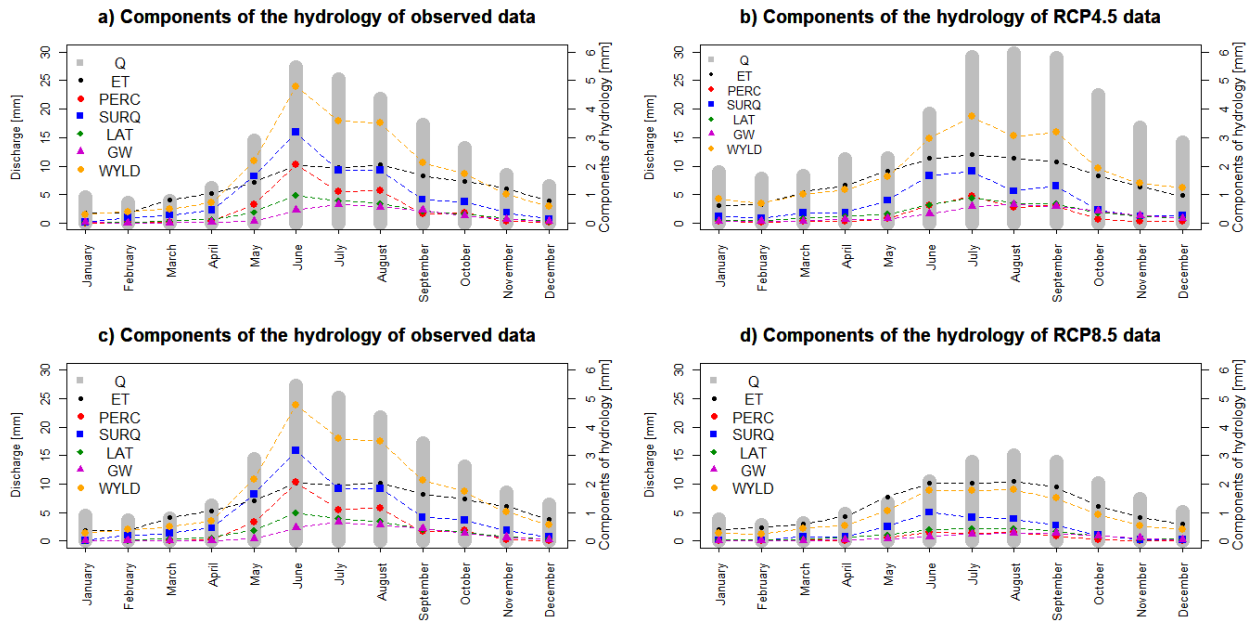


Figura 4: a) Valores mensuales de los componentes de la Hidrología para datos Observados, b) Valores mensuales de los componentes de la Hidrología para RCP 4.5, c) Valores mensuales de los componentes de la Hidrología para datos Observados y d) Valores mensuales de los componentes de la Hidrología para RCP 8.5.

#### 4.4. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO CONSIDERANDO EVENTOS EXTREMOS

Los resultados de la modelación usando las proyecciones RCP 4.5 y RCP 8.5 para los componentes del ciclo hidrológico se presentan en la Tabla 4. Dado que en este caso sí se consideran los eventos extremos que antes se descartaron por estar fuera de los percentiles 5 y 95, se ve que en todos los tramos temporales bajo el escenario RCP 4.5 se tiene un aumento en el caudal, lo que no significa que esta variable aumente de forma sostenida en el tiempo, si no que la incorporación de eventos extremos genera crecidas localizadas en los rangos temporales analizados. En el caso de RCP 8.5 se tiene una respuesta similar, a excepción del tramo 2005-2100, que incluso con precipitaciones extremas genera una disminución, de lo que se concluye que, aun así, sigue siendo el tramo temporal más desfavorable.

Además, como se vio anteriormente, el caudal posee relación directa con los otros elementos de la hidrología, donde se destaca cómo la percolación (PERC) y las aguas subterráneas (GW) poseen variaciones similares, y la escorrentía superficial (SURQ) es siempre mayor a la escorrentía subsuperficial (LAT), debido al tipo de suelo y a que el tiempo de respuesta en una crecida es menor no permitiendo que el agua infiltre.

Tabla 4: Variación porcentual de los diferentes procesos hidrológicos

	<b>Componentes del balance hidrológico</b>					
	<b>2005-2025</b>		<b>2005-2050</b>		<b>2005-2100</b>	
	<b>4.5</b>	<b>8.5</b>	<b>4.5</b>	<b>8.5</b>	<b>4.5</b>	<b>8.5</b>
Q (Caudales)	32,3%	20,0%	10,2%	9,8%	19,8%	-37,7%
ET (Evapotranspiración)	19,2%	16,1%	14,9%	15,4%	20,6%	-2,3%
PERC (Percolación)	50,9%	39,1%	19,6%	20,3%	34,7%	-35,2%
SURQ (Escorrentía superficial)	59,6%	42,3%	37,2%	36,8%	46,4%	-13,5%
LAT (Escorrentía subsuperficial)	45,5%	34,5%	21,1%	23,7%	33,8%	-21,5%
GW (Agua subterráneas)	50,9%	38,7%	20,4%	20,2%	33,8%	-34,6%
WYLD	54,1%	39,8%	29,8%	29,9%	40,5%	-20,7%

## 5. CONCLUSIÓN:

Se realiza con éxito una evaluación del cambio climático en la hidrología de una cuenca costera de Chile Central, esto se logra analizando los efectos de dos escenarios de cambio climático a mediana (RCP4.5) y alta (RCP 8.5) emisión de gases de efecto invernadero, y utilizando diez modelos del CMIP5 para evaluar el clima futuro. Se recomienda el uso de más de un GCM para disminuir las diferentes fuentes de incertidumbre y para analizar la robustez de los resultados (Araya-Osses et al., 2020; Knutti et al., 2010). Posteriormente, se hace un escalamiento de los datos simulados basándose en datos observados y así se genera un ajuste que entrega proyecciones de precipitaciones y temperatura. Con ello se desarrolla el modelo hidrológico SWAT que estima el comportamiento del ciclo hidrológico bajo las condiciones meteorológicas proyectadas, evaluando así los impactos asociados con el Cambio Climático (R. Garreaud, 2011).

En este estudio se puede ver que existe un aumento constante de la temperatura en ambos RCP, también se observa una disminución de la precipitación en la mayoría de los meses a excepción de enero, el cual presenta un aumento significativo, esto lleva que el caudal presente una crecida en este mes, estos resultados son concordantes con otros estudios (Christensen, n.d.) (Valdés-Pineda et al., 2014),(Araya-Osses et al., 2020),(Stehr et al., 2008),(R. Garreaud, 2011),(Carrasco et al., 2008),(Carrasco et al., 2005),(Pizarro et al., 2014),(Stehr et al., 2010). Estas variaciones traen como consecuencia que la cuenca experimente una sequía (principalmente en la estación seca), de igual manera puede haber problemas de inundación (principalmente en la temporada de lluvias), como ya se ha visto en la cuenca del Andalién (*Informe Sistema Frontal*, 2006), estas condiciones pueden perturbar la vida humana así como a todas las localidades afectadas por el caudal del río (Serur & Sarma, 2018).

Después de algunas décadas, dependiendo de las características de la cuenca y de los escenarios de cambio climático, la descarga total de esta cuenca caerá por debajo del nivel actual. Por lo tanto, el impacto del cambio climático tendrá una repercusión en la gestión y asignación de los recursos hídricos. Por esto, los responsables de la toma de decisiones deberían formular estrategias razonables en función de las características de las cuencas para

adaptarse al impacto del cambio climático (Luo et al., 2019) y así reducir las consecuencias sobre los ecosistemas, la producción agrícola y el riesgo de extinción de la flora y la fauna; también pueden utilizarse para reducir las amenazas a la seguridad alimentaria y los recursos hídricos (Araya-Osses et al., 2020). Consecuentemente, es imperativo poner en marcha medidas para aprovechar cualquier exceso de agua para utilizarla durante los periodos de escasas o nulas precipitaciones (Githui et al., 2009).

Este trabajo aporta a incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales y mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana que son parte del objetivo de Desarrollo Sustentable “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.”

## REFERENCIAS

- (DGA), D. Ge. de A. (2004). *Cuenca del rio andalien*.
- Anjum, M. N., Ding, Y., & Shangguan, D. (2019). Simulation of the projected climate change impacts on the river flow regimes under CMIP5 RCP scenarios in the westerlies dominated belt, northern Pakistan. *Atmospheric Research*, 227(January), 233–248. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.017>
- Araya-Osses, D., Casanueva, A., Román-Figueroa, C., Uribe, J. M., & Paneque, M. (2020). Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54(9–10), 4309–4330. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05231-4>
- Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563–572. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). *LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I : MODEL DEVELOPMENT ' basin scale model called SWAT ( Soil and Water speed and storage , advanced software debugging policy to meet the needs , and the management to the tank model ( Sugawara et al ., 1. 34(1), 73–89.*
- Ayivi, F., & Jha, M. K. (2018). Estimation of water balance and water yield in the Reedy Fork-Buffalo Creek Watershed in North Carolina using SWAT. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(3), 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.03.007>
- Basheer, A. K., Lu, H., Omer, A., Ali, A. B., & Abdelgader, A. M. S. (2016). Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on the streamflow in the Dinder River and ecosystem habitats in Dinder National Park, Sudan. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(4), 1331–1353. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1331-2016>
- Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Bouabid, R., Benaabidate, L., & Oueslati, O. (2017). SWAT manual calibration and parameters sensitivity analysis in a semi-arid watershed in North-western Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(19). <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3220-9>
- CAMELS-CL. (n.d.). *CAMELS-CL: Integrated Information on Water Catchments*. Center for Climate. <http://www.cr2.cl/eng/camels/>
- Carrasco, J. F., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century / Changements de l'isotherme 0°C et de la ligne d'équilibre des neiges dans le Chili central durant le dernier quart du 20ème siècle. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6). <https://doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.933>
- Carrasco, J. F., Osorio, R., & Casassa, G. (2008). Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*, 54(186), 538–550. <https://doi.org/10.3189/002214308785837002>
- Castillo, E. J. (2017). Geomorfología de la cuenca del río Andalién, Chile. *Revista Geográfica Del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, January 2008. <https://doi.org/10.2307/40996764>
- Chen, Y., Marek, G. W., Marek, T. H., Moorhead, J. E., Heflin, K. R., Brauer, D. K., Gowda, P. H., & Srinivasan, R. (2019). Simulating the impacts of climate change on hydrology and crop production in the Northern High Plains of Texas using an improved SWAT model. *Agricultural Water Management*, 221(November 2018), 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.021>

- Christensen, J. H. (n.d.). Regional Climate Projections. Chapter 11. In *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (Cambridge, pp. 847–940).  
[https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Climate change 2007%3A the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change&publication\\_year=2007&author=Christensen%2C](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Climate+change+2007%3A+the+physical+science+basis.+Contribution+of+working+group+I+to+the+fourth+assessment+report+of+the+intergovernmental+panel+on+climate+change&publication_year=2007&author=Christensen%2C)
- CIREN. (n.d.). *Capas de Información Geográfica asociadas al Estudio Agrológico de Suelos: Región del Biobío (VIII)*. <http://www.ide.cl/index.php/agricultura-y-ganaderia/item/1767-capas-de-informacion-geografica-asociadas-al-estudio-agrologico-de-suelos-region-del-biobio-viii>
- CONAF. (2015). *Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales de Chile - Actualización*. <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/22/planificacion-catastral/>
- Eckhardt, K., Fohrer, N., & Frede, H. G. (2005). Automatic model calibration. *Hydrological Processes*, 19(3), 651–658. <https://doi.org/10.1002/hyp.5613>
- Escanilla-Minchel, R., Alcayaga, H., Soto-Alvarez, M., Kinnard, C., & Urrutia, R. (2020). Evaluation of the impact of climate change on runoff generation in an andean glacier watershed. *Water (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/w12123547>
- Garreaud, R. (2011). Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro-INIA*, 93, 14. <http://www.dgf.uchile.cl/rene>
- 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>
- Githui, F., Gitau, W., Mutua, F., & Bauwens, W. (2009). Climate change impact on SWAT simulated streamflow in western Kenya. *International Journal of Climatology*, 29(12), 1823–1834. <https://doi.org/10.1002/joc.1828>
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations &ndash; A comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3383–3390. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012>
- Ha, Ghafouri Azar, & Bae. (2019). Long-Term Variation of Runoff Coefficient during Dry and Wet Seasons Due to Climate Change. *Water*, 11(11), 2411. <https://doi.org/10.3390/w11112411>
- Harald Cramér. (1999). *Mathematical Methods of Statistics*.
- Informe Sistema Frontal. (2006).
- Is-Enes. (2021). *Infrastructure for the European Network for Earth System Modelling*. <https://climate4impact.eu/impactportal/data/esgfsearch.jsp#>.
- Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J., & Meehl, G. A. (2010). Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *Journal of Climate*, 23(10), 2739–2758. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3361.1>
- Kouchi, D. H., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaeinejad, S. H., Khalili, D., & Abbaspour, K. C. (2017). Sensitivity of Calibrated Parameters and Water Resource Estimates on Different Objective Functions and Optimization Algorithms. *Water*, 9(6), 384. <https://doi.org/10.3390/w9060384>
- Lu, E., Takle, E. S., & Manoj, J. (2010). The Relationships between Climatic and Hydrological Changes in the Upper Mississippi River Basin: A SWAT and Multi-GCM Study. *Journal of Hydrometeorology*, 11(2), 437–451. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1150.1>
- Ludwig, R., Soddu, A., Duttman, R., Baghdadi, N., Benabdallah, S., Deidda, R., Marrocu, M., Strunz, G., Wendland, F., Engin, G., Paniconi, C., Pretenthaler, F., Lajeunesse, I., Afifi, S., Cassiani, G., Bellin, A., Mabrouk, B., Bach, H., & Ammerl, T. (2010). Climate-induced changes on the hydrology of mediterranean basins - A research concept to reduce uncertainty and quantify risk. *Fresenius Environmental Bulletin*, 19(10 A), 2379–2384.
- Luo, M., Liu, T., Meng, F., Duan, Y., Bao, A., Xing, W., Feng, X., De Maeyer, P., & Frankl, A. (2019). Identifying climate change impacts on water resources in Xinjiang, China. *Science of the Total Environment*, 676, 613–626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.297>
- Muñoz, A. A., Klock-Barriá, K., Alvarez-Garretón, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J. A., Chávez, R. O., Barriá, P., Christie, D., Rojas-Badilla, M., & Lequesne, C. (2020). Water crisis in petorca basin, Chile: The combined effects of a mega-drought and water management. *Water (Switzerland)*, 12(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w12030648>
- Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Santa-María, C. M., & López-Ballesteros, A. (2020). Assessment of

- ecological and hydro-geomorphological alterations under climate change using SWAT and IAHRIS in the Eo River in Northern Spain. *Water (Switzerland)*, 12(6), 1–31. <https://doi.org/10.3390/W12061745>
- Pizarro, R., Vera, M., Valdés, R., Helwig, B., & Olivares, C. (2014). Multi-decadal variations in annual maximum peak flows in semi-arid and temperate regions of Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 59(2), 300–311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803182>
- Rivas-Tabares, D., Tarquis, A. M., Willaarts, B., & De Miguel, Á. (2019). An accurate evaluation of water availability in sub-arid Mediterranean watersheds through SWAT: Cega-Eresma-Adaja. *Agricultural Water Management*, 212(August 2018), 211–225. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.012>
- Serur, A. B., & Sarma, A. K. (2018). Climate change impacts analysis on hydrological processes in the Weyib River basin in Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(3–4), 1301–1314. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2348-6>
- Stehr, A., Debels, P., Arumi, J. L., Alcayaga, H., & Romero, F. (2010). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: Experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1(4), 37–58.
- Stehr, A., Debels, P., Romero, F., & Alcayaga, H. (2008). Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: Evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological Sciences Journal*, 53(3), 588–601. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.3.588>
- Stolpe, N. (2006). *Descripción de los principales suelos de la VIII Región de Chile. May 2006.*
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., & Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538–2567. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>
- Verichev, K., Zamorano, M., & Carpio, M. (2020). Effects of climate change on variations in climatic zones and heating energy consumption of residential buildings in the southern Chile. *Energy and Buildings*, 215, 109874. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109874>
- Vozinaki, A.-E. K., Tapoglou, E., & Tsanis, I. K. (2018). Hydrometeorological impact of climate change in two Mediterranean basins. *International Journal of River Basin Management*, 16(2), 245–257. <https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1437742>
- Welde, K., & Gebremariam, B. (2017). Effect of land use land cover dynamics on hydrological response of watershed: Case study of Tekeze Dam watershed, northern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 5(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.03.002>

