



Universidad de Concepción

# MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA ENFRENTAR LOS CAMBIOS GLOBALES

Rebeca Martínez / Norberto Abreu / Luis Octavio Lagos / Ricardo Barra

Serie Comunicacional CRHIAM

Sistema de Gestión Sostenible Aguas Subterráneas  
Sustentabilidad Cambio Climático  
**Escasez Hídrica** Comunidades  
Huella del Agua Sequía **Agua Minería**  
Servicios Ecosistémicos **Recursos Hídricos**  
Calidad del agua **Agricultura Tecnología** Innovación  
Cambio Climático Reutilización de aguas Investigación  
**Ecosistemas Gestión Sostenible** Aguas Subterráneas

## **SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM**

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

### **Directora:**

Gladys Vidal Sáez

### **Comité editorial:**

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

### **Serie:**

Modelación hidrológica para enfrentar los cambios globales

Rebeca Martínez, Norberto Abreu,

Luis Octavio Lagos y Ricardo Barra.

Septiembre 2022

### **Agradecimientos:**

Centro de Recursos Hídricos  
para la Agricultura y la Minería  
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

[www.crhiam.cl](http://www.crhiam.cl)



Universidad de Concepción

# MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA ENFRENTAR LOS CAMBIOS GLOBALES

Rebeca Martínez / Norberto Abreu / Luis Octavio Lagos / Ricardo Barra

## SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

### PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

**Dra. Gladys Vidal**  
Directora de CRHIAM

## DATOS DE INVESTIGADORES



### **Rebeca Martínez**

Geógrafo.  
Doctor en Ciencias Ambientales c/m en  
Sistemas Acuáticos Continentales,  
Universidad de Concepción.  
Investigadora postdoctoral CRHIAM,  
Facultad de Ciencias Ambientales,  
Universidad de Concepción, Chile.



### **Norberto Abreu**

Ingeniero en Tecnologías Nucleares y Energéticas.  
Doctor en Ciencias de la Ingeniería  
c/m Ingeniería Química,  
Universidad de Concepción.  
Académico Departamento de Ingeniería Química,  
Centro para el Manejo de Residuos y Bioenergía,  
BIOREN, Universidad de la Frontera.



### **Luis Octavio Lagos**

Ingeniero Civil Agrícola.  
Doctor of Philosophy Universidad Nebraska-Lincoln,  
Estados Unidos de América.  
Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería Agrícola,  
Universidad de Concepción.  
Director Consorcio Tecnológico del Agua COTH2O.  
Investigador Asociado CRHIAM.



### **Ricardo Barra**

Bioquímico.  
Doctor en Ciencias Ambientales,  
Universidad de Concepción.  
Profesor Titular Facultad de Ciencias Ambientales,  
Universidad de Concepción.  
Director Centro EULA Chile.  
Investigador Principal CRHIAM.

## RESUMEN

El cambio de uso/cobertura del suelo y el cambio climático destacan entre los principales cambios ambientales globales. Éstos afectan aspectos claves del sistema terrestre cuyo adecuado funcionamiento sustenta importantes servicios ecosistémicos. El potencial de los enfoques de modelación integrada, para evaluar los efectos de estos cambios globales sobre la cantidad y distribución del agua disponible en las cuencas hidrográficas, lo hace imprescindible para la gestión integrada de cuencas, fundamentalmente en países de escasos recursos.

En el presente trabajo se aborda la importancia de la modelación hidrológica como herramienta para analizar y enfrentar los cambios globales que afectan los ecosistemas naturales. De este modo, se presentan diferentes modelos hidrológicos con énfasis en el modelo SWAT y sus particularidades en la modelación, las alternativas para obtener los datos necesarios para la modelación y las vías para validar los resultados obtenidos. Los detalles aquí expuestos pueden ser utilizados para la formulación y ejecución de proyectos de investigaciones ambientales empleando modelación hidrológica. Los resultados de su implementación pueden ser fundamentales para diseñar políticas públicas como parte de una estrategia eficiente que permita transitar a un desarrollo sostenible.

---

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los componentes biofísicos (atmósfera, océanos, recursos hídricos, suelos, biodiversidad, entre otros) se han visto alterados como consecuencia de la intensificación de las actividades humanas. Estos impactos sobre el sistema biofísico generan una cadena de efectos en los sistemas biológicos, como ecosistemas, comunidades con posibles efectos incluso en los sistemas socioeconómicos. Tales transformaciones presentan diversos orígenes llevando a causas e impactos variados, expresando a su vez comportamientos sinérgicos que dificultan su predicción mediante análisis no sistémicos.

La evidencia disponible, muestra que el cambio de uso de suelo y el cambio climático se encuentran entre los fenómenos con mayor incidencia global donde existe un intenso debate sobre sus consecuencias, la magnitud de sus impactos y las opciones de política pública para atender este fenómeno.

La gestión eficiente de los recursos hídricos se encuentra relacionada de una forma directa al adecuado entendimiento de los procesos de precipitación-escorrentía y sus efectos a mediano y largo plazo en el balance hídrico. A pesar de los avances científicos actuales y su extensa aplicación, todavía existe una comprensión limitada de la forma en la que las modificaciones del uso de la tierra y los cambios que ocurren en el clima impactan sobre los flujos de agua en las cuencas hidrográficas.

La demanda de modelos hidrológicos para facilitar la toma de decisiones, se ha incrementado sobre todo cuando es necesario predecir las condiciones hidrológicas futuras resultantes de cambios de uso de suelo y clima. En este contexto, los modelos hidrológicos tienen la capacidad de predecir los efectos sinérgicos y/o acumulativos del cambio climático y cambio de uso del suelo, convirtiéndose en una herramienta apropiada para la toma de decisiones anticipadas y la implementación de medidas preventivas ante escenarios de escasez hídrica (Bronstert, Niehoff, & Gerd, 2002).

En el ámbito de la gestión de cuencas, estos modelos permiten evaluar diversas prácticas de manejo considerando distintos escenarios de uso del suelo y condiciones climáticas. De la misma manera, estas herramientas de análisis tienen la capacidad de simular los efectos de la implementación de medidas de adaptación orientadas a la protección de los recursos hídricos, tales como planes ordenamiento territorial, programas de restauración ecológica y acciones de conservación.

---

## ESTUDIOS DE EFECTOS DE LOS CAMBIOS GLOBALES Y LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Antes de plantearnos la búsqueda de una solución mediante la aplicación de la tecnología para resolver un problema ambiental, debemos tener absoluta claridad sobre la problemática y sus bases científicas. Es por ello que, antes de abrir el software de modelación hidrológica con el que pretendemos buscar respuestas debemos hacernos la siguiente pregunta:

### ¿Qué son los cambios globales?

Un cambio global es el conjunto de cambios ambientales que se derivan de las actividades humanas sobre el planeta, con especial referencia a cambios en los procesos que determinan el funcionamiento del sistema Tierra (Cabreira Silva, 2019). Entre ellos se pueden listar los que se muestran en la figura 1.



Figura 1.

Cambios ambientales globales. Fuente: Adaptado de Cabrera Silva, (2019).

No obstante a eso, el clima varía siempre, a lo largo de las estaciones y los años, y estos cambios no solo ocurren por factores derivados de la acción del hombre. Es así que los inviernos cambian al otoño y después al verano y a la primavera, y aún así algunos veranos son más cálidos que otros. Desde el punto de vista del comportamiento de las precipitaciones sucede del mismo modo, algunos años llueve más que otros. Este fenómeno, independiente del actuar de los seres humanos se denomina variabilidad climática. Las causas de la variabilidad climática son naturales y entre ellas influyen: los ciclos y tendencias que dependen de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, la radiación solar que traspasa la atmósfera, la composición química de nuestra atmósfera, la circulación de los océanos y la interacción del océano-atmósfera, y la actividad de la Biósfera (Cabrera Silva, 2019).

Sin embargo, entre los años 1980 y 2000 la temperatura global de la Tierra subió 0,35°C, con una celeridad mucho más rápida que la media reportada

anteriormente. En conjunto a este incremento brusco de temperatura, en diferentes observatorios ambientales se ha observado que la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ha aumentado de unas 270 partes por millón en 1750 a 408 ppm en el año 2018, siendo la primera vez que en algunos de estos observatorios se registran concentraciones de CO<sub>2</sub> mayores a 400 ppm durante todo el año. Con estas determinaciones, y otros efectos visibles a lo largo del planeta como el derretimiento de los glaciares, el avance de las zonas áridas y desérticas entre otras observaciones, los científicos han llegado a la conclusión que nuestro planeta se está calentando a un ritmo muy rápido (Hugonnet *et al.*, 2021). Estos cambios bruscos, son causados principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y el resultado directo e indirecto de acciones de los seres humanos (figura 2).

Entre estos cambios globales, el uso del suelo y el clima son dos de los cambios ambientales globales con mayor implicancia que enfrenta la civilización actual. Estos destacan entre las actividades antrópicas que han inducido severas afectaciones en la provisión y regulación hídrica, provocando una creciente escasez del recurso (Adugna & Abegaz, 2016). Esta situación pone de manifiesto la urgente necesidad de realizar estudios que puedan determinar diferentes estrategias de manejo sustentable sobre los recursos hídricos.

### Cambios de uso/cobertura del suelo

El cambio de uso del suelo generalmente se ha considerado como un tema ambiental de carácter local. Sin embargo, cada vez hay mayores evidencias científicas que demuestran sus efectos a escala global (Foley *et al.*, 2005). La necesidad de proporcionar alimento, fibra, agua y abrigo a más de 7 mil millones de personas, ha producido profundas transformaciones en la superficie terrestre. En las últimas décadas las fronteras agrícola y ganadera, las plantaciones forestales y las áreas urbanas se han expandido acompañadas de un fuerte aumento en el consumo de energía, agua y agroquímicos, junto con pérdidas considerables de biodiversidad.

La magnitud, el alcance y la velocidad de las alteraciones antropogénicas sobre la superficie de la Tierra no tienen precedentes en la historia de la humanidad. Alrededor de la mitad de la superficie del planeta ha sido directamente transformado por la acción humana (Mooney, Vitousek, Mooney, Lubchenco, & Melillo, 1997). La mayoría de los impactos se han producido por la pérdida y/o transformación de ecosistemas boscosos y praderas naturales en terrenos habilitados para el desarrollo agrícola, ganadero, forestal y urbano/industrial (Sala *et al.*, 2000).

Tales cambios en el uso del suelo han permitido a los seres humanos apropiarse de una parte importante de los recursos del planeta, afectando la capacidad de los ecosistemas para sostener la producción de alimento e influir en aspectos ambientales relevantes, como la calidad y cantidad de agua, regulación del clima y calidad del aire (Foley *et al.*, 2005).



**Figura 2.**

Disminución del caudal en la Laguna de Aculeo, Comuna de Paine, Región Metropolitana. Fuente: Google Earth.

Debido a que el impacto de la acción del hombre en el planeta es cada vez más evidente, y todos los años los gobiernos invierten millones de dólares en investigación para entender las consecuencias de estos profundos cambios ambientales a nivel global, se han identificado los principales desafíos relacionados con la investigación en ciencias ambientales que deben ser abordados con la más alta prioridad en las próximas décadas (NRC, 2001). Es así que, con el objetivo de mejorar las condiciones de vida en el planeta, la comunidad científica es exhortada a concentrar la investigación en:

1. Los efectos provocados por la alteración de los ciclos biogeoquímicos
2. El funcionamiento de los ecosistemas y la pérdida de biodiversidad
3. La variabilidad climática
4. La predicción de cambios en la cantidad, calidad y distribución de los recursos hídricos
5. La relación entre los cambios ambientales y transmisión de enfermedades infecciosas
6. Los reales alcances de la nueva institucionalidad y política ambiental sobre el uso y conservación de los recursos naturales
7. La dinámica del uso de la tierra y sus consecuencias ambientales
8. La reutilización de materiales (NRC, 2001).

### **¿Cómo influyen estos cambios de uso/cobertura de suelo en la distribución del agua en la cuenca hidrográfica?**

Las coberturas del suelo están íntimamente relacionadas con la cuantía y distribución de los recursos hídricos, debido a que determinan el flujo de agua entre el suelo y la atmósfera, a través de los procesos de interceptación, evapotranspiración, escorrentía superficial y flujos sub-superficiales (Huber & Iroume, 2001; Putuhena & Cordery, 2000). Cambios en la cobertura vegetal, a través de diversas prácticas de uso del suelo, pueden alterar significativamente el balance de agua superficial y la partición de las precipitaciones dentro de los procesos de evaporación, escorrentía, y flujo de agua subterránea, afectando con ello la cantidad, calidad y distribución espacio-temporal del agua en el sistema fluvial (Foley *et al.*, 2005; Sahin & Hall, 1996). De esta manera, el cambio de uso del suelo es un aspecto clave en el manejo de recursos hídricos, debido a que cualquier modificación de la estructura territorial de una cuenca altera, considerablemente, el proceso de escorrentía superficial y los regímenes de caudal (Bronstert *et al.*, 2002).

## Cambio climático

El cambio climático y las alteraciones antrópicas sobre el ciclo hidrológico adquieren cada vez mayor fuerza en la comunidad científica. Muchos impactos predecibles del cambio climático se manifestarán a través de cambios en el ciclo hidrológico (UNEP, 2012, 2016). Existen evidencias sólidas de que el cambio climático está alterando los ciclos hidrológicos a nivel regional y mundial (IPCC, 2014; Kundzewicz *et al.*, 2007), y se ha predicho que los impactos serán evidentes: patrones de precipitación cambiantes, aumento en la intensidad de los eventos meteorológicos extremos, retroceso de los glaciares con la consecuente alteración en los regímenes de descargas fluviales, y sequías más intensas en regiones semiáridas (IPCC, 2014).

En efecto, el aumento de las temperaturas, incrementa la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas, contribuyendo a la emisión de vapor de agua hacia la atmósfera. Este incremento del vapor de agua hará cambiar la frecuencia y distribución de las precipitaciones afectando, al mismo tiempo, el régimen de escorrentía superficial y recarga de aguas subterráneas (Arnell & Reynard, 1996; Lahmer, Pfützner, & Becker, 2001). Estas alteraciones inducidas por la acción del hombre han aumentado la vulnerabilidad de los sistemas hídricos frente al cambio climático, entendida como la sensibilidad o susceptibilidad al daño o la falta de capacidad de adaptarse (IPCC, 2014).

Respecto al cambio climático, la construcción de escenarios regionalizados es una herramienta apropiada para obtener una representación numérica de los cambios climáticos futuros, y los efectos que éstos producirán en la hidrología.

Un escenario de cambio climático es una descripción espacial y temporal, físicamente consistente, de rangos plausibles de las condiciones climáticas futuras basada en la comprensión científica del sistema climático actual (IPCC, 2014). Una herramienta confiable para investigar la posible respuesta del clima a futuras variaciones en la composición de la atmósfera, son los llamados Modelos Climáticos Globales, por sus siglas en inglés GCM. Estos son modelos que incorporan la descripción matemática de los procesos físicos y de las interacciones fundamentales entre los componentes más importantes del sistema climático atmósfera-hidrosfera-litósfera-biosfera. Con los GCM se obtienen escenarios climáticos de gran escala (continental). Mediante el método del factor de cambio, los escenarios de gran escala se aplican a la línea base climática observada de alta resolución, generándose escenarios climáticos regionales, los cuales sirven de entrada a los modelos hidrológicos a escala de cuenca hidrográfica.

### MODELOS HIDROLÓGICOS: VENTAJAS Y LIMITACIONES

En la literatura científica se reportan diversos modelos hidrológicos los cuales, de acuerdo a su representación espacial, se pueden clasificar en modelos agregados y modelos hidrológicos semi-distribuidos o distribuidos.

#### ¿Todos los modelos hidrológicos se basan en los mismos fundamentos?

Los modelos hidrológicos agregados, tales como el Modelo "Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning" (HBV) (Bergström, 1992), Modelo "Xinanjiang" (Liu, Chen, Zhang, & Flury, 2009) y el Modelo de Equilibrio Hídrico de Australia (AWBM) (Boughton & Chiew, 2007) entre otros, asumen que la cuenca hidrológica es homogénea, tanto en lo que ocurre en la superficie, como en lo que ocurre de forma subterránea. Sin embargo, esta suposición es válida sólo para cuencas muy pequeñas (Chong-yu, 2002), y su uso en cuencas hidrográficas de mayor tamaño implicaría grandes errores en los resultados obtenidos mediante la modelación.

Estos modelos utilizan datos promediados en la cuenca para ser utilizados como parámetros de entrada, tales como la precipitación y evapotranspiración (agua evaporada por las plantas), para simular el flujo de la corriente de agua en la cuenca hidrográfica (Chong-yu, 2002).

A pesar de ser más complejos, a la hora de simular la distribución del agua en una cuenca hidrográfica, los más utilizados son los modelos hidrológicos semi-distribuidos y distribuidos. Entre ellos podemos encontrar la herramienta de evaluación del suelo y el agua (SWAT), (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005), el modelo de vegetación hidrológica distribuida del suelo (DHSVM), (Zhao *et al.*, 2009) y el modelo de capacidad de infiltración variable (VIC), (Bao *et al.*, 2012), entre otros.

La principal ventaja de este otro grupo de modelos es que consideran atributos variables para diferentes regiones del área de estudio. Estos modelos procesan datos topográficos, meteorológicos en diferentes localizaciones, del suelo y de vegetación. Esta diversidad de datos, así como las estructuras complejas de los modelos hidrológicos, generan una mayor representatividad de las posibles variaciones de las características del suelo, efectos de pendiente, entre otros (Chong-yu, 2002), conduciendo a modelaciones más realistas, fundamentalmente para cuencas de mayor escala. El uso de modelos hidrológicos semi-distribuidos permite describir la variabilidad de los componentes del balance hídrico a lo largo de la superficie de la cuenca y en el tiempo. Esto significa que los mecanismos de generación de escorrentía

pueden ser distinguidos en el modelo, y que la influencia de las condiciones superficiales del suelo sobre estos mecanismos son reflejados en la estructura del modelo y en sus parámetros (Bronstert *et al.*, 2002).

El modelo SWAT ha demostrado ser una herramienta poderosa para evaluar los impactos del cambio climático y el cambio de uso/cobertura del suelo sobre los recursos hídricos regionales, tal como ha sido reportado en investigaciones en múltiples cuencas hidrográficas de todo el mundo (Martínez-Retureta *et al.*, 2021, 2020; Petpongpan, Ekkawatpanit, Visessri, & Kositgitwong, 2021; Tang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020).

---

## MODELO HIDROLÓGICO SWAT

Desarrollado en 1993 para evaluar los efectos de planes de manejo de recursos hídricos, SWAT es un modelo continuo en el tiempo y semi-distribuido espacialmente, basado en los procesos que ocurren en cuencas hidrográficas.

Se ejecuta a una escala diaria y permite predecir el impacto del manejo del uso del suelo sobre el recurso hídrico, sedimentos y transporte de nutrientes provenientes de la agricultura en cuencas no estancadas. El modelo se encuentra basado en procesos, es computacionalmente eficiente y capaz de realizar simulaciones continuas por largos períodos de tiempo. Los principales insumos del programa incluyen parámetros climáticos, hidrológicos, temperatura y propiedades del suelo, crecimiento de plantas, información de nutrientes y pesticidas así como usos de suelo entre otros parámetros (Arnold, Kiniry, *et al.*, 2012).

Con esta información el modelo permite calcular diferentes variables del ciclo hidrológico así como el arrastre de sedimentos y el transporte de nutrientes y agroquímicos provenientes de la agricultura (figura 3).

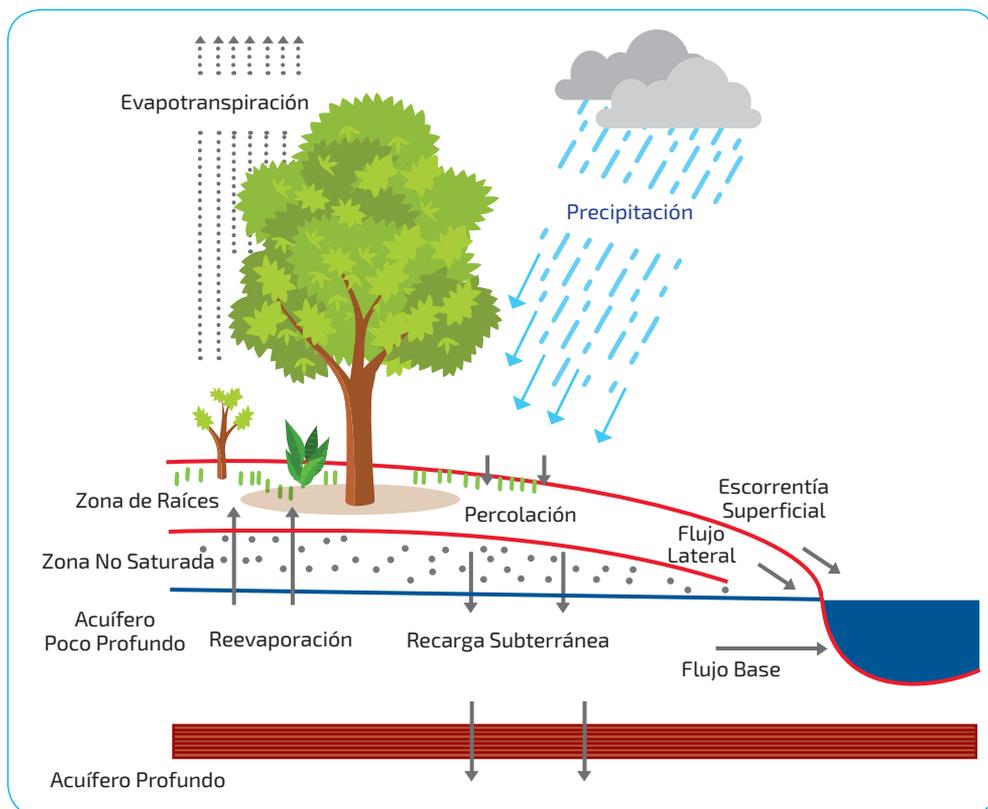


Figura 3.

Distribución de componentes del ciclo hidrológico en modelo SWAT.

Fuente: Adaptado de Arnold *et al.*, (1998); Arnold y Fohrer, (2005).

Desde el punto de vista espacial, en SWAT la cuenca es dividida en múltiples sub-cuencas las que pueden ser divididas nuevamente en unidades de respuesta hidrológica (HRUs). La ventaja de esta última subdivisión es que considera pequeñas unidades de terreno homogéneos desde el punto de vista del uso de suelo, características topográficas y tipo de suelo (figura 4).

Las HRUs son representadas como un porcentaje de las diferentes sub-cuencas y pueden ser incluso fracciones discontinuas al interior de la sub-cuenca. Alternativamente la cuenca puede ser dividida solo en sub-cuencas caracterizadas por un uso de suelo, tipo de suelo y características topográficas dominantes (Arnold, Kiniry, *et al.*, 2012).

La respuesta del modelo puede ser obtenida a una escala temporal diaria, mensual o anual según sea el requerimiento del usuario. Los procesos hidrológicos simulados incluyen escorrentía superficial, percolación, flujo lateral sub-superficial, flujo de agua subterránea y evaporación potencial (Arnold, Kiniry, et al., 2012).

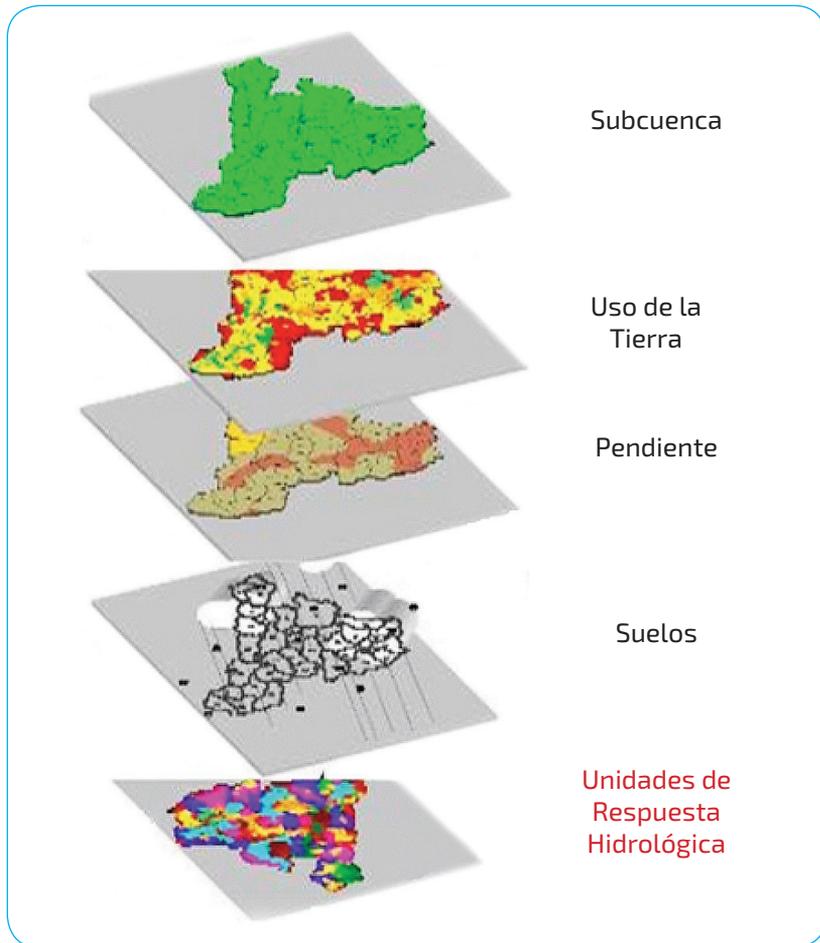


Figura 4.

Subdivisión espacial en el modelo SWAT.

Fuente: Adaptado de Arnold et al., (1998); Arnold y Fohrer, (2005).

### Datos de entrada del modelo y dónde encontrarlos

Entre los datos de entrada del SWAT, debe disponerse de un modelo digital de elevación (DEM), mapas de tipo y uso del suelo en los períodos de estudio, así como datos meteorológicos los cuales generalmente son los que presentan mayores limitaciones, pues requieren de inversiones tecnológicas de entidades de investigación regionales y nacionales para su disposición (figura 5).

En el caso chileno esta información puede ser obtenida a partir de estaciones meteorológicas operadas por la Dirección General de Aguas (DGA), Dirección Meteorológica de Chile (DMC), Red Meteorológica del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) y las redes meteorológicas de empresas privadas que pongan su información a disposición de los investigadores entre otros.

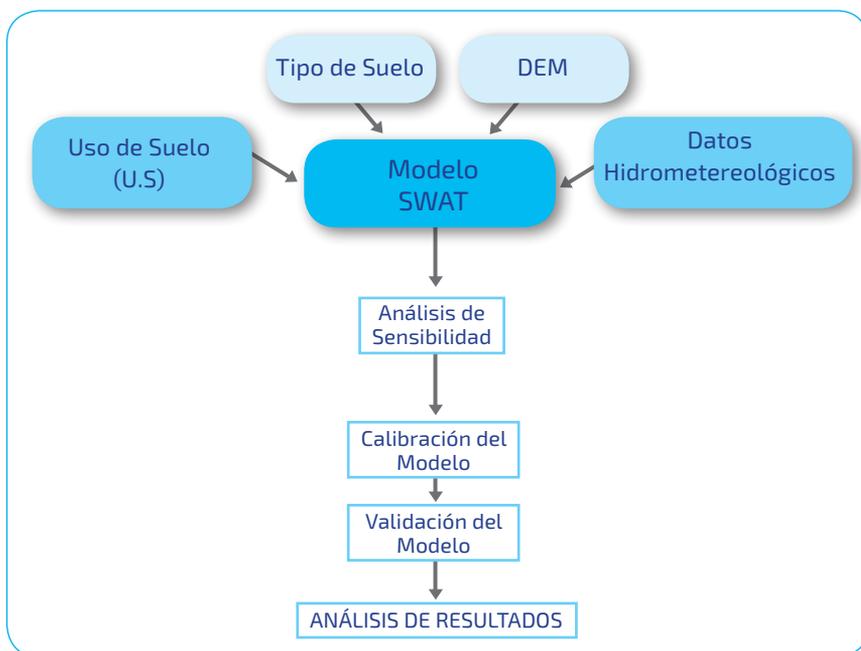


Figura 5.

Procedimientos de modelación en SWAT. Fuente: Elaboración propia

## Inicio de la modelación

Una vez identificadas las cuencas para el estudio, el investigador debe realizar una búsqueda de las estaciones meteorológicas con datos disponibles en el área de interés. En muchos casos esta es una tarea ardua ya que la calidad de esta información puede ser limitada. Es por ello que deben realizarse exámenes de consistencia para evaluar la calidad, la coherencia y la extensión de los datos para la selección de estaciones que puedan directamente contribuir al estudio (figura 6).

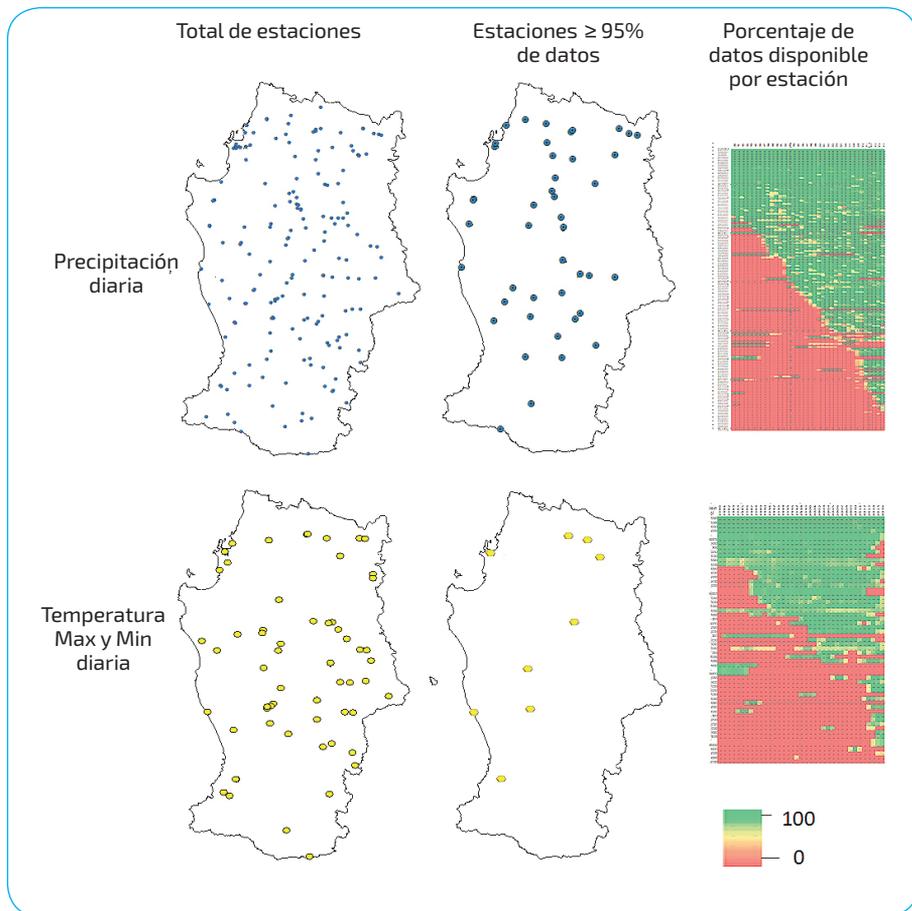


Figura 6.

Análisis de extensión de datos de estaciones meteorológicas en el Centro-Sur de Chile entre 1980 – 2016. Fuente: Elaboración propia.

El modelo requiere de un 100% de datos diarios para realizar las simulaciones. Sin embargo, según recomendaciones generales, debería disponerse de al menos el 95% de la totalidad de los datos meteorológicos en el período estudiado, donde el 5% restante pudiera obtenerse mediante métodos de interpolación con análisis pertinentes de expertos en el tema.

En caso de no disponer de datos reales tomados por estaciones meteorológicas localizadas en el área de estudio estos datos podrían obtenerse de bases globales cuyo uso se encuentre validado para la región geográfica en cuestión. En el caso de Chile entre las bases globales que se encuentran validadas para su utilización se encuentra la base de datos meteorológica *Climate Hazards Group Infra Red Precipitation with Station* (CHIRPS).

---

## CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Teniendo en cuenta que los insumos del modelo SWAT son parámetros y variables reales, tanto del terreno de la hidrología así como variables meteorológicas, debe comprobarse que los resultados también se correspondan con una representación fidedigna de las áreas estudiadas. Para ello debe disponerse de información real medida en terreno respecto a las variables de salida del programa, como caudales reales en diferentes posiciones de las cuencas, datos de concentración de nutrientes en las mismas así como otros datos que sean necesarios. El procedimiento consta de una secuencia de acciones que incluye un análisis de los parámetros más sensibles, calibración y posterior validación de los resultados del modelo para proceder finalmente al análisis de los resultados obtenidos (Figura 5)

### Pasos a seguir para realizar una modelación hidrológica con SWAT

De acuerdo a la experiencia de los investigadores que desarrollan proyectos utilizando el modelo SWAT, el primer paso en el proceso de calibración y validación es la determinación de los parámetros más sensibles para determinadas cuencas o sub-cuencas. Para ello, debe hacerse un análisis de sensibilidad para establecer los parámetros cuya variación presenta una mayor influencia sobre los de salida (resultados del modelo), esto significa determinar los procesos dominantes que afectan los componentes de interés para el investigador.

Generalmente se desarrollan dos tipos de análisis de sensibilidad: el primero consiste en un análisis local mediante la variación un parámetro a la vez, y el segundo, un análisis global permitiendo la variación de múltiples parámetros simultáneamente. Ambos análisis pueden conducir a resultados diferentes, y deben ser analizados con conocimiento del comportamiento hidrológico de la cuenca o sub-cuenca de estudio por parte del investigador.

Los dos enfoques presentan ventajas y desventajas: por un lado, al variar un solo parámetro podrían olvidarse las interacciones complejas que existen entre ellos, pero se necesita un pequeño número de simulaciones para el análisis de sensibilidad de ese parámetro. Por otro lado, el enfoque de variar múltiples parámetros es más realista, pero se necesita un gran número de simulaciones y altas capacidades computacionales para ser ejecutado.

En algunos casos el proceso de determinación de la calibración, validación y análisis de sensibilidad puede realizarse con sistemas automatizados. Esto se logra a través del acople de programas computacionales con el software principal. Tal es el caso del programa SWAT-CUP el cual realiza estos análisis de manera global o uno a la vez y arroja un análisis de incertidumbre. Además, el programa vincula los algoritmos de validación computacional con SWAT. De este modo se pueden utilizar diferentes criterios de rendimiento del modelo, como funciones objetivo para calibrar y validar los modelos SWAT.

Una vez identificados los parámetros más sensibles, se procede a la calibración y validación del modelo.

Para los propósitos de calibración del modelo se suelen utilizar series de tiempo de precipitaciones, temperaturas y caudales de al menos 5 años continuos. El uso de suelo utilizado para el periodo de calibración deberá corresponder con los años de la serie de tiempo elegida. Dependiendo de la disponibilidad de datos de precipitaciones y caudales diarios se pueden utilizar diferentes métodos más o menos precisos para la realización de calibración.

Por su parte las series de datos meteorológicos deben ser obtenidas de las estaciones más cercanas a las cuencas bajo análisis. De esta forma los datos de temperaturas y de las precipitaciones deben ser distribuidos en el espacio en correspondencia con los puntos de análisis. Muchas veces, el set de datos más importante para la calibración son datos de caudales contra los que serán comprobados los caudales simulados. De esta forma se ajustan los parámetros determinados durante el análisis de sensibilidad para brindar

un mejor ajuste entre los datos simulados y los datos observados en puntos al interior de la cuenca hidrográfica (Figura 7), para ellos suelen utilizarse métodos estadísticos que determinen la similitud entre ambos set de datos.

### ¿Por qué debemos validar una vez que hemos calibrado el modelo?

El proceso de validación es similar al proceso de calibración, con la diferencia que en éste se verifica que los ajustes de los parámetros son válidos con datos que se encuentren fuera de la serie de tiempo utilizada para calibrar (figura 7), es decir, que podemos predecir el comportamiento más allá de los años utilizados en la calibración. De este modo, se puede determinar el comportamiento de los parámetros de la cuenca hidrográfica para series de tiempo incluso para los que no tenemos datos de caudales para verificación, he aquí la importancia para predecir el comportamiento de la cuenca en el futuro.

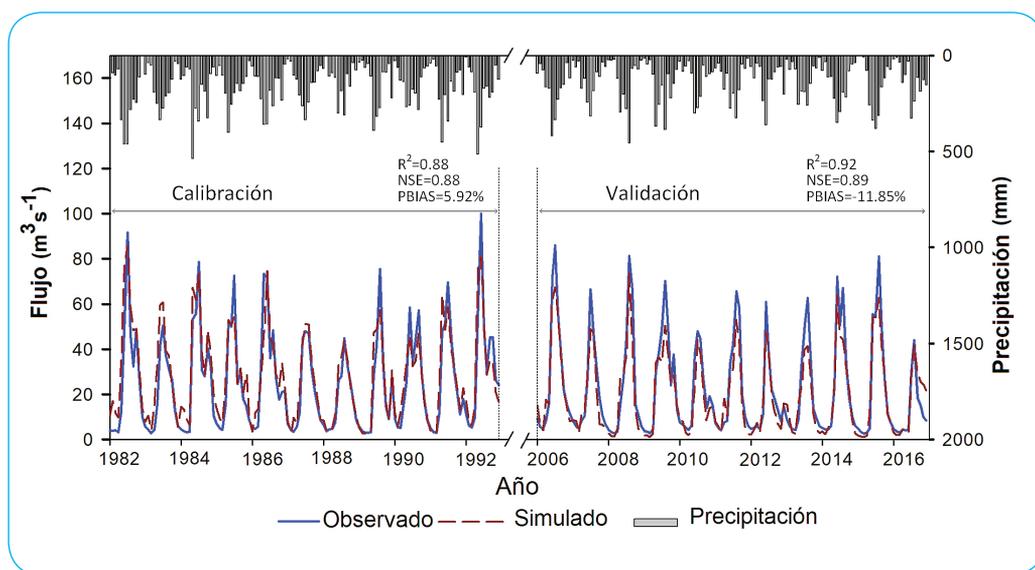


Figura 7.

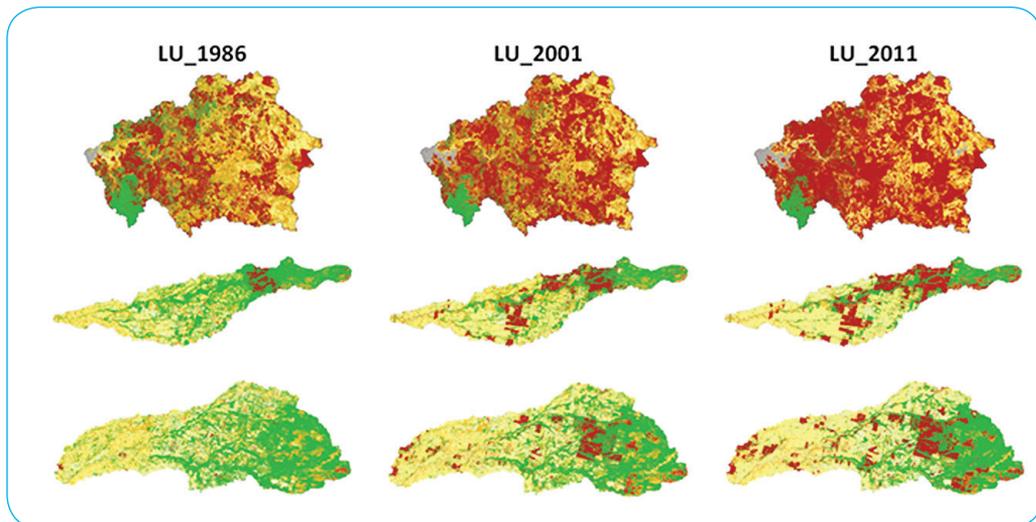
Procedimientos de calibración y validación en un caso de estudio en la zona Centro-Sur de Chile. Fuente: Adaptado de Martínez-Retureta *et al.*, (2021).

## ¿Cómo evaluar las implicancias que presentan los cambios en el uso/cobertura del suelo sobre la hidrología local?

Esta es una de las funciones fundamentales dentro del modelo SWAT y otros sistemas de modelación hidrológica.

Primero se necesita determinar los escenarios de uso/cobertura del suelo en los que se planifica realizar la investigación, en este ejemplo se utilizaron dos escenarios de uso/cobertura del suelo correspondiente a los años 1986 y 2011 para las cuencas Quino y Muco del Centro-Sur de Chile. Los escenarios se adquirió del procesamiento de imagen satelital realizada por (Heilmayr, Echeverría, Fuentes, & Lambin, 2016).

Dentro de los resultados más destacados a nivel espacial se pudo cuantificar un remplazo de bosques nativos y matorrales por plantaciones forestales y agricultura entre 1986 y 2011 (figura 8).



**Figura 8.**

Cambio del uso/cobertura del suelo en cuencas del Centro-Sur de Chile.  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez analizados los escenarios de uso/cobertura del suelo, se procesa la simulación en cuestión para determinar el efecto del cambio sobre los procesos hidrológicos de las cuencas. Uno de los resultados fundamentales suele ser la comparación de los caudales de los ríos de las cuencas hidrográficas y el efecto que provocan los cambios de uso de suelo sobre éstos, debido a la repercusión de caudal para los ecosistemas que en ellos existen. De igual forma es el parámetro que causa mayor impacto a los usuarios de los servicios ecosistémicos sustentados por la cuenca (figura 9).

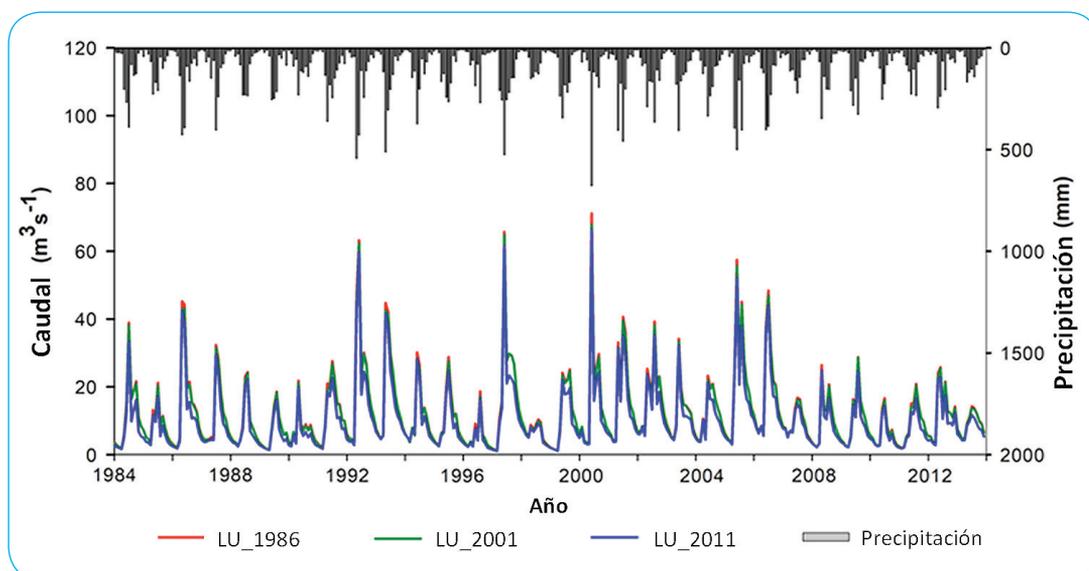


Figura 9.

Comportamiento de los caudales medios mensuales en una cuenca del Centro-Sur de Chile para diferentes usos de suelo.

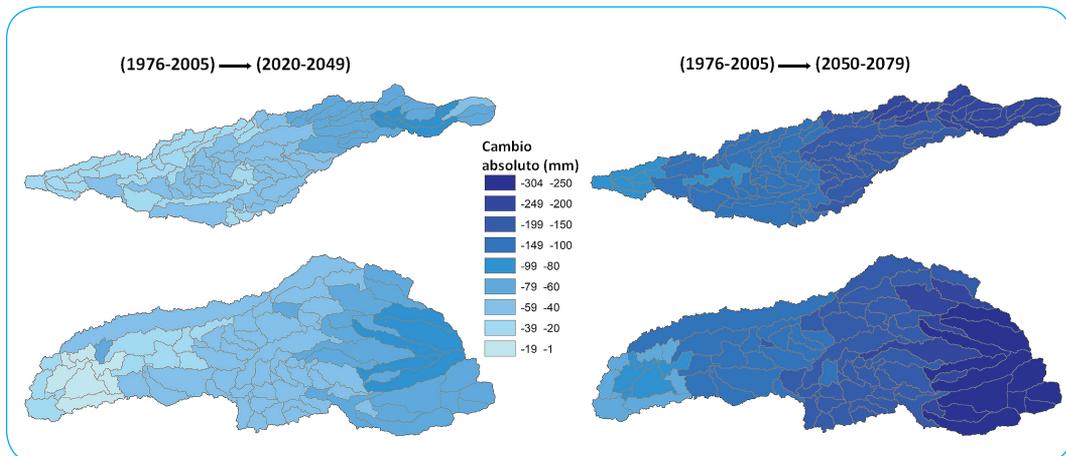
Fuente: Adaptado de Retureta *et al.*, (2020).

### Estudio del efecto del cambio climático sobre el agua con modelación hidrológica

Debemos contar inicialmente con modelos que permitan predecir las temperaturas y precipitaciones en el futuro, los que serán utilizadas como insumo de los modelos hidrológicos una vez que estos se encuentren calibrados y validados. Para las predicciones de escenarios climáticos, se requiere de una serie de modelos y métodos que conviertan los datos desde una esca-

la global a una regional. Esto debe incluir: (i) Modelos Globales Acoplados Atmósfera-Océano (AO-GCM) que describan la variabilidad climática a gran escala; y (ii) Modelación de Clima Regional (RCM), con suficiente resolución espacial para ajustar los datos a las condiciones locales del área de estudio, en particular su topografía.

Los datos deben tener una resolución temporal adecuada a los requerimientos del modelo hidrológico, mientras que su resolución espacial deberá adecuarse a las características locales. Las series de tiempo de precipitación y temperatura simuladas serán ingresadas al modelo SWAT para evaluar sus efectos sobre los procesos hidrológicos de cada cuenca. De este modo, se puede evaluar los déficits del recurso hídrico en los escenarios futuros modelados, en comparación con modelaciones que puedan ser validadas para la realidad actual (Figura 10).



**Figura 10.**

Modelación de cambios en el caudal medio anual por efecto del cambio climático en dos cuencas del Centro-Sur de Chile bajo un escenario RCP 8.5. Fuente: Adaptado de Martínez-Retureta *et al.*, (2021)

### Importancia de los resultados obtenidos para el manejo integrado de cuencas hidrográficas

El rápido avance de los cambios globales, y su efecto sobre las cuencas hidrográficas, pone de manifiesto la urgente necesidad de establecer estrategias de manejo sustentable de los recursos hídricos. Sin embargo, una gestión integrada a escala de cuenca, bajo condiciones de demanda creciente y disponibilidad cambiante, puede ser exitosa solo si los tomadores de decisiones cuentan con un soporte científico y técnico adecuado.

Estos estudios mediante modelación hidrológica, proporcionan información clave sobre las influencias relativas de cómo los procesos hidrológicos de las cuencas responden a los cambios en el uso/cobertura del suelo y el cambio climático. De este modo, se permitiría planificar intervenciones adecuadas de gestión de los recursos hídricos, en base a resultados sustentados en investigación científica. Se podrían analizar soluciones naturales previas a la implementación de tal forma que los recursos invertidos tengan los mejores resultados posibles. Pudiera, además, de esta forma responderse muchas preguntas valiosas para tomar medidas de mitigación al cambio climático: ¿qué tipo de plantaciones utilizar?, ¿cuáles son las zonas cuya rehabilitación desde el punto de vista de uso del suelo presente mayor urgencia?, ¿cuáles pudieran ser el efecto de desarrollar planes de explotación forestal de algunos terrenos?

Los modelos hidrológicos pudieran ser el mejor aliado de los tomadores de decisión e inversores en materia de sustentabilidad de los recursos hídricos, no solo a nivel local, sino a nivel internacional ya que, para poder llevar a cabo estos proyectos, se necesita de desarrollos regionales y cooperación para impulsar estrategias sólidas de gestión resilientes al clima y para contrarrestar los rápidos cambios climáticos en la cuenca.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La modelación hidrológica permite determinar los efectos que podrían acarrear los cambios climáticos, así como los cambios de uso de suelo en cuencas hidrográficas, dilucidándose la mayor o menor influencia estos estresores y la respuesta del sistema ante su acción conjunta. Ante posibles escenarios futuros que proyectan tendencias sostenidas al aumento de las plantaciones forestales, así como el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, la sensibilidad de los recursos hídricos pudiera verse agudizada.

El efecto combinado de estos factores, conduce a cambios en la partición de los recursos hídricos al interior de la cuenca. Los resultados de estas modelaciones permitirían tener datos valiosos del comportamiento de la cuenca, los que deberían ser considerados ante la toma de decisiones pertinentes al manejo integrado de cuencas hidrográficas.

El modelo SWAT, muestra una adecuada evaluación del impacto de los cambios de uso del suelo y el cambio climático, permitiendo su reproducción en otras áreas de interés con condiciones físico-geográficas similares. Sin embargo, se debe mejorar la disponibilidad y calidad de los datos hidroclimáticos en la región, para facilitar la comprensión de los cambios globales actuales y predecir los futuros.

Aun cuando existan pocos datos meteorológicos sobre el área de estudio, generalmente se encuentran soluciones tecnológicas que permiten el empleo del modelo. Sin embargo, los organismos encargados de los estudios de cambio climático recomiendan que los gobiernos regionales realicen inversiones directas en la instrumentación de cuencas hidrográficas.

De este modo, se favorecería la existencia de datos hidro-meteorológicos tanto para los insumos del programa como para las respectivas calibraciones y validaciones necesarias, y de este modo, garantizar la precisión de los resultados. Más aún, este esfuerzo debería ser impulsado por organismos regionales que ayuden a la existencia de investigaciones internacionales que aborden cuencas hidrográficas de una mayor escala, para así poder predecir el comportamiento de la región ante los cambios globales, y lo que es más importante, anticiparse a éstos y tomar medidas a tiempo en base al conocimiento científico.

## REFERENCIAS

- Adugna, A., & Abegaz, A. 2016. Effects of land use changes on the dynamics of selected soil properties in northeast Wellega, Ethiopia. *Soil*, 2(1), 63–70.
- Arnell, N. W., & Reynard, N. S. 1996. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 183(3–4), 397–424.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. 2012. SWAT 2012 Input/Output Documentation (pp. 30).
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Jha, M. K. 2012. Swat: Model Use, Calibration, and Validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1491–1508.
- Bao, Z., Zhang, J., Wang, G., Fu, G., He, R., Yan, X., Zhang, A. 2012. Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin, northern China: Climate variability or human activities? *Journal of Hydrology*, 460–461, 117–129.
- Bergström, S. 1992. The HBV model - its structure and applications. In *Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping (Vol. 4)*.
- Boughton, W., & Chiew, F. (2007). Estimating runoff in ungauged catchments from rainfall, PET and the AWBM model. *Environmental Modelling and Software*, 22(4), 476–487.
- Bronstert, A., Niehoff, D., & Gerd, B. 2002. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, 16(2), 509–529.
- Cabrera Silva, S. 2019. Cambio global: una mirada desde la biología. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 35(1), 9–14. <https://doi.org/10.4067/s0717-73482019000100009>
- Chong-yu, X. (2002). Hydrologic Model. In *Lärobok i Avrinningsmodeller (Vol. 72)*.

- Foley, J. A., Defries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Snyder, P. K. 2005. Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570–575.
- Heilmayr, R., Echeverría, C., Fuentes, R., & Lambin, E. F. 2016. A plantation-dominated forest transition in Chile. *Applied Geography*, 75, 71–82.
- Huber, A., & Iroume, A. 2001. Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of Hydrology*, 248(1–4), 78–92.
- Hugonnet, R., McNabb, R., Berthier, E., Menounos, B., Nuth, C., Girod, L., Kääb, A. 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726–731.
- Hundecha, Y., & Bardossy, A. 2004. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, 294(1–4), 281–295.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects* ( and L. L. W. I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. Mac, Ed.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kundzewicz, Z. ., Mata, L. ., Arnell, N. ., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., ... Shiklomanov, I. 2007. Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. In P. J. van der L. and C. E. H. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof (Ed.), *Current Opinion in Environmental Sustainability* (pp. 173–210). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Lahmer, W., Pfützner, B., & Becker, A. 2001. Assessment of land use and climate change impacts on the mesoscale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(7–8), 565–575.

- Liu, J., Chen, X., Zhang, J., & Flury, M. 2009. Coupling the Xinanjiang model to a kinematic flow model based on digital drainage networks for flood forecasting. *Hydrol. Process*, 23(1), 1337–1348.
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Abreu, N. J., Stehr, A., Duran-Llaser, I., Rodríguez-López, L., ... Sánchez-Pérez, J. M. 2021. Estimation of the climate change impact on the hydrological balance in basins of south-central Chile. *Water (Switzerland)*, 13(6).
- Martínez-Retureta, R., Aguayo, M., Stehr, A., Sauvage, S., Echeverría, C., & Sánchez-Pérez, J. M. 2020. Effect of land use/cover change on the hydrological response of a southern center basin of Chile. *Water (Switzerland)*, 12(1), 1–21.
- Mooney, H. A., Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. 1997. Human Domination of Earth ' s Ecosystems. (July). <https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Temple, TX: Soil and Water Research Laboratory.
- NRC. 2001. Grand Challenges in Environmental Sciences. Committee on Grand Challenges in Environmental Sciences. National Research Council, National Academy Press, Washington, DC, USA, 106 pp.
- Petpongpan, C., Ekkawatpanit, C., Visessri, S., & Kositgittiwong, D. 2021. Projection of hydro-climatic extreme events under climate change in yom and nan river basins, Thailand. *Water (Switzerland)*, 13(5), 1–20.
- Putuhena, W. M., & Cordery, I. 2000. Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to *Pinus radiata*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(1), 59–72.
- Sahin, V., & Hall, M. J. 1996. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, 178(1–4), 293–309.
- Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., ... Wall, D. H. 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 287(5459), 1770–1774.

- Tang, X., Zhang, J., Wang, G., Yang, Q., Yang, Y., Guan, T., ... Bao, Z. 2019. Evaluating Suitability of Multiple Precipitation Products for the Lancang River Basin. *Chinese Geographical Science*, 29(1), 37–57.
- UNEP. 2012. GEO 5 - Perspectivas del Medio Ambiente Mundial: Medio Ambiente para el Futuro que Queremos. In United Nations Environmental Program. Disponible en: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=546&menu=35>
- UNEP. 2016. GEO-6 Regional Assessment for Latin America and the Caribbean. Nairobi, Kenya.
- Yang, T. C., Yu, P. S., & Chen, C. C. 2005. Long-term runoff forecasting by combining hydrological models and meteorological records. *Hydrological Processes*, 19(10), 1967–1981.
- Zhang, Y., Tang, C., Ye, A., Zheng, T., Nie, X., Tu, A., Zhang, S. 2020. Impacts of climate and land-use change on blue and green water: A case study of the upper ganjiang river basin, china. *Water (Switzerland)*, 12(10), 1–18.
- Zhao, Q., Liu, Z., Ye, B., Qin, Y., Wei, Z., & Fang, S. 2009. A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(10), 1897–1906.



Universidad de Concepción

# MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA ENFRENTAR LOS CAMBIOS GLOBALES

Rebeca Martínez / Norberto Abreu / Luis Octavio Lagos / Ricardo Barra

Serie Comunicacional CRHIAM

