

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE LA ESCORRENTÍA EN
LOS RÍOS SILOLI Y LOA A TRAVÉS DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA
DISTRIBUIDA**

NAHUEL VILLARROEL V.¹
MIGUEL LAGOS Z.²

RESUMEN

Las cuencas de la zona norte de Chile presentan condiciones de extrema aridez y escasez de recursos hídricos, caracterizándose por desarrollar su recarga principalmente en las zonas andinas, y presentar importantes interacciones con acuíferos, estas singulares condiciones han dificultado la comprensión acabada de sus ciclos hidrológicos. Esta investigación estudia el balance hídrico de las cuencas andinas del río Loa definidas por las estaciones DGA “Río Siloli Antes B.T Fcab” y “Río Loa antes Represa Lequena”, a través del modelo VIC, calibrando a nivel diario en base al índice KGE.

Los resultados sugieren que la incorporación de flujos bases mejoran las calibraciones logradas sin separar el hidrograma previamente. Los criterios de separación del hidrograma: *the recursive digital filter method* en Siloli y caudal base constante en Lequena, muestran mejoras respecto al caso base con un KGE pasando de -0.039 a 0.133 en la cuenca del Siloli y de 0.54 a 0.58 en la cuenca de Lequena en los periodos de calibración (2001-2009) y (1991-2001) respectivamente, en los periodos de validación el índice no presenta mejoras.

Los bajos desempeños del modelo indican que VIC en su versión actual no es capaz de representar los flujos dominantes en las cuencas, planteando como hipótesis la necesidad de utilizar modelos que integren esta interacción a través flujos subterráneos entre distintas celdas del modelo.

¹Estudiante, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María–
Nahuel.villarroel@alumnos.usm.cl

² Profesional Docente, Depto. Ing. Civil e Investigador asociado, AMTC, U. de Chile– miguel.lagos@amtc.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas hídricos en el norte grande presentan un comportamiento singular que los distingue de cuencas de la zona centro y sur. Estos son caracterizados por desarrollar su recarga principalmente en las zonas andinas, y presentar una importante componente de flujo subterráneo e interacciones con acuíferos (Favier et al., 2009), estas singulares condiciones han dificultado la comprensión acabada de sus ciclos hidrológicos (DGA, 2017) planeando desafíos para su investigación.

Estudios anteriores han profundizado en el ciclo hidrológico de la zona, en este sentido el balance hídrico del año (1987) que entregó los componentes del balance hídrico por cuenca a nivel anual, presentó discrepancias de $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ en el balance de la estación “Río Loa antes Represa Lequena” en adelante “Lequena”; destacando las dificultades de estudios en la zona norte, que por la escasez de registros se utilizaron de 20 años en vez de los 30 años disponibles en ese momento en el resto del país. Además se destaca la dificultad de realizar balances hídricos en zonas de montaña por la falta de mediciones en áreas altas y su poca representatividad espacial.

A la fecha han pasado 30 años, en que los registros se han hecho más extensos y gracias al avance de la tecnología se cuenta con nuevos métodos de obtención y validación de mediciones como registros en tiempo real, análisis de imágenes satelitales y reanálisis climáticos; en este contexto el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (2017) desarrolla un estudio del balance hídrico en cinco cuencas piloto entre ellas el río Loa, aun con estas condiciones más favorables el estudio del ciclo hidrológico en la zona del norte grande presenta dificultades en la representación fidedigna de caudales observados, presentando discrepancias en las cuencas andinas.

En este contexto otras disciplinas de las ciencias de la tierra presentan importantes herramientas de exploración; en el área de la hidrogeoquímica el estudio “Caracterización hidrogeoquímica de la cuenca del Loa alto” desarrollado por la DGA (2014) realiza un estudio de la composición hidroquímica e isotópica de las aguas para caracterizar la componente subterránea del ciclo hidrológico, identificando el funcionamiento de sus variables como: acuíferos, zonas de recarga y descarga. Sus resultados muestran evidencias de la potencial circulación subterránea de agua entre cuatro cuencas vecinas donde tres de ellas tienen como destino la cuenca del río Loa; estas cuencas aportantes son: el salar de Ascotan, la Pampa Puno y la cuenca del río San Pedro, estos resultados plantean además la posibilidad de discrepancia entre cuencas hidrográficas y cuencas hidrogeológicas. Por su parte Magaritz (1990) ha estudiado anomalías químicas e isotópicas, que no son explicadas por flujos basados en superficies potenciométricas, estas plantean la existencia de flujos regionales profundos que subyacen los acuíferos del área y los recargan mediante canales formados por fallas verticales. Respecto a estudios de ajuste de modelos hidrológicos en la zona se dispone de escasa información, destacando el proyecto de DGA (2017), por otro lado una cantidad importante de estudios corresponden a evaluaciones de impacto ambiental de extracciones de agua subterránea para las mineras del sector y se estima que otro nicho de información de estudios relacionados está en posesión de compañías mineras y presentan carácter privado o confidencial.

El objetivo de este artículo, es mostrar los resultados obtenidos al utilizar un modelo hidrológico de base física calibrado mediante un algoritmo de optimización global que modele los caudales medios diarios observados a través del índice de Kling-Gupta KGE (Gupta et al., 2009) en las cuencas de los ríos Lequena y Siloli. Se muestran también los efectos de considerar el flujo base como externo a cada hoya hidrográfica.

2. ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

El trabajo se realiza en la zona andina de la cuenca del río Loa ubicada en el Norte Grande de Chile, abarcando las regiones de Antofagasta y Tarapacá, y parte del territorio del Estado Plurinacional de Bolivia como presenta la Figura 1. El área posee un clima desértico con fuertes oscilaciones térmicas diarias y un régimen pluvial irregular, con fuerte variación inter anual y lluvias en los meses estivales producto de flujos de humedad provenientes del atlántico. La presencia del anticiclón del Pacífico determina la aridez de la zona al impedir la entrada al continente de corrientes de humedad provenientes del océano. Las cuencas presentan un régimen pluvial y clima de estepa de altura con escasos asentamientos humanos y mínima intervención; están ubicadas en la unidad morfológica de la Cordillera de los Andes, donde la topografía es abrupta presentando cambios de cota considerables entre los valles y, las montañas y volcanes que los limitan. El material, principalmente volcánico, que compone el terreno tiene un origen cenozoico a cuaternario.

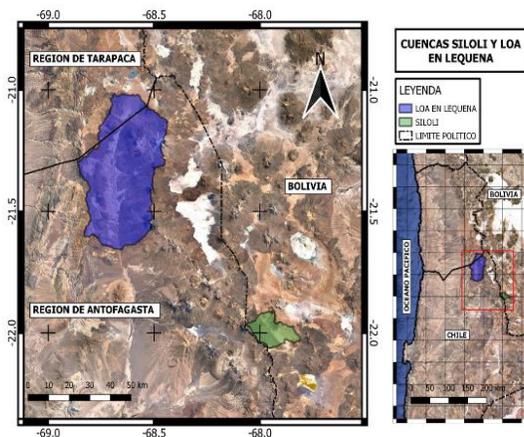


Figura 1. Ubicación cuencas en estudio

Modelo hidrológico VIC

La modelación se realiza a través del modelo Variable Infiltration Capacity - VIC (Liang et al., 1994) es un modelo semi distribuido de macro escala, este divide el área en múltiples celdas de igual dimensión que componen la unidad básica de estudio, donde se realiza un balance de energía y de masa de forma independiente sin conexión entre ellos. VIC no incorpora la modelación de acuíferos y trabaja con catorce parámetros. A continuación se describen con más detalles los parámetros relacionados al flujo base.

Binfilt (b_i): describe la curva de infiltración variable en la capa superior del terreno; valores altos del parámetro generan menor infiltración y mayor escorrentía superficial.

Ds max: Corresponde al máximo flujo base que puede escurrir desde la última capa de suelo; su valor depende de la conductividad hidráulica y sus unidades están en milímetros por día.

Ds: Fracción de Dsmax donde el flujo base no lineal comienza. En este punto el flujo aumenta rápidamente. Si Ds adquiere valores altos el flujo base será mayor para menores contenidos de agua en la última capa.

Ws: Fracción de la máxima humedad de la capa inferior de suelo en que se produce el flujo base no lineal. Valores altos del parámetro aumentan el contenido de agua requerido para generar un aumento rápido del flujo base, de forma similar a Ds, por lo que valores altos retrasan los máximos del caudal.

Cexpt: Exponente de la ecuación de conductividad hidráulica no saturada según la formula Brooks y Corey (Maidment, 1993) al aumentar el parámetro disminuye la conductividad hidráulica para medios no saturados.

Espesores del suelo: En general el aumento del espesor disminuye los caudales máximos estacionales, aumentando el aporte del flujo base e incrementan las pérdidas debido a evapotranspiración. La capacidad máxima de almacenar agua es la característica más sensible a la variación del espesor. En general entre más espesor, se genera menos escorrentía.

Respecto a la sensibilidad de los parámetros Demaria (2007) describe un análisis de sensibilidad con el método de Monte Carlo sobre diez parámetros que controlan la generación de escorrentía, el estudio identificó como los parámetros más sensitivos a: el parámetro de la curva de infiltración (binfilt), el exponente en la ecuación de conductividad hidráulica (cexpt) y el espesor de la segunda capa de suelo (depth2). Este análisis es motivado debido al aumento de los parámetros utilizados por los modelos hidráulicos actuales dada la gran cantidad de procesos que estos representan, donde muchos de estos no pueden ser medidos directamente en grandes extensiones de terreno y deben ser calibrados, así la determinación de parámetros redundantes es utilizada para simplificar los procesos.

Forzantes meteorológicas

Los datos hidrometeorológicos utilizados en el modelo VIC son obtenidos del estudio “Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macro zonas norte y centro” (DGA, 2018) La base de datos se presenta en un producto grillado con resolución espacial de 0.05° de latitud y longitud o aproximadamente cinco kilómetros y distribución temporal entre los años 1979 y 2015. En la Tabla 1 se presenta una lista de información utilizada en la investigación.

Tabla 1 Atributos de las cuencas. Fuente CAMELS-CL.

Atributo	Río Siloli Antes B.T Fcab	Río Loa antes Represa Lequena
Código BNA	2103014-7	2101001-4
Comuna	Ollague	Calama
Área cuenca	235 km ²	2083 km ²
Elevación estación	4323 msnm	3315 msnm
Latitud	22° 00' 49"	21° 39' 21"
Longitud	68° 01' 44"	68° 39' 43"
Elevación media	4699 msnm	4094 msnm

Elevación máxima	5685 msnm	6164 msnm
Pendiente media	98.4 m/km	100.1 m/km
Caudal medio anual	0.16 m ³ /s	0.57 m ³ /s
Precipitación anual (CR2MET)	166 mm	109 mm

Modelación hidrológica realizada

El proceso comienza con un análisis preliminar, donde se grafican las series de tiempo meteorológicas del producto grillado, que se utilizan como forzantes y se contrastan con los caudales observados, para realizar un análisis cualitativo de su relación y comportamiento. Se elaboran curvas de variación estacional (Villarreal, 2019) de caudales y precipitaciones para diferentes probabilidades de excedencia. La separación del hidrograma entre flujo base y escorrentía directa se realiza mediante cuatro criterios. Para su utilización se rellenaron linealmente los caudales observados y una vez obtenidas ambas series de tiempo se eliminaron los datos rellenados y así no agregar incertidumbre al sistema. Los métodos utilizados son:

- 1.-Caudal Base Constante: Flujo base constante expresado en porcentaje del caudal medio anual, este experimento se realiza en ambas cuencas para un set de cinco porcentajes.
- 2.-Local Minimum Method (Purdue University, 2010): Flujo Base calculado conectando los puntos mínimos locales del hidrograma al comparar su pendiente.
- 3.-One parameter digital filter method (Purdue University, 2010): Método utilizado en el análisis de señales donde la escorrentía directa contiene las señales de alta frecuencia mientras que el flujo base las de baja frecuencia; se basa en la hipótesis de que el flujo base de una cuenca es proporcional a su almacenamiento, caracterizado por el parámetro de la curva de recesión.
- 4.-The recursive digital filter method (Purdue University, 2010): Similar al anterior, este agrega un parámetro llamado BFI que corresponde a la proporción entre flujo base y flujo total.

La calibración del modelo se realiza mediante el algoritmo de búsqueda global SCE-UA (Duan, et al., 1992). Para la comparación de las series de tiempo de caudales observadas y modelados se utilizan cinco firmas hidrológicas (Casper et al., 2012) utilizadas en el DGA (2017), estos índices comparan coeficiente de escorrentía y pendientes de la curva de duración. Cada coeficiente está enfocado en analizar el desempeño de un segmento del ciclo de escorrentía, sus valores óptimos se ubican en cero, y los valores positivos indican un aumento en el comportamiento modelado respecto del observado, mientras que valores negativos representan una disminución. Una vez obtenidos los resultados se ordenan los índices de desempeño KGE y NSE de los experimentos para periodos de validación y calibración. Luego se estudia el resultado de la modelación mediante un análisis gráfico. En cuanto a los parámetros: se realiza un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más influyentes en la modelación del sistema, en base a cinco mil iteraciones en el proceso de calibración.

3. RESULTADOS

La Tabla 2 presenta los resultados en el periodo de calibración y validación para todos los experimentos realizados. En la cuenca “Río Siloli Antes B.T Fcab”, en adelante Siloli, el mejor desempeño se obtiene para el criterio de estimación de flujo base *The recursive digital filter*

Method, mientras que en Lequena éste se consigue con el criterio de caudal base constante, equivalente a un 50% del caudal medio anual obtenido por sucesivas iteraciones procurando mantener una escorrentía directa realista. En adelante se presentara para cada cuenca el caso base contrastado con el experimento de mejor desempeño.

Tabla 2. Índices de las simulaciones hidrológicas

Experimento	Siloli				Lequena			
	Calibración		Validación		Calibración		Validación	
	NSE	KGE	NSE	KGE	NSE	KGE	NSE	KGE
<u>Caudal Original</u>	-2.6	-0.02	-7.2	-0.3	0.03	0.54	-1.1	0.07
<u>Criterios Separación del hidrograma</u>								
Caudal base Constante	-0.6	0.02	-10	-0.9	0.14	0.58	-2	-0.68
Local Minimum Method	-2.9	-0.22	-2.6	-0.16	0.15	0.21	-0.37	0.02
One parameter digital filter	-1.7	0.01	-2.1	-0.18	0.13	0.27	-0.4	0.06
The recursive digital filter	-0.7	0.13	-2.23	0.03	0.09	0.51	-1.8	-0.3
<u>Porcentaje del caudal medio extraído</u>								
20%	-2.0	0.0	-6.9	-0.34	0.08	0.54	-1.2	0.0
40%	-14	-0.25	-6	-0.42	0.12	0.56	-0.9	0.02
60%	-6.4	-0.2	-5	-0.6	0.15	0.58	-2.1	-0.8
80%	-1.7	-0.07	-12	-1.4	0.25	0.58	-0.9	-0.8
100%	-0.9	0.09	-16	-1.9	0.02	0.34	-0.7	-0.1

Las firmas hidrológicas dan buenos resultados tanto en volúmenes (RR) como en sus promedios (FMM), en cuanto a la pendiente de la sección media (FMS) las cuencas presentan resultados opuestos.

Tabla 3. Firmas Hidrológicas en periodos de calibracion para experimentos: a) Caudal Original b) Caudal base Constante c) Local Minimum Method d) One parameter digital filter Method e) The recursive digital filter Method

Caso	Siloli					Lequena				
	RR	FMS	FHV	FLV	FMM	RR	FMS	FHV	FLV	FMM
a)	-15	-52	-14	85	0.09	-4	145	36	-88	0.09
b)	4	-88	-12	99	-0.15	-2.2	104	36	24	0.02
c)	-3	-26	17	-	0.005	22	6	36	-	-0.07
d)	1.2	-68	5.5	-	0	19	49	43	-	-0.06
e)	-0.2	-70	-3.5	99	0	4	222	58	78	-0.02

A continuación se presentan las series de precipitaciones, caudales modelados y caudales observados en la Figura 2 y Figura 3 las que al costado derecho presentan un diagrama de la curva de duración y el diagrama de Wundt con las componentes medias mensuales del ciclo hidrológico. En la Tabla 4 se presentan los valores de los parámetros calibrados en dos experimentos para cada cuenca.

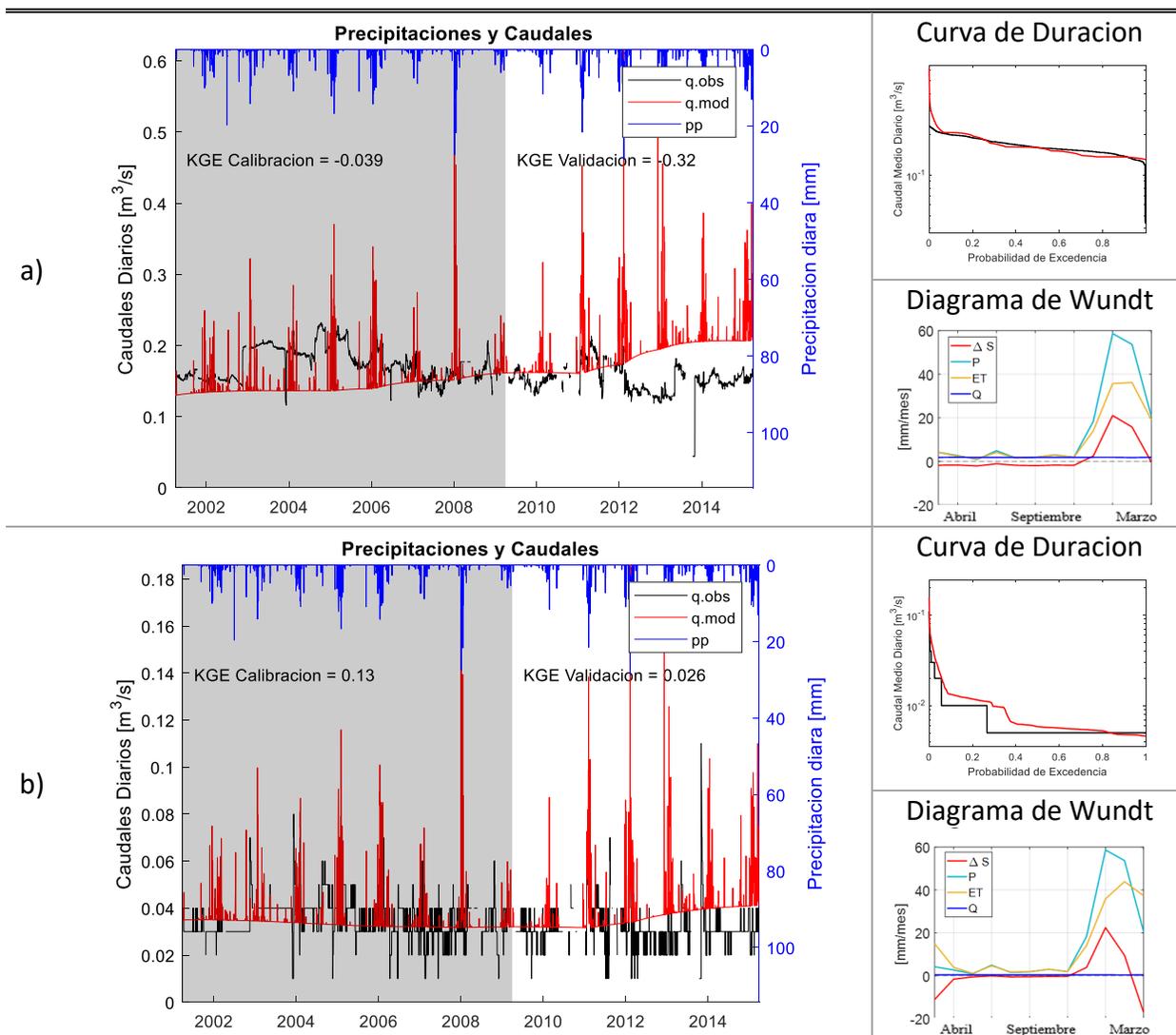


Figura 2 Modelación hidrológica en cuenca Siloli: a) Modelación del caso base, b) Modelación en base a escorrentía directa por criterio recursive digital filter.

Tabla 4. Parámetros calibrados en cuencas Siloli y Lequena donde: a) Modelación del caso base, b) Modelación en base a escorrentía directa.

Parametro	bimfil	Ds	Dsma	Ws	cexpt	Dept	Dept _{k1}	Dept _{k2}	Dept _{k3}	newal	albaa	Albth	ksat	Tmin	rsno
Cuenca	t														w
Siloli (a)	0.013	0.22	0.32	0.79	3	0.28	3.9	3.9	0.84	0.9	0.78	0.095	1.9	0.000001	
Siloli (b)	0.005	0.24	0.48	0.71	3.5	1.4	3.9	3.9	0.85	0.89	0.84	10.5	1.9	0.000004	
Lequena (a)	0.032	0.9	91	0.1	4.2	0.54	0.68	0.57	0.91	0.91	0.78	4	-0.25	0.0063	
Lequena (b)	0.014	0.98	98	0.1	8.6	0.1	0.62	0.56	0.87	0.87	0.89	12.6	-1.9	0.0014	

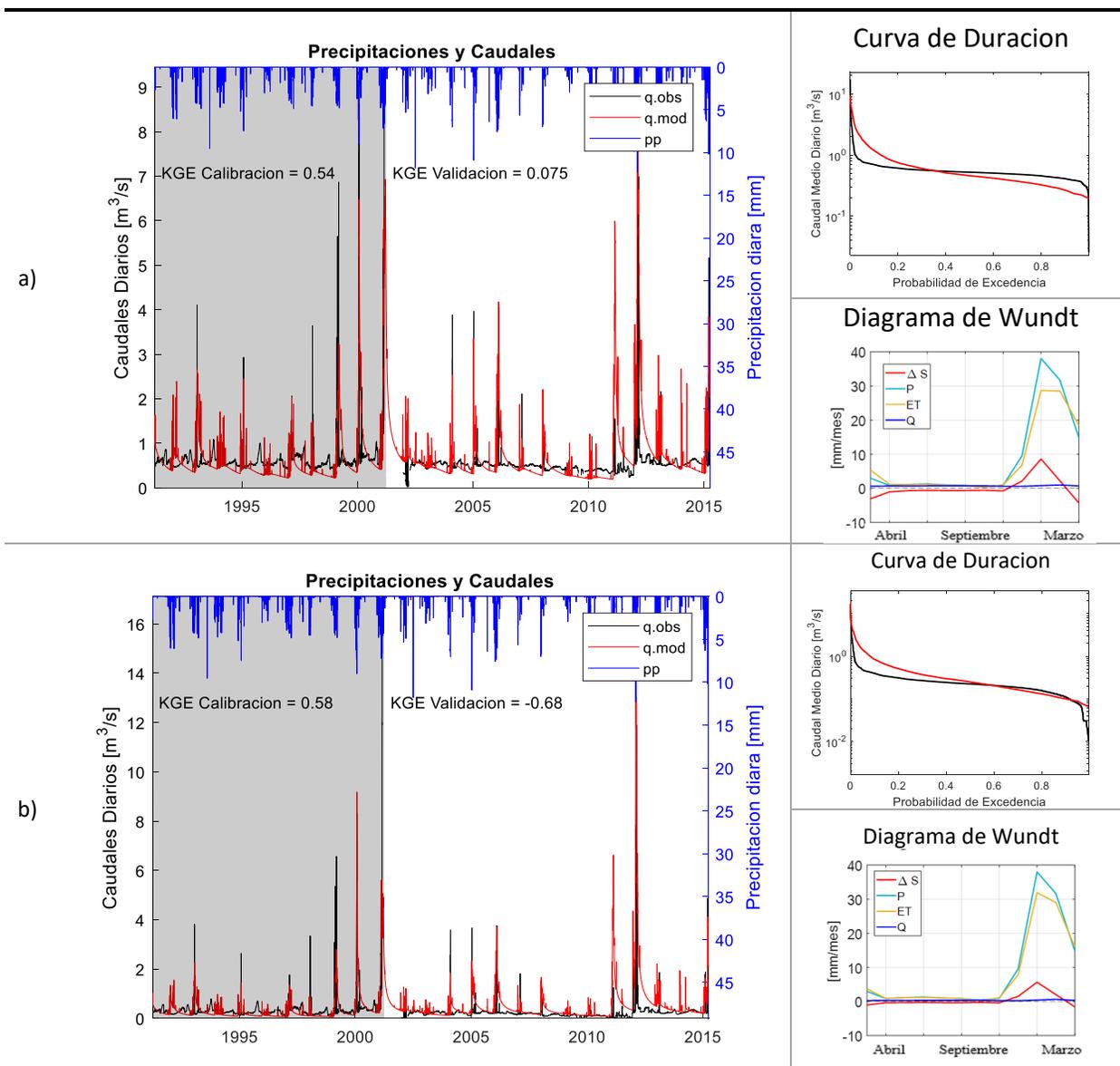


Figura 3 Modelación hidrológica cuenca Lequena: a) Modelación del caso base, b) Modelación en base a escorrentía directa.

La Tabla 5 presenta un resumen de los parámetros más sensibles sobre el modelo, principalmente compuestos por los parámetros de flujo base, sin mayor participación de los de nieve.

Tabla 5. Sensibilidad de la función objetivo ante los parámetros calibrados. Se indica “s” o “ns” si es sensible o no.

Parametro	binfilt	Ds	Dsmax	Ws	cexpt	Depth1	Depth2	Depth3	newalb	albaa	Albtha	ksat	Tmin	rsnow
Cuenca														
Siloli	S	NS	NS	NS	S	S	S	NS	NS	NS	NS	S	NS	NS
Lequena	S	S	S	S	NS	S	S	S	S	NS	NS	NS	NS	NS

4. DISCUSIONES

Una visión general del sistema sugiere dos fuentes principales de incertidumbre, siendo la incompleta representación de los procesos subterráneos por VIC y la escasez tanto espacial como temporal de mediciones en terreno. Respecto a la representación de los procesos subterráneos, estos son excluidos al modelar en base a la escorrentía directa. En el caso que VIC incorporara una función para flujos subterráneos aún subsistirían los inconvenientes dada la dificultad de obtener información para cuantificar estos procesos.

Los caudales de la estación Lequena presentan variaciones estacionales con un notorio aumento en los meses de verano, durante los años secos el caudal se mantiene estable en torno a $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Los caudales en la estación Siloli presentan baja variabilidad estacional manteniendo caudales medios mensuales cercanos a $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$, en este aspecto los caudales de Siloli no muestran sensibilidad a las precipitaciones estivales, ni a su ausencia durante el resto del año.

El criterio de separación de caudales que obtuvo los mejores resultados en Siloli genera un caudal base variable y una escorrentía más constante en el tiempo, con un caudal medio de $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ y rango entre 0.01 y $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$. Para Lequena la serie de escorrentía directa asociada a un caudal base constante entregó mejoras del índice KGE. El balance hídrico de las cuencas con series de escorrentía directa presenta un comportamiento similar al original (Figura 2 y Figura 3), donde el balance cierra mejor que para los casos base, manteniendo una discrepancia anual del orden de los caudales con valores de q y ΔS de 4.5 y 3.6 [mm] para siloli , 4.2 y 4.3 [mm] para lequena.

El criterio de caudal base constante es reevaluado en ambas cuencas para distintos valores calculados como porcentaje del caudal medio anual. En Siloli el aumento del caudal base incrementa también el valor del KGE hasta llegar al límite superior del experimento no pudiéndose identificar un óptimo; considerando que el mejor desempeño se logra por otro criterio para un caudal del 80% se descarta la hipótesis de caudales base constantes en Siloli. En Lequena el crecimiento del caudal base conlleva un aumento del KGE hasta alcanzar un óptimo en el 60% del caudal medio anual para luego disminuir rápidamente.

El proceso de calibración del modelo mediante el algoritmo SCE-UA facilita la búsqueda de óptimos globales dada la complejidad de realizar el proceso de forma manual, considerando que los parámetros se encuentran inter relacionados. Sin embargo, se descuida el significado físico de cada parámetro, pudiendo resultar en óptimos que no se relacionen con las características de la cuenca (Kirchner, 2006). En este sentido, el uso conjunto de métodos de calibración automática y estimaciones de rangos basados en estudios en terreno permiten la obtención de resultados más robustos.

La baja sensibilidad de la escorrentía del río Siloli ante las precipitaciones puede ser explicada teóricamente por: i) una alta capacidad de infiltración de la cuenca, ii) una elevada tasa de evapotranspiración, iii) Que prácticamente la totalidad de la escorrentía se explique por flujos subterráneos provenientes de tiempos significativamente mayores a los de la ocurrencia de precipitación o iv) Una falta en la representatividad tanto de la precipitación como de la escorrentía de la realidad de estos flujos.

El supuesto de una alta tasa de infiltración, coincide con los resultados de la calibración que entrega valores altos a los parámetros de infiltración y puede ser explicado también por la baja pendiente de sus laderas **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Aunque el modelo utiliza altos valores para la infiltración, no es capaz de reproducir el comportamiento presentando una fuerte respuesta a las precipitaciones. Si se considera la presencia de manantiales en la cuenca del río San Pedro aguas abajo de la estación Siloli se sigue la idea de una fuerte interacción del área con los procesos sub superficiales, y un análisis químico e isotópico para la cuenca podría ayudar a determinar el origen de las aguas de Siloli y el destino de las precipitaciones.

Respecto al sostenido caudal que presenta Siloli durante el año se puede suponer bajos valores de conductividad que modulen la salida de agua desde el terreno y la distribuyan en los meses secos. El modelo coincide con el supuesto calibrando bajos valores en parámetros de conductividad y parámetros asociados al flujo base (D_{smax} , D_s), expuestos en la Tabla 4, limitando la velocidad de salida desde la última capa, además de altos espesores de suelo permitiendo más almacenamiento de agua mientras que la conductividad hidráulica es reducida.

En el caso original de Siloli los valores modelados de la humedad en la tercera capa de suelo (Villarroel, 2019) aumentan continuamente en el tiempo debido a los altos valores de la infiltración y bajos en conductividad y velocidad de salida, generando una tasa de entrada mayor a la de salida. Esta configuración permite una acumulación de humedad en la estación húmeda que mantenga el caudal base durante la estación seca. Al no alcanzar un equilibrio de la humedad, y por lo tanto del flujo base, la coincidencia en los volúmenes durante la calibración es circunstancial ya que en tiempos futuros se tendrá mayor humedad acumulada y por ende mayor flujo base. La modificación de las condiciones iniciales de humedad y una nueva calibración son descartadas en vista que el periodo de calentamiento es extenso, veinte años, suficiente para independizar al modelo de las condiciones iniciales.

El análisis de sensibilidad del modelo respecto a los parámetros describe a aquellos relacionados al flujo base y a los de espesor de suelo como los de mayor influencia. Respecto a los parámetros de nieve solo 1 de ellos, en Lequena, presentó influencia sobre el desempeño concordante con la baja acumulación de nieve modelada en ambas cuenca (Villarroel, 2019) expresada mediante SWE. Los resultados obtenidos presentan un mayor número de parámetros sensibles en relación a los 3 descritos por Demaria (2007).

5. CONCLUSIONES

Respecto a los criterios de separación de caudales que produjeron los mejores resultados en cada cuenca, si se compara con Lequena, Siloli presenta una variabilidad significativamente menor en sus caudales diarios, con desviaciones estándar de 0.024 y 0.43 respectivamente, causado por la ausencia de eventos extremos; sin embargo, presenta variabilidad a escala inter anual. En base a lo anterior para Siloli el criterio The recursive digital filter method logra configurar un caudal base que captura toda la variación interanual dejando una escorrentía superficial más homogénea. A Lequena, que presenta un patrón de comportamiento con una marcada variación estacional, sin variaciones interanuales, se le ajusta mejor un caudal base constante que mantenga la variabilidad estacional en la escorrentía directa. Las series de caudal base seleccionadas como óptimos tienen

valores medios anuales de 0.13 m³/s para Siloli y 0.3 m³/s para Lequena, correspondientes a un 80% y un 50% del caudal medio anual.

Los valores para el índice KGE disminuyen a valores cercanos a cero o negativos en los periodos de validación por lo que se descarta la utilización del modelo en el estudio de escenarios futuros en las condiciones de esta investigación.

Del mismo modo el caudal modelado en Lequena no es capaz de mantener un caudal base estable durante el periodo seco, como sí lo presentan los caudales observados. Los caudales modelados evidencian una prolongada curva de recesión que se extiende hasta la siguiente temporada estival e impide la disminución de los caudales. Estas pueden corresponder a aportes subterráneos provenientes de fuentes locales como cuencas endorreicas vecinas (DGA, 2014) o a fuentes más lejanas con áreas de recarga en el altiplano que constituyen flujos regionales que subyacen a los acuíferos del área (Jordan et al., 2015; Magaritz et al., 1990). Lo anterior sugiere que la estructura del modelo VIC no permite explicar la fuerte componente subterránea observada en los sistemas analizados.

Las principales debilidades de VIC, en su versión actual, en el área de estudio son: no poseer funciones para describir acuíferos y, bajo el supuesto de que los flujos subterráneos son mucho menores a los superficiales no permite la conexión entre celdas que podría ayudar a describir el flujo subterráneo no solo a nivel de celda sino a nivel de cuenca, cabe destacar que en estas cuencas los caudales superficiales son tan pequeños que los caudales subterráneos podrían fácilmente alcanzar porcentajes del 50% del total con tan solo 0.25 m³/s. La utilización de modelos integrados que incorporen flujos subterráneos en el balance hídrico se presenta como una alternativa a futuro en el proceso de entendimiento de los flujos hídricos en sub cuencas andinas del río Loa.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar a mi familia, quienes han brindado un constante apoyo. Al profesor Miguel, por su orientación y enseñanza en este proceso.

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

REFERENCIAS

- Casper, M. C., Grigoryan, G., Gronz, O., Gutjahr, O., Heinemann, G., Ley, R., & Rock, A. (2012). Analysis of projected hydrological behavior of catchments based on signature indices. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(2), 409–421. <https://doi.org/10.5194/hess-16-409-2012>
- Demaria, E. M., Nijssen, B., & Wagener, T. (2007). Monte Carlo sensitivity analysis of land surface parameters using the Variable Infiltration Capacity model. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(11), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2006JD007534>
- DGA. (1987). Balance hidrológico nacional. *Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile.*
- DGA. (2014). ANÁLISIS INTEGRADO RÍO LOA REGIÓN DE ANTOFAGASTA. Ministerio

- de Obras Públicas, Departamento de Estudios y Planificación. Santiago, Chile.
- DGA. (2017). ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO NACIONAL. SIT N° 417. Ministerio de Obras Públicas, Departamento de Estudios y Planificación. Santiago, Chile.
- DGA. (2018). *APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ACTUALIZACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO NACIONAL EN LAS CUENCAS DE LAS MACROZONAS NORTE Y CENTRO*, SIT N° 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Research*, 28(4), 1015–1031.
- Favier, V., Falvey, M., Rabatel, A., Praderio, E., & López, D. (2009). Interpreting discrepancies between discharge and precipitation in high-altitude area of Chile's norte chico region (26-32°S). *Water Resources Research*, 45(2), 1–20. <https://doi.org/10.1029/2008WR006802>
- Jordan, T., Lameli, C. H., Kirk-Lawlor, N., & Godfrey, L. (2015). Architecture of the aquifers of the Calama Basin, Loa catchment basin, northern Chile. *Geosphere*, 11(5), 1438–1474. <https://doi.org/10.1130/GES01176.1>
- Kirchner, J. W. (2006). Getting the right answers for the right reasons : Linking measurements , analyses , and models to advance the science of hydrology, 42(4), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2005WR004362>
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, J. (1994). based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, 99.
- Magaritz, M., Aravena, R., Peña, H., Suzuki, O., & Grilli, A. (1990). Source of Ground Water in the Deserts of Northern Chile: Evidence of Deep Circulation of Ground Water from the Andes. *Wroundwater*, 28(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb01706.x>
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Matraz, C. A. (2014). Caracterización hidrogeoquímica de la cuenca del Loa Alto, región de Antofagasta, Chile, 451.
- Purdue University. (2010). WHAT. Retrieved from <https://engineering.purdue.edu/mapserve/WHAT/>
- Villarroel, N. (2019). *Análisis de las potenciales discrepancias existentes en el balance hídrico en las cuencas de los ríos Siloli y Loa - Chile*. Universidad Tecnica Federico Santa Maria.