

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

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS DEL MODELO VIC A  
TRAVÉS DEL GRADIENTE HIDROCLIMÁTICO DE CHILE CONTINENTAL**

**ULISES SEPÚLVEDA J.<sup>1</sup>**  
**PABLO MENDOZA Z.<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

En este trabajo, se investigan las sensibilidades proporcionadas por 43 parámetros de suelo, vegetación y nieve del modelo Capacidad de Infiltración Variable (VIC por sus siglas en inglés) para 101 cuencas que abarcan las diversas condiciones hidroclimáticas de Chile continental. Se implementa un enfoque híbrido local-global de análisis de sensibilidad, utilizando ocho métricas de evaluación: cuatro de ellas son formuladas a partir de series de tiempo de escorrentía; dos caracterizan los procesos de la nieve y dos se basan en procesos de evapotranspiración. Los resultados confirman una sobre-parametrización para los procesos analizados, con sólo 12 parámetros (28% del total) sensibles, distribuidos entre suelo (7), vegetación (2) y nieve (3). Se destaca la influencia del índice de área foliar en los procesos hidrológicos simulados, independientemente de los tipos de clima dominante, y la relevancia de los parámetros de nieve codificados (i.e., ocultos al usuario). Se entregan recomendaciones sobre los parámetros más relevantes para la calibración del modelo VIC de acuerdo con los procesos que se busque representar y el tipo de clima predominante. En general, los resultados presentados contribuyen a una mejor comprensión del comportamiento del modelo para dominios con diversas características físicas, a lo largo de un pronunciado gradiente hidroclimático que abarca desde sistemas hiper-áridos a húmedos.

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: ulises.sepulveda@ug.uchile.cl

<sup>2</sup> Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: pamendoz@uchile.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas cuatro décadas, los modelos hidrológicos distribuidos han surgido como herramientas poderosas para caracterizar el ciclo del agua. El aumento de la capacidad computacional, una mayor disponibilidad de datos y una creciente necesidad por representar la heterogeneidad espacial y las características físicas de las cuencas hidrográficas han impulsado el desarrollo de modelos hidrológicos espacialmente distribuidos cada vez más complejos (Niu et al., 2011; Fisher and Koven, 2020; Swenson et al., 2019).

El aumento en la complejidad de modelos hidrológicos ha ido acompañado de un alza en el número de parámetros ajustables, incrementando los tiempos de calibración (van Griensven et al., 2006). Con el fin de disminuir el costo computacional, el modelador generalmente elige un sub-set de parámetros "sensibles" para ser calibrados en base al juicio experto o a recomendaciones de los desarrolladores del modelo (Rosero et al., 2009). Sin embargo, la sensibilidad paramétrica de un modelo, así como el ranking de parámetros más importantes, puede variar de un sistema hidrológico a otro dependiendo de características climáticas y fisiográficas (Van Werkhoven et al., 2008). Por lo tanto, el análisis de sensibilidad es un requisito previo para mejorar la efectividad de la calibración del modelo hidrológico.

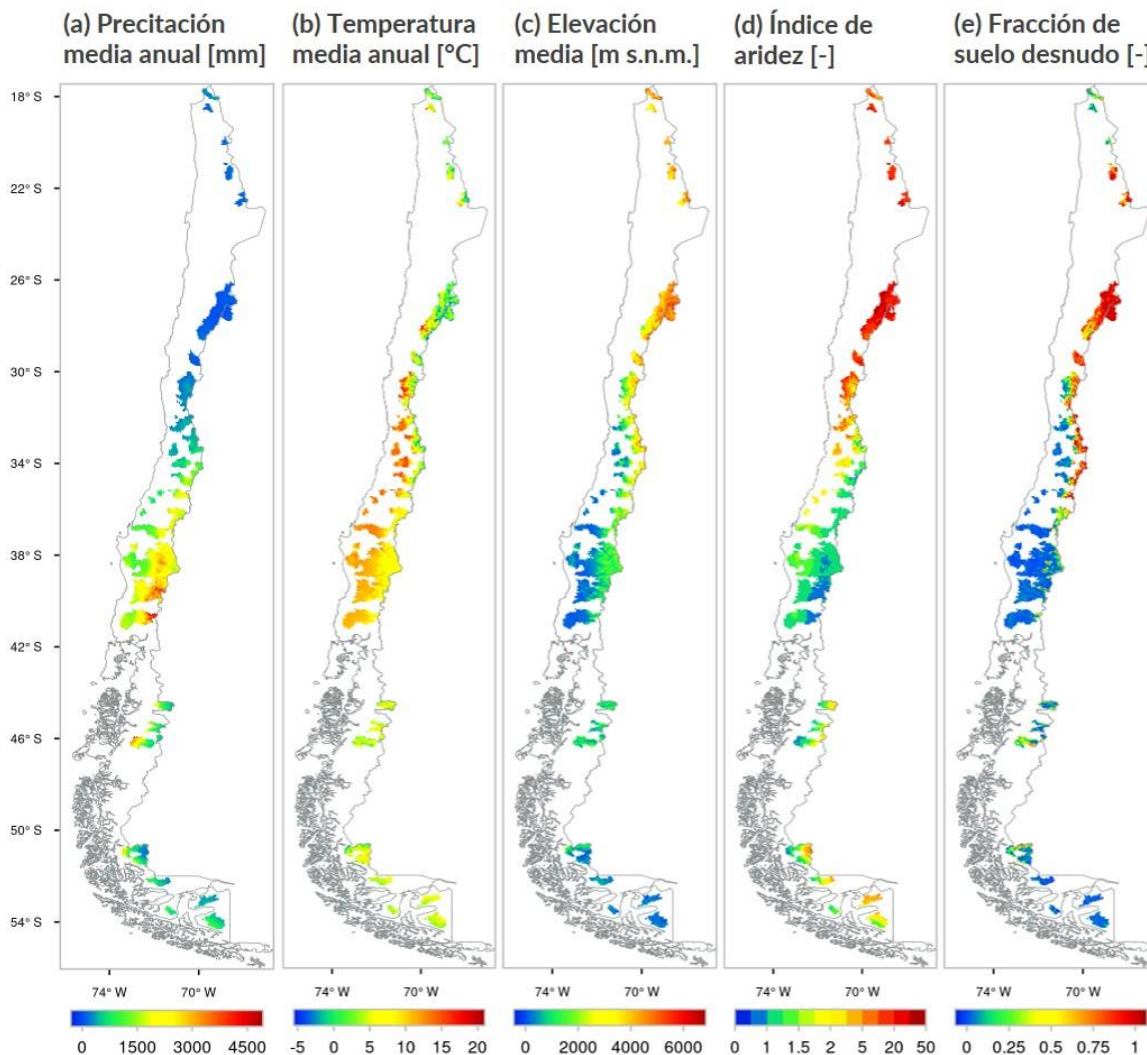
El modelo VIC (Liang et al., 1994) contiene una gran cantidad de parámetros, de los cuales algunos tienen sentido físico, mientras que otros son "libres" (i.e., son coeficientes ajustables). A pesar de que estudios recientes han examinado la sensibilidad paramétrica de este modelo (e.g., Mendoza et al., 2015; Melsen et al., 2016; Gou et al., 2020; Yeste et al., 2020), la sensibilidad con respecto algunos parámetros permanece desconocida, especialmente aquellos ocultos para los usuarios (i.e., codificados; Mendoza et al., 2015). En este trabajo, se cuantifican las sensibilidades de 43 parámetros del modelo VIC en 5.574 píxeles con una resolución horizontal de  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$  que cubren 101 cuencas de Chile continental, utilizando un conjunto de métricas que abarcan diferentes procesos de escorrentía, evapotranspiración (ET) y nieve.

## 2. DOMINIO DE ESTUDIO Y DATOS

El análisis se efectúa en 101 cuencas con regímenes hidrológicos cercanos al natural, y contenidas en la base de datos CAMELS-CL (Alvarez-garretón et al., 2018). Las cuencas abarcan una superficie total de 139.350 km<sup>2</sup> - es decir, el 19% del territorio de Chile continental -, y cumplen con los siguientes criterios: (i) un valor umbral máximo del 5% para la relación entre el volumen anual de agua asignado como derechos consuntivos permanentes y el caudal medio anual (Tabla 3 en Alvarez-garretón et al., 2018), y (ii) ausencia de grandes embalses dentro de cada cuenca. Además, las cuencas seleccionadas representan la diversidad de condiciones hidroclimatológicas en todo el país. La ubicación y características hidroclimáticas y de cobertura del suelo en todo el dominio se muestran en la Figura 1.

Los datos de forzantes meteorológicas se obtienen desde varias fuentes. Las series temporales de precipitación diaria y temperatura diaria máxima, media y mínima provienen del producto meteorológico grillado CR2MET (DGA, 2017), que proporciona datos para Chile continental a una resolución horizontal de  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$  (~5 km) para el período 1979-2016. La humedad

relativa y la velocidad del viento se obtuvieron de una combinación entre ERA-Interim (Dee et al., 2011) y ERA5 (Copernicus Climate Change Service, 2017).



**Figura 1.** Distribución espacial de los atributos climáticos y fisiográficos en todos los píxeles: (a) precipitación media anual (período 1979-2020), (b) temperatura media anual (período 1979-2020), (c) elevación media, (d) índice de aridez y (e) fracción de suelo desnudo.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. MODELO HIDROLÓGICO

VIC es un modelo hidrológico de base física y semi-distribuido, que simula la acumulación y el derretimiento de la nieve, evapotranspiración (ET), interceptación de la nieve, escorrentía superficial, flujo base y otros procesos hidrológicos en pasos de tiempo diarios o subdiarios. VIC se usa predominantemente en los Estados Unidos (Addor and Melsen, 2019), con muchos estudios enfocados en balances de agua y energía (Andreadis and Lettenmaier, 2006); sin embargo, su uso se ha expandido a otros dominios geográficos, incluyendo China

(e.g, Zhao et al., 2013), Chile (e.g., Vásquez et al., 2021), Europa (e.g., Roudier et al., 2016) y globalmente (p. ej., Yang et al., 2021). Se utiliza la versión 4.1.2.g de VIC, que se puede descargar desde <https://github.com/UW-Hydro/VIC/releases>, junto con otras versiones.

### 3.2. PARÁMETROS CONSIDERADOS

Se considera un conjunto de 43 parámetros (Tabla 1) asociados a procesos de suelo, vegetación y nieve simulados por VIC. Cabe señalar que tres de los parámetros de la nieve no están expuestos a los usuarios (NEW ALB, ALB AA y ALB THA). Para los parámetros con variaciones mensuales, se examinan las sensibilidades utilizando “superparámetros” de regularización (Tonkin and Doherty, 2005), que en este caso corresponden a multiplicadores (Pokhrel and Gupta, 2010), que se aplican uniformemente sobre todos los valores mensuales. Por lo tanto, se utilizan multiplicadores para el índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés); albedo de vegetación (ALB); longitud de rugosidad de la vegetación (ROU) y desplazamiento de la vegetación (DIS). A pesar de que algunos de estos parámetros se consideran observables, en su determinación puede involucrar un grado no despreciable de incertidumbre. Un ejemplo de esto es el parámetro LAI (Tian et al., 2002), un valor adimensional que se define como la superficie foliar por unidad de superficie del suelo, cuya implementación en muchos modelos se simplifica a través de valores mensuales estáticos.

**Tabla 1.** Parámetros del modelo VIC considerados en este estudio.

Parámetro	Descripción	Unidad	Mínimo	Máximo
Parámetros de suelo				
INFILT	Parámetro de la curva de infiltración variable	-	0,001	0,4
DSMAX	Velocidad máxima de flujo base	mm/d	1	50
DS	Fracción de D <sub>SMAX</sub> donde ocurre flujo base no lineal	-	0,00005	1
W <sub>s</sub>	Fracción de la humedad del suelo máxima donde ocurre el flujo base no lineal	-	0,0009	1
c	Exponente utilizado en la curva de caudal base	-	1	4
Expt <sub>i</sub>	Exponente en la ecuación de Campbell para la conductividad hidráulica de la capa de suelo i	-	5	30
Ksat <sub>i</sub>	Conductividad hidráulica saturada de la capa de suelo i	mm/d	1	10.000
Depth <sub>1</sub>	Profundidad de la capa 1 (superior)	m	0,01	0,5
Depth <sub>2</sub>	Profundidad de la capa 2	m	Depth <sub>1</sub> + 0,1	Depth <sub>1</sub> + 4
Depth <sub>3</sub>	Profundidad de la capa 3 (inferior)	m	0,1	4
dp	Profundidad de amortiguamiento térmico del suelo	m	1	3,75
quartz <sub>i</sub>	Contenido de cuarzo de la capa de suelo i	-	0,1	0,82
bulk density <sub>i</sub>	Densidad aparente de la capa i	kg/m <sup>3</sup>	1.200	1.609
rough	Rugosidad de la superficie del suelo desnudo	m	0,0001	0,08
Resid moist	Humedad residual del suelo de la capa i	-	0,02	0,109
Parámetros de vegetación				
rarc	Resistencia aerodinámica entre las hojas y la parte superior de copas de los árboles	s/m	2	50
Rmin	Resistencia estomática mínima del tipo de vegetación	s/m	30	300
LAI*	Índice de área foliar del tipo de vegetación	-	<b>0,1</b>	<b>1,16</b>
ALB*	Albedo de onda corta para el tipo de vegetación	-	<b>1</b>	<b>1,65</b>
ROU*	Longitud de rugosidad de la vegetación	-	<b>0,82</b>	<b>2,11</b>
DIS*	Altura de desplazamiento de la vegetación	-	<b>0,82</b>	<b>2,11</b>

Parámetro	Descripción	Unidad	Mínimo	Máximo
Root depth i	Espesor de la zona de la raíz (la suma de las profundidades es la profundidad total de penetración de la raíz) de la capa i	m	0,1	3
Root fraction i	Fracción de raíces en la zona de raíces actual de la capa i	-	0	1
Parámetros generales y de nieve				
$z0_{SNOW}$	Rugosidad de la superficie de la capa de nieve	m	0,0001	0,01
$T_{MIN}$	Temperatura mínima a la que puede caer la lluvia,	°C	-1,5	0
$T_{MAX}$	Temperatura máxima a la que puede caer nieve,	°C	$T_{MIN} + 0,5$	$T_{MIN} + 1,5$
NEW ALB	Albedo de la nieve nueva	-	0,7	0,99
ALB AA	Parámetro base en función de albedo de nieve (acumulación)	-	0,88	0,99
ALB THA	Parámetro base en función de albedo de nieve (derretimiento)	-	0,66	0,98

\*Este parámetro está distribuido temporalmente (variaciones mensuales) y, por tanto, su sensibilidad se analiza en base a multiplicadores. Aunque la descripción y las unidades se refieren a los parámetros reales de VIC, los valores de los parámetros en negrita representan los valores del multiplicador (en lugar de los parámetros reales).

### 3.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realiza una Evaluación Distribuida del Análisis de Sensibilidad Local (DELSA por sus siglas en inglés; Rakovec et al., 2014), que es un enfoque híbrido basado en derivadas locales. DELSA combina elementos del método de Morris (Morris, 1991), el método de Sobol (Sobol, 2001) y el análisis de sensibilidad regional (Hornberger and Spear, 1981), y proporciona resultados robustos con un número menor de simulaciones del modelo en comparación con métodos globales basados en la varianza.

Las sensibilidades de primer orden,  $S_j^L$ , se obtienen utilizando gradientes locales que cuantifican la sensibilidad de una salida modelada,  $\Psi$ , en relación con las variaciones individuales de un parámetro  $\theta_j$ . Los gradientes locales  $\frac{\partial \Psi}{\partial \theta_j} |_{\theta^*}$  se utilizan para calcular la sensibilidad de primer orden de cada parámetro j en cada punto del espacio de parámetros:

$$S_j^L = \frac{\left( \frac{\partial \Psi}{\partial \theta_j} |_{\theta^*} \right)^2 s_j^2}{V_L(\theta^*)} \quad (1)$$

Dónde  $s_j^2$  es la varianza a priori del parámetro j, obtenida a partir de la varianza de una distribución uniforme (Rakovec et al., 2014), que es  $\frac{1}{12}(\theta_{j,max} - \theta_{j,min})^2$ .  $V_L(\theta^*)$  es la varianza local linealizada:

$$V_L(\theta^*) = \sum_{j=1}^k \left( \frac{\partial \Psi}{\partial \theta_j} |_{\theta^*} \right)^2 s_j^2 \quad (2)$$

Los índices de sensibilidad de primer orden varían entre 0 y 1, y la suma de  $S_j^L$  de todos los parámetros en cada punto de la muestra es igual a 1. Las sensibilidades locales se pueden examinar a través de su distribución de frecuencia acumulada en el espacio de parámetros, o calculando una propiedad estadística específica. Aquí, se cuantifica la contribución relativa de un parámetro utilizando el área sobre la curva de la distribución de frecuencia completa:

$$IS_j^L = 1 - \int_0^1 F(S_j^L) dS_j^L \quad (3)$$

### 3.4. MÉTRICAS DE EVALUACIÓN

Se utilizan ocho métricas de evaluación para cuantificar la sensibilidad de los procesos hidrológicos respecto a variaciones en los parámetros. La notación, breve descripción y formulación matemática de cada métrica se detalla en la Tabla 2. Estas métricas se calculan contrastando la salida del modelo en los puntos de muestreo producidos para DELSA, con una simulación de referencia generada en el proyecto del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018, 2019, 2020) para el periodo histórico 1985-2015.

**Tabla 2.** Métricas de sensibilidad de los parámetros utilizadas en este estudio.

Notación	Descripción breve	Fórmulas
RMSE	Raíz del error cuadrático medio	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Q_t^{sim} - Q_t^{ref})^2}$
TRMSE	Raíz del error cuadrático medio transformado	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Z_t^{sim} - Z_t^{ref})^2}$ ; $Z_t = \frac{(1 + Q_t)^{0,3} - 1}{0,3}$ ; $\lambda = 0.3$
FMS	Diferencia de pendiente del segmento medio de la curva de duración del caudal	$\left  \frac{Q_{m_1}^{sim} - Q_{m_2}^{ref}}{m_1 - m_2} - \frac{Q_{m_1}^{obs} - Q_{m_2}^{ref}}{m_1 - m_2} \right $
RR	Error en el coeficiente de escorrentía anual	$\left  \frac{R_{sim}}{P_{sim}} - \frac{R_{ref}}{P_{ref}} \right $
PeakSWE	Diferencia del equivalente en agua de nieve (SWE) máximo	$ \max\{SWE_t\}_{sim} - \max\{SWE_t\}_{ref} $
SnowLength	Diferencia en la duración de la temporada de nieve	$\left  \sum days \in SWE_{sim} > x - \sum days \in SWE_{ref} > x \right $ $x = 1 \text{ mm}$
SUBL	Diferencia de sublimación	$ Subl_{sim} - Subl_{ref} $
TRANSP	Diferencia de transpiración	$ Transp_{sim} - Transp_{ref} $

$N$ , número de pasos de tiempo;  $Q_t$ , escorrentía en el paso de tiempo  $t$ ;  $Z_t$ , escorrentía transformada en el paso de tiempo  $t$ ;  $Q_{m_1}$ , percentil  $m_1$  de la curva de duración de flujo;  $m_1=70$ ;  $Q_{m_2}$ , percentil  $m_2$  de la curva de duración de flujo;  $m_2=30$ ;  $R$ , Escorrentía anual media promediado del píxel;  $P$ , precipitación media anual promediada en el píxel;  $SWE_t$ , Equivalente de agua de nieve para el paso de tiempo  $t$ ;  $Subl$ , sublimación anual media promediada en el píxel;  $Transp$ , transpiración anual media promediada en el píxel.

Se formulan cuatro métricas de evaluación a partir de las series de escorrentía. La primera función objetivo es la raíz del error cuadrático medio (RMSE), que es una métrica estándar que enfatiza valores de escorrentía altos. La segunda métrica seleccionada es la raíz del error cuadrático medio transformado (TRMSE), para el cual las series de tiempo de escorrentía simuladas y observadas se transforman utilizando una transformación de Box-Cox para enfatizar valores bajos (Misirli et al., 2003). La tercera función objetivo es la diferencia de pendiente del segmento medio (FMS) de la curva de duración del flujo (FDC), que representa la variabilidad de la magnitud del flujo, por lo que mide qué tan bien un modelo captura la distribución de los flujos de nivel medio. La cuarta métrica de evaluación es la diferencia de

razón de escorrentía (RR), considerada como una medida del balance hídrico general y, por lo tanto, del componente del modelo de evapotranspiración (Mendoza et al., 2015b).

Se utilizan dos métricas para caracterizar los procesos de nieve: la diferencia en el máximo SWE simulado a largo plazo (PeakSWE), que es una medida integrada de los procesos que ocurren durante la temporada de acumulación, y la diferencia en la duración del manto de nieve, cuantificada mediante el número de días con nieve en el suelo (SnowLength; Mizukami et al., 2014). Finalmente, se incluyen dos métricas para flujos evaporativos: la diferencia de sublimación (SUBL) y la diferencia de transpiración de las plantas (TRANSP).

### 3.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

El método DELSA se aplica en 5.574 píxeles de Chile continental, contenidas en de las 101 cuencas descritas en la sección 2. En cada pixel, se realizan simulaciones en pasos de tiempo de 3 horas para un período de 12 años (abril/ 1999 – marzo/2011), con los dos primeros años como período de calentamiento. El modelo se ejecuta en modo de balance de energía, y las salidas tri-horarias se agregan a resolución temporal diaria para análisis posteriores.

Para obtener una muestra de 200 puntos en el espacio de parámetros, se aplica el método de muestreo de hipercubo latino (LHS), que es particularmente adecuado para cálculos de estadísticos y de sensibilidad (Vořechovský, 2015). En cada punto obtenido con LHS y para cada métrica, se calculan los índices  $S_j^L$ . En este trabajo, un parámetro se considera insensible cuando el valor de la mediana del índice de sensibilidad de primer orden integrado (es decir, la mediana  $IS_j^L$ ) en todos los píxeles es menor que 0,05 para al menos siete de las ocho métricas de la Tabla 2. Los resultados de la sensibilidad de parámetros también se examinan por métrica y tipo de clima, en función del índice de aridez (Tabla 3; Verbist et al., 2010).

**Tabla 3.** Clasificación climática utilizada para agrupar los píxeles del modelo.

Clasificación	Húmeda	Subhúmeda húmeda	Subhúmeda seca	Semiárida	Árida	Hiperárida
Índice de aridez	<1	1 a 1,53	1,53 a 2	2 a 5	5 a 20	>20
Total de píxeles	2.189	772	318	992	803	499

## 4. RESULTADOS

La Figura 2 contiene diagramas de caja con los resultados de  $IS_j^L$  de todos los píxeles en el dominio de estudio, para cada parámetro y métrica de evaluación. Los resultados muestran que el 72% de los parámetros analizados (es decir, 31) entrega poca sensibilidad para las métricas examinadas aquí. Por el contrario, 12 parámetros sensibles están asociados a procesos de suelo (INFILT,  $D_s$ ,  $D_{SMAX}$ ,  $W_s$ ,  $Expt_2$ ,  $Depth_2$ ,  $Depth_3$ ), nieve (NEW ALB, ALB THA y ALB AA) y vegetación ( $R_{min}$  y LAI).

Para el caso de valores de escorrentía altos (RMSE), bajos (TRMSE) y la pendiente de la curva de duración (FMS), los parámetros identificados como sensibles son INFILT,  $D_s$ ,  $D_{SMAX}$ ,  $W_s$ ,  $Expt_2$ ,  $Depth_2$  y  $Depth_3$  (ver los tres paneles superiores en Figura 2). El parámetro

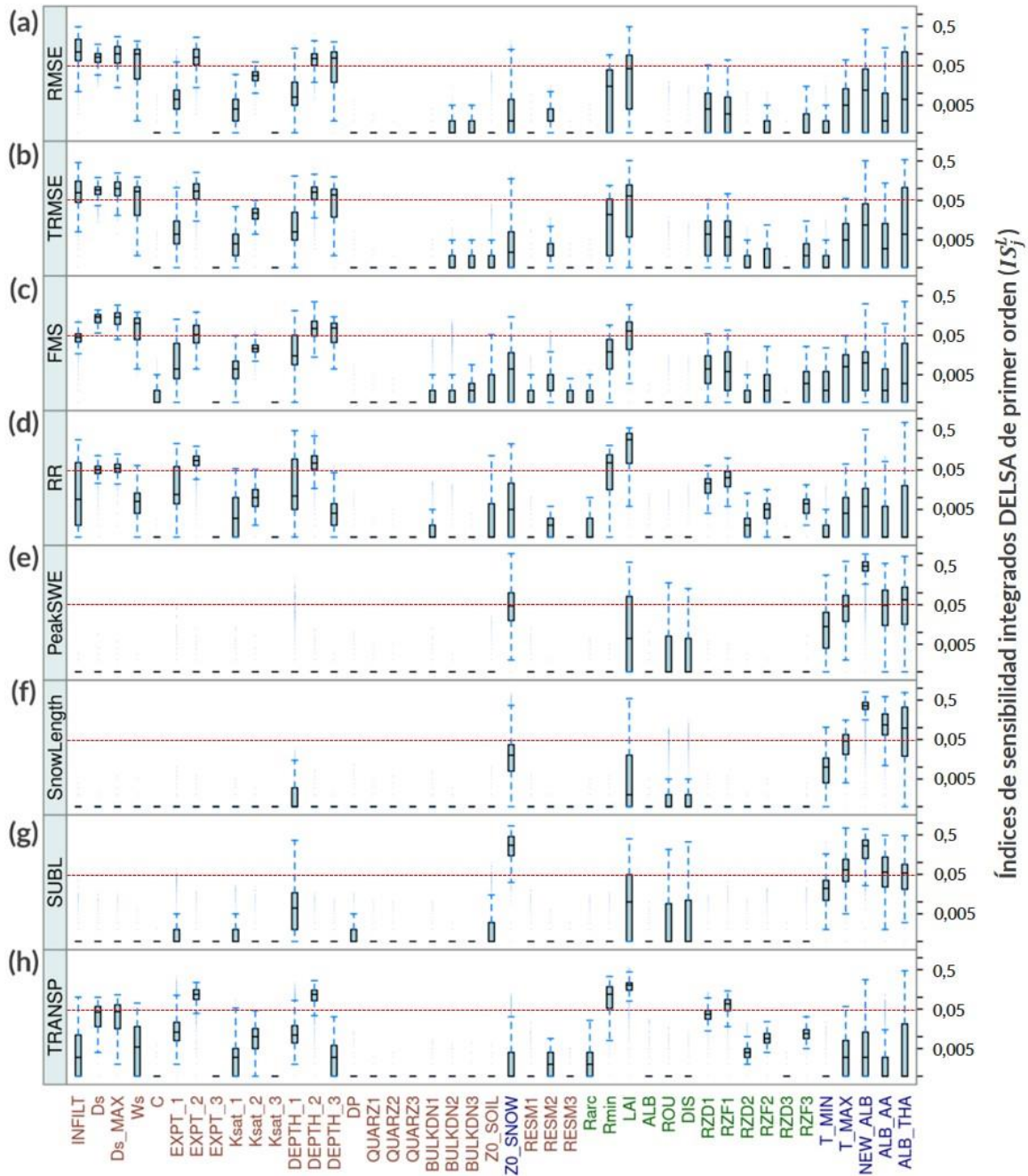
INFILT controla la forma de la curva de capacidad de infiltración variable (Zhao et al., 1980) y, por lo tanto, la partición de la precipitación líquida o el deshielo entre infiltración y escorrentía superficial. Un valor de INFILT más alto genera menos infiltración y mayor escorrentía superficial. Las métricas RMSE y TRMSE son particularmente sensibles a INFILT, lo que revela un papel clave en la generación y sincronización de valores de escorrentía altos y bajos.  $D_{SMAX}$  es la velocidad máxima del flujo base, mientras que  $D_s$  y  $W_s$  son la fracción de  $D_{SMAX}$  y la fracción del contenido máximo de humedad del suelo en la tercera capa, respectivamente, donde se produce un flujo base no lineal. Estos tres parámetros están involucrados en la formulación ARNO de la escorrentía subterránea (Franchini and Pacciani, 1991) controlando la velocidad de liberación del flujo base desde la tercera capa del suelo y, específicamente, la parte no lineal de la función de generación de flujo base. Los índices de sensibilidad encontrados para estos parámetros son consistentes con la alta sensibilidad reportada por Mendoza et al. (2015b), Melsen et al. (2016) y Wi et al. (2017).

El parámetro  $Expt_2$  es un exponente de la relación Brooks-Corey (Brooks and Corey, 1964) y controla la conductividad hidráulica entre la segunda y la tercera capa del suelo. Un valor pequeño para el parámetro  $Expt_2$  aumenta el drenaje entre dichas capas para un mismo contenido de humedad del suelo y, por lo tanto, aumenta la generación de flujo base. El parámetro  $Depth_2$  es el espesor de la segunda capa de suelo. En general, las capas de suelo más gruesas reducen la escorrentía máxima estacional y aumentan la pérdida de agua debido a la evapotranspiración (Xie et al., 2007). Cabe señalar que el parámetro  $Depth_2$  ha sido identificado como altamente sensible por muchos autores (Demaria et al., 2007; Mendoza et al., 2015b; Wi et al., 2017; Gou et al., 2020; Lilhare et al., 2020; Yeste et al., 2020; Melsen and Guse, 2021). Finalmente,  $Depth_3$  es el espesor de la tercera capa de suelo, y la elevada sensibilidad aquí obtenida concuerdan con los resultados reportados por Mendoza et al. (2015b) y Wi et al. (2017).

Los resultados de la Figura 2 muestran que  $Expt_2$  y  $Depth_2$  también brindan una gran sensibilidad para los flujos evaporativos (es decir, RR y TRANSP). Otros parámetros relevantes para estos procesos son el LAI y la resistencia estomática mínima ( $R_{min}$ ). De hecho, Chaney et al. (2015) informaron una alta sensibilidad en los sesgos de escorrentía media anual a las variaciones en  $R_{min}$ . Por otro lado,  $R_{min}$  es uno de los parámetros que controlan la resistencia de la región superior de copas de los árboles al calcular la transpiración de cada clase de vegetación, siguiendo las formulaciones propuestas por Blondin (1991) y Ducoudré et al. (1993). Tanto LAI como  $R_{min}$  proporcionan sensibilidades nulas si el tipo de cobertura terrestre es suelo desnudo; sin embargo,  $R_{min}$  también puede producir sensibilidades nulas en píxeles con vegetación.

La Figura 2 revela la influencia de los parámetros codificados (NEW ALB, ALB THA y ALB AA) sobre PeakSWE, SnowLength y SUBL. El parámetro NEW ALB es el albedo de la nieve nueva, que controla la reflexión de la radiación solar y, por tanto, el intercambio de energía entre la atmósfera, la región superior de copas de los árboles y la capa superficial de la nieve (Andreadis et al., 2009). Los parámetros ALB AA y ALB THA representan la disminución del albedo durante las temporadas de acumulación y derretimiento, respectivamente, en la curva de albedo de la nieve (USACE, 1956). Los resultados concuerdan con las altas sensibilidades reportadas por Mendoza et al. (2015b) para estos tres

parámetros codificados. Finalmente, la longitud de la rugosidad de la superficie de la nieve ( $z0_{SNOW}$ ) también afecta las tasas de sublimación en los subdominios andinos.



**Figura 2.** Diagramas de caja con índices de sensibilidad integrados DELSA de primer orden ( $IS_j^L$ ) de los 5.574 píxeles. La línea roja en cada panel ubica al umbral de sensibilidad  $IS_j^L = 0,05$ . El eje x muestra todos los parámetros coloreados según su tipo: café – suelo, verde – vegetación y azul – nieve.

La Tabla 4 contiene los tres parámetros más importantes en cada zona climática (usando la clasificación de la Tabla 3), para cada métrica de evaluación (es decir, proceso físico a representar). Dicha información se puede utilizar para guiar la selección de parámetros para

la calibración del modelo hidrológico, en función del régimen hidroclimático y el proceso que a los modeladores les gustaría representar.

**Tabla 4.** Resumen de los parámetros VIC más sensibles encontrados para cada métrica (filas) y tipo climático. Los tres parámetros más importantes se determinan en función de la mediana de los índices de sensibilidad DELSA integrados de primer orden y se ordenan por clasificación (es decir, 1°, 2° y 3° más sensibles).

Clasificación	Húmeda	Subhúmeda húmeda	Subhúmeda seca	Semiárida	Árida	Hiperárida
RMSE	DSMAX Ws Depth <sub>3</sub>	DSMAX Ws Depth <sub>3</sub>	INFILT Ws DSMAX	INFILT Expt <sub>2</sub> Depth <sub>2</sub>	INFILT Expt <sub>2</sub> Depth <sub>2</sub>	INFILT Expt <sub>2</sub> Depth <sub>2</sub>
TRMSE	DSMAX Ws Ds	LAI DSMAX Ds	LAI Depth <sub>2</sub> Ds	INFILT Depth <sub>2</sub> Expt <sub>2</sub>	INFILT Expt <sub>2</sub> Depth <sub>2</sub>	INFILT Expt <sub>2</sub> Depth <sub>2</sub>
FMS	DSMAX Ds Ws	Ds DSMAX LAI	Ds DSMAX LAI	Ds DSMAX Depth <sub>2</sub>	Depth <sub>2</sub> Expt <sub>2</sub> Ds	Depth <sub>2</sub> Expt <sub>2</sub> Ds
RR	LAI Rmin Expt <sub>2</sub>	LAI Rmin Expt <sub>2</sub>	LAI Expt <sub>2</sub> Depth <sub>2</sub>	LAI Expt <sub>2</sub> Depth <sub>2</sub>	INFILT Depth <sub>1</sub> Expt <sub>2</sub>	Depth <sub>2</sub> INFILT Depth <sub>1</sub>
PeakSWE	NEW ALB ALB THA LAI	NEW ALB ALB THA ALB AA	NEW ALB z <sub>0SNOW</sub> ALB THA	NEW ALB ALB AA T <sub>MAX</sub>	NEW ALB ALB AA z <sub>0SNOW</sub>	NEW ALB ALB AA z <sub>0SNOW</sub>
SnowLength	NEW ALB ALB THA ALB AA	NEW ALB ALB AA ALB THA	NEW ALB ALB AA ALB THA	NEW ALB ALB AA T <sub>MAX</sub>	NEW ALB ALB AA ALB THA	NEW ALB ALB AA z <sub>0SNOW</sub>
SUBL	z <sub>0SNOW</sub> NEW ALB ALB THA	NEW ALB z <sub>0SNOW</sub> T <sub>MAX</sub>	z <sub>0SNOW</sub> NEW ALB T <sub>MAX</sub>	NEW ALB z <sub>0SNOW</sub> ALB AA	NEW ALB z <sub>0SNOW</sub> ALB AA	NEW ALB ALB AA z <sub>0SNOW</sub>
TRANSP	LAI Rmin Expt <sub>2</sub>	LAI Rmin Depth <sub>2</sub>	LAI Depth <sub>2</sub> Expt <sub>2</sub>	LAI Depth <sub>2</sub> Expt <sub>2</sub>	Expt <sub>2</sub> LAI Depth <sub>2</sub>	Expt <sub>2</sub> Depth <sub>2</sub> LAI

## 5. CONCLUSIONES

La principal contribución de este estudio es la identificación de sensibilidades paramétricas del modelo VIC, incluyendo un considerable número de parámetros (estándares y codificados) y para una resolución horizontal considerable (~5 km), junto con la caracterización de patrones espaciales e interpretación de procesos a lo largo del territorio nacional. Los principales hallazgos de este estudio son:

- 31 de 43 parámetros (es decir, 72%) entregan poca o ninguna sensibilidad, la mayoría de los cuales corresponde a parámetros de suelo y vegetación. Por lo tanto, la incorporación de dichos parámetros en el proceso de calibración conducirá a mejoras mínimas en representaciones de procesos, con considerables costos computacionales.
- Las tres métricas de evaluación enfocadas en los procesos de nieve y ablación son altamente sensibles a los parámetros codificados. La exposición de estos parámetros, sin duda, ampliará las capacidades para realizar análisis exhaustivos y mejorar la fidelidad del modelo VIC, así como caracterizaciones de incertidumbre paramétrica.

- Las sensibilidades paramétricas varían dependiendo de las condiciones climáticas en las cuencas estudiadas. En ambientes húmedos, los parámetros más importantes están relacionados con la tercera capa de suelo ( $W_s$ ,  $D_s$ ,  $D_{sMAX}$  y  $Depth_3$ ) y la vegetación ( $R_{min}$ ), mientras que, en zonas áridas, los parámetros más influyentes están asociados con las primeras capas de suelo ( $INFILT$ ,  $Expt_2$ , y  $Depth_2$ ).
- En áreas dominadas por la nieve, los parámetros no expuestos al usuario NEW ALB, ALB THA y ALB AA proporcionan una gran sensibilidad al SWE máximo, la duración de la temporada de nieve y la sublimación.
- El índice de área foliar (LAI) es un parámetro crucial en cualquier lugar con cobertura vegetal. Si bien esta condición es más habitual en ambientes húmedos, la importancia de este parámetro responde a las características de la vegetación, que no necesariamente se correlacionan con patrones climáticos.

Los resultados indican que 12 (de 43) parámetros del modelo VIC son sensibles y que, por lo tanto, deben incluirse en la etapa de calibración del modelo, además, los resultados presentados aquí constituyen una guía sobre los parámetros relevantes de acuerdo a los procesos de interés del modelador y el tipo de clima imperante dentro del dominio de interés.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada parcialmente por la infraestructura de supercomputación del NLHPC (ECM-02). Pablo Mendoza recibió apoyo del Proyecto Fondecyt 11200142 y del proyecto CONICYT/PIA AFB220002. Los autores agradecen a Eduardo Muñoz-Castro y Nicolás Vásquez por su asesoramiento y asistencia en la creación de modelos de simulación, y a Ximena Vargas, Miguel Lagos, Naoki Mizumaki y Andrew Newman por sus sugerencias sobre versiones anteriores de este manuscrito.

## REFERENCIAS

- Addor, N. and Melsen, L. A.: Legacy, Rather Than Adequacy, Drives the Selection of Hydrological Models, *Water Resour. Res.*, 55, 378–390, <https://doi.org/10.1029/2018WR022958>, 2019.
- Alvarez-garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., and Garreaud, R.: The CAMELS-CL dataset : catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset, 5817–5846, 2018.
- Andreadis, K. M. and Lettenmaier, D. P.: Trends in 20th century drought over the continental United States, *Geophys. Res. Lett.*, 33, 1–4, <https://doi.org/10.1029/2006GL025711>, 2006.
- Andreadis, K. M., Storck, P., and Lettenmaier, D. P.: Modeling snow accumulation and ablation processes in forested environments, *Water Resour. Res.*, 45, 1–13, <https://doi.org/10.1029/2008WR007042>, 2009.
- Blondin, C.: Parameterization of Land-Surface Processes in Numerical Weather Prediction, *L. Surf. Evaporation*, 31–54, [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3032-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3032-8_3), 1991.
- Brooks, R. and Corey, A.: Hydraulic properties of porous media, *Hydrol. Pap. Color. State Univ.*, 3, 37 pp, 1964.
- Chaney, N. W., Herman, J. D., Reed, P. M., and Wood, E. F.: Flood and drought hydrologic monitoring: The role of model parameter uncertainty, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 3239–3251, <https://doi.org/10.5194/hess-19-3239-2015>, 2015.
- Clark, M. P., Nijssen, B., Lundquist, J. D., Kavetski, D., Rupp, D. E., Woods, R. A., Freer, J. E., Gutmann, E. D., Wood, A. W., Brekke, L. D., Arnold, J. R., Gochis, D. J., and Rasmussen, R. M.: A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept, *Water Resour. Res.*, <https://doi.org/10.1002/2015WR017198>, 2015.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A.,

Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J. J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. N., and Vitart, F.: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 553–597, <https://doi.org/10.1002/qj.828>, 2011.

Demaria, E. M., Nijssen, B., and Wagener, T.: Monte Carlo sensitivity analysis of land surface parameters using the Variable Infiltration Capacity model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 112, 1–15, <https://doi.org/10.1029/2006JD007534>, 2007.

DGA: Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Santiago, Chile, 2017.

DGA: Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro, SIT N° 435, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Elaborado por UNTEC en UTP con la P.U. Católica de Chile, Santiago, Chile, 2018.

DGA: Aplicación de La Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Macrozona Sur y Parte de la Macrozona Austral, SIT N° 441, Santiago, Chile, 2019.

DGA: Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de la Parte Sur de la Macrozona Austral e Isla de Pascua, SIT N° 444, Santiago, Chile, 2020.

Ducoudré, N. I., Laval, K., and Perrier, A.: SECHIBA, a New Set of Parameterizations of the Hydrologic Exchanges at the Land-Atmosphere Interface within the LMD Atmospheric General Circulation Model, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<0248:sansop>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<0248:sansop>2.0.co;2), 1993.

Fisher, R. A. and Koven, C. D.: Perspectives on the Future of Land Surface Models and the Challenges of Representing Complex Terrestrial Systems, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 12, <https://doi.org/10.1029/2018MS001453>, 2020.

Franchini, M. and Pacciani, M.: Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models, *J. Hydrol.*, 122, 161–219, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(91\)90178-K](https://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90178-K), 1991.

Gou, J., Miao, C., Duan, Q., Tang, Q., Di, Z., Liao, W., Wu, J., and Zhou, R.: Sensitivity Analysis-Based Automatic Parameter Calibration of the VIC Model for Streamflow Simulations Over China, *Water Resour. Res.*, 56, 1–19, <https://doi.org/10.1029/2019WR025968>, 2020.

van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., and Srinivasan, R.: A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models, *J. Hydrol.*, 324, 10–23, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008>, 2006.

Hornberger, G. and Spear, R.: Approach to the preliminary analysis of environmental systems, *J. Environ. Mgmt.*, 12:1, 7–18, 1981.

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Burges, S. J.: A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, *J. Geophys. Res.*, 99, 14415, <https://doi.org/10.1029/94JD00483>, 1994.

Lilhare, R., Pokorny, S., Déry, S. J., Stednyk, T. A., and Koenig, K. A.: Sensitivity analysis and uncertainty assessment in water budgets simulated by the variable infiltration capacity model for Canadian subarctic watersheds, *Hydrol. Process.*, 34, 2057–2075, <https://doi.org/10.1002/hyp.13711>, 2020.

Melsen, L., Teuling, A., Torfs, P., Zappa, M., Mizukami, N., Clark, M., and Uijlenhoet, R.: Representation of spatial and temporal variability in large-domain hydrological models: Case study for a mesoscale pre-Alpine basin, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 2207–2226, <https://doi.org/10.5194/hess-20-2207-2016>, 2016.

Melsen, L. A. and Guse, B.: Climate change impacts model parameter sensitivity-implications for calibration strategy and model diagnostic evaluation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 1307–1332, <https://doi.org/10.5194/hess-25-1307-2021>, 2021.

Mendoza, P. A., Clark, M. P., Barlage, M., Rajagopalan, B., Samaniego, L., Abramowitz, G., and Gupta, H.: Are we unnecessarily constraining the agility of complex process-based models?, *Water Resour. Res.*, 51, 716–728, <https://doi.org/10.1002/2014WR015820>, 2015a.

Mendoza, P. A., Clark, M. P., Mizukami, N., Newman, A. J., Barlage, M., Gutmann, E. D., Rasmussen, R. M., Rajagopalan, B., Brekke, L. D., and Arnold, J. R.: Effects of hydrologic model choice and calibration on the portrayal of climate change impacts, *J. Hydrometeorol.*, 16, 762–780, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0104.1>, 2015b.

Misirli, F., Gupta, H. V., Sorooshian, S., and Thiemann, M.: Bayesian recursive estimation of parameter and output uncertainty for watershed models, vol. 6, edited by: Duan, Q., Gupta, H. V., Sorooshian, S., Rousseau, A. N., and Turcotte, R., American Geophysical Union, Washington, D. C., 113–124, <https://doi.org/10.1029/WS006p0113>, 2003.

Mizukami, N., P. Clark, M., G. Slater, A., D. Brekke, L., M. Elsner, M., R. Arnold, J., and Gangopadhyay, S.: Hydrologic Implications of Different Large-Scale Meteorological Model Forcing Datasets in Mountainous Regions, *J. Hydrometeorol.*, 15, 474–488, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-036.1>, 2014.

Morris, M. D.: Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments, 33, 161–174, <https://doi.org/10.1080/00401706.1991.10484804>, 1991.

- Niu, G. Y., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., Kumar, A., Manning, K., Niyogi, D., Rosero, E., Tewari, M., and Xia, Y.: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116, D12109, <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>, 2011.
- Pokhrel, P. and Gupta, H. V.: On the use of spatial regularization strategies to improve calibration of distributed watershed models, *Water Resour. Res.*, 46, W01505, <https://doi.org/10.1029/2009WR008066>, 2010.
- Rakovec, O., Hill, M. C., Clark, M. P., Weerts, A. H., Teuling, A. J., and Uijlenhoet, R.: Distributed evaluation of local sensitivity analysis (DELSA), with application to hydrologic models, *Water Resour. Res.*, 50, 409–426, <https://doi.org/10.1002/2013WR014063>, 2014.
- Rosero, E., Yang, Z. L., Gulden, L. E., Niu, G. Y., and Gochis, D. J.: Evaluating enhanced hydrological representations in Noah LSM over transition zones: Implications for model development, *J. Hydrometeorol.*, 10, 600–622, <https://doi.org/10.1175/2009JHM1029.1>, 2009.
- Roudier, P., Andersson, J. C. M., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W., and Ludwig, F.: Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming, *Clim. Change*, 135, 341–355, <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1570-4>, 2016.
- Sobol, I. M.: Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates, *Math. Comput. Simul.*, 55, 271–280, [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6), 2001.
- Swenson, S. C., Clark, M., Fan, Y., Lawrence, D. M., and Perket, J.: Representing Intrahillslope Lateral Subsurface Flow in the Community Land Model, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 11, 4044–4065, <https://doi.org/10.1029/2019MS001833>, 2019.
- Tian, Y., Woodcock, C. E., Wang, Y., Privette, J. L., Shabanov, N. V., Zhou, L., Zhang, Y., Buermann, W., Dong, J., Veikkanen, B., Häme, T., Andersson, K., Ozdogan, M., Knyazikhin, Y., and Myneni, R. B.: Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product I. Uncertainty assessment, *Remote Sens. Environ.*, 83, 414–430, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00047-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00047-0), 2002.
- Tonkin, M. J. and Doherty, J.: A hybrid regularized inversion methodology for highly parameterized environmental models, *Water Resour. Res.*, 41, 1–16, <https://doi.org/10.1029/2005WR003995>, 2005.
- USACE: Snow hydrology: Summary report of the snow investigations, North Pacific Division, Corps of Engineers, U.S. Army, 1956.
- Vásquez, N., Cepeda, J., Gómez, T., Mendoza, P. A., Lagos, M., Boisier, J. P., Álvarez-Garretón, C., and Vargas, X.: Catchment-Scale Natural Water Balance in Chile, in: *Water Resources of Chile*, 189–208, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3_9), 2021.
- Verbist, K., Santibañez, F., Gabriels, D., and Soto, G.: Documento Técnico N° 25. Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe, 48 pp., 2010.
- Vořechovský, M.: Hierarchical Refinement of Latin Hypercube Samples, *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, 30, 394–411, <https://doi.org/10.1111/mice.12088>, 2015.
- Van Werkhoven, K., Wagener, T., Reed, P., and Tang, Y.: Characterization of watershed model behavior across a hydroclimatic gradient, *Water Resour. Res.*, 44, 1–16, <https://doi.org/10.1029/2007WR006271>, 2008.
- Wi, S., Ray, P., Demaria, E. M. C., Steinschneider, S., and Brown, C.: A user-friendly software package for VIC hydrologic model development, *Environ. Model. Softw.*, 98, 35–53, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.006>, 2017.
- Xie, Z., Yuan, F., Duan, Q., Zheng, J., Liang, M., and Chen, F.: Regional parameter estimation of the VIC land surface model: Methodology and application to river basins in China, *J. Hydrometeorol.*, 8, 447–468, <https://doi.org/10.1175/JHM568.1>, 2007.
- Yang, Y., Pan, M., Lin, P., Beck, H. E., Zeng, Z., Yamazaki, D., David, C. H., Lu, H., Yang, K., Hong, Y., and Wood, E. F.: Global reach-level 3-hourly river flood reanalysis (1980–2019), *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 102, E2086–E2105, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0057.1>, 2021.
- Yeste, P., García-Valdecasas Ojeda, M., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., and Esteban-Parra, M. J.: Integrated sensitivity analysis of a macroscale hydrologic model in the north of the Iberian Peninsula, *J. Hydrol.*, 590, 125230, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125230>, 2020.
- Zhao, Q., Ye, B., Ding, Y., Zhang, S., Yi, S., Wang, J., Shangguan, D., Zhao, C., and Han, H.: Coupling a glacier melt model to the Variable Infiltration Capacity (VIC) model for hydrological modeling in north-western China, *Environ. Earth Sci.*, 68, 87–101, <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1718-8>, 2013.
- Zhao, R.-J., Zuang, Y.-L., Fang, L.-R., Liu, X.-R., and Zhang, Q.-S.: Xinnanjiang Model., *IAHS-AISH Publ.*, 351–356, 1980.