

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

EFFECTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA HIDROLOGÍA DE UNA CUENCA DEL CENTRO SUR DE CHILE

CAMILA ORELLANA ¹
HERNÁN ALCAYAGA²
ROSSANA ESCANILLA³
MAURICIO AGUAYO ⁴
MIGUEL AGUAYO ⁵

RESUMEN

El impacto de las actividades antropogénicas en las principales cuencas hidrográficas que provocan alteraciones en el medio ambiente ha motivado este estudio en la cuenca hidrográfica del río Andalién. La comprensión de la contribución de los cambios en el uso a la hidrología de las cuencas hidrográficas es vital para la planificación de los recursos hídricos, la utilización de los recursos y la gestión del agua. Debido a lo anterior, el presente estudio evalúa los efectos del cambio de uso de suelo en tres escenarios futuros (2025, 2035 y 2045) sobre el balance hídrico de la cuenca mediante el modelo hidrológico Soil & Water Assessment Tool (SWAT). Los resultados indican que el rendimiento del modelo SWAT es bueno en la cuenca de estudio, con una eficiencia mensual en NS de un 0.91 y 0.73, R^2 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. El modelo de CA-Markov proyecta que en los tres escenarios futuros se contemplará un aumento de en bosque nativo – mixto y en matorrales y praderas. Mientras que las clases de cobertura de plantación forestal joven y agricultura presentaran una disminución en sus áreas. En el balance hídrico, a nivel de cuenca, en una escala temporal anual se observa un incremento medio en percolación, flujo subsuperficial y aguas subterráneas, mientras que se presenta una reducción en la evapotranspiración y escorrentía superficial.

1 Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Diego Portales- email: camila.orellanap@mail.udp.cl

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

3 Ingeniera Civil, Eridanus- 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

El cambio de uso de suelo es una de las representaciones más claras del fenómeno de cambio ambiental global que se produce a diversas escalas espaciales y temporales, particularmente ha sido responsable de la variación en la respuesta hidrológica en cuencas hidrográficas, modificando el régimen de caudales y acelerando la erosión de suelos (Adhikari et al., 2020; Aguayo et al., 2009). Las actividades antrópicas que provocan cambios en los usos de suelo y las dinámicas naturales están completamente relacionadas, algunas de estas son la deforestación e incendios por expansión agrícola, la extracción de madera y construcción de infraestructuras (Lambin et al., 2003). Las motivaciones de estas acciones pueden ser resumidas como la adquisición de recursos naturales para las necesidades humanas inmediatas, cuya consecuencia es la degradación de los ecosistemas (Foley et al., 2005).

A nivel global se han realizado diversas investigaciones sobre el impacto del cambio de uso de suelo en cuencas hidrográficas (Li et al., 2018; Öztürk et al., 2013; Tong et al., 2012; Welde & Gebremariam, 2017; Yan et al., 2019) obteniendo diferentes resultados según las condiciones climáticas y del territorio donde se encuentran las respectivas áreas de estudio.

Así es como los modelos hidrológicos pasan a ser una herramienta relevante para predecir las consecuencias del cambio de uso de suelos en el ciclo hidrológico. Los distintos modelos disponibles, permiten simular la distribución espacial de cada uno de los componentes del balance hídrico de una cuenca, dependiendo del nivel de información que se tenga (Blöschl & Sivapalan, 1995). En este estudio se emplea el modelo Soil & Water Assessment Tool (SWAT), el cual ha sido aplicado globalmente para evaluar los impactos del cambio de uso de suelo debido a sus múltiples funciones que permiten obtener información de cada uno de los componentes del balance hídrico ante los escenarios definidos, a partir de la optimización de solo unos pocos parámetros en comparación a otros modelos (Aghsaei et al., 2020; Wang et al., 2008).

A nivel regional, en el centro-sur de Chile, las zonas rurales costeras manifiestan un alto deterioro ambiental y económico, es decir, pasan por un proceso de degradación de recursos naturales, provenientes de las actividades productivas (Castillo, 2008). A esto se suman los problemas referidos a los recursos hídricos actuales y futuros, tales como el aumento de la frecuencia en procesos de inundaciones, degradación de cauces, entre otros (Castillo, 2008; Rojas et al., 2019). Estos efectos ambientales se traducen en costos millonarios para el Estado y un deterioro de la calidad y nivel de vida de la población debido a destrucciones de viviendas, caminos y puentes (Rojas et al., 2014). Dado a lo anterior, se propone como objetivo principal de este estudio analizar los efectos sobre los procesos hidrológicos en la cuenca del río Andalién, debido a los cambios de usos de suelos que se pueden surgir en escenarios futuros. Para cumplir con este objetivo, se realiza un análisis de imágenes satelitales generando mapas de coberturas de suelo para estudiar la dinámica de su uso. Luego se calibra y valida un modelo hidrológico para simular caudales y componentes hidrológicos, posteriormente se definen los escenarios futuros para analizar las probabilidades de transición. Finalmente, se evalúan los impactos del cambio de uso de suelo sobre el balance hídrico de la cuenca del río Andalién mediante la simulación de estos escenarios futuros, usando el modelo hidrológico calibrado y validado.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca de estudio corresponde a la del río Andalien ubicada en la Cordillera de la Costa de la Región del Biobío, localizada entre los 36°42' S y 36°56' S y los 72°36' y 73°04' O. La cuenca posee una superficie de 780 km² y tiene un régimen exclusivamente pluvial con un clima mediterráneo con influencia oceánica (Csb), según la clasificación de Köppen. Se caracteriza por tener temperaturas medias de 13°C y presenta cuatro meses fríos (mayo-agosto), característicos del invierno austral, donde se concentra cerca del 70% de las precipitaciones anuales, las que alcanzan montos entre los 1200 y 1400 mm. El caudal promedio anual es de 14 (m³/s) en la estación río Andalién camino a Penco llegando a 565 (m³/s) durante una crecida de T=50 años y un tiempo de concentración de 10 a 12 horas. Durante crecidas, el principal afluente del río Andalién en la parte inferior corresponde a la cuenca del Estero Nonguén, aportando un 13% de su caudal (ARRAU INGENIERÍA E.I.R.L, 2012)

Según (CONAF, n.d.) los usos de suelo más influyentes en la cuenca corresponden a las plantaciones forestales con una ocupación del 46% de la superficie total, seguido del bosque nativo y mixto que cubre un 11.8% (DGA, 2004)(Gysling et al., 2019). La cuenca del río Andalién abarca el 23% de la provincia de Concepción incluyendo las comunas de Penco, Florida, Tomé y Concepción (DGA, 2004), concentrándose para el año 2017 un total de 223.574 habitantes (Instituto Nacional de & Concepción, 2019).

2.2. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES Y CLASIFICACIÓN DE USOS DE SUELO

Para el análisis de la dinámica de usos de suelo en la cuenca se utilizan imágenes Landsat de 30 m de resolución. Todas las imágenes fueron descargadas de la base de datos del United States Geological Survey (USGS) (U.S. Geological Survey, 2019). Para este estudio se usa el método de clasificación supervisado interactivo, herramienta disponible en el software ArcGIS en su versión 10.4. (Lauricella et al., 2017; Mamun et al., 2013). Este procedimiento se realiza mediante la creación de polígonos de entrenamiento que fueron extraídos de dos clasificaciones de suelo precedentes y publicadas por CONAF para los años 2008 y 2015 (CONAF, n.d.). A la información obtenida a través de las imágenes satelitales, se complementa con los datos proporcionados por los mapas desarrollados por Hansen (Hansen, 2013). Usando esta metodología se clasifica la cobertura de suelo en nueve categorías: Bosque nativo y mixto (FRST), Plantación forestal adulta (FRSE), Plantación forestal joven (RNGB), Agricultura (AGRL), Zona industrial y urbana (UIDU), Matorrales y praderas (RNGE), Suelo desprovisto de vegetación (BARR), Humedales (WETN) y Cuerpos de aguas superficiales (WATR).

2.3. MODELO HIDROLÓGICO

En este estudio se emplea el modelo Soil & Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1998), el cual ha sido aplicado globalmente para evaluar los impactos del cambio de uso de suelo debido a sus múltiples funciones que permiten obtener información de cada uno de los componentes del balance hídrico. El modelo SWAT discretiza una cuenca hidrográfica en múltiples subcuencas que

a su vez se distribuyen en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs). Las HRUs representan áreas agrupadas con un tipo de suelo, uso de suelo y clase de pendientes iguales dentro de una subcuenca (Dibaba et al., 2020). El ciclo hidrológico simulado por SWAT se basa en un balance hidrológico que considera los diferentes procesos en cada HRU. Las componentes del balance hidrológico considerados a nivel de cuenca y subcuenca son: evapotranspiración (ET), percolación (PERC), escorrentía superficial (SURQ), escorrentía subsuperficial lateral (LAT), aguas subterráneas (GW) y el rendimiento hídrico (WYLD).

Los datos meteorológicos de entrada al modelo corresponden a las precipitaciones y temperaturas (máximas y mínimas) a escala diaria. Este trabajo comprende una modelación del período entre el año 2003 y 2016, los datos provinieron de la estación meteorológica llamada Río Andalien camino a Penco, controlada por la Dirección General de Aguas (DGA). Para la topografía de la zona se utiliza un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 30 x 30 m, obtenido desde la base de datos de Alaska Satellite Facility (ASF) (ASF, n.d.), este DEM permite la delimitación de la cuenca y la extracción de la red hídrica. Además, el modelo hidrológico requiere información sobre los tipos de suelo y uso de suelo. La información de los tipos de suelo es obtenida desde el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, n.d.) y la información sobre cobertura del suelo proviene de la clasificación generadas a partir de imágenes satelitales desde para el periodo 2003 – 2016 como se menciona en la sección 2.2.

2.4 CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO

Para evaluar el rendimiento del modelo hidrológico en SWAT, primero se realiza una calibración de los parámetros que representan los diferentes procesos hidrológicos, comparando los resultados del modelo con los caudales observados en una escala mensual.

Durante la modelación hidrológico se emplea un periodo inicial de calentamiento (*warm up*) de ocho años, para asegurar que se elimina cualquier sesgo inicial previo al período de calibración y validación. El periodo de simulación del modelo está comprendido entre el 1 de enero del 1994 y el 31 de diciembre del 2016, donde el periodo de calibración va desde el 1 de enero del 2003 al 31 de diciembre del 2007 y el periodo de validación comienza el 1 de enero del 2008 y termina el 31 de diciembre del 2016.

Para evaluar el rendimiento del modelo mediante estadísticas cuantitativas es necesario considerar al menos el coeficiente de determinación (R^2), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS), adicionalmente se incorpora la eficiencia de Kling-Gupta (KGE) corresponde a una descomposición de la función NSE (Kling et al., 2012). Para clasificar el rendimiento del modelo SWAT aplicado en la cuenca del río Andalién se utiliza el criterio propuesto por Kouchi (Kouchi et al., 2017).

2.5 ESCENARIOS FUTUROS DE USOS DE SUELO

Durante la última década varios SIG como IDRISI Selva (Eastman, 2012) han incorporado algoritmos que combinan el análisis de cadenas de Markov (Markov) y autómatas celulares (CA) en un modelo para efectuar proyecciones de uso de suelo (Kumar et al., 2014). En el presente

estudio por medio del modelo CA-Markov se predice la tendencia de la dinámica de uso de suelo usando una la matriz de probabilidades de transición, que se deduce a partir de la ecuación de Bayes (Kumar et al., 2014).

Para las proyecciones de uso de suelo en la cuenca del río Andalien, se utilizan tres clasificaciones de uso de suelo para los años 2008, 2015 y 2020, obtenidas mediante la clasificación realizada por la CONAF y para el año 2020 se utiliza la clasificación supervisada interactiva de imágenes satelitales, tal como se expuso anteriormente. Las clasificaciones de uso de suelo del 2008 y 2015 se utilizan como usos de suelo de referencia (definiendo el año 2015 como año base), para predecir los futuros mapas de uso de suelo para los años 2025, 2035 y 2045.

La clasificación del uso de suelo del año 2020 (uso de suelo observado) se utiliza para evaluar el rendimiento del modelo CA-Markov, al ser comparada con el uso de suelo proyectado para el mismo año 2020. El rendimiento modelo CA-Markov en la proyección de los mapas de uso de suelo se evalúa a partir del indicador estadístico Kappa, y será catalogado según las condiciones de Landis (Landis & Koch, 1977), quien presenta una metodología estadística general para el análisis de datos categóricos multivariantes procedentes de estudios de fiabilidad de observadores. Finalmente, para evaluar de los efectos del cambio de uso de suelo en el balance hídrico se realizan simulaciones hidrológicas con el modelo SWAT calibrado, para los tres escenarios futuros de uso de suelo (2025, 2035 y 2045). Para los tres casos, las series de precipitación y temperaturas máximas y mínimas son las del periodo 1994 – 2015. De esta manera los resultados que se obtengan de los componentes del balance hidrológico se deberán exclusivamente al efecto de las modificaciones de cobertura del suelo que fueron proyectadas. Las componentes del balance hidrológico considerados son: evapotranspiración (ET), percolación (PERC), escorrentía superficial (SURQ), escorrentía subsuperficial lateral (LAT), aguas subterráneas (GW) y el rendimiento hídrico (WYLD).

3 RESULTADOS

3.1 ANÁLISIS DE DEL CAMBIO DE USO DE SUELO DE LOS AÑOS BASE 2008 Y 2015

A partir de las clasificaciones de uso de suelo para los años 2008 y 2015 (Figura 1), se observa un cambio porcentual promedio del 3.6% (variación porcentual entre cifra del año 2015 y el año 2008 de cada uso) en las clases de cobertura más representativas de la cuenca (Bosque nativo-mixto, Plantación forestal adulta, Plantación forestal joven, Agricultura y Matorrales y praderas) con un máximo del 7.1% para la clase de matorrales y praderas (RNGE). Como se muestra en la Figura 2, para ambos años las coberturas de uso de suelo que destacan, en términos de superficie ocupada de la cuenca, corresponden a plantaciones forestales joven y adulta (FRSE y RNGB), bosque nativo mixto (FRST) y agricultura (AGRL). En el año 2008 la plantación forestal adulta ocupaba un 46.1% de la superficie de la cuenca, lo sigue la clase bosque nativo y mixto con un 16.5% y por último la agricultura con un 16.0%. En el año 2015 se observa una disminución de la plantación forestal adulta en un 3.3%, que junto a la plantación forestal joven suman una ocupación total de la cuenca de 56.2%, mostrando un evidente dominio de las plantaciones forestales. Por otro lado, la agricultura reduce su área en un 5.9%, mientras que matorrales y praderas aumenta significativamente de un 6.8% en 2008 a un 13.9% en 2015.

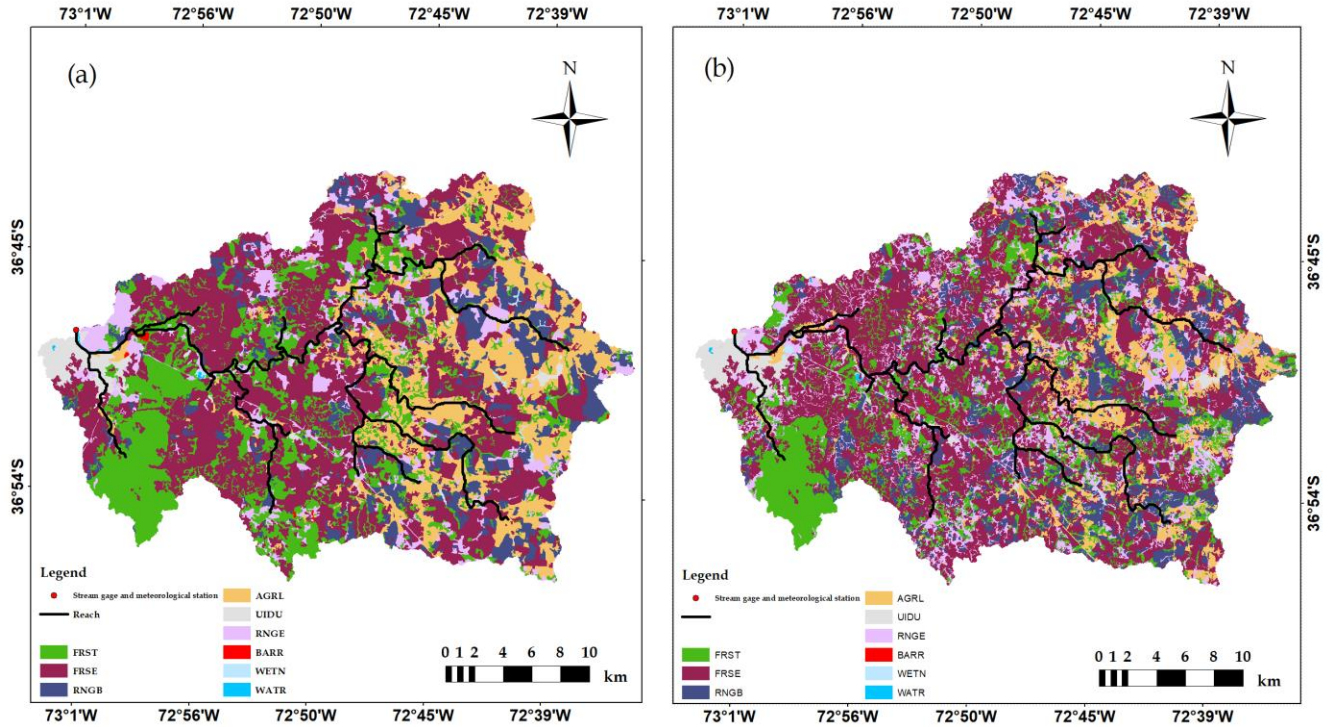


Figura 1. (a) Mapa de uso de suelo año 2008 y (b) Mapa de uso de suelo año 2015

Donde FRST: Bosque nativo-mixto, FRSE: Plantación forestal adulta, RNGB: Plantación forestal joven, AGRL: Agricultura, UIDU: Zona industrial y urbana, RNGE: Matorrales y praderas, BARR: Suelo desprovisto de vegetación, WETN: Humedales y WATR: Cuerpos de aguas superficiales.

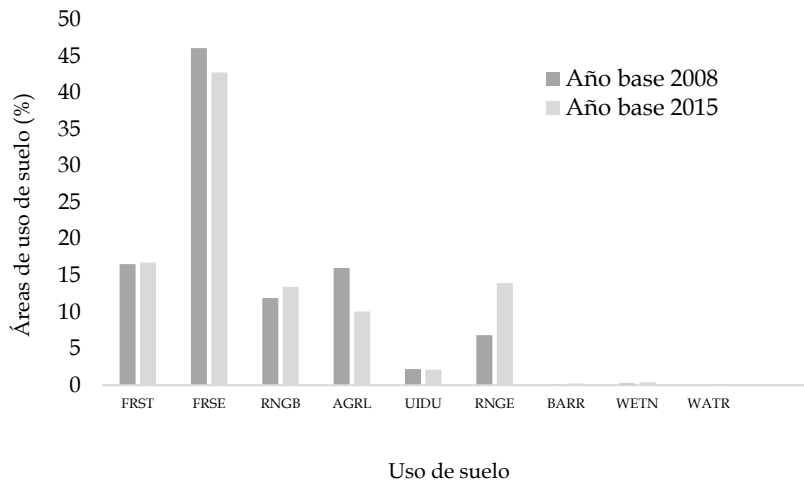


Figura 2. Áreas de uso de suelo de los años base

3.2 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la evaluación del modelo mediante los indicadores de ajuste para las fases de calibración y validación, y el rendimiento del modelo según el criterio de Moriasi (D. N. Moriasi et al., 2007).

Tabla 1. Rendimiento del modelo hidrológico

Índice estadístico	Calibración (2003 - 2007)		Validación (2008 - 2016)	
R ²	0.91	MB	0.75	B
NSE	0.91	MB	0.73	B
PBIAS	-1.18	MB	-5.67	MB
KGE	0.94	MB	0.85	B

Figura 3. (a) Resultados del proceso de calibración y validación del modelo hidrológico (2003-2016), para la estación río Andalien camino a Penco y (b) gráfico de dispersión para caudales observados y simulados.

3.3 ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO

PROYECCIONES DEL CAMBIO DE USO DE SUELO

La matriz de probabilidad de transición, obtenida a partir de los mapas de uso de suelo de referencia (años 2008 y 2015), se presenta en la Tabla 2. El color rojo representa una mayor probabilidad de transición y el color verde una menor probabilidad, para la ventana temporal de diez años, entre 2015 y 2025. El cambio más probable de cobertura corresponde a la transición desde las clases bosque nativo y mixto (FRST) a plantación forestal adulta (FRSE). Adicionalmente, la plantación forestal joven (RNGB) en el año 2015 pasa al estado de plantación forestal adulta para 2025. Lo anterior ocurre con una probabilidad de 40.9% y 51.2% respectivamente. Finalmente, existe una probabilidad del 30.4% que la clase de uso de suelo desprovisto de vegetación se convierta en matorrales y praderas.

Tabla 2. Matriz de probabilidad de transición 2015 - 2025

		Probabilidad de cambio en el año 2025 a:								
		FRST	FRSE	RNGB	AGRL	UIDU	RNGE	BARR	WETN	WATR
Cambiando en el año 2015 de:	FRST	0.292	0.409	0.098	0.041	0.002	0.155	0.002	0.002	0.001
	FRSE	0.163	0.428	0.190	0.051	0.006	0.154	0.004	0.003	0.002
	RNGB	0.130	0.512	0.158	0.060	0.002	0.131	0.004	0.004	0.001
	AGRL	0.130	0.293	0.096	0.247	0.007	0.214	0.001	0.012	0.002
	UIDU	0.053	0.133	0.020	0.063	0.617	0.082	0.009	0.002	0.023
	RNGE	0.223	0.365	0.098	0.074	0.015	0.213	0.002	0.009	0.002
	BARR	0.150	0.283	0.081	0.121	0.019	0.304	0.001	0.026	0.014
	WETN	0.123	0.317	0.081	0.140	0.010	0.267	0.002	0.039	0.021
	WATR	0.031	0.204	0.024	0.036	0.336	0.183	0.002	0.008	0.177

El modelo de CA-Markov proyecta los cambios de uso de suelo que se muestran en la Tabla 3, en la cual se proyecta que al año 2025, se tendrá un aumento de 10.6 km² para bosque nativo-mixto y de 18.6 km² para matorrales y praderas. Mientras que en las clases de cobertura plantación forestal adulta y agricultura se presentaran una disminución de 16.4 km² y 20.0 km² respectivamente. En los siguientes periodos estos cambios disminuyen llegando a una estabilización del uso de suelo para un horizonte de 30 años a partir del año base 2015. Finalmente, se consolida esta estabilización con un incremento en el período 2035 - 2045 de 1.1 km² en la clase de bosque nativo y mixto, mientras que para las clases de agricultura y plantación forestal joven se presenta una reducción de 1 km² y 0.6 km² respectivamente.

Tabla 3. Predicciones del uso de suelo para los años 2025, 2035 y 2045

Clases de uso de suelo	2008 (km ²)	2015 (km ²)	Escenarios futuros		
			2025 (km ²)	2035 (km ²)	2045 (km ²)
FRST	124.3	126.2	136.8	141.0	142.1
FRSE	346.3	321.4	305.0	305.9	306.0
RNGB	89.7	101.2	107.7	105.4	104.8
AGRL	120.5	75.7	55.7	53.1	52.1
UIDU	16.5	15.9	15.0	15.7	16.4
RNGE	51.4	105.1	123.7	123.3	122.7
BARR	0.9	1.9	2.2	2.1	2.1
WETN	1.7	3.0	3.6	3.5	3.4
WATR	0.6	1.2	1.7	1.8	1.7

El estado del uso de suelo de la cuenca del río Andalien desde el año 2025 al año 2045 se muestra espacialmente en la Figura 3. En términos generales, se puede observar como la agricultura va perdiendo superficie en la zona alta de la cuenca siendo reemplazada principalmente por plantación forestal joven y matorrales y praderas. Además, se contempla una mayor estabilización del uso de suelo en los años 2035 y 2045 lo que coincide con los resultados cuantitativos (ver Tabla 3).

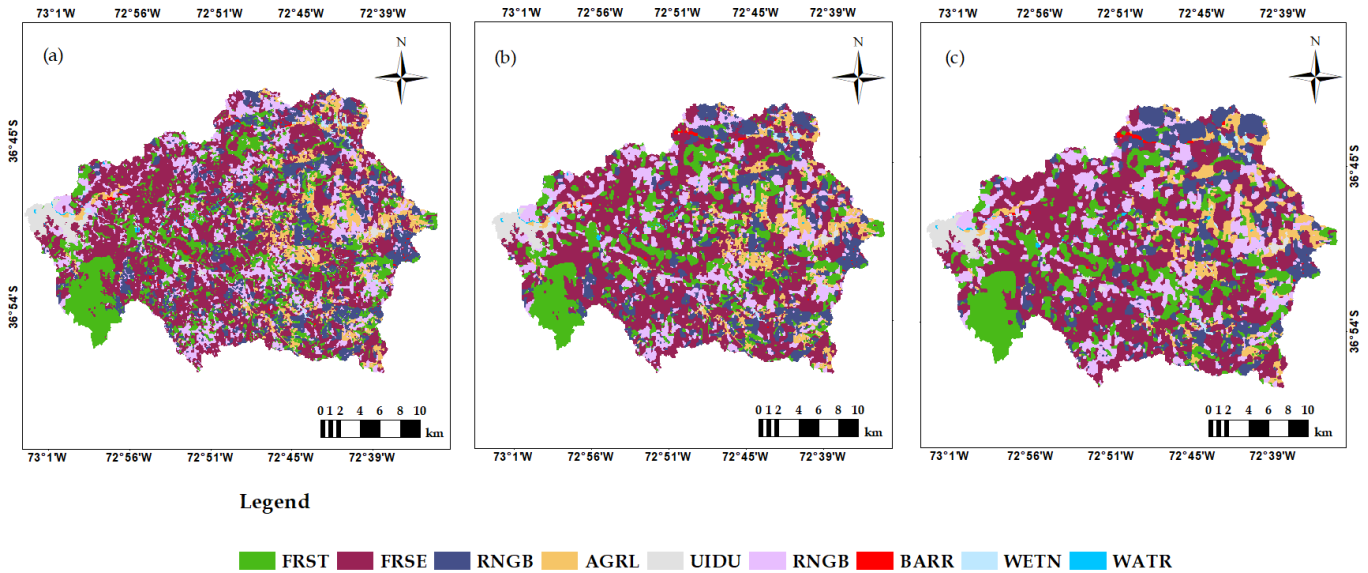


Figura 3. Proyección mapa usos de suelo año 2025 (a), proyección mapa usos de suelo año 2035 (b) y proyección mapa usos de suelo año 2045 (c)

Donde FRST: Bosque nativo-mixto, FRSE: Plantación forestal adulta, RNGB: Plantación forestal joven, AGRL: Agricultura, UIDU: Zona industrial y urbana, RNGE: Matorrales y praderas, BARR: Suelo desprovisto de vegetación, WETN: Humedales y WATR: Cuerpos de aguas superficiales.

3.4 RENDIMIENTO DEL MODELO DE CA-MARKOV

El rendimiento del modelo CA-Markov fue evaluado comparando el uso suelo para el año 2020 proyectado con la clasificación del uso de suelo para ese mismo año, realizado mediante una imagen satelital Landsat. Para esta evaluación se utilizó la herramienta *Validate* que se encuentra en el software IDRISI Selva, obteniendo un coeficiente kappa, $K_{no} = 0.67$. Por lo tanto, las proyecciones realizadas mediante CA-Markov tienen un buen grado de precisión según el criterio de Landis (Landis & Koch, 1977).

3.5 RESPUESTAS HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA Y SUBCUENCAS ANTE LAS PROYECCIONES DEL CAMBIO DE USO DE SUELO

IMPACTOS DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN EL BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA

Las respuestas hidrológicas de la cuenca del río Andalién ante los cambios de uso de suelo fueron evaluadas usando tres escenarios proyectados y comparándolo con el del año base 2015.

Los resultados (ver Tabla 4) muestran que para los escenarios futuros de cambios de uso de suelo se experimenta principalmente un aumento promedio de la percolación en 27.4 mm y de 12.7 mm en aguas subterráneas, mientras que el flujo lateral disminuye en 14.1 mm.

Tabla 4. Componentes del balance hídrico anual debido al cambio de uso de suelo.

Usos de suelo	Evapotranspiración (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía superficial (mm)	Escurrentía subsuperficial (mm)	Aguas subterráneas (mm)	Rendimiento de agua (mm)	Caudal (m³)
2015	440.6	58.8	285.4	118.1	27.3	463.0	10.0
2025	435.8	74.9	277.5	114.0	34.8	467.3	10.8
2035	442.2	101.5	276.1	83.8	47.1	462.0	11.0
2045	430.7	82.4	274.9	114.2	38.2	472.2	11.0

ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO EN SUBCUENCAS REPRESENTATIVAS

Los resultados anteriores corresponden al balance global de la cuenca del río Andalién y estos pueden estar enmascarando algunos efectos locales en subcuencas donde domina uno u otro uso de suelo. Con este fin, se ha realizado un análisis más detallado para cuatro subcuencas. Estas han sido seleccionadas considerando un mayor cambio de cobertura para el periodo de tiempo comprendido entre los años 2015 y 2045 y en la que el uso de suelo predominante sea Plantación forestal adulta, Agricultura, Bosque nativo-mixto y Plantación forestal joven. Estas subcuencas corresponden a las presentadas en la Figura 4, junto con su identificador numérico.

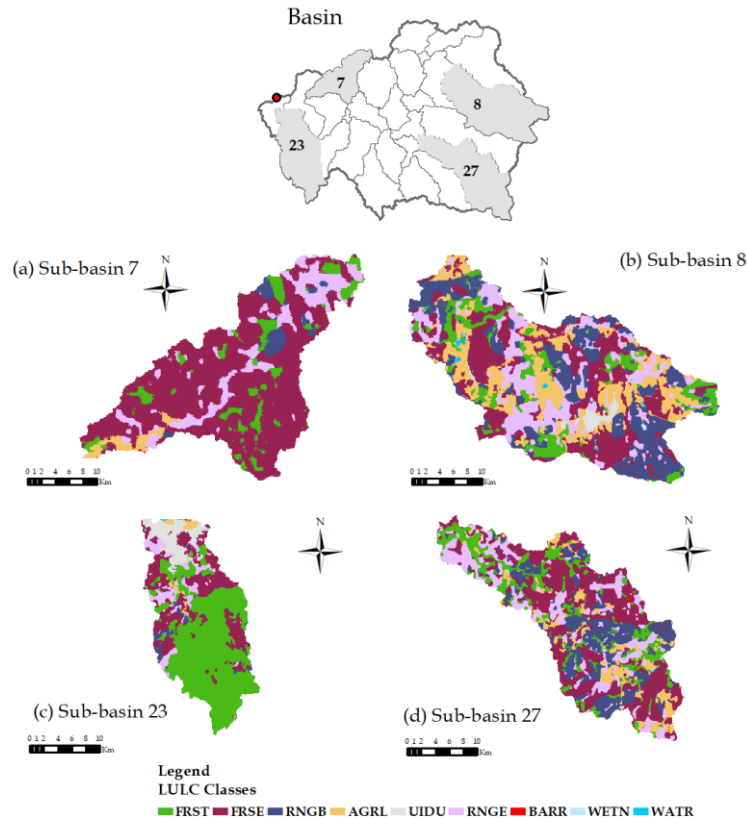


Figura 4. Ubicación subcuencas representativas en la cuenca del río Andalién. (a) Subcuenca 7 – FRSE, (b) Subcuenca 8 – AGRL, (c) Subcuenca 23 – FRST y (d) Subcuenca 27 – RNGB

Donde FRST: Bosque nativo-mixto, FRSE: Plantación forestal adulta, RNGB: Plantación forestal joven, AGRL: Agricultura, UIDU: Zona industrial y urbana, RNGE: Matorrales y praderas, BARR: Suelo desprovisto de vegetación, WETN: Humedales y WATR: Cuerpos de aguas superficiales.

En la Figura 5, se muestra el cambio porcentual anual de cada uno de los componentes del balance hídrico para los escenarios futuros con respecto al año base 2015 para cada una de las subcuencas representativas. En el gráfico de evapotranspiración se observa que el mayor aumento se produce en la subcuenca 27 (dominante Plantación forestal joven) con un 53.7% para el año 2045, además de una reducción del 21.3% en la subcuenca 8 (dominante Agricultura) para el año 2025. Dentro de los mayores cambios anuales, destaca la percolación en la subcuenca 8 (dominante Agricultura) con un aumento del 106.0% en el año 2035. Finalmente, se distingue la disminución del rendimiento hídrico y caudal al año 2045 en la subcuenca 27 (dominante Plantación forestal joven) en un 36.4% y 29.1% respectivamente.

Además, la Figura 5 evidencia que las subcuencas 8 (dominante Agricultura) y 27 (dominante Plantación forestal joven) son las más susceptibles a los cambios de uso de suelo proyectados, que se refleja en los componentes hidrológicos, particularmente para las proyecciones de los años 2035 y 2045 con respecto al año base 2015.

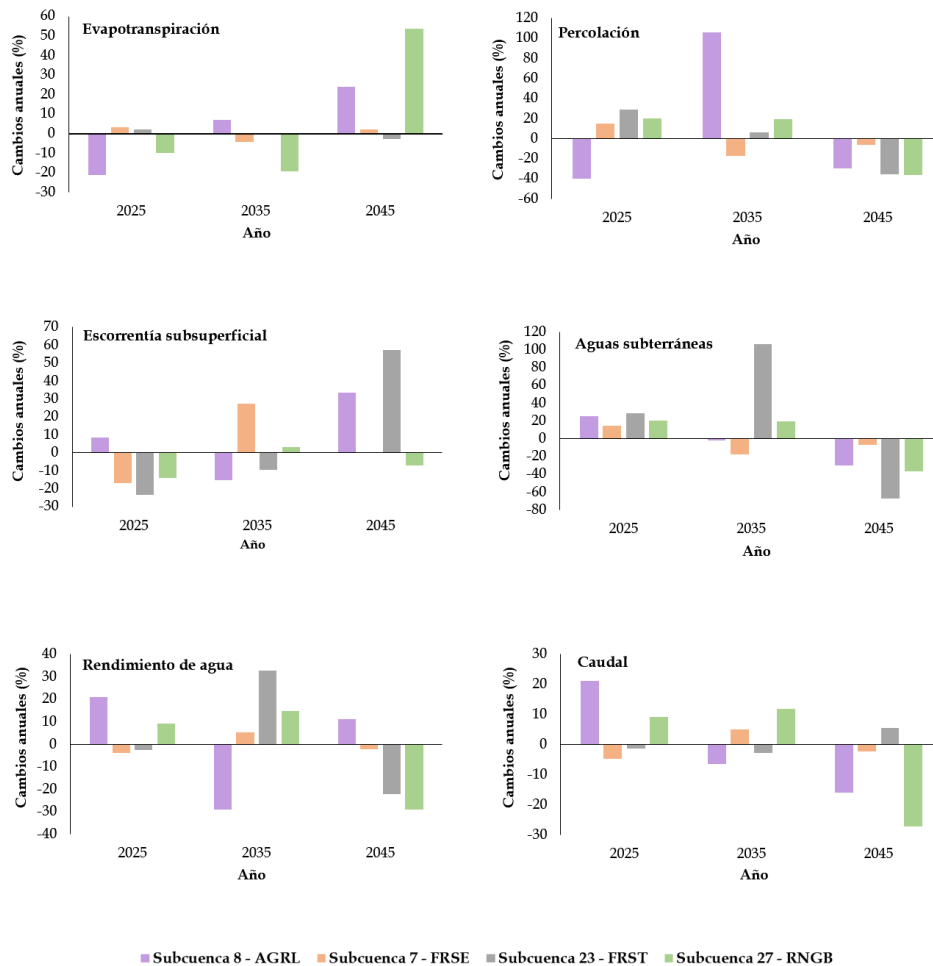


Figura 5. Variación porcentual anual de la evapotranspiración, percolación, escorrentía subsuperficial lateral, aguas subterráneas, rendimiento hídrico y caudal.

4 CONCLUSIÓN

En este estudio se investigó sobre efectos que tiene la dinámica del uso de suelo sobre el balance hídrico en la cuenca costera del río Andalién, ubicada en la zona centro sur de Chile.

Una de las restricciones de este estudio está referida al método utilizado para la predicción de los mapas de uso de suelo. La complejidad de contar e incorporar información sobre planes de manejo forestales y urbano, nuevos proyectos industriales (inversiones privadas), de obras civiles (nuevas carreteras, mejoramiento de caminos, entre otras), futuras normativas ambientales o de crecimiento económicos y otras variables aún más complejas como comportamientos sociales (demográfico), podría mejorar las predicciones sobre usos de suelo. Si se contara con la información de estas variables, estas se podrían considerar dentro de un modelo híbrido que combine las CA-Markov y una evaluación multicriterio (MCE). Además de lo mencionado anteriormente se suma la incertidumbre del modelo hidrológico, el cual está determinado por los datos de entrada, la distribución espacial del modelo y los parámetros a seleccionar para los procesos de calibración y validación (Yu et al., 2020). Es importante mencionar que la existencia de diversos datos es escasa, tales como, la humedad relativa, la velocidad del viento y la radiación solar, por lo que se requiere del uso del generador meteorológico estocástico de SWAT lo cual puede limitar el rendimiento del modelo al ser parte de los datos de entrada.

Las predicciones de cambio de uso de suelo reflejaron una tendencia a la estabilidad de las coberturas de los usos de suelo dominantes de la zona en estudio (Plantación forestal adulta, Agricultura, Bosque nativo-mixto y Plantación forestal joven) para los tres escenarios futuros: año 2025, año 2035 y año 2045. A pesar de que la dinámica del cambio de uso de suelo es menor respecto a la que se produjo en las dos décadas precedentes (2000-2020), sus consecuencias sobre el balance hídrico de la cuenca y particularmente en las subcuencas es considerable en términos de la reserva de agua en el suelo y los efectos negativos sobre el rendimiento hídrico de la cuenca. Lo anterior se traduce, concretamente en subcuencas con una superficie dominada por las plantaciones forestales, en una disminución de la percolación y los flujos subterráneos que en consecuencia reduce la recarga de los acuíferos, compensado principalmente por un aumento en la evapotranspiración. Por otro lado, a nivel de cuenca, el modelo hidrológico semi-distribuido permite cuantificar los impactos hidrológicos proyectados en una escala temporal anual de la cual se observa un incremento medio en percolación, flujo subsuperficial y aguas subterráneas, mientras que se presenta una reducción en la evapotranspiración y escorrentía superficial.

Los resultados de esta investigación demuestran la importancia de una evaluación de los impactos de la dinámica del uso de suelo sobre la respuesta hidrológica para cuencas como la del río Andalién y finalmente en como la gobernanza del uso suelo en las cuencas está íntimamente ligada a la de los recursos hídricos (Moss, 2004). Ciertamente, las áreas de plantación forestal siguen manteniendo un porcentaje alto sobre la cuenca del río Andalién y no hay evidencias de un posible aumento de la superficie de bosque nativo – mixto pretendiendo su conservación, reflejando que no se ha realizado una revisión correcta de la gestión de suelos y recursos hídricos.

El análisis de los efectos del cambio de uso de suelo es importante para la toma de decisiones, pero un desafío mayor corresponde a la combinación de esta condición en conjunto con las forzantes introducidas por cambio climático (Dibaba et al., 2020; Mekonnen et al., 2018; Wang

et al., 2008; Yan et al., 2019)). Según la literatura, los efectos aislados del cambio climático sobre la cuenca pueden ser opuestos a los efectos del cambio de uso de suelo en algunos componentes del balance hídrico, dependiendo de las características de la zona en estudio. Además, estudios como los mencionados anteriormente indican que la combinación de ambos efectos (cambio climático y cambio de uso de suelo) sobre la cuenca hidrográfica pueden amplificar las variaciones en los procesos hidrológicos a nivel estacional y anual.

Este trabajo propone aportar a metas como gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de suelos y detener la pérdida de la biodiversidad, que son parte de los objetivos de desarrollo sustentable.

REFERENCIAS

- Adhikari, B., Pokhrel, P., Pradhan, Y., & Ulak, A. (2020). Decadal variation in the land use and land cover pattern of Madi, Chitwan from 1989 to 2017 with Flood Hazard Mapping. *Lowland Technology International*, 21(4), 287–295.
- Aghsaee, H., Mobarghaee Dinan, N., Moridi, A., Asadolahi, Z., Delavar, M., Fohrer, N., & Wagner, P. D. (2020). Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran. *Science of the Total Environment*, 712, 136449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136449>
- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G., & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX: Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(3). <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2009000300004>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- ARRAU INGENIERÍA E.I.R.L. (2012). *Estudio de Factibilidad y Diseño Definitivo de las Obras de Regulación y Retención de Sedimentos en Río Andalién, Región del Bío-Bío*. Dirección de Obras Hidráulicas Gobierno de Chile.
- ASF. (n.d.). *Alaska Satellite Facility*.
- Blöschl, G., & Sivapalan, M. (1995). Scale issues in hydrological modelling: A review. *Hydrological Processes*, 9(3–4), 251–290. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090305>
- Castillo, E. J. (2008). Geomorfología de la cuenca del río Andalién, Chile. *Revista Geográfica*, 143, 97–116. <https://doi.org/10.2307/40996764>
- 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. (n.d.). *Catastro y actualización de los recursos vegetacionales y uso de la tierra (CONAF)*. <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/22/planificacion-catastral/>
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, & T. L. Veith. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- DGA. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Andalién*.
- Dibaba, W. T., Demissie, T. A., & Miegel, K. (2020). Watershed hydrological response to combined land use/land cover and climate change in highland ethiopia: Finchaa catchment. *Water (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/w12061801>
- Eastman, J. R. (2012). IDRISI Selva GIS and image processing software version 17.0. *Massachusetts, USA: Clark Labs*.
- Foley, J., Defries, R., Asner, G., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S., Chapin III, F. S., Coe, M., Daily, G., Gibbs,

- H., Helkowski, J., Holloway, T., Howard, E., Kucharik, C., Monfreda, C., Patz, J., Prentice, I., Ramankutty, N., & Snyder, P. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science (New York, N.Y.)*, 309, 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Gysling, A., Álvarez, V., Soto, D., Pardo, E., Poblete, P., & Khaler, C. (2019). Anuario Forestal 2019. *Anuario Forestal 2019 [Chilean Statistical Yearbook of Forestry 2019]*, 168, 232.
- Hansen, M. C. (2013). *High-Resolution Global Maps of*. 850(November), 850–854. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Instituto Nacional de, & Concepción. (2019). *DIVISIÓN POLÍTICO ADMINISTRATIVA Y*.
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424–425, 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
- 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>
- Kumar, S., Radhakrishnan, N., & Mathew, S. (2014). Land use change modelling using a Markov model and remote sensing. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 5(2), 145–156. <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.795502>
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28(1), 205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 159–174.
- Lauricella, A., Cannon, J., Branting, S., & Hammer, E. (2017). Semi-automated detection of looting in Afghanistan using multispectral imagery and principal component analysis. *Antiquity*, 91(359), 1344–1355. <https://doi.org/10.15184/aqy.2017.90>
- Li, S., Yang, H., Lacayo, M., Liu, J., & Lei, G. (2018). Impacts of land-use and land-cover changes on water yield: A case study in Jing-Jin-Ji, China. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su10040960>
- Mamun, A. Al, Mahmood, A., & Rahman, M. (2013). Identification and monitoring the change of land use pattern using remote sensing and GIS: A case study of Dhaka City. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 6(2), 20–28.
- Mekonnen, D. F., Duan, Z., Rientjes, T., & Disse, M. (2018). Analysis of combined and isolated effects of land-use and land-cover changes and climate change on the upper Blue Nile River basin's streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6187–6207. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6187-2018>
- Moss, T. (2004). The governance of land use in river basins: prospects for overcoming problems of institutional interplay with the EU Water Framework Directive. *Land Use Policy*, 21(1), 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2003.10.001>
- Öztürk, M., Coptý, N. K., & Saysel, A. K. (2013). Modeling the impact of land use change on the hydrology of a rural watershed. *Journal of Hydrology*, 497, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.022>
- Rojas, O., Latorre, T., Pacheco, F., Araya, M., & Lopez, J. J. (2019). *Inundaciones fluviales en cuencas costeras mediterráneas de Chile: recurrencia, factores físicos y efectos hidrogeomorfológicos de su gestión* (pp. 79–103).
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574–2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177–192. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000100012>
- Tong, S. T. Y., Sun, Y., Ranatunga, T., He, J., & Yang, Y. J. (2012). Predicting plausible impacts of sets of climate and land use change scenarios on water resources. *Applied Geography*, 32(2), 477–489. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.06.014>
- U.S. Geological Survey. (2019). *Earth Explorer*. <http://earthexplorer.usgs.gov>.
- Wang, S., Kang, S., Zhang, L., & Li, F. (2008). Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China. *Hydrological Processes*, 22(14), 2502–2510. <https://doi.org/10.1002/hyp.6846>
- 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>
- Yan, R., Cai, Y., Li, C., Wang, X., & Liu, Q. (2019). Hydrological responses to climate and land use changes in a watershed of the Loess Plateau, China. *Sustainability (Switzerland)*, 11(5).

<https://doi.org/10.3390/su11051443>

Yu, Z., Man, X., Duan, L., & Cai, T. (2020). Assessments of Impacts of Climate and Forest Change on Water Resources Using SWAT Model in a Subboreal Watershed in Northern Da Hinggan Mountains. *Water*, *12*(6), 1565. <https://doi.org/10.3390/w12061565>

