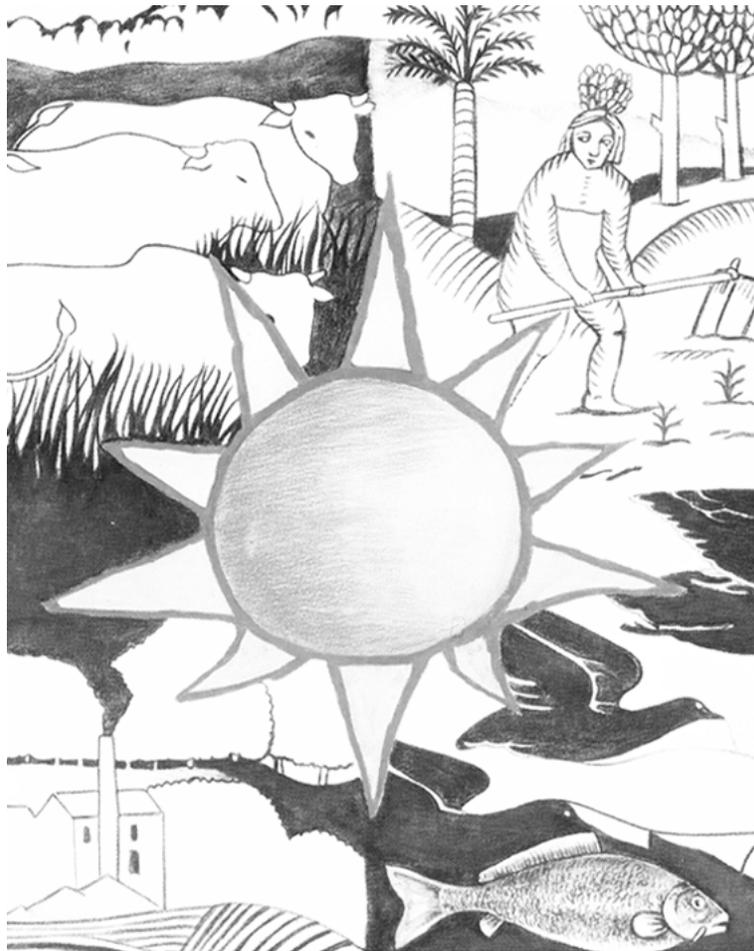


VULNERABILIDAD DEL RECURSO HIDRICO RESPECTO A ACTIVIDADES AGRICOLAS EN DIFERENTES SUBCUENCAS DEL RIO LIMARÍ

Vulnerability of water resources as to agricultural activities in different subbasin of the Limarí river

Jorge Espinosa¹, Hamil Uribe², José Arumí¹, Diego Rivera¹ & Alejandra Stehr³



¹Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chile. Correo electrónico: jorgeespinosa@udec.cl. ²Departamento de Recursos Naturales, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Chile. ³Centro de Ciencias Ambientales EULA-CHILE, Universidad de Concepción, Chile.

RESUMEN

La cuenca del río Limarí ha experimentado un constante incremento en la superficie de producción agrícola, lo que ha ocasionado alteraciones en el comportamiento de la oferta y demanda de los recursos hídricos. Además, esta cuenca se ve fuertemente afectada por la variabilidad climática (interanual y decadal) y cambio climático. Para diseñar e implementar medidas que hagan frente a estos cambios, clima y superficie agrícola, es necesario el uso de herramientas de modelación. El objetivo de este trabajo es analizar la vulnerabilidad en la respuesta hidrológica de 7 subcuencas frente a un escenario de incremento en la superficie agrícola, utilizando el modelo hidrológico SWAT. Los resultados muestran un desempeño aceptable del modelo hidrológico lo que permite señalar que las diferentes subcuencas presentan vulnerabilidad moderada a media ante el incremento de la superficie de cultivo. La condición de vulnerabilidad frente a un aumento del 15% en la superficie agrícola es variable en espacio y tiempo, en dependencia a las condiciones de oferta y demanda de agua. Desde el punto de vista del manejo de los recursos hídricos, dado los resultados muestran que la vulnerabilidad puede verse incrementada en los diferentes años con déficit hídrico mayores, es necesario avanzar en la generación de medidas de adaptación y mitigación que hagan frente a la variabilidad climática.

Palabras Claves: SWAT, balance hídrico, escenarios de cambio, evapotranspiración.

ABSTRACT

The watershed Limarí river has experimented a constant increment in surface of agricultural production, which has caused to changes in the behavior of supply and demand of water resources. In addition, this watershed is strongly affected by climate variability and climate change. To design and implement measures that face these changes, climate and agriculture surface, it is necessary to use modeling tools. The objective of this research is to analyze the vulnerability in watershed hydrological response of seven (7) sub watershed front against a backdrop of increased agricultural area, using the SWAT hydrological model. The results show acceptable performance of the hydrological model such as determine that different sub-basins show moderate to medium vulnerability to rising acreage. The condition of vulnerability to an increase of 15% in the agricultural area is variable in space and time, depending on the conditions of supply and demand for water. From the viewpoint of water resource management, since the results show that the vulnerability can be increased in different years with higher water deficit, it is necessary to advance the generation of adaptation and mitigation measures that face the climate variability.

Key words: SWAT, water balance, change scenarios, evapotranspiration.

INTRODUCCIÓN

La gestión de los recursos hídricos en zonas áridas y semiáridas es de suma importancia, dado que la escasez de agua puede causar desequilibrio entre los procesos biofísicos y sociales. Por lo anterior es necesario evaluar y cuantificar estas alteraciones para determinar la vulnerabilidad del sistema, vinculado al medio ambiente, hábitat de flora y fauna, aspectos socio-culturales y las posibilidades de interacción entre ellos (FAO 2005).

El concepto de vulnerabilidad se define actualmente como «la condición en la cual los asentamientos humanos o actividades antrópicas se encuentran en peligro, en virtud de su proximidad a una amenaza o exposición a un evento de riesgo (fenómeno natural)». Por esta razón reducir la «vulnerabilidad» implica reducir el «riesgo» y reducir el «riesgo» implica reducir la probabilidad de posibles «desastres» (FAO 2005). Por otra parte, instituciones como el Departamento de Asuntos Humanitarios de las Naciones Unidas (DHA por sus siglas en inglés) consideran la vulnerabilidad de un sistema con el grado de pérdida (de 0% a 100%) resultado de un fenómeno potencialmente dañino (DHA 1992).

Así, la vulnerabilidad está determinada por la habilidad de un sistema para anticiparse, resistir y recobrase de un evento específico. Varios estudios de vulnerabilidad, advierten los efectos de la escases de agua en sistemas frágiles y sus consecuencias en el ciclo hidrológico (Vicuña et al. 2008, AEET 2008, Ravindranath et al. 2011, Mikko et al. 2005, Secunda et al. 1998, Takeuchi 2009). También se hace referencia a las consecuencias del crecimiento urbano no planificado y de la expansión de la frontera agrícola sobre el uso de los recursos hídricos y su consecuencia en un modelo de desarrollo ecológicamente insostenible (Pérez-Carrera et al. 2010).

El sistema hidrográfico formado por el río Limarí y sus afluentes es el más importante del Norte Chico desde el punto de vista agrícola, pues sus aguas riegan más de 70.000 ha, incluyendo aquellas que se sirven de los embalses La Paloma, Cogotí y Recoleta (DGA 2004). Esta cuenca forma el sistema interconectado de embalses más grande de Chile, permitiendo una adecuada regulación y manejo del recurso hídrico. Como resultado de su operación se tiene un desarrollo económico con vocación exportadora lo cual tiende a provocar un desequilibrio entre la oferta y la demanda del agua por su incremento en la superficie de producción, lo que atenta contra la sostenibilidad del sistema (Ferrando 2002).

Esta realidad se ve reflejada en el catastro frutícola efectuado en la región de Coquimbo, en el año 2005 por el Centro de Información de Recursos Naturales, donde indica que existen 21.462 hectáreas de cultivo frutícola para ese año lo que significa un incremento del 51,7% respecto a la última medición ejecutada el año 1999 (CIREN 2005).

En la actualidad se pueden encontrar varios estudios de cambio climático aplicados a la cuenca del río Limarí, respecto a la disponibilidad del agua para consumo, considerando diferentes escenarios de temperatura, precipitación y emisión de gases, los que intentan explicar cuáles serían los cambios futuros y de acuerdo a estos, las medidas de adaptación que se deberían aplicar para evitar riesgos y desastres, además de cuantificar la vulnerabilidad del sistema (DGA 2004, Alfaro et al. 2002, Vicuña et al. 2008, Parga 2002).

Dado el incremento constante del área de cultivo y la importancia económica que representa la cuenca del río Limarí el objetivo de este estudio es cuantificar la vulnerabilidad del recurso hídrico en siete subcuencas de la cuenca del río Limarí mediante la modelación

hidrológica, considerando como escenario futuro el incremento de la superficie agrícola en un 15%.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca del río Limarí (Fig. 1), ubicada en la Región de Coquimbo, se extiende aproximadamente entre los 30° 15' y 31° 20' de latitud sur y abarca una superficie

aproximada de 11.800 km². La cuenca está conformada por la unión de los ríos Grande y Hurtado, los cuales nacen en partes de la cordillera donde las cumbres alcanzan en promedio hasta los 4500 m y reciben una abundante precipitación nival, que puede ir desde los 300 a más de 650 mm promedio anual (MOP 2004). La cuenca tiene un régimen pluvio-nival en el semestre de abril-septiembre y el aporte durante el resto del año está dado por el flujo base y los deshielos producidos en las subcuencas altas, sin determinarse aun la proporción relativa de estos componentes.

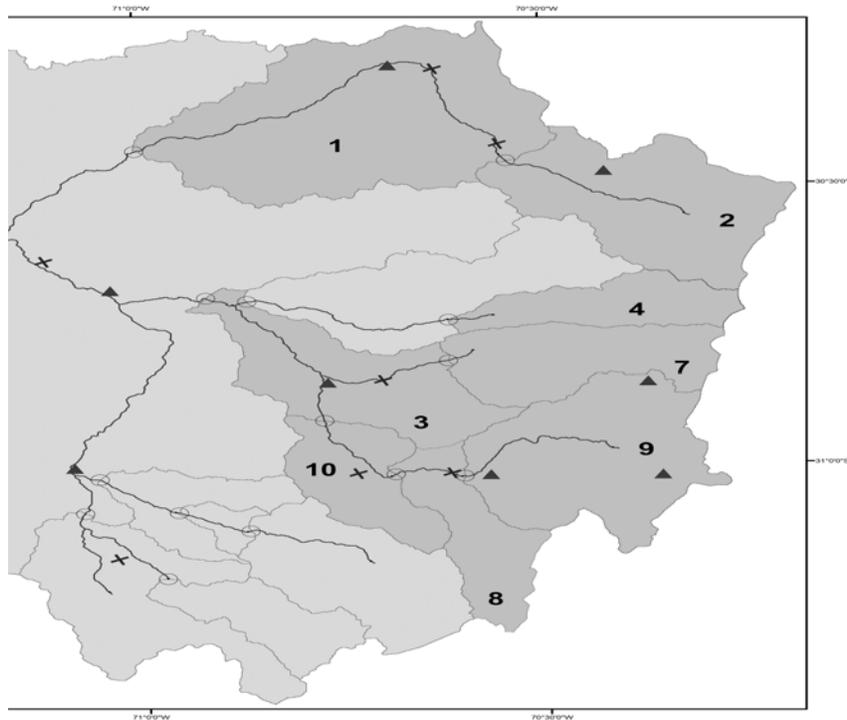


FIGURA 1. UBICACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL LIMARÍ CON LAS SUBCUENCAS EN ESTUDIO.

Location the watershed Limarí river and it's subbasins.

El río Hurtado constituye el único y gran dren de la parte norte de la cuenca del Limarí. En su curso inferior se encuentra embalse Recoleta, con capacidad útil de 100 millones de m³. El río Grande recibe una serie de afluentes, entre los cuales cabe mencionar el río Rapel, río Mostazal y el río Guatulame. El escurrimiento del Guatulame está regulado por el embalse Cogotí de 150 millones de m³ de capacidad y en la confluencia del río Guatulame con el río Grande se encuentra el embalse la Paloma con un volumen de regulación de 750 millones de m³. A partir de la confluencia de ambos toma el nombre de río Limarí, el que luego de recorrer alrededor de 60 km desemboca al mar en la localidad denominada Punta Limarí (MOP 2004).

El principal uso consuntivo del agua en la cuenca del Limarí es el riego, con aproximadamente 7.398 usuarios del agua, los cuales administrativamente conforman 647 organizaciones (633 Comunidades de agua, ocho Juntas de Vigilancia y seis Asociaciones de Canalistas) que tienen por objetivo tomar las aguas del canal matriz y repartirlas entre los usuarios titulares de los derechos, además de construir, explorar y conservar el recurso hídrico (León et al. 2006). La demanda de riego en la cuenca correspondiente al año 1997 fue de 724 millones de m³/año, considerando una asignación única de derechos de agua de 1 l/s para una hectárea por usuario. Considerando que en el futuro se proyecta un aumento en la tecnología y eficiencia de los sistemas de riego de frutales y viñas pisqueras se puede estimar que para el año 2017 la demanda alcanzaría los 747 millones de m³/año (DGA 2005).

Entre los cultivos frutícolas encontrados destacan por la superficie de cultivo el almendro (*Prunus amygdalus*), cítricos (*Citrus spp.*), nogal (*Juglans Regia*), vid (*Vitis niniifera*), durazno (*Prunus pérsica*), olivo (*Olea europea*) y palta (*Persea americana*).

Metodología

En la cuenca del Limarí, la Dirección General de Aguas (DGA) posee una red de monitoreo hidrometeorológico compuesto por: precipitación (12 estaciones), temperatura (10 estaciones) y fluviometría (15 estaciones), cuya la ubicación se presenta en la Fig. 1. Luego de ser evaluada la información disponible se estableció como periodo de análisis los años 1978 a 2008, pues este periodo de tiempo posee la mayor calidad de información y periodos comunes para las variables antes mencionadas.

La información de series de suelos abarca un 25 % del área total, por lo que se generó, los tipos de suelo para el área faltante a partir de información base como es la geomorfología de suelos, modelo digital de terreno SRTM 90M versión 4.1 (CGIAR 2011), el Estudio Agrologico para la IV Región (CIREN 1997) y el estudio frutícola realizado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN 2005).

El modelo SWAT

Basado en el clima, las características topográficas de la cuenca del río Limarí y la disponibilidad de datos de ingreso, se optó por la utilización de un modelo semidistribuido, que permite analizar los componentes del ciclo hidrológico a nivel de subcuencas. Para este propósito, SWAT es un modelo adecuado, dado que fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA) para evaluar el impacto del uso de la tierra y el clima en el balance hídrico y ha sido ampliamente usado y validado en varias escalas espacio-temporales (Hernández et al. 2000, Stehr et al. 2008, Stehr et al. 2009, Stehr et al. 2010a, Stehr et al. 2010b, Abu El-Nasr et al. 2005, Eckhardt 2005, Gosain et al. 2005, Govender

& Everson 2005, Cao et al. 2006, Tripathi et al. 2006). Por otra parte (Muttiah & Wurbs 2002) usaron y validaron SWAT en regiones de clima semiárido.

La documentación teórica del modelo aplicado en detalle se podrá encontrar en la guía de usuario versión 2005 (Neitsch et al. 2005^a, 2005^b), incluyendo, documentación sobre los parámetros. La guía de uso de la interface gráfica se encuentra en Winchell et al. (2010).

SWAT es un modelo semidistribuido, físicamente basado, que incluye procesos como escorrentía, flujo lateral, cobertura nival, infiltración, entre otros (Chaponniere et al. 2007). Como principio de cálculo considera la conservación de la masa (balance de agua, sedimentos y contaminantes) a escala diaria (Samper 2008). El modelo se basa en la ecuación general de balance hídrico

$$SW_t = SW_o + \sum_i^t (R_{dias} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

donde SW_t es el contenido de agua final (mm), SW_o el contenido inicial de agua, R_{dias} la Precipitación, Q_{surf} es la escorrentía superficial, E_a es la evapotranspiración, W_{seep} es el agua almacenada en el suelo no saturado y Q_{gw} es el flujo base.

La subdivisión de la cuenca contempla la posibilidad de dividirla en subcuencas y éstas a su vez en Unidades de Respuesta Hidrológicas (HRU), que son zonas de parámetros homogéneos, en cuanto a tipos de suelo, usos de suelo y pendientes, permitiendo al modelo reflejar diferencias en la evapotranspiración por tipos de suelos y cultivos, la escorrentía superficial calculada mediante el método de Curva Número, los sedimentos y los nutrientes transportados. Cada parámetro es calculado por separado en cada HRU y son sumados para obtener el total de la cuenca (Neitsch et al. 2005).

Taxonomía de suelos

Para la definición de fases o variaciones de suelos se utilizan parámetros que se encuentran separados en rangos: Profundidad del suelo, textura superficial, topografía, pedregosidad, rocosidad superficial, erosión, clases de drenaje, inundación, alcalinidad, salinidad. El criterio de clasificación se obtuvo del estudio agrológico de la IV región (CIREN 1997).

Generación de geomorfología de suelos

La geomorfología es el estudio de las formas de superficie terrestre y tiene por objeto clasificar y explicar todas las formas de relieve (Villota 1991). Permite conocer la pendiente (Tabla 1), dentro del espacio geográfico, lo que determina que existan áreas con similares potencialidades y se las pueda dotar de igual manejo (Moreno 2001). El criterio de clasificación de pendientes simples se obtuvo

Clase	Descripción	Rango (%)
1	Plano a casi plano	0-1
2	Suave o ligeramente inclinado	1-3
3	Moderadamente inclinado	3-8
4	Fuertemente inclinado	8-15
5	Moderadamente escarpado	15-25
6	Escarpado	25-45
7	Muy escarpado	> a 45

TABLA 1. CLASE, RANGO Y DESCRIPCIÓN DE PENDIENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Class, rank and description of the study area slopes.

del estudio agrológico de la IV región (CIREN 1997).

Calibración y validación de la modelación hidrológica

La calibración del modelo consistió en ajustar los datos observados y simulados, mediante el cambio de los parámetros de mayor influencia: flujo lateral, agua subterránea, escorrentía superficial y balance de agua (Van Grienseven et al. 2006, Galván 2007).

La validación consistió en medir la capacidad predictiva del modelo mediante la comparación de caudales calculados y observados en un periodo diferente al de la calibración (Wagener et al. 2004).

El desempeño del modelo fue evaluado mediante los índices de Nash-Sutcliffe, Gupta-Kling y el coeficiente de determinación de Pearson's. El coeficiente de eficiencia (Nash & Sutcliffe 1970) determina la eficiencia del modelo, como la relación entre varianza del flujo observado y la varianza del error de la simulación. La mejor simulación se encuentra cuando el valor es 1. El coeficiente de eficiencia de Gupta-Kling es la modificación del coeficiente Nash-Sutcliffe (Gupta et al. 2009) que busca reducir los problemas en flujos altos. El coeficiente de determinación de Pearson's, es una medida que abarca la relación al cuadrado de la dispersión combinada de dos series punto a punto (Akaike 1974).

Los eventos de lluvia y caudales son representativos en toda la cuenca. La Dirección Meteorológica de Chile menciona en sus publicaciones en línea que en el siglo XX, los eventos de El Niño se presentan en los años 1976, 1982 y 1986, con una precipitación deficitaria en un 33% y en los años 1992 y 1997 la precipitación es superior a la normal en un 27% (Escobar & Aceituno 1998). Por este antecedente la calibración y

validación del modelo se realizó en el periodo 1985-1992 siendo los cuatro primeros años el periodo de calibración (1985-1988) y la validación en los 4 años siguientes (1989-1992).

Generación de escenarios

En el periodo 1962- 1998, la mayor parte del crecimiento en la producción agrícola se debió a la revolución verde. En los países desarrollados se espera mantener este incremento asociado al aumento de la productividad (69%), intensidad del cultivo (12%) y aumento de aéreas de cultivos (19%). La mayor parte de la producción agrícola será en áreas regadas donde tres cuartas partes se encontrarán en países en vías de desarrollo.

Durante el periodo mencionado el regadío creció a nivel mundial un 2 % anual, resultando durante de ese periodo un incremento de 100 millones de hectáreas, lo que indica que el área de riego se duplicó. Este ritmo de crecimiento de las áreas de producción agrícola no continuaría por variadas razones. La mayoría de analistas estiman que la tasa de incremento será mucho menor. En efecto, en el periodo 1998-2030, la FAO determina que en ciertos países existirá un incremento 0,6 % de tasa anual, lo que representa aproximadamente un 23 % de incremento del área de riego con fines productivos para 47 países, entre ellos los países sudamericanos de la costa del Pacífico (FAO 2002).

En la cuenca del Limarí, cuando se constituyeron los derechos de agua en el año 1928, una acción correspondía a la cantidad de agua necesaria para regar un cultivo tipo en una superficie de una hectárea (actualmente una acción representa 1 l/s). A la fecha han ocurrido pocas transacciones de agua con derechos definitivos, especialmente porque el agua es escasa y tiene un alto costo. Sin embargo desde que el Código de Agua

(1981) fue aprobado han existido de parte de los pequeños agricultores y comuneros venta de sus derechos, (León et al. 2006) siendo el mercado de agua con derechos eventuales (periodo de 1 año) los que llegan a tener alta aceptación. Por esta razón se genera el traspaso de importantes volúmenes de agua entre las asociaciones, que pueden variar en un rango del 14% al 45% dependiendo de la temporada, siendo las mayores transacciones de agua en los periodos con déficit altos de agua, principalmente para los eventos La Niña (Vicuña et al. 2001).

De acuerdo al análisis sobre las demandas de agua para riego y su incremento según la superficie cultivada (FAO 2002), las condiciones sobre el mercado dinámico del agua que existe en la cuenca del Limarí (Domper 2009, Vicuña et al. 2001), el catastro frutícola (CIREN, 2005) y la sociabilización con expertos (comunicación personal, Ovidio Melo 2011) se plantea un escenario en el cual se incrementará la superficie de producción agrícola en un 15 % y se evaluará el efecto sobre los caudales anuales disponibles en las subcuencas.

Índices de Vulnerabilidad

Con el fin de evaluar el efecto entre la oferta hídrica y las condiciones de demanda para las distintas subcuencas y el escenario planteado, fueron calculados índices de vulnerabilidad (ecuación 2). Este índice compara la diferencia existente entre el caudal anual promedio histórico y el caudal anual promedio obtenido del escenario planteado en cada una de las subcuencas en estudio. La clasificación empleada para categorizar este índice se encuentra recomendado por la Organización de Naciones Unidas (IDEAM ONU MDGIF 2009), que es una adaptación de la metodología propuesta por el Instituto de Hidrología,

Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM 2008).

$$IV = \frac{(S-E)}{S} * 100$$

Donde, IV es el índice de vulnerabilidad; S es el valor de condición histórica con el que el modelo fue calibrado y validado; E son los valores de escorrentía obtenidos con el escenario de incremento de superficie agrícola.

El índice obtenido por subcuenca, representa la posición de cada área en función de la vulnerabilidad, los indicadores utilizados y su peso en la evaluación se los podrá identificar de acuerdo a la clasificación propuesta (Tabla 2).

RESULTADOS

Delimitación de subcuencas

Se delimitaron 15 subcuencas, de las cuales dada la disponibilidad de información se presentan resultados para 7 de ellas. Cabe mencionar que la delimitación de las subcuencas se realizó considerando las estaciones fluviométricas que existen la zona de estudio (Fig. 1 y Tabla 3).

Calibración y validación del modelo SWAT

Para evaluar el comportamiento del modelo en la fase de calibración y validación se utilizaron los test hidrológicos antes mencionados. La Tabla 4 muestra los valores obtenidos al aplicar los distintos índices estadísticos, mientras que la Fig. 2 presenta el análisis gráfico de las series de caudales observadas versus las simuladas. Se aprecia

Categoría	Porcentaje	Significado
Bajo	< 10%	No se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico, en términos de cantidad de agua
Moderado	10 - 20 %	La disponibilidad de agua se puede convertir en un factor limitador del desarrollo. Se debe implementar un mejor sistema de monitoreo, desarrollar proyecciones de recurso a corto y largo plazo
Medio	20 - 40%	La oferta hídrica llega al máximo para atender en forma adecuada la demanda hídrica. Es necesario el ordenamiento territorial de la cuenca e implementar corrección inmediata en la reglamentación de las corrientes y usos de agua. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos para que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia.
Alto	> 40%	Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima en intervenir y controlar la oferta y demanda. Es insuficiente la oferta hídrica para atender la demanda de agua por sectores productivos y se restringe el desarrollo económico. Se requiere fuerte inversión económica para mejorar la eficiencia del sistema en los sectores productivos y abastecimientos de agua potable.

TABLA 2. CATEGORÍAS DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD.

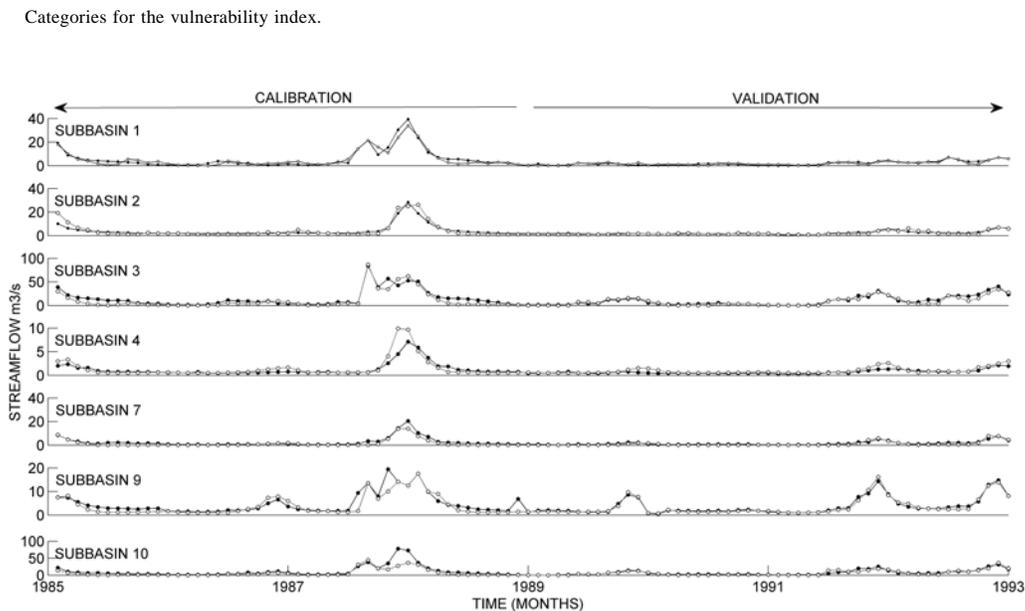


FIGURA 2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN (RESULTADOS MENSUALES) PARA LAS SUBCUENCAS DEL RÍO LIMARÍ.

Calibration and validation (monthly results) for the Limarí river basins.

Sub-Cuencas	Estación fluviométrica	Área (km ²)	Superficie cultivada (ha)
1	Río Hurtado en Angostura	1138,24	1528
2	Río Hurtado en San Agustí	6,15	150
3	Río Grande en San Juan	512,77	222
4	Molles Ojos de Agua	0,25	60
7	Río Mostazal en Cuestecita	391,73	631
9	Río Tascadero desembocadura	691.61	160
10	Río Grande en Ramadas	293,78	371

TABLA 3. SUBCUENCAS EN ESTUDIO DEL RÍO LIMARÍ CON SUS RESPECTIVAS ÁREAS DE CULTIVO.

Subbasins of the study the limarí river with their respective growing areas.

	Cuenca 1		Cuenca 2		Cuenca 3		Cuenca 4		Cuenca 7		Cuenca 9		Cuenca 10	
	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V	C	V
R ²	0,92	0,79	0,88	0,72	0,90	0,87	0,81	0,73	0,91	0,88	0,77	0,96	0,74	0,85
NASH	0,91	0,78	0,79	0,63	0,84	0,86	0,88	0,85	0,83	0,81	0,73	0,96	0,82	0,82
KGE	0,89	0,88	0,84	0,89	0,73	0,86	0,80	0,76	0,77	0,62	0,89	0,94	0,84	0,82

TABLA 4. INDICADORES ESTADÍSTICOS (CAUDALES MEDIOS MENSUALES) PARA LAS ETAPAS DE CALIBRACIÓN (C) Y VALIDACIÓN (V) PARA LAS DIFERENTES SUBCUENCAS DEL RÍO LIMARÍ.

Performance indicators for calibration (C) and validation (V) stages for different river basins Limarí.

la concordancia entre los caudales observados y los caudales simulados. Los resultados antes descritos indican un buen desempeño general del modelo en cada una de las subcuencas en estudio.

Para efectos de analizar el desempeño del modelo respecto a condiciones de variabilidad interanual, en la Fig. 3a se puede apreciar la bondad de ajuste entre los caudales observados y simulados para los trimestres de

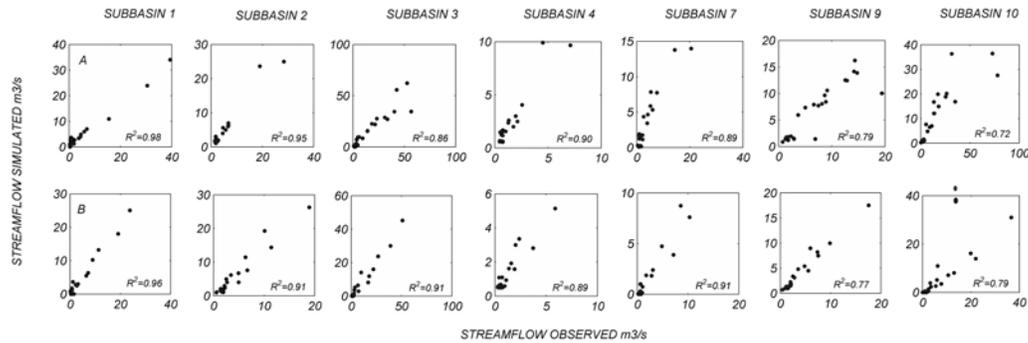


FIGURA 3. GRÁFICOS DE DISPERSIÓN PARA CAUDAL SIMULADO RESPECTO AL CAUDAL OBSERVADO EN SUBCUENCAS DEL RÍO LIMARÍ. (A) TRIMESTRE: OCTUBRE, NOVIEMBRE, DICIEMBRE. (B) TRIMESTRE: ENERO, FEBRERO, MARZO

Scatter plots for simulated flows (calibration and validation) against observed flows for the Limari's subbasins. (a) quarter: october, november, december. (b) quarter: january, february, march.

octubre- noviembre- diciembre y enero- febrero-marzo. La figura muestra que existe buena simulación de los caudales. Cabe mencionar que en esta temporada la demanda hídrica (evapotranspiración) incrementa progresivamente, ya que los diferentes cultivos en la zona, en su gran mayoría de hoja caduca, inician la temporada de producción a medida que aumenta el fotoperiodo o el incremento de la temperatura. El modelo tiene un mejor desempeño en el trimestre de estiaje o verano (Fig. 3b), incluso en condiciones de alto caudal y de variabilidad de la evapotranspiración, lo que favorece el uso del modelo como herramienta de análisis. Por otra parte, en ambos casos es posible observar que algunas cuencas tienen mejores indicadores de ajuste, sin un claro patrón espacial.

Se debe mencionar que en los trimestres que corresponden a otoño e invierno las demandas del recurso hídrico bajan, la evapotranspiración disminuye paulatinamente ya que las especies vegetales comienzan su etapa de dormancia predictiva que tiende a

estar íntimamente relacionada con las condiciones ambientales y ocurre cuando un organismo entra en la fase de dormancia antes de la llegada de las condiciones adversas (invierno). Sin embargo, la finalidad de esta investigación es la evaluación del modelo en el periodo de primavera y verano, ya que su buen funcionamiento dará una clara visión sobre las demandas de agua que ocurren en este periodo.

Análisis de vulnerabilidad

En la Fig. 4, se puede observar la categorización de vulnerabilidad promedio para el periodo 1981-2008, para las diferentes subcuencas del río Limarí. Se observa que la mayoría de las subcuencas presenta una vulnerabilidad Moderada, mientras que las subcuencas 4 y 7, ubicadas en la parte alta de la cuenca, presentan vulnerabilidad Media

Sin embargo, dado la alta variabilidad interanual de las precipitaciones, es necesario

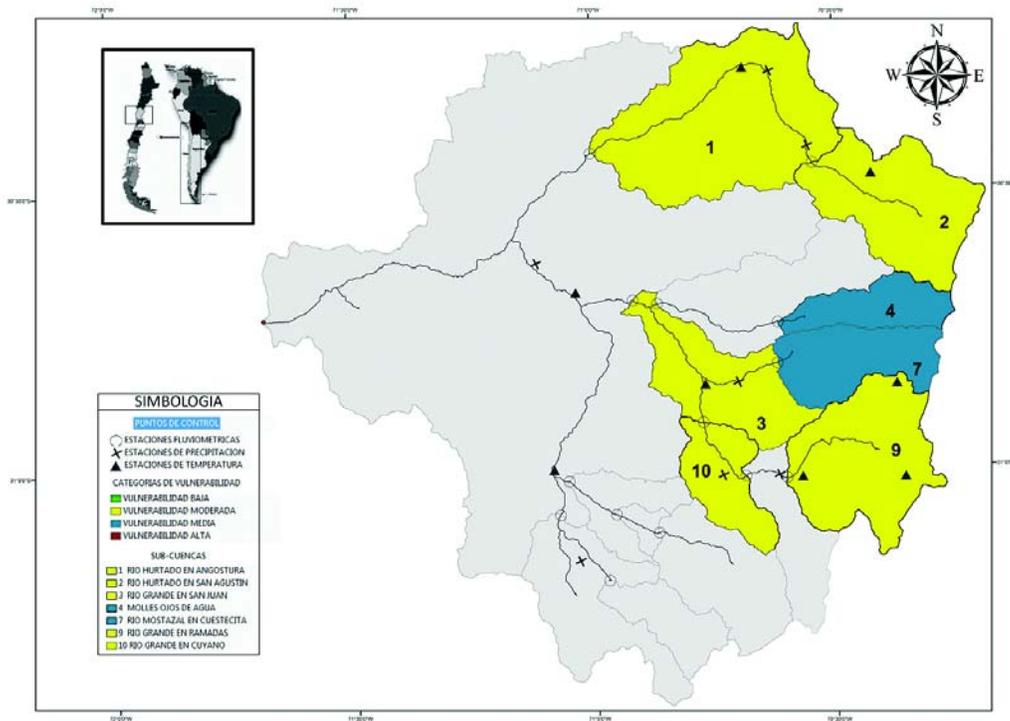


FIGURA 4. VULNERABILIDAD PROMEDIO PARA LAS DIFERENTES SUBCUENCAS EN ESTUDIO DEL RÍO LIMARÍ

Average vulnerability for the different river basins of the Limarí.

analizar la evolución temporal de la vulnerabilidad. Para ello, la Fig. 5 muestra la evolución anual de los índices de vulnerabilidad para el escenario planteado en cada una de las subcuencas en estudio. En la figura se se pueden apreciar que los índices de vulnerabilidad incrementan en los años donde existe déficit del recurso hídrico, el periodo evaluado corresponde a 1981-2008.

DISCUSIÓN

La vulnerabilidad del recurso hídrico ante la presión de incremento de superficie en las diferentes subcuencas, es variable en el tiempo (Fig. 5) y está íntimamente relacionado a la

presencia de años secos y húmedos. En efecto, la demanda de agua tiene un comportamiento que puede considerarse monótonicamente creciente, mientras que la oferta de agua tiene un comportamiento cíclico. Por lo anterior, se tendrán periodos de déficit en los cuales la oferta no satisfará la demanda. En concordancia, el índice de vulnerabilidad se puede incrementar como respuesta a un año seco o verse mermado ante la presencia de un año húmedo. Frente a estas condiciones, el mercado de agua que puede variar en los volúmenes de traspaso de agua entre las asociaciones de canalistas en un rango del 14% al 40% en periodos secos lo cual es considerado como una medida estratégica de adaptación.

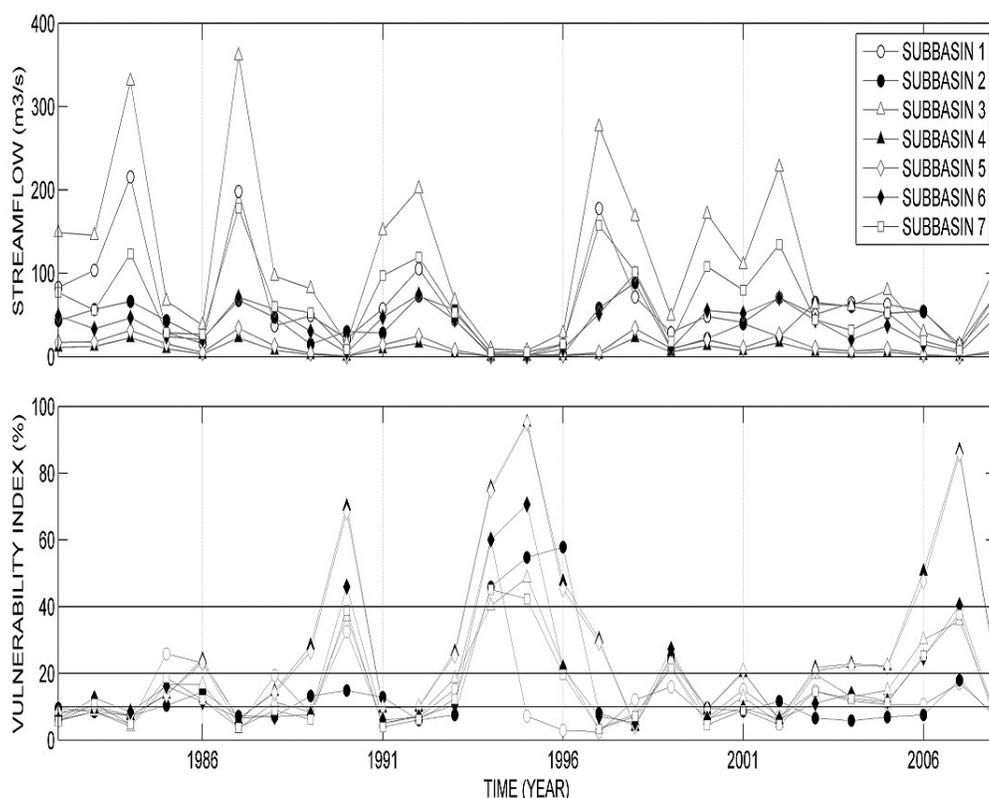


FIGURA 5. (a) CAUDAL PROMEDIO ANUAL EN LOS DISTINTOS AÑOS PARA LAS DIFERENTES SUBCUENCAS EN ESTUDIO, (b) ÍNDICES DE VULNERABILIDAD EN LOS DISTINTOS AÑOS PARA LAS SUBCUENCAS EN ESTUDIO DEL RIO LIMARÍ.

(a) Average annual flow in different years for different subbasins in study, (b) index of vulnerability in different years for the Limarí river subbasins under study.

En la Fig. 4 se puede apreciar que las diferentes cuencas se encuentran en una situación de vulnerabilidad ante la presión del incremento de la superficie agrícola. Las subcuencas 4 y 7 se encuentran en una categoría media, i.e. la oferta hídrica definitivamente tiene problemas para satisfacer a la demanda y es necesario realizar correcciones inmediatas de uso de agua. Las subcuencas 1, 2, 3, 9 y 10 se clasifican como vulnerabilidad moderada donde la disponibilidad del recurso hídrico se puede

convertir en un factor limitador del desarrollo sea de tipo humano o productivo. Por esta razón si se asume que la variabilidad climática durante el periodo 1999-2008 se mantendría similar al periodo 2009-2020 con el incremento de superficie agrícola en un 15%, algunas modalidades de producción y desarrollo tienen el potencial de aumentar la vulnerabilidad. Por esta razón se necesitan medidas de corrección para que el desarrollo sostenible pueda contribuir a reducir esa vulnerabilidad. Sin

embargo, es importante señalar que el tiempo de adaptación de un sistema a nuevas condiciones será mayor si las medidas de corrección son pausadas, la rapidez con que el sistema pueda reaccionar, puede considerarse como una medida de capacidad adaptativa, un caso extremo se considera cuando el sistema no puede adaptarse o las medidas correctivas tardaron mucho tiempo, por lo cual todo el sistema tenga que cambiar o definitivamente extinguirse (Conde 2003).

En general la cuenca del Limarí es vulnerable a los posibles incrementos de superficie cultivada y está afectada en mayor grado por la variabilidad del clima, que puede forzar la oferta de agua con la demanda existente.

El modelo SWAT constituye una buena herramienta para predecir el comportamiento de caudales. En efecto, Stehr et al. (2010) y Stehr (2008) muestran que este modelo es aplicable a las condiciones de cuencas chilenas de montaña. Sin embargo, la calidad de las simulaciones está afectada por la calidad de los datos. Así, la incertidumbre en los resultados puede ser disminuida en medida de que se mejore la calidad de los datos en la información de partida. En el caso de la aplicación en la cuenca del Limarí, los datos de suelo presentaron una baja cobertura espacial, por lo cual fue necesario completar esta información. Sin embargo, las pruebas de sensibilidad mostraron que los resultados, y conclusiones, no se ven mayormente afectados por cambios en la completación de los datos de suelo. Lo anterior se explica en el hecho que la variabilidad de propiedades del suelo a escala regional tiene una variación suave y potencialmente predecible. De esta manera, las principales fuentes de incerteza serían las series de datos meteorológicas y la parametrización del modelo.

Es relevante recordar que la información climática es el principal forzante en el modelo

hidrológico (Hattermann et al. 2005), por lo que se recomienda instalar estaciones meteorológicas en la parte alta de la cuenca es decir sobre los 2500 m para obtener información sobre temperatura, precipitación, heliofanía, velocidad de viento (Fontaine et al. 2002). Es necesario mencionar que la cuenca depende netamente del aporte nival por esta razón si existe un mejor control de información sobre la cuenca existirá una visión más amplia sobre lo que sucede en sus diferentes procesos hidrológicos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con respecto a los impactos hidrológicos producidos por el escenario formulado de acuerdo al constante aumento en la superficie de cultivo, evidenciado en el transcurso del tiempo en la cuenca de Limarí, con la aplicación del modelo semidistribuido SWAT calibrado y validado para las diferentes subcuencas, indican que existe vulnerabilidad ante la presión de incremento del área de cultivo y se puede evidenciar en términos de reducción de los caudales para satisfacer las demandas del recurso hídrico que puede estar asociada al incremento de la evapotranspiración, en la etapa de producción de los diferentes cultivos que se desarrollan en estas áreas.

Por tanto, se requiere establecer estrategias de adaptación que permitan continuar el desarrollo de cultivos. Se destaca la importancia del riego y la necesidad de mejorar la eficiencia de los usos del agua entre los requisitos para disminuir la vulnerabilidad a los eventos extremos más frecuentes.

En este estudio se presentó a la vulnerabilidad como un enfoque que permite a entender y definir este concepto como la adaptación que debe tener el sistema; sin embargo, al momento de diseñar medidas o

estrategias de adaptación, se debe tener en cuenta que en su aplicabilidad, influirán distintos factores como conflictos de intereses, así como también diferentes o contradictorias visiones o aspiraciones a futuro lo cual influirá directamente sobre el tiempo de reacción del sistema ante condiciones adversas.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se realizó en el marco del proyecto «Evaluación de los Cambios en la Productividad del Agua frente a Diferentes Escenarios Climáticos en Distintas Regiones del Cono Sur» el cual es financiado por el FONTAGRO Y PROCISUR, se quiere dar especial reconocimiento a las personas del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias sede Quilamapu, así como a todas las personas que colaboraron de una forma u otra y no hayan sido mencionados explícitamente. D. Rivera agradece el aporte financiero de FONDECYT a través del proyecto FONDECYT de Iniciación 10090032.

LITERATURA CITADA

- ABU EL-NASR A, J ARNOLD , J FEYEN & J BERLAMONT (2005) Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrological Processes* 19: 573-587.
- AEET (2002) Asociación española de ecología terrestre, tierras secas, desertificación y recursos hídricos. *Ecosistemas* 17: 1-4.
- AKAIKE H (1974) A new look at the statistical model identification *IEEE. Transactions on Automotive Control* 19: 716-723.
- ALFARO C & C HONORES (2002) Análisis de la disponibilidad del recurso hídrico superficial en los cauces controlados de las cuencas de los ríos Elqui, Limarí y Choapa. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Obras Civiles. Facultad de Ingeniería, Universidad de La Serena. La Serena. 105 pp.
- ARNOLD J & PALLEN (1999) Automated methods for estimating base flow and ground water recharge from stream flow records. *Journal of American Water Resources Association* 35(2): 411-424.
- ARNOLD J, R SRINIVASAN, R MUTTIAH & J WILLIAMS (2007) Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model Application. *Journal of the American Water Resources Association* 73-89.
- CÁCERES D, G SOTO, F SILVETTI & C BISIO (2010) La expansión de la agricultura industrial en Argentina Central. Su impacto en las estrategias campesinas. *Cuadernos de Desarrollo Rural* 7: 91-119.
- CAO W, WB BOWDEN, T DAVIE & A FENEMOR (2006) Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrological Processes* 20: 1057-1073.
- CGIAR [en línea] The consortium for Spatial Information CGIAR- CSI <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- CHAPONNIERE A, G BOULET, A CHEHBOUNI & M ARESMOUK (2007) Understanding hydrological processes with scarce data in mountain environment. *Hydrological Processes* 21: 0-10.
- CIREN (1997) Estudio Agrológico IV Región. Descripción de suelos Materiales y Símbolos. Información Recursos Naturales 116: 1-350.
- CIREN, ODEPA (2005) Catastro Frutícola. Principales resultados IV Región. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Santiago de Chile. 44 pp.
- CONDE C (2003) Cambio y Variabilidad Climáticos. Dos Estudios de Caso en México. Tesis Doctoral. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. 23 pp.
- CONDE C (2005) Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: Descripción de un estudio de caso y los retos de las investigaciones actuales, Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. 157-171.

- DHA (1992) Internationally Agreed Glossary of Basic Terms related to Disaster Management. Ginebra, 81 pp. Disponible en: [http://www.reliefweb.int/rw/lib.nsf/db900SID/LGEL-5EQNZV/\\$FILE/dha-glossary-1992.pdf?OpenElement](http://www.reliefweb.int/rw/lib.nsf/db900SID/LGEL-5EQNZV/$FILE/dha-glossary-1992.pdf?OpenElement)
- ECKHARDT K (2005) How to construct recursive digital filters for base flow separation. *Hydrological Processes* 19: 507-515.
- ESCOBAR F & PACEITUNO (1998) Influencia del fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector andino de Chile Central durante el invierno. *Instituto Francés de Estudios Andinos. Bulletin de l'IFEA* 27 (3): 753-759.
- FAO (2002) Agua y Cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 26 pp.
- FAO (2005) Estudio de vulnerabilidad y riesgo para actividades productivas y erosión por tipo de cultivo en la micro cuenca de Piuray-Corimarca. Proyecto regional Ordenamiento Territorial Rural Sostenible. Documento de Campo N°2, Santiago de Chile.
- FERRANDO F (2002) Cuenca del Río Limarí, Chile Semiárido: Aspectos de la oferta y Demanda de Agua. *Revista de Geografía Norte Grande* 30: 23-44.
- FONTAINE T, T CRUICKSHANK, JARNOLD & R HOTCHKISS (2002) Development of a snowfall snowmelt routine for mountainous terrain for the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Journal of Hydrology* 262: 209-223.
- GALVÁN L, M OLIAS, R FERNÁNDEZ DE VILLARÁN & J DOMINGO-SANTOS. (2007) Application of SWAT hydrological model to the Meca river watershed (Huelva, Spain). *Geogaceta* 42: 63-66.
- GOSAINA, K RAO, S SRINIVASAN & N REDDY (2005) Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. *Hydrological Processes* 19: 673-682.
- GOVENDER M & C EVERSON (2005) Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model *Hydrological Processes* 19: 683-692.
- GUPTA S & W LARSON (1979) Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research* 15(6): 1633-1635.
- GUPTAS, H KLING, K YILMAZ & G MARTINEZ (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *Journal of Hydrology* 377: 80-91.
- HATTERMANN F, V KRYSANOVA, F WECHSUNG & WATTENBACH M (2005) Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment-validation and uncertainty analysis. *Hydrological Processes* 19: 693-714.
- HERNANDEZ M, S MILLER, DC GOODRICH, BF GOFF, WG KEPNER, EDMONDS, CM. JONES, KB. (2000) Modeling runoff response to land cover rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment* 64: 285-298.
- IDEAM, ONU & MDGIF (2009) Indicadores, tendencias y escenarios hidrológicos para el cambio climático, Programa conjunto de integración de ecosistemas y adaptación al cambio climático 12-28.
- KNISEL W (1980) CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. *USDA Conservation Research Report* 2: 511-523.
- LEÓN A, E MONTAÑA, R FUSTER, E ABRAHAM, M ARAVENA, R GARAY, H INSTEN, M LEMOS, P LEÓN, H MOYA, G PASTOR, M SALOMÓN, E TORRES, L TORRES & N URETA (2006) Riego y pobreza rural: dos estudios de caso en la región semiárida de Chile y Argentina. *Usos del Agua en Tierras Secas de Iberoamérica* 12: 65-92.
- MIKKO J & S SYKES (2002) Recharge Estimation for Transient Ground Water Modeling. *Ground Water* 40 (6): 638-648.
- MOP (2004) Diagnostico de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. Santiago de Chile. Chile 1: 131 pp.
- MORENO J (2001) Zonificación agroecológica de la cuenca baja del río Guayas.: Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas. 151 pp.

- MUTTIAH RS & RA WURBS (2002) Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model. *Journal of Hydrology* 256: 264-285.
- NASH J & J SUTCLIFFE (1970) River flow forecasting through conceptual models, part 1 a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10 (3): 282-290.
- NEITSCH S, JARNOLD, J KINIRY, J WILLIAMS & K KING (2002^a). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station 1: 1-506.
- NEITSCH S, JARNOLD, J KINIRY, J WILLIAMS & K KING (2002^b). Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. Texas Water Resources Institute, College Station. 2: 1-506.
- PARGA F, ALEÓN, X VARGAS & R FUSTER (2002) El Índice de Pobreza Hídrica Aplicado a la Cuenca del Río Limarí. *Chile Semiárido* 1: 93-109.
- RAVIDRANATH N, S RAO, N SHARMA, M NAIR, AGOPALAKRISHNAN, S MALAVIYA, R TIWARI, A SAGADEVAN, M MUNIS, N KRISHNA & G BALA (2011) Climate change vulnerability profiles for North East India. *Current Science* 101: 53-67.
- SAMPER J & B PISANI, J ESPINHA (2009) Evaluación de los recursos hídricos en la Cuenca hidrográfica del Ebro mediante modelización semidistribuida con GIS- BALAN. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo IX*: 365-370.
- SECUNDA S, M COLLIN & J MELLOUL (1998) Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management* 54 (1): 39-57.
- STEHR A (2008) Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua bajo escenarios de cambio climático para dos subcuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana 1: 115 pp.
- STEHR A, M AGUAYO, O LINK, O PARRA, F ROMERO, & HALCAYAGA (2010) Modelling the hydrologic response of a mesoscale Andean watershed to changes in land use patterns for environmental planning. *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 1963-1977.
- STEHR A, DEBELS P, ARUMÍ J, ALCAYAGA H & ROMERO F. (2010) Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático, experiencia de dos cuencas del centro-sur Chileno. *Tecnología y Ciencias del Agua* 1(4): 37-58.
- STEHR A, P DEBELS, J ARUMÍ, FROMERO & H ALCAYAGA (2009) Combining the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and MODIS imagery to estimate monthly flows in a data-scarce Chilean Andean basin. *Hydrological Sciences Journal* 54(6): 1053-1067.
- STEHR A, P DEBELS, F ROMERO & H ALCAYAGA (2008) Hydrological modelling with SWAT under limited conditions of data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrological Sciences Journal* 53 (3): 588-601.
- TAKEUCHI K (2009) Increasing vulnerability to extreme floods and societal needs of hydrological forecasting. *Vulnérabilité croissante aux crues extrêmes et demandes sociales en prévision hydrologique. Hydrological Sciences Journal* 46 (1): 869-881.
- TRIPATHI M, N RAGHUWANSHI & G RAO (2006) Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. *Hydrological Processes* 20: 1137-1156.
- VANGRIENSVEN A, T MEIXNER, S GRUNDWALD, T BISHOP & R SIRINIVASAN (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal Hydrological* 324: 10-23.
- VICUÑAS, O CRISTI, LAZEVEDO & ABALTAR (2001) Mercado de agua para irrigación: una aplicación al sistema paloma de la cuenca del Limarí. *Vida y Desarrollo. Santiago de Chile* 1: 1-12.
- VICUÑA S, R GARREAUD & J MCPHEE (2008) Climate Changes Impacts on the Hydrology of a Snowmelt Driven Basin in Semiarid Chile. *Climate Change* 3: 469-488.
- VILLOTA H (1991) Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras, Instituto Geográfico Agustín

Codazzi, Subdirección de Docencia e Investigación. Santafé de Bogotá 1: 1-212.
WAGENER T, H WHEATER, & V GUPTA (2004)
Rainfall – Runoff Modelling in Gauged and Ungauged Cathment, Imperial College Press London. 41: 1-14.

Recibido 6/09/2011; aceptado 28/12/2011