



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles

“USO DEL MODELO SWAT PARA ESTUDIAR LOS EFECTOS
DE CAMBIOS DE USO DEL SUELO EN LA HIDROLOGÍA,
TRANSPORTE DE SEDIMENTO FINO Y EN LAS FUENTES
DE APORTE DE SEDIMENTOS EN CUENCAS
EXPERIMENTALES DEL SUR DE CHILE”

Tesis para optar al Título de:
Ingeniero Civil en Obras Civiles

Profesor Potrocinante:
Sr. Andrés Iroumé Arrau
Ingeniero Civil,
Master of Sciences in Resources Management
Doctor en Ciencias Forestales

EDUARDO ANDRÉS ROCO VILLABLANCA

VALDIVIA – CHILE

2014

Uso del modelo SWAT para estudiar los efectos de cambios de uso del suelo en la hidrología, transporte de sedimento fino y en las fuentes de aporte de sedimentos en cuencas experimentales del sur de Chile.

Eduardo Roco^a, Andrés Iroume^{b*}

^aUniversidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles, Valdivia, Chile.

* Autor de correspondencia: ^bFacultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Instituto de Manejo Forestal, Casilla 567, Valdivia, Chile, airoume@uach.cl

RESUMEN

El modelo SWAT (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua) fue utilizado para estudiar los efectos de cambios de uso del suelo en la hidrología, transporte de sedimento fino y en las fuentes de aporte de sedimentos en cuencas experimentales del sur de Chile. El objetivo del estudio es la calibración y validación hidrológica en dos períodos a nivel diario, y la estimación de la carga total de sedimento fino en las cuencas Los Ulmos Control (inalterada) y Los Ulmos Tratamiento (intervenida a cosecha) con el fin de comparar el comportamiento de distintas condiciones del uso de suelo. El modelo fue calibrado (octubre del 2009 a marzo del 2010) modificando ciertos parámetros de SWAT y validado (abril del 2010 a junio del 2011) en la cuenca inalterada, mientras que en la cuenca intervenida fue validado el período de pre cosecha (octubre del 2009 a marzo del 2010) para luego calibrar en un segundo período (abril del 2010 a junio del 2011), la condición de post cosecha.

Los resultados mostraron que el modelo SWAT simuló, para Los Ulmos Control, “bien” ($R^2 = 0,79$; $NSE = 0,56$) a “muy bien” ($R^2 = 0,7$; $NSE = 0,66$) para los períodos de calibración y validación respectivamente mientras que en Los Ulmos Tratamiento los resultados fueron “aceptables” ($R^2 = 0,86$; $NSE = 0,41$) en la validación y “buenos” ($R^2 = 0,78$; $NSE = 0,75$), en la calibración para el nuevo uso de suelo. La carga de sedimento fino simulado en Los Ulmos Control (2,092 T/ha) resultó mayor al medido (1,183 T/ha), mientras que en Los Ulmos Tratamiento los valores simulados en el período de pre-cosecha (0,848 T/ha) y post-cosecha (1,505 T/ha) fueron mayores (0,309 T/ha) y menores (2,196 T/ha) que los medidos respectivamente. SWAT permitió identificar solo la red hídrica como zona de aporte de sedimentos.

Palabras clave: SWAT, calibración y validación del modelo, simulación, carga de sedimentos.

ABSTRACT

The SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) was used to study the effects of land use changes on hydrology, transport of fine sediment and in the sources of supply of sediment in experimental watersheds in southern Chile. The objective of this study was the hydrological calibration and validation in two periods to daily level, and estimating fine sediment load in *Los Ulmos Control* (unchanged) and *Los Ulmos Tratamiento* watersheds (operated at harvest) in order to compare to behavior of different land use conditions. The model was calibrated (October 2009 to March 2010) modifying parameters of SWAT and validated (April 2010 to June 2011) in the unchanged watershed, while for the operated watershed was validated the pre harvest period (October 2009 to March 2010) for then calibrate in a second period (April 2010 to June 2011) the condition of the watershed harvest. The results showed that the SWAT model is able to simulate, for *Los Ulmos Control*, “good” ($R^2 = 0.79$; NSE = 0.56) to “very good” ($R^2 = 0.7$; NSE = 0.66) for the calibration and validation periods respectively while for *Los Ulmos Tratamiento* the results were “acceptable” ($R^2 = 0.86$; NSE = 0.41) in the validation to “good” ($R^2 = 0.78$; NSE = 0.75) in the calibration for the new land use. The fine sediment load simulated in *Los Ulmos Control watershed* (2.092 T/ha), was greater than the measured (1.183 T/ha), while in *Los Ulmos Tratamiento watershed*, simulated values during the pre-harvest (0.848 T/ha) and post-harvest (1.505 T/ha), were greater (0.309 T/ha) and less (2.196 T/ha) than the measured respectively. SWAT identified only the river as source of supply of sediment.

Keywords: SWAT, model calibration and validation, simulation, sediment load.

INTRODUCCIÓN

Chile ha desarrollado una importante economía forestal basada en 2,6 millones de hectáreas de plantaciones establecidas con especies exóticas de rápido crecimiento, las que tienen el potencial de afectar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico (Iroumé y Palacios, 2013). Ante este escenario, se requiere generar la evidencia necesaria para decidir un balance apropiado entre producción forestal y protección ambiental, y éste ha sido el tema de muchos estudios que examinan los efectos de los cambios en el uso del suelo en los ciclos hídricos y de sedimentos (Pandey *et al.*, 2007; Guo *et al.*, 2008;

Amatya y Jha, 2011). Es difícil generar un conocimiento preciso de la cantidad de escorrentía y sedimentos desde la superficie de las laderas de las cuencas a la red de drenaje, y además pueden requerirse importantes recursos financieros y tiempo (Pandey *et al.*, 2007). Para lograrlo, los investigadores conducen estudios usando técnicas de monitoreo en el campo o usando modelos de simulación para generar una referencia de los principales componentes en los ciclos hídricos y de sedimentos (Amatya y Jha, 2011). Sin embargo, por las dificultades de disponer de monitoreos de largo plazo, los investigadores están usando cada vez más modelos de simulación hidrológicos para cuantificar de mejor manera las complejas interrelaciones entre topografía, suelos, vegetación y cambios en el uso del suelo (Amatya y Jha, 2011).

Entre estos modelos, destaca la Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (Soil and Water Assessment Tool o SWAT), desarrollada para evaluar los impactos de las prácticas de manejo de suelo sobre la hidrología y la calidad del agua (Arnold *et al.*, 1998).

Rosenthal *et al.* (1995) probaron SWAT para simular la escorrentía en diferentes sub-cuencas de la cuenca del Río Colorado Inferior (8.927 km²) en Texas, donde el modelo simuló el caudal mensual con un coeficiente de regresión (R^2) de 0,75 en comparación a los caudales medidos. Bingner (1996) evaluó el modelo SWAT utilizando la Cuenca del Arroyo Goodwin (21,3 km²) situada en el norte de Mississippi durante un período de 10 años, logrando coeficientes promedio de Nash Sutcliffe (NSE) y de R^2 a nivel mensual de 0,8 para la mayoría de las sub cuencas. En una de las pocas aplicaciones para el estudio de los caudales diarios, Peterson y Hamlett (1998) utilizaron el modelo SWAT para simular la descarga en la cuenca Creek Ariel (39,5 km²) del noreste de Pensilvania, en donde el modelo antes de la calibración reveló una desviación del volumen de escorrentía del 68,3% y un R^2 de 0,03. Guo *et al.* (2008) utilizaron SWAT en la cuenca del lago Poyang (China) para examinar los efectos de cambios climáticos y de uso del suelo sobre la hidrología y los caudales. Un importante hallazgo de este estudio es que el efecto climático fue dominante en el caudal anual, mientras que el cambio de la cubierta vegetal tuvo un impacto moderado en los caudales anuales pero influyó mucho en el caudal estacional y alteró el hidrograma anual de la cuenca. En Carolina del Sur (Estados Unidos de América), Amatya y Jha (2011) modelaron una cuenca hidrográfica boscosa sobre suelos con mal drenaje en llanuras costeras, donde el objetivo principal del estudio fue la calibración y validación del SIG (Sistema de Información Geográfico) basado en la herramienta SWAT, para los 72,6 km² de superficie en la cuenca Turkey Creek. El rendimiento del modelo fue “bueno” ($R^2 = 0,76$; NSE = 0,68) a “muy bueno” ($R^2 = 0,94$; NSE = 0,90) en los períodos de calibración y validación a nivel mensual y “satisfactorio” ($R^2 = 0,64$; NSE = 0,59) a “bueno” ($R^2 = 0,70$; NSE = 0,70) para los períodos de calibración y validación a

nivel diario. Ourng *et al.* (2011) utilizaron SWAT para simular la descarga y el transporte de sedimentos a nivel diario en la cuenca Save en el suroeste de Francia (1.110 km², cultivos intensivos) y concluyeron que los valores diarios simulados coincidían satisfactoriamente con los observados.

En general, SWAT ha sido utilizado para simular procesos hidrológicos en cuencas de todo el mundo estimando la producción de agua y sedimentos en diversos escenarios.

El objetivo general de este trabajo es estudiar los efectos de cambios de uso del suelo en los procesos hidrológicos y del transporte de sedimento fino en cuencas experimentales utilizando el modelo SWAT. Los objetivos específicos son calibrar y validar el modelo para generar un set de parámetros que ajuste razonablemente los valores simulados y medidos de escorrentías y transporte de sedimentos finos, analizar el potencial uso del modelo para simular caudales y tasas de transporte de sedimentos ante cambios de uso del suelo, y por último, comprobar la capacidad del modelo SWAT para identificar las fuentes de aporte de sedimento fino a la red de drenaje.

MÉTODOS

Área de estudio.

El estudio se realizó en cuencas pareadas de uso forestal que se encuentran dentro del predio Los Ulmos, de la Universidad Austral de Chile, cuyas coordenadas son 40°02' S y 73°06' O (Figura 1). La localidad de Los Ulmos está situada en la comuna de Paillaco, Región de Los Ríos, y se encuentra a unos 30 km al sureste de la ciudad de Valdivia.

La cuenca Los Ulmos Control (LUC) tiene una superficie de 19,8 ha. El uso del suelo comprende 7,3 ha cubiertas por *Eucalyptus nitens*; 3,7 ha cubiertas por *Pinus Radiata* plantados en el año 2000; 5,75 ha cubiertas de bosque nativo y 3 ha ocupadas por caminos forestales. La pendiente media es de 18% y la altitud media de la cuenca es de 192 m.s.n.m. La longitud de su cauce principal es de 530 m.

Por su parte, la cuenca Los Ulmos Tratamiento (LUT) tiene una superficie de 7,6 ha, de las cuales al inicio de la investigación 6,5 ha estaban cubiertas por *Eucalyptus nitens* establecidos en el año 1997, y 1,1 ha restantes corresponderían a vegetación ripariana. La pendiente media es de un 25% y la altitud media de la cuenca es de 198 m.s.n.m. La longitud del cauce principal es de 180 m aproximadamente (Palacios, 2014).

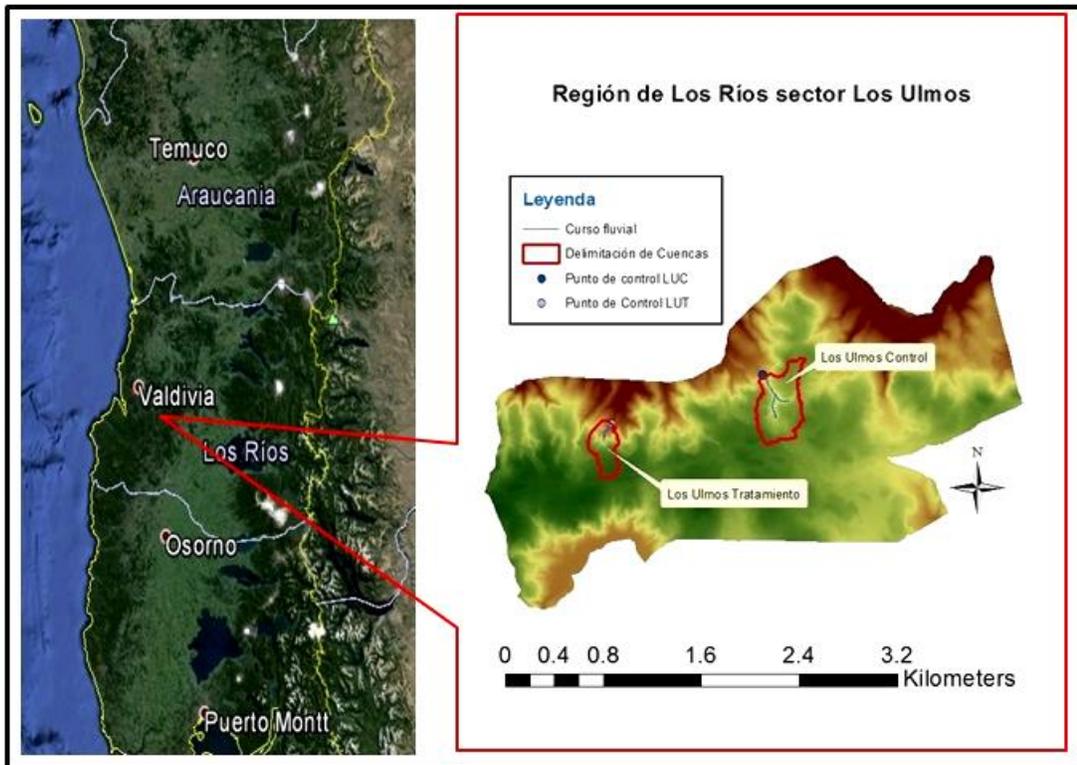


Figura 1. Ubicación Cuencas Los Ulmos Control y Los Ulmos Tratamiento.

El clima en el área de estudio es templado lluvioso (Fuenzalida, 1971) con una precipitación promedio anual de 2.500 mm aproximadamente. La precipitación es de origen orográfico, que se genera durante el ascenso de las nubes sobre un relieve, en este caso, la Cordillera de la Costa y los vientos que la producen provienen del norte y oeste (Huber, 1970). Las temperaturas promedio son de 12°C en Valdivia y los promedios mensuales no descienden bajo los 6°C en gran parte de la región.

Los suelos en la cuenca son de color rojo arcilloso y corresponden a la serie Los Ulmos. Se originaron a partir de cenizas volcánicas antiguas depositadas sobre el complejo metamórfico de la Cordillera de la Costa, y se ubican a alturas entre 100 y 280 m.s.n.m. Son suelos muy bien estructurados y bien drenados, moderadamente profundos a profundos, tienen textura superficial franco arcillosa y color pardo rojizo oscuro en el matiz 5YR (tono intermedio amarillo y rojo valor 5), y textura arcillosa y color rojo amarillento en el matiz 5YR en profundidad (Estudio de Suelos de la Provincia de Valdivia, 1978).

La cuenca Los Ulmos Control (LUC) permaneció inalterada en todo el período de investigación que comprende desde el 1 de octubre del 2009 al 20 de junio del 2011. La cuenca Los Ulmos Tratamiento (LUT) fue sometida a una cosecha forestal entre el 1 y el 15 de abril del año 2010, cosechándose las 6,5 ha cubiertas por *Eucalyptus nitens*. De acuerdo a esto, el período de estudio se

dividió en: pre-cosecha del 1 de octubre del 2009 al 30 de marzo del 2010, y post-cosecha entre el 1 de abril del 2010 al 20 de junio del 2011.

Información Hidro-meteorológica.

Se midieron los caudales mediante equipos instalados en la salida de las cuencas, que funcionan bajo la modalidad de flotador, para determinar la variación temporal del caudal de cada afluente. La frecuencia de registro fue cada 3 minutos (Huber *et al.*, 2010). Los valores de caudales (l/s) durante el período de estudio fueron proporcionados por el Laboratorio de Hidrología y Fluviomorfología del Instituto de Conservación, Biodiversidad y Territorio de la Universidad Austral de Chile. Los datos de precipitación (mm) se obtuvieron de la estación pluviométrica instalada en Los Ulmos, el cual consta de un pluviógrafo tipo “tipping-buckets” marca Davis® de $\pm 0,257$ mm de resolución, conectado a un almacenador de datos o data logger marca Hobo®. De los Anuarios Climatológicos de la Dirección Meteorológica de Chile correspondiente a la estación meteorológica Pichoy, Valdivia, se obtuvieron los siguientes parámetros meteorológicos: temperaturas máximas y mínimas ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), radiación solar (MJ/m^2) y velocidad media del viento (m/s).

Modelo SWAT.

Se usó el modelo hidrológico SWAT (Herramienta para la evaluación del Suelo y Agua), desarrollado para el Servicio Agrícola de Investigación de Estados Unidos (USDA) con la función de predecir el impacto de las prácticas de manejo de suelo en la hidrología y la calidad del agua, la producción de sedimentos y sustancias agrícolas químicas en cuencas complejas con una variedad de suelos, uso de suelos y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado (Arnold *et al.*, 1998). SWAT requiere información sobre el clima, propiedades de los suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra. El modelo es capaz de simular una variedad de factores ambientales tales como hidrología, transporte de sedimentos, clima, crecimiento de cultivos, temperatura del suelo y nutrientes (Wu and Xu 2006). En este estudio se utilizó la versión 2012 de ArcSWAT (plataforma gráfica de SWAT) como herramienta del programa ArcGIS versión 2010.

Parametrización del Modelo.

Para la delimitación de las dos cuencas se utilizó un modelo de elevación digital generado de una imagen LiDAR (en inglés, Light Detection and Ranging) georreferenciada en coordenadas UTM (del inglés *Universal Transverse Mercator*). El modelo SWAT permite subdividir la cuenca en varias sub-

cuencas generando por cada una de ellas una unidad de respuesta hidrológica (HRU). Debido al tamaño de las cuencas estudiadas, se consideró una sub-cuenca por cada cuenca. En el cuadro 1 se muestran las características geomorfológicas de ambas cuencas donde se observa la similitud entre los cálculos realizados anteriormente usando procesos de delimitación de cuencas en ambientes SIG (“monitoreo” en el cuadro 1) con la parametrización que realiza automáticamente SWAT en su módulo de “delimitación automática de la cuenca”.

Cuadro 1. Características de las cuencas Los Ulmos Control y Los Ulmos Tratamiento. Comparación entre monitoreo en terreno y SWAT (modelación).

Características	Monitoreo		SWAT	
	Control	Tratamiento	Control	Tratamiento
Área (ha)	19,8	7,6	18,78	8
Altitud media (msnm)	192	198	191	191
Pendiente media del cauce (%)	10	28	6,86	16,27
Longitud cauce principal (m)	530	180	560	203

Para el tipo de uso de suelo se trabajó en ArcGIS bajo una imagen con formato “.shp” (archivo que contiene toda la información de la cobertura del área en estudio). Para las dos cuencas, la vegetación de la zona de protección o ripariana fue clasificada en SWAT como un “Bosque mixto” definido como una mezcla de especies arbóreas perennes y caducifolias, las plantaciones de *Eucalyptus* como “Bosque Siempreverde”, las plantaciones de *Pinus Radiata* como “Pino”, el matorral o plantaciones en las etapas iniciales del crecimiento como “Matorral” y los caminos forestales como “Uso urbano”. En LUC se identificaron cuatro zonas: 47,02% con “Bosque Siempreverde” (*Eucalyptus Globulus*, *Nitens* y *Regnans*), 29,07% con “Bosque Mixto” (zona de protección o ripariana), 20,5% como “Pino” (las plantaciones de *Pinus Radiata*) y 3,4% como “Uso urbano” (los caminos forestales). Por su parte, en LUT se identificaron en el período de pre-cosecha las siguientes cuatro zonas: 85,73% de “Bosque Siempreverde” (*Eucalyptus Globulus* y *Nitens*), 11,05% con “Bosque Mixto” (bosque nativo en la zona de protección), 2,04% de “Pino” (plantaciones de *Pinus Radiata*) y un 0,78% de “Matorral” (plantaciones forestales en las etapas iniciales del crecimiento). Luego, en el período de post-cosecha, la zona con cubierta de “Bosque Siempreverde” (la plantación de *Eucalyptus spp.* que se cosechó en un 100% y que correspondió al 85% de la superficie de la cuenca), se clasificó en SWAT en la condición “suelo desnudo”.

SWAT contiene una base de datos de todas las series de suelos pertenecientes a Estados Unidos, lo que obligó a crear una base de datos propia con el suelo correspondiente al sector de la investigación. La información sobre el tipo de suelo se obtuvo del *Estudio de Suelos de la Provincia de Valdivia* (1978) realizado por el Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales (Universidad Austral de Chile). En este estudio se describe la serie de suelo correspondida a la zona de Los Ulmos, en donde se mencionan las características físicas y químicas requeridas por SWAT, como por ejemplo: textura, grupo hidrológico, conductividad hidráulica, entre otros. En el cuadro 2 se muestran los parámetros por perfil de suelo que fueron ingresados al modelo. La serie Los Ulmos comprende una cantidad de 6 perfiles de suelo en 2 m de profundidad. Según las características de infiltración de los suelos, a esta serie le corresponde el grupo hidrológico B (clasificación realizada por el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos).

Cuadro 2. Parámetros suelo Serie Los Ulmos.

Parámetros del Suelo						
Nombre de la Serie	Los Ulmos					
	0 - 7	7 - 27	27 - 66	66 - 115	115 - 166	166 - 200
Profundidad (cm)	0 - 7	7 - 27	27 - 66	66 - 115	115 - 166	166 - 200
Densidad aparente (gr/cm ³)	0,91	0,91	0,91	1,14	1,11	1,1
Capacidad disponible de agua (%)	0,391	0,486	0,495	0,526	0,526	0,526
Contenido de Carbono orgánico (%)	6,54	4,29	2,38	0,6	0,58	0,43
Conductividad hidráulica (mm/hr)	7,9	---	---	---	---	---
Arcilla (%)	52,4	45,4	58,3	78,4	83,6	81,3
Limo (%)	36,1	41,2	31,8	17	12,5	13,4
Arena (%)	11,5	13,4	9,9	4,6	3,9	5,3
Roca (%)	0	0	0	0	0	0
Albedo (fracción)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Factor K USLE	0,09	0,125	0,06	0,09	0,05	0,04

Fuente: Instituto Nacional de Investigación de Recursos Naturales. Elaboración propia.

En cuanto a la información climática, SWAT requiere la precipitación diaria y las temperaturas máximas y mínimas diarias, como información mínima, lo cual permite simular la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento, a través del modelo generador de clima WXGEN (Sharpley y Williams, 1990). Sin embargo, esta opción solo es permitida en Estados Unidos y en algunos países del hemisferio norte. Para este estudio los datos de precipitación, temperaturas máximas y mínimas,

humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, obtenidas como se mencionó anteriormente del pluviógrafo existente en el área de estudio y de los anuarios climatológicos de la Dirección Meteorológica de Chile para la estación meteorológica Pichoy (Valdivia), fueron ingresadas a SWAT a nivel diario mediante el formato de archivo de texto.

Análisis estadísticos.

Los valores de esorrentía simulados fueron comparados con los medidos usando tres técnicas estadísticas aplicadas comúnmente en este tipo de estudios hidrológicos: el Coeficiente de determinación (R^2), el índice del modelo de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el ciento sesgo (PBIAS). El R^2 se utilizó como un test de bondad de ajuste entre los resultados simulados y los observados, y sus valores varían entre 0 y 1, donde el 0 indica un pésimo ajuste y el 1 un ajuste perfecto. El NSE fue usado para estimar la eficiencia del modelo, ya que indica que tan bien es el ajuste valor por valor entre lo simulado y lo medido. El rango de NSE varía entre $-\infty$ a 1, siendo el 1 el ajuste perfecto. Por último, el PBIAS se utilizó para evaluar si los valores simulados fueron mayores o menores que los valores medidos. El valor óptimo es el 0, y un valor positivo de PBIAS indica que el modelo está subestimando los valores medidos, mientras que un valor negativo indica que el modelo sobreestima lo medido.

El estudio comprendió un total de 21 meses divididos en dos períodos. En LUC, los primeros 6 meses (primera fase de la aplicación de SWAT) fueron utilizados para calibrar el modelo generando primero valores a nivel diario de esorrentías (mm) simuladas usando los parámetros por defecto, para luego ir variándoles en simulaciones sucesivas hasta lograr buenos ajustes entre los valores simulados y medidos, logrando validar el modelo en los posteriores 15 meses y obtener un valor total de transporte de sedimentos simulado cercano a lo medido al final del período en estudio. En LUT se realizó una validación durante los primeros 6 meses (pre cosecha) utilizando los parámetros modificados y validados de la cuenca pareada, y para los 15 meses posteriores (post cosecha) se modificaron ciertos parámetros estableciendo una calibración para la nueva condición de uso de suelo generado por la tala de *eucalyptus*. En éste caso los valores de transporte de sedimentos simulados y medidos fueron comparados al final de cada período. Se ejecutó la simulación a partir del 1 de enero del 2009, dejando 9 meses previos de “calentamiento” para que el programa no tuviese una inestabilidad en el cálculo del balance hídrico causado por las condiciones iniciales (Luzio *et al.*, 2002) llegando a la fecha de inicio de la simulación correspondiente al 1 de Octubre del 2009.

RESULTADOS

Pre-calibración para las condiciones de la cuenca LUC.

En la Figura 2 se muestra la primera simulación a nivel diario con los parámetros iniciales (por defecto) de SWAT, sin modificarlos específicamente para la cuenca. Se observa que los “peak” de crecida simulados son mayores a los medidos, y casi duplicando su valor, en tanto, el flujo base simulado es muy bajo y en algunos casos nulo. Con los parámetros por defecto se simula el comportamiento de una cuenca con baja capacidad de almacenamiento y retención de agua y con altos niveles de escurrimientos superficiales, es decir, una cuenca “casi pavimentada”.

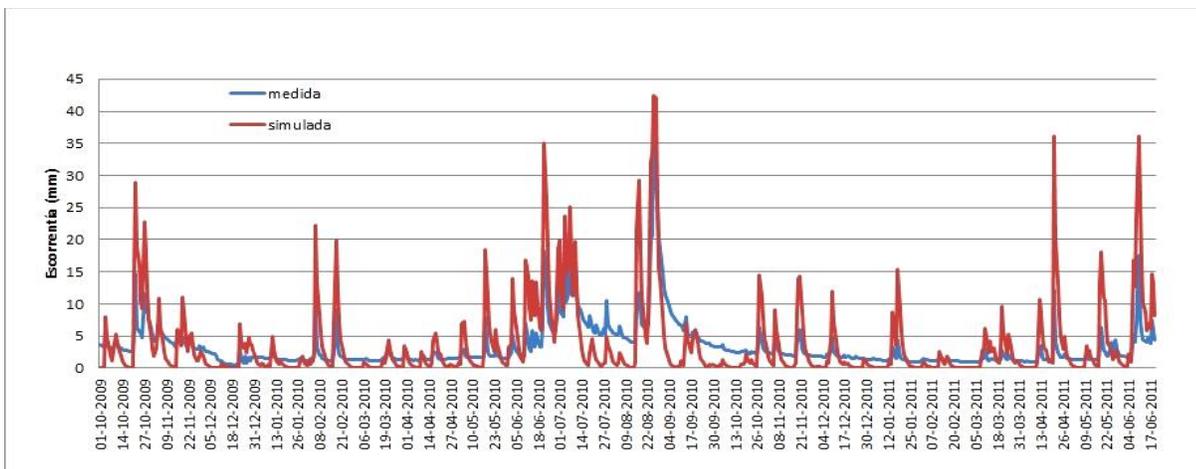


Figura 2. Comparación de escorrentía diaria medida y simulada sin calibrar en Los Ulmos Control.

Los valores del R^2 fueron 0,68 y 0,61 y para NSE de -1,22 y -0,19 en los dos períodos respectivamente (octubre del 2009 a marzo del 2010 y abril del 2010 a junio del 2011) en que dividió este primer análisis, lo que representa un mal ajuste entre la escorrentía medida y la simulada. Los valores del PBIAS fueron -8,64 y -12,13 respectivamente, lo que indica que el modelo está sobreestimando las escorrentías.

Para los 21 meses del periodo completo de pre-calibración, la escorrentía simulada fue de 2.354,8 mm y la medida de 2.114,5 mm. Con respecto a la carga de sedimento fino, la simulación generó al final de los 21 meses, un total de 7,3E-3 T/ha, lo que es muy inferior a los 1,18 T/ha medidos.

Calibración para las condiciones de LUC.

Para el período de calibración, 1 de octubre del 2009 al 31 de marzo del 2010, se modificaron seis parámetros: Conductividad hidráulica (SOL_K), Número de curva (CN), Factor de compensación de la evaporación del suelo (ESCO), Factor alfa del flujo base (ALPHA-BF), Coeficiente de agua subterránea (GWREVAP) y el Factor práctica de apoyo de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE_P). Los cinco primeros influyeron para la calibración hidrológica y la última para la carga de sedimentos. La selección de los parámetros fue en base a estudios anteriores en cuencas a nivel mundial (Khanal and Parajuli, 2013; Amatya and Jha, 2011). El cuadro 3 muestra los parámetros utilizados con sus valores por defecto y los valores modificados para la mejor simulación respecto a la hidrología (buscando el mejor ajuste mediante análisis estadístico entre la escorrentía simulada y medida), a la carga de sedimentos (buscando la equidad del valor total de transporte de sedimento simulado y medido al final de cada período) y la simulación final (logrando la paridad entre un buen ajuste hidrológico y una buena aproximación entre el valor total de transporte de sedimento simulado y medido al final de cada período). En el cuadro 4 se muestran los valores calibrados del análisis estadístico para cada caso.

Cuadro 3. Parámetros modificados para la calibración y validación de la cuenca Los Ulmos Control.

Parámetros	Valor por defecto	Valor mejor hidrológico	Valor mejor sedimentos	Valor final
Numero de curva (CN)	65	40	50	55
Conductividad hidráulica (SOL_K)	7	20	2,5	4
Factor de compensación de la evaporación del suelo (ESCO)	1	0,4	0,4	0,4
Factor alfa del flujo base (ALPHA-BF)	0,048	0,9	0,9	0,9
Coeficiente de agua subterránea (GWREVAP)	0,02	0,2	0,2	0,2
Ecuación universal de pérdida de suelo factor práctica de apoyo (USLE_P)	1	1	1	0,6

Cuadro 4. Análisis estadístico a nivel diario entre la escorrentía medida y simulada para los respectivos casos en Los Ulmos Control.

	Simulaciones		
	Mejor hidrología	Mejor sedimentos	Simulación final
R ²	0,76	0,71	0,79
NSE	0,65	0,31	0,56
PBIAS (%)	12,92	-45,54	-26,7

Si bien, para la simulación “Mejor hidrología”, los valores estadísticos muestran un buen rendimiento del modelo, se puede observar en la Figura 3, el flujo base tiende a ser muy bajo o casi nulo en períodos de baja producción de agua, lo que indica un problema de baja capacidad de almacenamiento de agua retenida en la cuenca. Por esto, se modificó el parámetro de Conductividad hidráulica del suelo (SOL_K), el cual era demasiado alto para las características geomorfológicas de la cuenca (Casanova *et al.*, 2009), lo cual mejoró notablemente la estadística hidrológica.

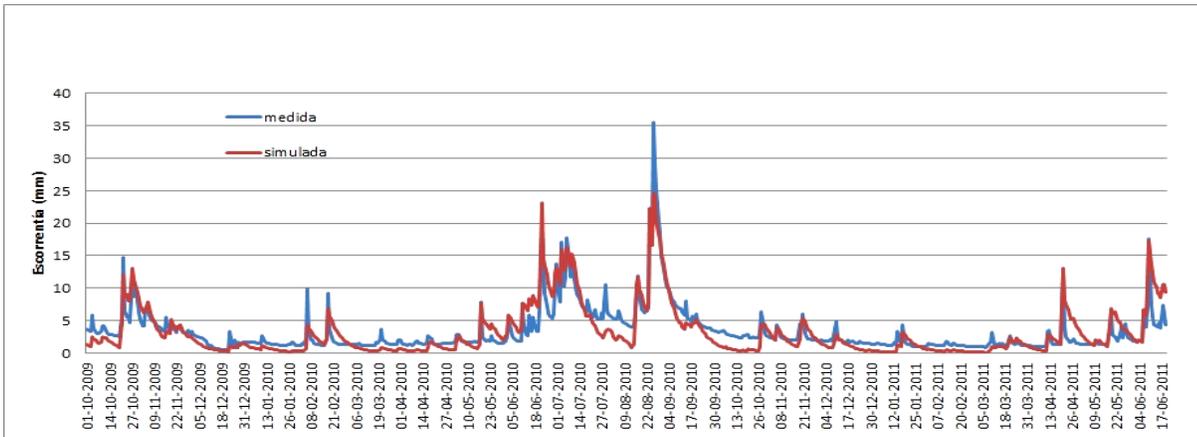


Figura 3. Escorrentía medida y simulada en SWAT en la cuenca Los Ulmos Control a nivel diario. Mejor simulación hidrológica en base al análisis estadístico.

La mejor simulación que generó SWAT a nivel diario combinando un buen rendimiento con respecto a los valores estadísticos y la carga total de sedimento al final del período total de estudio (“Simulación final”) se muestra en la Figura 4, en donde se puede observar que los eventos de crecida y el flujo base de la cuenca mejoran.

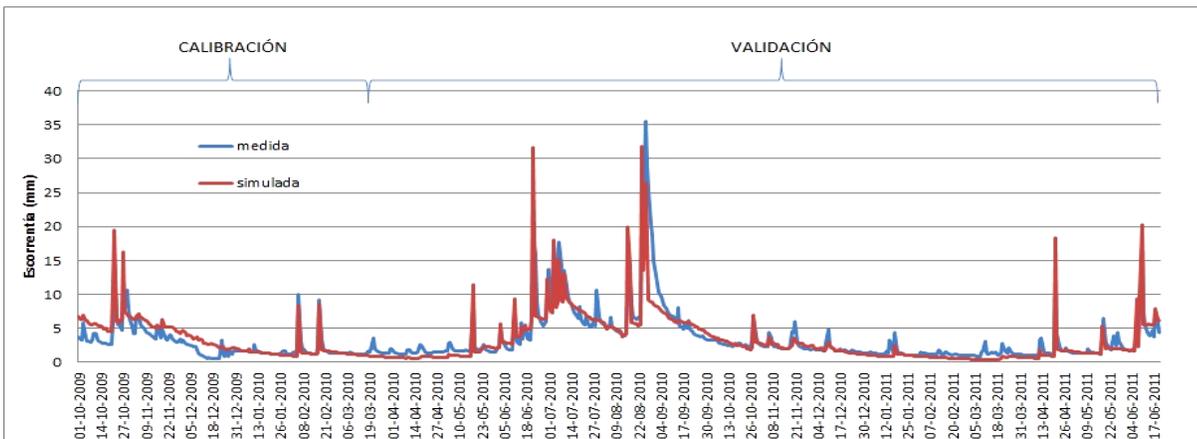


Figura 4. Escorrentía medida y simulada en SWAT a nivel diario en Los Ulmos Control. Simulación Final.

En el período de calibración los resultados indicaron una muy buena correlación entre los valores simulados y los medidos en el cauce, donde el R^2 entregó un valor de 0,79 (Santhi *et al.*, 2001; Van Liew *et al.*, 2003). El valor del NSE fue de 0,56 a nivel diario cuyo valor es considerado como aceptable (Nash and Sutcliffe, 1970). El valor otorgado por PBIAS mostró que en LUC a nivel diario la escorrentía está siendo sobrestimada generando un valor de -26,7% (Gupta *et al.*, 1999), lo que está dentro del rango de rendimiento satisfactorio. Al final de este período la producción de agua total medida y simulada fueron 462,7 mm y 586,3 mm respectivamente.

Validación del modelo SWAT en LUC y LUT para las condiciones de ambas cuencas sin intervención.

Para el período entre el 1 de abril de 2010 al 20 de Junio del 2011 en LUC, fueron validados los valores de los parámetros modificados (simulación final) en el período de calibración ya que demostraron un buen ajuste estadístico. Los resultados en el período de validación del modelo fueron ampliamente mejores en rendimiento que en el período de calibración. El R^2 generó un valor de 0,70 obteniendo una muy buena correlación entre los valores simulados y medidos. Para el NSE, se obtuvo un valor de 0,66 resultando así un muy buen rendimiento del modelo. En el PBIAS el resultado fue de 8,8% mostrando una ligera subestimación del modelo. Al final de este período la producción de agua total medida y simulada fue de 1.651,8 mm y 1.506,4 mm respectivamente. En la Figura 4 presentada anteriormente se muestra la simulación final calibrada y validada a nivel diario en la cuenca.

Para el período de pre cosecha, se conservaron las modificaciones en valores de los parámetros realizadas en LUC para validar el modelo en LUT, ya que las dos cuencas presentan similar tipo de suelo y condiciones de uso de suelo. El valor generado en la simulación para el R^2 fue de 0,86, indicando una muy buena correlación entre los valores simulados y los medidos (Santhi *et al.*, 2001; Van Liew *et al.*, 2003). El valor del NSE fue de 0,41 a nivel diario, valor considerado como aceptable (Nash and Sutcliffe, 1970). El PBIAS entregó un valor de -3,52% a nivel diario, lo que indica un muy buen rendimiento y también tiende a sobrestimar ligeramente el modelo (Van Liew *et al.*, 2007). Al final de este período la producción de agua total medida y simulada fueron 494,2 mm y 511,6 mm respectivamente.

La figura 5 muestra la escorrentía medida y la simulada en los períodos de pre cosecha y post cosecha, sin haber modificado aún la condición de uso de suelo en esta última para una posterior comparación, donde se observa que en el primer período la diferencia de los “peak” de crecidas entre la escorrentía medida y simulada no excede más allá de los 10 mm y con respecto al flujo base se logra observar que existe una alta capacidad de almacenamiento en la cuenca.

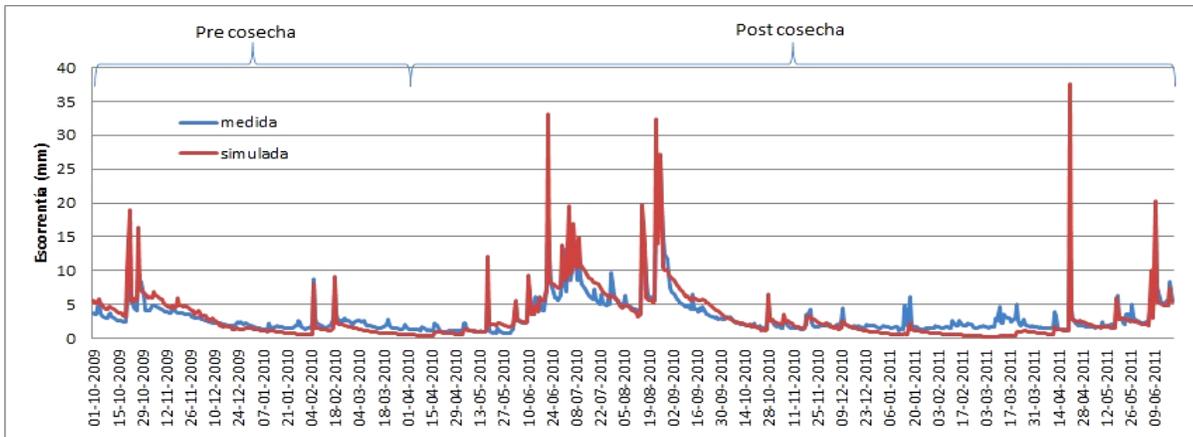


Figura 5. Escorrentía medida y simulada en SWAT a nivel diario en LUT con similar condición de uso de suelo que en LUC.

Calibración del modelo SWAT para la condición de post-tratamiento en LUT.

En el período de post cosecha se modificaron los parámetros más sensibles de SWAT, con respecto al período de pre cosecha para simular un escenario de “Suelo desnudo”, los cuales fueron: Conductividad hidráulica (SOL_K), Número de curva (CN) y el Factor práctica de apoyo de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE_P). Las modificaciones de los valores se muestran en el cuadro 5 y en el cuadro 6 se muestran los mejores resultados estadísticos a nivel diario de las simulaciones realizadas respecto a la hidrología de la cuenca, a la carga de sedimentos y la mejor en conjunto.

La mejor simulación con respecto a la hidrología coincidió con la simulación validada del período de pre cosecha. Sin embargo, en la Figura 5 presentada anteriormente se puede observar que en los meses de febrero y marzo del año 2011 el flujo base de la cuenca resulta muy baja, lo que implica un problema de infiltración y retención de agua.

La mejor simulación (Simulación final) a nivel diario presentó valores estadísticos muy cercanos a la “Mejor hidrología”, el R^2 generó un valor de 0,78, obteniendo una muy buena correlación entre los valores simulados y medidos. Para el NSE, se obtuvo un valor de 0,75 y para el PBIAS el resultado fue de 0,05. Al final de este período la producción de agua total medida y simulada fueron 1.532,4 mm y 1.531,6 mm respectivamente. En la figura 6 se visualiza la simulación entre la escorrentía medida y simulada.

Cuadro 5. Nuevos valores de los parámetros para el período de post cosecha.

Parámetros	Mejor valor hidrológico	Mejor valor sedimentos	Valor final Post cosecha
Numero de curva (CN)	55	45	40
Conductividad hidráulica (SOL_K)	4	1	1
Ecuación universal de pérdida de suelo factor práctica de apoyo (USLE_P)	0,6	0,9	0,9

Cuadro 6. Resumen estadístico a nivel diario de las mejores simulaciones en Los Ulmos Tratamiento post cosecha.

	Simulaciones		
	Mejor hidrología	Mejor sedimentos	Simulación final
R ²	0,8	0,62	0,78
NSE	0,75	-1,04	0,75
PBIAS (%)	2,32	-1,75	0,05

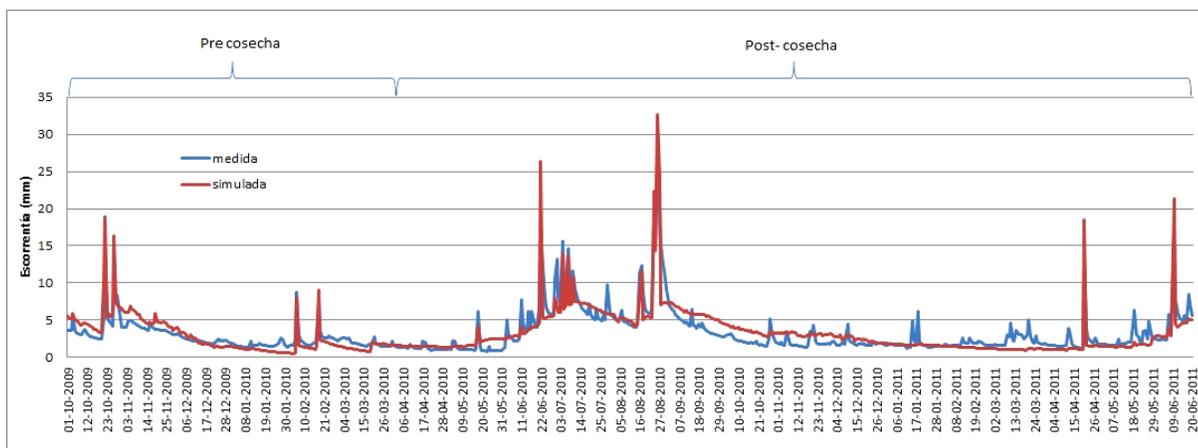


Figura 6. Escorrentía medida y simulada a nivel diario para el período de post cosecha con “Suelo desnudo” en LUT.

Verificación de la carga de sedimento en las simulaciones finales e identificación de las fuentes.

Para la cuenca Los Ulmos Control la cantidad de sedimento fino que se midió al final del período de estudio (21 meses) fue de 1,18 (T/ha) y el valor que generó SWAT en la “Simulación final” (mejor simulación en conjunto con la hidrología) fue de 1,84 (T/ha). Para el período de Pre-cosecha (primeros 6 meses de estudio) en la cuenca Los Ulmos Tratamiento, la carga de sedimento fino que fue medido en terreno fue de 0,309 (T/ha), lo que SWAT simuló un valor de 0,848 (T/ha), y para el período de Post-cosecha (15 meses) el valor medido fue de 2,196 (T/ha) y el valor generado por el modelo entregó un

valor de 1,505 (T/ha). Con respecto a las fuentes de sedimentos, SWAT solo determina cuanta carga de sedimento proviene de una sub cuenca, que a la vez es una unidad de respuesta hidrológica (HRU), por lo tanto, cada sub cuenca será una zona de aporte. En este estudio la cuenca mayor tiene una superficie de 0,19 km² con un único curso de agua, contrastándose con otras cuencas a nivel mundial simuladas por SWAT mayores a 100 km², lo que impide subdividir la cuenca y generar más de una HRU, convirtiéndose la red hídrica como el único productor identificable de sedimentos.

DISCUSIÓN

En cuencas pequeñas, los micro deslizamientos en la red de caminos pueden generar cargas importantes no atribuibles a la condición de cubierta vegetal, lo que podría explicar la sobreestimación en Los Ulmos Control y en Los Ulmos Tratamiento en el período de pre cosecha. En la cuenca Los Ulmos Tratamiento, se observa que en el período de post cosecha, la carga de sedimento fino simulado por SWAT resulta menor a lo que se esperaba, lo que en teoría en un escenario en condición de “suelo desnudo” se espera que la escorrentía sea mayor a un escenario con cobertura vegetal (sin intervención) a lo que el arrastre y la producción de sedimentos provenientes de laderas forestales también aumenten. Esto se explica con el cambio de los valores de parámetros de Curva numérica (CN = 55 a 40) y del Factor práctica de apoyo de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE_P = 0,6 a 0,9) de pre cosecha a post cosecha respectivamente, el valor de CN es menor en el período de post cosecha el cual debe ser mayor, pero de ese modo el flujo base logra niveles casi nulos a lo largo de la simulación. Esto indica que el tamaño de la cuenca y el tipo de suelo podrían ser los factores que influyen en los resultados dispares entre los medidos y los generados por SWAT.

CONCLUSIONES

La herramienta de evaluación de suelo y agua (SWAT) permitió simular satisfactoriamente la escorrentía en Los Ulmos Control (0,19 km²) y en Los Ulmos Tratamiento (0,08 km²) puesto que SWAT fue desarrollado para simular la producción de agua en cuencas de gran tamaño superior a los 100 km².

Los parámetros de SWAT correspondientes al tipo de suelo, como la Conductividad hidráulica (SOL_K) y el Número de curva (CN), fueron los más determinantes en el período de calibración para lograr el mejor ajuste estadístico entre los valores de escorrentía simulados y medidos.

Aunque SWAT no tiene la opción por defecto de simular un terreno cosechado a tala rasa, la modificación de los parámetros para representar la condición de “Suelo desnudo” permitió una buena simulación a nivel hidrológico (escorrentía) pero no muy precisa en el transporte de sedimentos.

SWAT puede simular la carga de sedimento fino entregando valores cercanos a los medidos modificando el parámetro USLE_P, que resultó determinante en los períodos de calibración. Las técnicas usadas en los procedimientos para la medición de sedimentos finos son sensibles y vulnerables, dependiendo quién las realice, lo que dificulta una comparación fehaciente con los valores simulados.

El modelo no logra identificar fuentes de sedimento fino más que la red hídrica donde ocurren los procesos erosivos más importantes de la cuenca.

A pesar de las limitantes tales como información meteorológica, base de datos de tipo y cobertura de suelo, terminología y tecnicismos norteamericanos utilizados por el USDA, los cuales son necesarios para la ejecución de SWAT, se logró elaborar una base de datos con la información necesaria para ser utilizada mediante el modelo para simular escorrentías y transporte de sedimentos en otras cuencas cercanas al área de estudio, ahorrando recursos financieros y tiempo, para futuros estudios hidrológicos en la región.

REFERENCIAS

- Amatya, D., M. Jha. 2011. Evaluating the SWAT Model for a Low-Gradient Forested Watershed in Coastal South Carolina. *ASABE* 54(6): 2151-2163.
- Anuario Climatológico 2009. Dirección General de Aeronáutica Civil Dirección meteorológica de Chile. Sub departamento Climatología y Met. Aplicada. Estación Central. Santiago.
- Anuario Climatológico 2010. Dirección General de Aeronáutica Civil Dirección meteorológica de Chile. Sub departamento Climatología y Met. Aplicada. Estación Central. Santiago.
- Anuario Climatológico 2011. Dirección General de Aeronáutica Civil Dirección meteorológica de Chile. Sub departamento Climatología y Met. Aplicada. Estación Central. Santiago.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development. *J. American Water Resour. Assoc.* 34(1): 73-89.
- Bingner R. L. 1996. Runoff simulated from Goodwin Creek watershed using SWAT. *Trans. ASAE* 39(1): 85-90.

- Casanova M. P., O. Salazar G., O. Seguel S., V. Nogueira A. 2009. Conductividad hidráulica en monolitos de suelo de Chile central. Departamento de Ingeniería y Suelos. Facultad de ciencias agronómicas. Universidad de Chile.
- Fuenzalida, H., 1971. Climatología de Chile, en: CORFO (Ed.), Geografía Económica de Chile. Imprenta Universitaria, pp. 99–152.
- Guo H., Q. Hu., T. Jiang. 2008. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake Basin, China. *Journal of Hydrology* 355: 106-122.
- Huber, A., 1970. Diez años de observaciones climatológicas en la estación Teja-Valdivia (Chile) 1960-1970. Reporte Técnico. Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. Instituto de Geología y Geografía.
- Huber, A., Iroumé, A., Mohr, C., Frêne, C., 2010. Efecto de plantaciones de pinus radiata y eucalyptus globulus sobre el recurso agua en la cordillera de la costa de la región del biobío, Chile. *Bosque* 31: 219–230.
- Iroume, A., H. Palacios. 2013. Afforestation and changes in forest composition affect runoff in large river basins with pluvial regime and Mediterranean climate, Chile. *Journal of Hydrology* 505: 113-125.
- Khanal S., B. Parajuli. 2013. Evaluating the Impacts of Forest Clear Cutting on Water and Sediment Yields Using SWAT in Mississippi. *Journal of Water Resource and Protection* 5: 474-483.
- Luzio, M. D., R. Srinivasan, J. R. Arnold, and S. L. Neitsch. 2002. ArcView Interface for SWAT2000: User's Guide. College Station, Tex.: USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory, and Blackland Research and Extension Center. Disponible en: www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swatav2000.pdf.
- Ourng C., S. Sauvage, J.M. Sanchez-Perez. 2011. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology* 401: 145-153.
- Palacios, H., 2014. Comunicación personal.
- Pandey A., V.M. Chowdary, B.C. Mal, M. Billib. 2007. Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model. *Journal of Hydrology* 348: 305-319
- Peterson J.R., J.M. Hamlett. 1998. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. *Journal of the American Water Resources Association* 34(3): 531-544.
- Rosenthal W. D., R. Srinivasan, J.G. Arnold. 1995. Alternative river management using a linked GIS-

hydrology model. *Trans. ASAE* 38(3): 783-790.

Sharpley, A. N. and J. R. Williams, eds. 1990. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.

Van Liew, M. W., T. L. Veith, D. D. Bosch, and J. G. Arnold. 2007. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS experimental watersheds. *J. Hydrologic Eng.* 12(2): 173-189.

Wu, K., and Y. J. Xu. 2006. Evaluation of the applicability of the SWAT model for coastal watersheds in southeastern Louisiana. *J. American Water Resour. Assoc.* 42(5): 1247-1260.