



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL DE LLUVIA-ESCORRENTÍA PARA
INTERPRETACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA
ALTOANDINA DEL RÍO ZHURUCAY.**

**Trabajo de graduación
previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil**

DIRECTOR:

Ing. Patricio Javier Crespo Sánchez, Ph.D.

AUTORES:

Edgar Cristóbal Albuja Silva

Daniel Orlando Tenelanda Patiño

Cuenca - Ecuador

Junio 2014

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva

Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Resumen

La importancia de interpretar los procesos de los ecosistemas alto andinos garantiza la toma de decisiones en todos los aspectos relacionados al desarrollo y conservación de los mismos. El presente estudio se enfoca al desarrollo y evaluación de cinco modelos conceptuales del proceso lluvia-escorrentía en una microcuenca alto andina de paramo húmedo, localizada en la región sur del Ecuador. La hidrología de los suelos es representada por un máximo de tres reservorios dispuestos en serie y/o paralelo, para la evaluación del desempeño de los modelos se usó el análisis de incertidumbre GLUE. Los resultados de la simulación de las descargas avalan la aplicabilidad de modelos conceptuales basados en la hidrología de los suelos para la representación del ecosistema en el periodo de calibración como en el de validación. El modelo compuesto por dos reservorios en paralelo simula de buena forma la escorrentía, aun así los modelos con tres reservorios en serie simulan la escorrentía y brindan mejor identificabilidad de los procesos. La escorrentía es fuertemente controlada por la precipitación y las características de los suelos, el aporte de los horizontes del suelo a la escorrentía está fuertemente controlado por la humedad antecedente. Los resultados confirman que el caudal de los ríos es controlado principalmente por flujo sub-superficial lateral a través de los horizontes orgánicos en condiciones húmedas y secas, siendo indispensable el uso de un reservorio de dinámica lenta en todas las conceptualizaciones. La generación de flujo superficial es insignificante y ocurre durante ciertos eventos máximos de precipitación.

Palabras Clave [Modelación Hidrológica, Modelo Conceptual, Paramo alto-andino, Lluvia-escorrentía, Procesos hidrológicos, Balance hídrico, Análisis de incertidumbre GLUE]

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Abstract

The importance of construe the process of the high-Andean ecosystems assure the decision making in every aspect related to the development and conservation of them. The present study focusses in the development and evaluation of five conceptual models about the rainfall-runoff process in a high-Andean micro-catchment of wetlands, located in the south of Ecuador. The soil hydrology is mimicked by a maximal of three reservoirs arranged in series or/and parallel, for the evaluation of the performance the GLUE uncertainty analysis is used. The results of the discharge simulation supports the relevance of the conceptual models based on the soils hydrology to represent the ecosystem on the calibration and validation periods. The model based on two parallel reservoirs simulates on a good way the rainfall-runoff, even so the models with three reservoirs in series have the same results and provides a best identification of the processes. The rainfall-runoff is highly controlled by the precipitation and the soils properties, the contribution of the soil horizons for rainfall-runoff is controlled by the soil moisture antecedent. The results confirm that the river flow is controlled primarily by subsurface lateral flow through the organic horizons in wet and dry conditions, while the mineral horizon and the top of the fractured rock does not contribute significantly to the discharge, being necessary to use a reservoir of slow dynamics in all conceptualizations. Surface flow generation is negligible and occurs during certain maximum precipitation events.

Key Words [Hydrologic Modeling, Conceptual model, high-Andean Wetlands, Rainfall-runoff, Hydrological processes, Water balance, uncertainty analysis GLUE]

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Índice

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Lista de Tablas.....	5
Lista de Figuras	6
1. INTRODUCCION.....	12
1.1 Objetivos	15
2 MATERIALES.....	16
2.1 Área de estudio	16
2.2 Monitoreo y disponibilidad de datos	17
3 METODOLOGIA.....	19
3.1 Esquema de trabajo	19
3.2 Descripción de las estructuras conceptuales	20
3.2.1 Estructura dos reservorios en serie (2RS)	22
3.2.2 Estructura tres reservorios en serie (3RSa).....	22
3.2.3 Estructura tres reservorios en serie (3RSb).....	22
3.2.4 Estructura dos reservorios en paralelo (2RP).....	23
3.2.5 Estructura tres reservorios en paralelo (3RP).....	23
3.3 Ecuaciones de Balance Hídrico	25
3.3.1 Estimación de la evapotranspiración.....	26
3.3.2 Estimación del flujo lateral.....	27
3.3.3 Estimación de la percolación	28
3.3.4 Flujo por exceso de saturación.....	28
3.4 Numero de parámetros a calibrar	28
3.5 Calibración y validación	29
3.6 Rendimiento de los modelos	29
3.6.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe	30
3.6.2 Coeficiente de Nash-Sutcliffe modificado.....	30
3.6.3 Root mean square error (RMSE)	30
3.6.4 Sesgo Relativo BIAS.....	31

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

3.6.5	Precisión (AC%).....	31
3.7	Análisis de incertidumbre	31
3.8	Parámetros de evaluación de las Estructuras Conceptuales.....	32
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1	Lluvia-escorrentía.....	34
4.2	Comparación de las estructuras conceptuales durante el periodo de calibración y validación.	34
4.3	Evaluación de las ecuaciones de transferencia del modelo almacenamiento-flujo de salida, para recesiones de caudal.....	45
4.4	Interpretación de la producción de flujos a través del estrato orgánico y mineral	47
4.5	Interpretación de procesos	48
5	CONCLUSIONES.....	51
6	RECOMENDACIONES	53
7	REFERENCIAS	54

Lista de Tablas

Principales características granulométricas e hidrofísicas para los horizontes de suelo del Río Zhurucay	17
Numero de parámetros a calibrar en las estructuras conceptuales.....	28
Indicadores del rendimiento del modelo para el periodo de calibración y validación.....	35
Parámetros óptimos de las estructuras 3RSa y 2RP.....	45
Contribución del flujo por reservorio [%].	48
Evapotranspiración diaria.....	50



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Lista de Figuras

Mapa de la cuenca del río Zhurucay.....	18
Esquema para la selección de la estructura conceptual para el modelo de lluvia escorrentía	19
Identificación de las principales fuentes de agua que contribuyen a la generación de escorrentía en la cuenca del río Zhurucay durante diferentes caudales. 21	
Representación Esquemática de las estructuras conceptuales.....	24
Caudal observado y mejores simulaciones para las 5 estructuras y sus variantes (exp y pow). (Escala logarítmica)	37
Descarga observada y límites de incertidumbre del 5 y 95% de la descarga simulada de las estructuras analizadas.	39
Curvas de duración horarias de caudal para las 5 estructuras conceptuales y límites de incertidumbre del 5 y 95%.....	40
Dotty plots de los parámetros sensibles de las estructuras 2RP exp y 3RSa exp.	43
Análisis de los parámetros calibrados del suelo vs los obtenidos en laboratorio.	44
Curvas de recesión de la estructura 3RSa.	46
Contribución de Flujos por Reservorio, estructura 3RSa.	49



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, *Daniel Orlando Tenelanda Patiño* autor de la tesis “**DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO DE LLUVIA-ESCORRENTÍA PARA INTERPRETACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA ALTOANDINA DEL RÍO ZHURUCAY**”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **Ingeniero Civil**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, julio del 2014

Daniel Orlando Tenelanda Patiño

0104784137

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva

Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, *Edgar Cristóbal Albuja Silva* autor de la tesis **“DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO DE LLUVIA-ESCORRENTÍA PARA INTERPRETACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA ALTOANDINA DEL RÍO ZHURUCAY”**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **Ingeniero Civil**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, julio del 2014

Edgar Cristóbal Albuja Silva

0105668834

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Daniel Orlando Tenelanda Patiño, autor de la tesis “**DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO DE LLUVIA-ESCORRENTÍA PARA INTERPRETACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA ALTOANDINA DEL RÍO ZHURUCAY**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, julio del 2014

Daniel Orlando Tenelanda Patiño

0104784137

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, *Edgar Cristóbal Albuja Silva*, autor de la tesis “**DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL HIDROLÓGICO DE LLUVIA-ESCORRENTÍA PARA INTERPRETACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA ALTOANDINA DEL RÍO ZHURUCAY**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, julio del 2014

Edgar Cristóbal Albuja Silva

0105668834



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Dedicatoria

A mis padres y hermanos por haberme brindado sus enseñanzas, apoyo y amistad, a mis colegas y amigos, Patricio Crespo, Daniel Mendoza y Francisco Vega, por los consejos y comentarios prácticos que ayudaron a estructurar el estudio realizado, finalmente y de manera muy especial a Verónica y Benjamín por darme el verdadero sentido de vivir.

Daniel.

A mis padres y a mi hermana por haberme brindado apoyo y comprensión en la realización, a mis colegas y amigos, Patricio Crespo, Rolando Céleri, Daniel Mendoza y Francisco Vega por el apoyo en la culminación de este trabajo y finalmente y de manera muy especial a mi abuela por haberme enseñado a nunca rendirme ante cualquier situación en mi vida.

Cristóbal.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

1. INTRODUCCION

Los ecosistemas alto-andinos, como el páramo húmedo son de vital importancia debido a la cantidad de servicios que prestan a la sociedad. Uno de los servicios más importantes es el almacenamiento y regulación del agua (Celleri & Feyen, 2009), (Rodríguez, Schwarzkopf, Gamez, Dugarte, & Dulhoste, 2011). Por tanto es imprescindible entender el funcionamiento interno en lo referente a procesos hidrológicos en orden de determinar la dinámica del ciclo hidrológico y sus componentes más influyentes.

Los estudios sobre el páramo a micro-escala son escasos y dispersos, lo cual limita el desarrollo de conocimiento de éstas áreas. Pese a esto, en los últimos años se han realizado esfuerzos por entender los procesos o fenómenos de mayor relevancia en cuanto al ciclo hidrológico de estos sistemas en orden de asesorar la toma de decisiones en cuanto a manejo de éstas áreas (Céleri, Crespo, De Bièvre, & Acosta, 2011).

Debido a la falta de estudios y un escaso monitoreo hidrológico de estas fuentes almacenadoras y reguladoras de agua, los intentos de modelar la hidrología de los páramos son hasta ahora muy escasos y sólo han tenido limitado éxito (Buytaert & Beven, 2010). Es necesaria la cooperación entre las entidades públicas y privadas interesadas el monitoreo conjunto con la finalidad de crear una base de datos sólida que aporte conocimiento detallado, para así con la ayuda de las herramientas computacionales generar un conocimiento extrapolable a las escalas de interés para el manejo de los recursos hidrológicos en éstos ecosistemas (Cuesta & Becerra, 2012).

La conceptualización de los procesos de generación de lluvia escorrentía, y la predicción de la respuesta hidrológica son desafíos mayores en los que están enfocados muchas iniciativas internacionales (Bonell, y col, 2006). En los últimos años se ha realizado un mayor esfuerzo por aumentar el conocimiento de los procesos hidrológicos en los ecosistemas alto-andinos debido a la importancia en relación al recurso hídrico (Crespo P., y col, 2012); con el objetivo de generar mejores políticas en para la toma de decisiones respecto al manejo y conservación de estos ecosistemas y sus procesos.

La importancia de la modelación de paramos alto-andinos radica en la falta de monitoreo intensivo, inexistencia o falta de regulaciones y políticas ambientales para las zonas y necesidad de comprender los procesos hidrológicos de manera detallada (Crespo P., y col, 2012), y como una iniciativa para el desarrollo internacional sobre cuencas hidrológicas para generar un conocimiento global del entorno que nos rodea (Bonell, y col, 2006).

Modelar consiste en describir los procesos de un sistema basado en una serie de decisiones sobre variables de entrada, parámetros del sistema y condiciones iniciales

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

para poder realizar una correcta simulación del sistema (Aghakouchak & Habid, 2010), (Clark, Kavetski, & Fenicia, 2011). Una vez estructurado el modelo, es necesaria la calibración con la finalidad de ampliar la falta de conocimiento de las heterogeneidades espaciales y de las propiedades de la zona en estudio y así suplir la falta de entendimiento de los actuales procesos y sus interacciones. (McDonell, y col, 2007).

La interpretación de los resultados de los modelos y del análisis de incertidumbre de sus parámetros generan información muy importante en procesos de evapotranspiración, escorrentía superficial y separación de flujos en los ecosistemas de paramo alto-andino (Buytaert & Beven, 2010), información de gran utilidad para la comprensión de procesos poco monitoreados en estos ecosistemas.

La interpretación de los procesos del ciclo hidrológico de una Cuenca Hidrográfica requiere el análisis de las interrelaciones de múltiples variables hidrometeorológicas, lo que conlleva a un gran número de cálculos complejos. Para ello, las herramientas computacionales han permitido manejar gran cantidad de cálculos y bases de datos; que han permitido por más de 40 años simular de manera relativamente rápida y eficiente los diversos fenómenos del sistema hidrológico en diferentes grados de complejidad (Fernández M., Vela M., & Castaño F., 1997), (McDonell, y otros, 2007), (Rodríguez, Schwarzkopf, Gamez, Dugarte, & Dulhoste, 2011). Sin embargo, independiente de la complejidad del modelo empleado, las características generales apuntan a un procesamiento de variables de entrada, obteniéndose las variables de salida necesarias según el propósito del uso del modelo, cuestión inherente en lo referente a materia de modelación en general (Beven K. J., 2003), (Vaze, Jordan, Beecham, Frost, & Sumerell, 2011).

Modelos de diferentes característica y complejidad están disponibles actualmente en materia de modelación hidrológica. De entre toda la gama, los conocidos como modelos determinísticos distribuidos han sido destacados debido a las interpretaciones generalmente físicas de los mismos, con características de variabilidad espacio-temporal. (Xu, 2002), (Ponce, 1989), (Fernández M., Vela M., & Castaño F., 1997).

Por otro lado, los modelos estocásticos carecen de bases físicas y expresan resultados como probabilidades según lo expuesto en (Xu, 2002). Estos modelos preferentemente se aplican para problemas de pronóstico debido a su capacidad de describir incertidumbres propias de los métodos estadísticos de los que forman parte (Ponce, 1989). Sus resultados generalmente no pueden ser interpretados en términos físicos o conceptuales, sin embargo la inversión moderada en el uso de datos para este tipo de modelos, otorga una gran ventaja a los mismos, y constituye el centro de atención para su desarrollo y uso (Fernández M., Vela M., & Castaño F., 1997).

Por último están los modelos conceptuales; los cuales se caracterizan por usar representaciones simplificadas de los procesos hidrológicos mediante relaciones paramétricas simples, que pueden encerrar diversos efectos físicos, simulando de ésta manera procesos complejos por medio de abstracciones asumidas por el modelador

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

(Fernández M., Vela M., & Castaño F., 1997). Sin embargo, estos modelos generalmente requieren información hidrometeorológica básica más allá de la simple cuantificación de la lluvia escorrentía. Además, su característica es la de agregar efectos espaciales heterogéneos, y por esto su uso preferentemente se apunta a escalas pequeñas de sistemas hidrológicos, con limitaciones considerables hacia las escalas grandes (Tetzlaff, Uhlenbrook, Eppert, & Soulsby, 2008).

Estudios en zonas andinas como Crespo P., y col (2011a, b), Roa-García & Weiler (2010), Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo (2012), Mosquera, y col, (2014) han evidenciado algunos aspectos sobre el funcionamiento de los ecosistemas de la zona. Donde se identifica que en condiciones secas, el componente de flujo lento consiste en flujo lateral a través del horizonte mineral y contribuciones de parte superior de la roca fracturada, que estará representado en un reservorio que se denominara de dinámica lenta. Durante condiciones húmedas el componente de flujo lateral es generado por el/los horizonte(s) orgánico(s), que estarán representados en uno o más reservorios denominados de dinámica rápida. En función de que la respuesta hidrológica está dominada por las propiedades físicas del suelo, además el contenido antecedente de agua en cada estrato controla el aporte de flujo para la generación de escorrentía.

El presente trabajo desarrolla y analiza cinco modelos conceptuales basados en hipótesis de funcionamiento del páramo, sustentados por trabajos previos realizados por Mosquera, Lazo, Cárdenas, Crespo, & Céleri, (2013), Crespo P., y col, (2012) y Buytaert & Beven, (2010), siguiendo las recomendaciones de pruebas múltiples de hipótesis según Clark, Kavetski, & Fenicia (2011), Buytaert & Beven (2010); en orden de contrastar los resultados obtenidos para sustentar o revocar percepciones de funcionamiento, aportando de ésta manera al conocimiento de procesos hidrológicos en este sitio.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

1.1 Objetivos

Objetivo General

Simular e interpretar los principales procesos hidrológicos del sistema lluvia-escorrentía, mediante la evaluación de diferentes representaciones conceptuales que integran estos procesos, en la cuenca del río Zhurucay.

Objetivos específicos

1. Comparar y probar diferentes estructuras en un modelo conceptual mediante una evaluación cualitativa y cuantitativa de las simulaciones.
2. Evaluar que ecuación de transferencia, con ley de potencia o exponencial, ofrece una mejor representación para el ajuste de las recesiones del caudal en el sistema.
3. Determinar la importancia y función del estrato orgánico y estrato mineral en base a producción de caudales.
4. Evaluar si la conceptualización estructural en base a un sistema estratificado de los suelos, permite una mejor representación de los procesos hidrológicos de flujo a nivel de sub-superficie.



2 MATERIALES

2.1 Área de estudio

Para el presente estudio se analizó la cuenca alta del río Zhurucay que se encuentra en la región sur de la república del Ecuador, en la provincia del Azuay. Esta cuenca se encuentra aproximadamente a 85 Km de la ciudad de Cuenca y tiene un área de drenaje de 7.53 Km² (Figura 2). El río Zhurucay aporta al río Rircay el mismo que es afluente del río Jubones, que desemboca al Océano Pacífico. La altitud de la cuenca varía desde los 3495 a los 3900 m.s.n.m. (Padrón R. S., 2013).

La temperatura de la cuenca puede llegar a valores inferiores a 1°C y superar los 15°C, la humedad relativa varía entre el 82 y el 91% (Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2012), (Padrón R. S., 2013), (Crespo P., y otros, 2011a). La precipitación promedio anual en estos ecosistemas es muy variable, y oscila entre los 700 a 2000mm (Crespo P., y col, 2012), (Crespo P., y col, 2011), (Célleri, y col, 2010), con una estacionalidad no muy marcada, se reporta una alta variabilidad espacial por acción del viento en este tipo de topografías, además se ve influenciado fuertemente por corrientes provenientes del Pacífico, masas de aire continental y tropicales del océano Atlántico (Buytaert, Célleri, Willems, De Bievre, & Wyseure, 2006), (Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2012).

La geología de la cuenca corresponde a depósitos de roca volcánica compactada por la actividad de la última glaciación. La formación geológica en la parte norte de la cuenca corresponde a la formación Quimsacocha con un 56%, mientras que la parte sur es de la formación Turi con un 31% y los depósitos cuaternarios representan el 13%. La geomorfología se compone principalmente de valles al pie de laderas escarpadas (Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2012), (Buytreart, 2004a).

La cobertura vegetal está compuesta pajonales en un 78%, plantas en cojín con un 17%, bosque de pino en un 4% y un 1% de bosque de Polylepys. El uso de los suelos es preferentemente natural en un 74%, mientras que el pastoreo se puede diferenciar entre pastoreo extensivo en un 22% y el pastoreo intensivo en un 4% (Crespo P., y col, 2011a).

Los suelos de paramo están principalmente formados por Andosoles e Histosoles (Crespo P., y col, 2011b). FAO (FAO/ISRIC/ISSS, 1988). Los Andosoles tienen una gran capacidad de retención de agua, a lo cual se atribuye generalmente la capacidad de regulación hídrica de estos ecosistemas (Buytreart, 2004a), el porcentaje de este tipo de suelos es del 72% y se localiza principalmente en las laderas de la cuenca.

Los Histosoles representan el 24% de los suelos y se encuentran generalmente en zonas saturadas en el fondo de los valles, cercano a los riachuelos, debido a su gran porcentaje de poros y densidad aparente baja, cuentan también con una extraordinaria



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

capacidad de retención, (Buytreart, 2004). Por último se tiene presencia de Leptosoles dentro de la cuenca que representan el 5% de los suelos y dentro de este estudio no son tomados en cuenta. Las propiedades hidrofísicas de Andosoles (Ah, A), Histosoles (H) y el estrato mineral (C) se presentan a detalle en la tabla 1.

La descarga promedio anual se encuentra por los $27.4 \text{ l s}^{-1} \text{ Km}^{-2}$ al año y la precipitación en los 1241 mm al año generando un coeficiente de escorrentía para la cuenca de 0.68.

Tabla 1 Principales características granulométricas e hidrofísicas para los horizontes de suelo del Río Zhurucay

Horizonte	Espesor (cm)	densidad aparente (g cm^3)	SOM (%)	Ks (mmh^{-1})	pF=0 ($\text{cm}^3 \text{ cm}^3$)	pF=2 ($\text{cm}^3 \text{ cm}^3$)	pF=4.2 ($\text{cm}^3 \text{ cm}^3$)
Ah	26–45	0.21-0.35	15–31	3.9-15.2	0.73-0.83	0.67-0.73	0.42-0.63
H	24–44	0.1–0.21	33–50	5.4-28.4	0.80–0.93	0.56-0.66	0.13-0.26
C	22-40	0.76-1.11	0.4–4.7	1.4-2.2	0.63–0.66	0.57-0.59	0.15-0.26

Leyenda: SOM, materia orgánica del suelo en%; Ks, Conductividad hidráulica saturada en mm h^{-1} ; PF, potencial matricial del suelo expresado como el \log_{10} (columna de agua en cm), respectivamente, a la saturación, capacidad de campo y punto de marchitez y el correspondiente contenido de agua del suelo en $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

2.2 Monitoreo y disponibilidad de datos

El monitoreo en la cuenca media y alta del río Zhurucay se ha venido realizando por parte del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca (Centro de Hidrología y Clima). Información Hidrometeorológica ha sido recolectada desde finales del año 2010. En este estudio usaremos 1 estación meteorológica, 1 punto de aforo de caudales, 4 pluviómetros y 5 puntos bajo investigación de las propiedades del suelo.

Las descargas de los datos de caudal son medidas en el punto de confluencia de la cuenca donde se utiliza un vertedero rectangular M9 Figura 2. El vertedero cuenta con sensores de presión marca Schlumberger programados para tomar lecturas de niveles de agua y de presión atmosférica cada 5 minutos, con un error de $\pm 5\text{mm}$, los datos del presente estudio fueron transformados a cuales horarios mediante una modificación a la ecuación de Kindsvater-Shen, para la calibración del vertedero, los cuales fueron obtenidos por aforos realizados en el trabajo de Gualpa, M. (2013).



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

En el caso de la precipitación se obtiene la información mediante 4 pluviómetros de cubeta basculante con resolución de 0.2 mm, marca Onset. La información recopilada es transformada a series de 1 hora. La lluvia media por sobre la cuenca fue obtenida mediante polígonos de Thiessen (Thiessen, 1911).

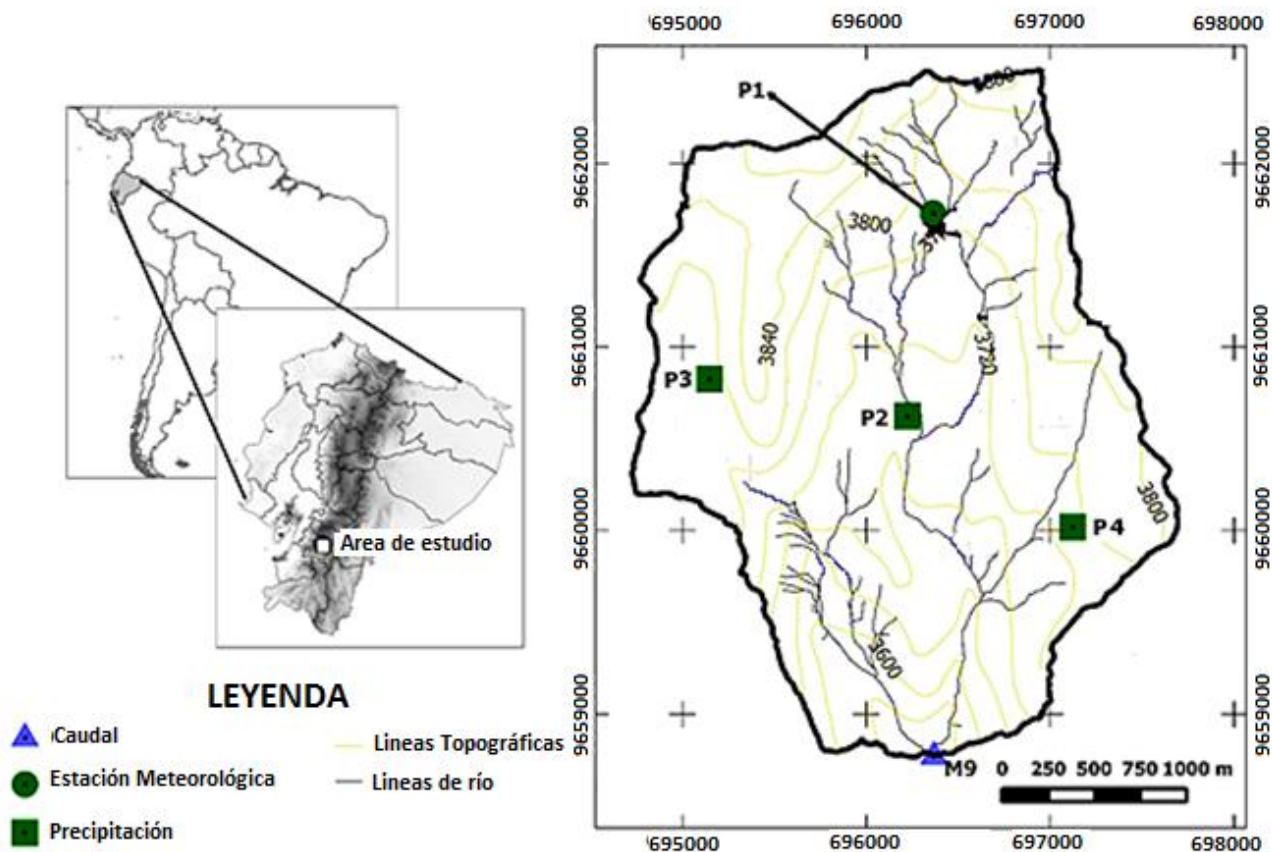


Figura 1 Mapa de la cuenca del río Zhurucay

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



3 METODOLOGIA

3.1 Esquema de trabajo

Según Buytaert & Beven, (2011), comparaciones entre diferentes representaciones conceptuales de los procesos hidrológicos en un modelo pueden ser utilizadas para probar cuál de estas hipótesis son compatibles con las observaciones a escala de cuenca. Para determinar que estructura, de las diferentes probadas, tiene una mejor interpretación y rendimiento en cuanto al funcionamiento el páramo andino, se procedió con el siguiente algoritmo esquematizado en la figura 2 basado en el método de hipótesis de trabajo múltiple para modelos hidrológicos (Clark, Kavetski, & Fenicia, 2011).

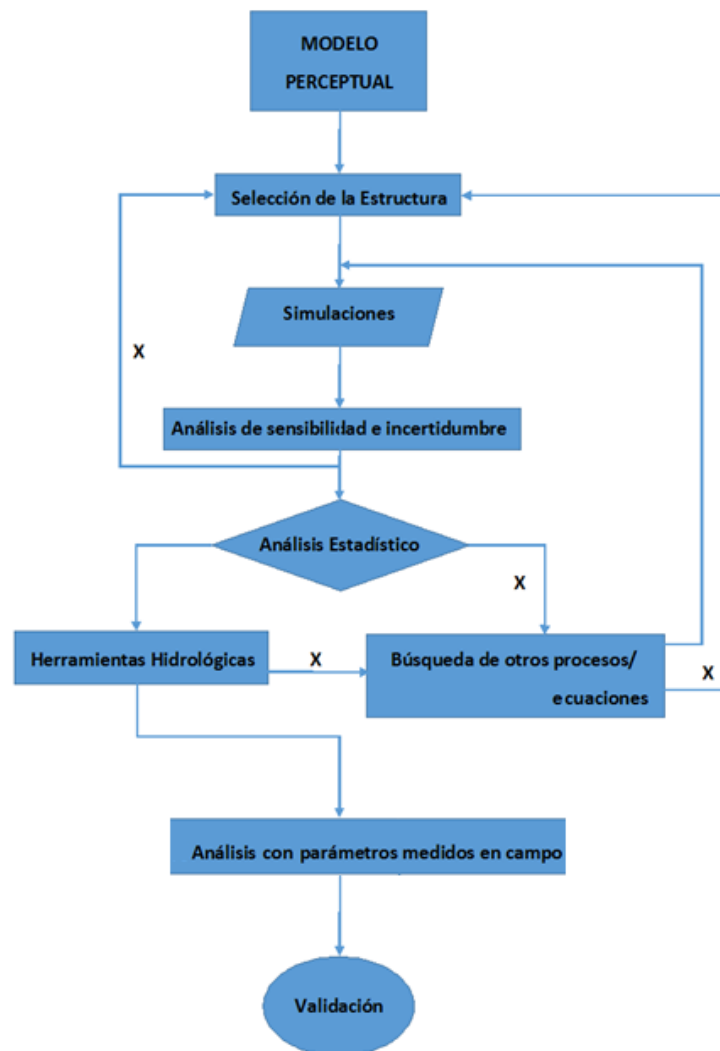


Figura 2 Esquema para la selección de la estructura conceptual para el modelo de lluvia escorrentía



3.2 Descripción de las estructuras conceptuales

Los modelos conceptuales representan la microcuenca hidrográfica como una serie de reservorios de humedad del suelo, que a través de funciones matemáticas simulan los procesos hidrológicos por el cual el agua se mueve dentro y fuera de los mismos, estas representaciones son una combinación de diferentes hipótesis de funcionamiento del sistema natural, siempre y cuando estén acordes a datos y mediciones de campo (Beven K., 2001).

Según Buytaert, De Bièvre, Wyseure, y Deckers (2004), el páramo muestra la existencia de señales de recesión, que principalmente se relacionan con procesos superficiales y sub-superficiales del suelo. Esta señal de recesión describe de forma integrada cómo los diferentes factores en una cuenca influyen en la generación de caudales en períodos de tiempo seco (Tallaksen, 1995), aludiendo la existencia de un componente que influencia la contribución de caudal lento que actúa como regulador. Crespo P., y col., (2012), indican que el flujo lateral procedente de capas orgánicas y minerales es muy importante para la generación de caudal en la microcuenca bajo estudio. Además, investigación sobre trazadores isotópicos realizada en el mismo sistema, sugieren el predominio influyente de capas orgánicas, en el cual los Histosoles se consideran como el componente principal para la generación de caudales (Mosquera, et al., 2014).

El Flujo hortoniano o superficial se considera un proceso insignificante en los páramos debido al régimen de lluvias, capacidad de infiltración del suelo y características de retención de los mismos, (Buytaert, De Bièvre, Wyseure, y Deckers, .2004); (Crespo P., y col., 2011a); (Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2012); (Mosquera, et al., 2014). Sin embargo, el flujo superficial es probable que se produzca cerca de los ríos, durante períodos húmedos y debido a exceso de saturación (Crespo P., y col., 2011a).

Las diferentes hipótesis de funcionamiento y por ende las estructuras conceptuales se justifican según los hallazgos realizados por Crespo P., y col. (2011a, b); Crespo P., y col. (2012); Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo (2012); Buytaert & Beven (2011); Mosquera, y col. (2014), estos trabajos evalúan la respuesta de las cuencas de paramo andino y en particular de la microcuenca en estudio, durante condiciones húmedas y secas, así como los principales procesos que controlan la conversión de la precipitación en caudal, controlados principalmente por los estratos de suelo.

En base a estos estudios mencionados, se realizan las siguientes asunciones implementadas en las 5 estructuras conceptuales: (i) la percolación profunda no tiene incidencia como perdida en el sistema y sobre el flujo generado, mientras que este flujo vertical de los estratos orgánicos superficiales se realiza hacia el estrato mineral; (ii)



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

durante los periodos secos prolongados, la contribución de flujo es dominada por el horizonte mineral y parte superior de la roca fracturada; (iii) el flujo lateral generado por los horizontes orgánicos muestra una mayor incidencia durante periodos lluviosos; (iv) el flujo superficial por exceso de saturación del suelo ocurre durante eventos extremos de precipitación; y (v) los efectos de pérdidas por interceptación de la vegetación, se espera sean integrados en el balance hidrológico mediante el modelo de evapotranspiración.

Además para la conceptualización de los procesos influyentes a nivel de sub-superficie se toma en consideración la posición en el paisaje de los diferentes estratos de suelo, utilizados para simular el almacenamiento y flujo de salida de agua a través de los mismos, según Beven K. (2001), un conocimiento adecuado de la geología y la topografía de la zona, son necesarios para predecir los flujos descendentes a través de la ladera. La figura 3 representa la base de los modelos perceptuales considerados para probar diferentes hipótesis de funcionamiento de la sub-superficie en las estructuras conceptuales.

Tasas bajas y medias de Flujo Tasas altas y máximas de flujo

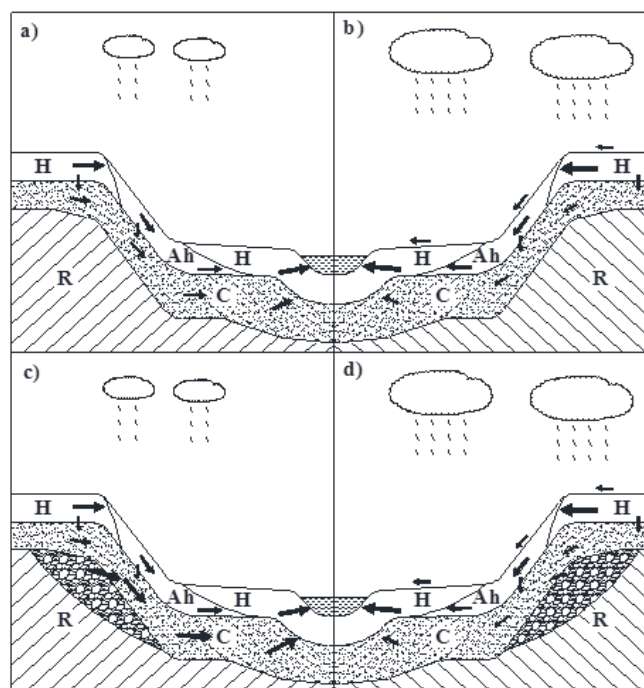


Figura 3 Identificación de las principales fuentes de agua que contribuyen a la generación de escorrentía en la cuenca del río Zhuruca y durante diferentes caudales.

Leyenda: H: horizonte orgánico Histosol, Ah: horizonte orgánico Andosol, C: horizonte mineral, R: Roca. Tomado de (Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2012)

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

El flujo sub-superficial se modela como un máximo de 3 reservorios, los cuales simulan los estratos orgánicos Andosol (Ah) e Histosol (H), estrato mineral (C) y parte superior de la roca fracturada (RF). En la figura 4 se representan las cinco estructuras conceptuales asumidas para probar las diferentes hipótesis de funcionamiento.

3.2.1 Estructura dos reservorios en serie (2RS)

Simula la generación y aporte de flujo en base a la influencia que presentan los diferentes estratos de suelo, debido a su posición en el sistema. Específicamente estudios de Mosquera, y col., (2014), concluyen que los Andosoles ubicados en la ladera recargan a los Histosoles ubicados en el fondo de valle, los cuales a su vez alimentan pequeños ríos que derivan en el cierre de la microcuenca. Además estos son contribuyentes de flujo lento durante periodos secos. Para esta estructura se considera un componente de flujo por exceso de saturación en el reservorio que representa el Andosol e Histosol (figura 4a), para evaluar si este flujo ocurre en una zona alejada del río.

Debido a la falta de conocimiento sobre la estructuración del reservorio mineral, utilizado para la generación de flujo lento de periodos secos, en las zonas cercanas a los ríos, y conociendo que el aporte mineral es un contribuyente importante para la generación de caudales (Crespo P., y col., 2011a). Se consideran las siguientes variantes representadas en las estructuras 3RSa y 3RSb.

3.2.2 Estructura tres reservorios en serie (3RSa)

Esta es una combinación de un modelo con dos reservorios en serie que simulan el aporte de los estratos orgánicos y un reservorio común en paralelo para el estrato mineral (figura 4b), el cual es recargado por percolación de los estratos superiores para la generación de flujo lento de periodos secos. Al igual que la estructura 2RS, simula la generación y aporte de flujo en base a la posición de los estratos de suelo en el sistema, utilizando la misma conceptualización basada en Mosquera, y col., (2014).

3.2.3 Estructura tres reservorios en serie (3RSb)

Esta estructura es una combinación de un modelo con dos reservorios en serie que simulan los estratos orgánicos y un reservorio en paralelo con la diferencia de que este reservorio, utilizado para simular el flujo lento, es recargado por percolación únicamente del Andosol, de esta manera el flujo horizontal proveniente del Andosol y del estrato mineral recargan al Histosol que da el ruteo final hacia el río, según Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, (2012); Mosquera, y col., (2014), los Histosoles



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

proporcionan flujo rápido de periodos húmedos al igual que flujo lento de periodos secos (figura 4c). Como sus similares en serie, simula la generación y aporte de flujo a través de los estratos de suelo según su posición dentro del sistema.

3.2.4 Estructura dos reservorios en paralelo (2RP)

Representa en su reservorio superior los estratos orgánicos superficiales, y el aporte de flujo a través del estrato mineral en el reservorio inferior, el cual es recargado por percolación de los estratos orgánicos superficiales durante periodos húmedos (figura 4d), sugerencias hechas por Crespo P., y col., (2012), mencionan que los estratos orgánicos y minerales son suficientes para simular la conversión de precipitación a escorrentía, debido a que los Histosoles se encuentran saturados durante la mayor parte del año, lo cual refleja una gran capacidad de almacenamiento en estos estratos de suelo.

3.2.5 Estructura tres reservorios en paralelo (3RP)

En base a estudios de Crespo P., y col., (2011a), se presenta un modelo bajo el supuesto de aportación de aguas profundas en el cual el reservorio 3 simula el aporte de flujo a través de la parte superior de la roca fracturada (figura 4e), en donde se considera que este reservorio es alimentado por percolación a través del estrato mineral.

Si bien las estructuras en paralelo fueron consideradas en trabajos análogos de Crespo P., y col., (2012); Buytaert & Beven, (2011) en el presente estudio serán probadas con ecuaciones diferentes de ruteo para evaluar el ajuste a las recesiones de caudal y su dependencia de las ecuaciones de transferencia utilizadas.

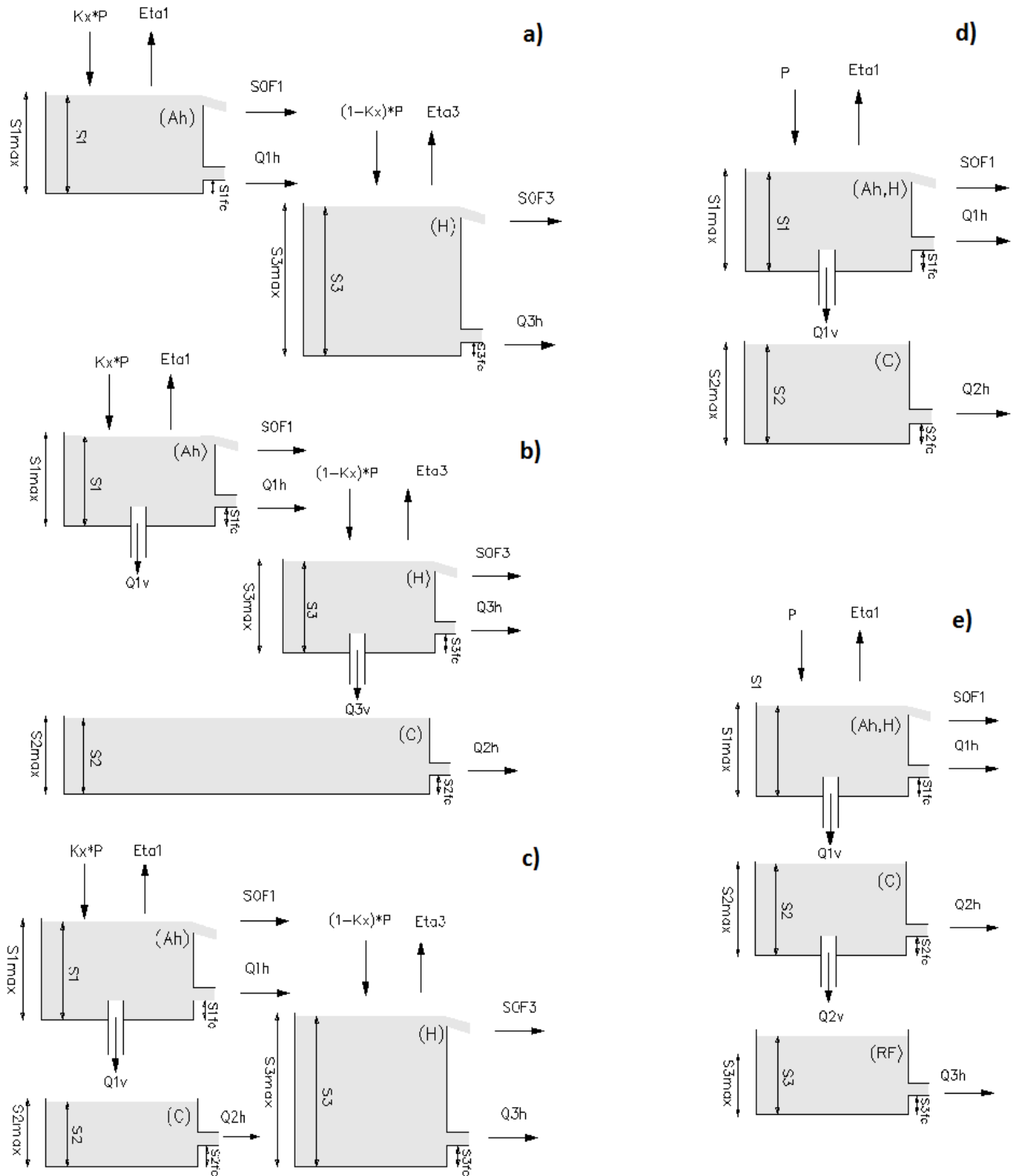


Figura 4 Representación Esquemática de las estructuras conceptuales.

Leyenda: a) Estructura 2RS; b) Estructura 3RSa; c) Estructura 3RSb; d) Estructura 2RP; e) Estructura 3RP; (Ah, Andosol; H, Histosol; C Horizonte mineral; RF, Parte superior de la roca fracturada)

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



3.3 Ecuaciones de Balance Hídrico

Cuando las estructuras se representan en paralelo, el flujo total (Q_t) es la suma de los flujos horizontales (Q_h) generados en los reservorios, más la suma del flujo por exceso de saturación. Mientras que Q_t de los modelos en serie, es igual a la suma del flujo o flujos de los reservorios dispuestos en la parte inferior de la estructura conceptual, más el flujo por exceso de saturación.

El Almacenamiento (S) en cada uno de los reservorios de las diferentes estructuras conceptuales está gobernado por las siguientes ecuaciones de balance.

Estructura conceptual 1 (2RS). Ecu. (1.1) y (1.2)

$$S_1(t) = S_1(t-1) + Kx * P(t) - Eta1(t) - SOF1(t) - Q1h(t) \quad (1.1)$$

$$S_2(t) = S_2(t-1) + (1 - Kx) * P(t) - Eta3(t) - SOF3(t) - Q3h(t) + SOF1(t) + Q1h(t) \quad (1.2)$$

Estructura conceptual 2 (3RSa). Ecu. (2.1), (2.2) y (2.3)

$$S_1(t) = S_1(t-1) + Kx * P(t) - Eta1(t) - SOF1(t) - Q1h(t) - Q1v(t) \quad (2.1)$$

$$S_2(t) = S_2(t-1) + (1 - Kx) * P(t) - Eta3(t) - SOF3(t) + SOF1(t) + Q1h(t) - Q3h(t) - Q3v(t) \quad (2.2)$$

$$S_2(t) = S_2(t-1) - Q2h(t) + Q1v(t) + Q3v(t) \quad (2.3)$$

Estructura conceptual 3 (3RSb). Ecu. (3.1), (3.2) y (3.3)

$$S_1(t) = S_1(t-1) + Kx * P(t) - Eta1(t) - SOF1(t) - Q1h(t) - Q1v(t) \quad (3.1)$$

$$S_2(t) = S_2(t-1) - Q2h(t) + Q1v(t) \quad (3.2)$$

$$S_3(t) = S_3(t-1) + (1 - Kx) * P(t) - Eta3(t) - SOF3(t) + SOF1(t) + Q1h(t) + Q2h(t) \quad (3.3)$$

Estructura conceptual 4 (2RP). Ecu. (4.1) y (4.2)

$$S_1(t) = S_1(t-1) + P(t) - Eta1(t) - SOF1(t) - Q1h(t) - Q1v(t) \quad (4.1)$$

$$S_2(t) = S_2(t-1) - Q2h(t) + Q1v(t) \quad (4.2)$$

Estructura conceptual 5 (3RP). Ecu. (5.1), (5.2) y (5.3)

$$S_1(t) = S_1(t-1) + P(t) - Eta1(t) - SOF1(t) - Q1h(t) - Q1v(t) \quad (5.1)$$

$$S_2(t) = S_2(t-1) - Q2h(t) + Q1v(t) \quad (5.2)$$

$$S_3(t) = S_3(t-1) - Q3h(t) + Q2v(t) \quad (5.3)$$

En donde P representa la variable de la precipitación en el intervalo de tiempo t , Eta es la evapotranspiración actual, SOF es el flujo por exceso de saturación, Qh es el flujo



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

lateral de cada reservorio, Q_v es el flujo vertical de percolación, K_x factor de área que representa la cantidad o densidad de suelos orgánicos en la microcuenca.

3.3.1 Estimación de la evapotranspiración.

La evapotranspiración actual (E_a) se satisface del agua almacenada en los reservorios superficiales representados en los suelos orgánicos Andosol e Histosol. Para las simulaciones la (E_a) se obtiene de la suma entre la transpiración actual (T_a) y la evaporación actual (E_a).

$$E_a = T_a + E_a \quad \text{Ecu. (6)}$$

Según Novák & Havrila (2005) la transpiración potencial (T_o) puede ser calculada en función de la evapotranspiración potencial (E_{to}) y el índice de área foliar de la vegetación (ω), además de un coeficiente β adimensional que varía entre 0.45 y 0.55.

$$T_o = E_{to} * [1 - \exp(-\beta\omega\omega)] \quad \text{Ecu. (6.1)}$$

La estimación de la transpiración actual (T_a) se realiza en función de una relación empírica de la (T_o) y el contenido de agua en el suelo o simplemente se supone que (T_a) es igual a (T_o) bajo un umbral de contenido de agua en el suelo, en el cual la zona de raíces se alcanza. Generalmente este umbral es igual al contenido de agua en el suelo correspondiente a la capacidad de campo S_{fc} . De esta manera, para la estimación de la transpiración actual, se tienen las siguientes condiciones en función del contenido de agua de los reservorios superficiales:

$$\begin{aligned} \text{Para } S_i(t) \geq S_{ifc} & \quad T_a = T_o \\ \text{Para } S_{ifc} > S_i(t) > S_{iwp} & \quad T_a = T_o \frac{S_i(t) - S_{iwp}}{S_{ifc} - S_{iwp}} \\ \text{Para } S_i(t) \leq S_{iwp} & \quad T_a = 0 \end{aligned} \quad \text{Ecu. (6.2)}$$

La estimación de la evaporación actual (E_a) se realiza en función del remanente de la evapotranspiración potencial (E_{to}) y la transpiración actual (T_a), mediante las siguientes condiciones de contenido de agua en los reservorios superficiales.

$$\begin{aligned} \text{Para } S_i(t) \geq S_{i,max} & \quad E_a = E_{to} - T_a \\ \text{Para } S_i(t) > S_{ifc} & \quad E_a = (E_{to} - T_a) \frac{S_i(t) - S_{ifc}}{S_{i,max} - S_{ifc}} \\ \text{Para } S_i(t) \leq S_{ifc} & \quad E_a = 0 \end{aligned} \quad \text{Ecu. (6.3)}$$



En donde $S(t)$ es el contenido de humedad en la parte superior del estrato en el tiempo t , S_{max} representa el máximo contenido de humedad del estrato superior correspondiente al punto de saturación, S_{fc} es el contenido de humedad correspondiente a la capacidad de campo, y S_{wp} es el contenido de humedad correspondiente al punto de marchitez. Para las simulaciones estos parámetros S_{max} , S_{fc} , y S_{wp} son sometidos a calibración, al igual que ω y β , para luego realizar una comparación de la (E_{ta}) obtenida de la simulación de los modelos vs la calculada con la ecuación ($E_{ta} = P - Q$).

3.3.2 Estimación del flujo lateral

El flujo paralelo con respecto a la superficie, es simulado con dos modelos diferentes de almacenamiento y flujo de salida no lineal, que son: Reservorio exponencial (exponential reservoir) y Reservorio con ley de potencia (power-law reservoir), los cuales utilizan ecuaciones de transferencia exponenciales y potenciales respectivamente.

3.3.2.1 Reservorio con ley de potencia (Power-law reservoir) (Moore, 1997)

La ecuación de este modelo consiste en un parámetro α multiplicado por el almacenamiento elevado a la potencia β . Estos parámetros α y β son determinados por calibración. En la ecuación $S_{i,fc}$ representa el valor de almacenamiento de agua, correspondiente a la capacidad de campo, cuando la descarga disminuye a cero (Kirchner, 2009). En la ecuación se tiene que:

$$(7) \quad \text{Para } S_i(t) \geq S_{i,fc} \quad Q_i h(t) = \alpha_i * (S_i(t) - S_{i,fc})^{\beta_i} \quad \text{Ecu.}$$

$$\text{Para } S_i(t) < S_{i,fc} \quad Q_i h(t) = 0$$

3.3.2.2 Reservorio exponencial (Exponential reservoir) (Moore, 1997)

La ecuación de este consiste en un parámetro QB multiplicado por el exponencial del producto entre el almacenamiento y un parámetro φ , de igual manera, estos parámetros son determinados por calibración. La ecuación decrece indefinidamente para un valor finito de valores de almacenamiento $S_i(t)$, en donde $S_{i,max}$ representa el valor de almacenamiento de agua cuando $QB = Qh$ (Kirchner, 2009), para la ecuación se obtienen las condiciones siguientes:

$$\text{Para } S_i(t) < S_{i,max} \quad Q_i h(t) = QB_i * e^{-\varphi(S_{i,max} - S_i(t))} \quad \text{Ecu. (8)}$$

$$\text{Para } S_i(t) \geq S_{i,max} \quad Q_i h(t) = QB_i$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

$S_{i\max}$, representa el máximo contenido de humedad en el suelo y es determinado como la multiplicación de la profundidad del estrato por la diferencia entre el punto de marchitez y el punto de saturación, al igual que S_{fc} y S_{wp} este parámetro es sometido a calibración. Los valores correspondientes a los diferentes puntos PF de los estratos de suelo, así como su profundidad en la microcuenca, se muestran en la tabla 1.

3.3.3 Estimación de la percolación

El flujo vertical simulado desde un reservorio superior hacia un inferior es aproximado con una ecuación lineal de flujo de salida, la cual cuenta con un parámetro k que representa el coeficiente de descarga en el periodo de tiempo (t), (Angeli, Buma, Gasparetto, & Pasuto, 1998), este parámetro es sometido a calibración. Para esta ecuación se asume que S_{ifc} representa el valor de almacenamiento que queda en el reservorio cuando el flujo disminuye a cero.

$$\begin{aligned} \text{Para } S_i(t) \geq S_{ifc} \quad \quad \quad Q_v(t) &= \frac{(S_i(t) - S_{ifc})}{k_i} & \text{Ecu. (9)} \\ \text{Para } S_i(t) < S_{ifc} \quad \quad \quad Q_{iv}(t) &= 0 \end{aligned}$$

3.3.4 Flujo por exceso de saturación

Finalmente el flujo por exceso de saturación SOF se obtiene cuando los estratos orgánicos Andosol e Histosol están saturados, por tanto este flujo es el volumen que excede la capacidad máxima de los estratos orgánicos S_{\max} .

3.4 Numero de parámetros a calibrar

El número de parámetros a calibrar en las 5 estructuras conceptuales se resume en la tabla 2 presentada a continuación:

Tabla 2 Numero de parámetros a calibrar en las estructuras conceptuales.

Estructura Conceptual	2RS	3RSa	3RSb	2RP	3RP
Potencial	12	18	17	12	17
Exponencial	12	17	16	11	15

Los diferentes modelos se desarrollaron en lenguaje JAVA. Versión 1.7.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

3.5 Calibración y validación

La calibración del modelo es un proceso de ajustar sistemáticamente valores de los parámetros del modelo para obtener un conjunto de parámetros los cuales proporcionan el mejor ajuste o estimación del caudal observado, este proceso implica correr el modelo el mayor número de veces. Mientras que la validación del modelo se utiliza para evaluar la confianza de los resultados, es decir el rendimiento del mismo, cuando se utiliza el modelo calibrado para simular el caudal, por lo general el modelo se valida dentro de un periodo diferente al utilizado en calibración (Vaze, Jordan, Beecham, Frost, & Sumerell, 2011).

De acuerdo a recomendaciones de Klemeš (1986) la separación del periodo de datos horarios disponible para el estudio (serie de datos pequeña), corresponden al 70% para calibración, desde 8/12/2010 hasta 11/08/2012 y el 30% para validación, desde 12/08/2012 hasta 04/04/2013, en los cuales se verificó la existencia de un periodo húmedo y un periodo seco. Dentro del periodo de calibración se utilizó un periodo de calentamiento (warm-up) de dos meses, mediante el cual las variables de salida del modelo se vuelven independientes o atenúan el efecto de las mismas debido a las condiciones iniciales asumidas (Mazzilli, Guinot, & Jourde, 2012).

3.6 Rendimiento de los modelos

La evaluación del comportamiento y rendimiento del modelo hidrológico se realizó a través de comparaciones entre el caudal observado y simulado. La cuantificación del rendimiento se realizó mediante el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970), adicionalmente se evaluó la modificación del coeficiente de Nash-Sutcliffe en transformación logarítmica (logNSE), que reduce la sensibilidad a valores extremos de la eficiencia de NSE para dar un incremento en la sensibilidad del modelo para caudales bajos y altos (Krause, et al., 2005).

Las funciones objetivo (NSE) y su variación (logNSE) se utilizaron para evaluar el rendimiento del modelo con respecto a diferentes aspectos del comportamiento del sistema, (Fenicia, Hubert H. G. Savenije, Matgen, & Pfister, 2008) de esta manera se logró evaluar el rendimiento del modelo para el caudal total y para los flujos lentos y rápidos del mismo, según Wheeler et al., (1986) el uso de múltiples funciones objetivo proporcionan información que mejora la identificabilidad de parámetros.

Además se utilizaron criterios de varias respuestas de eficiencia como el RMSE, BIAS y precisión (AC%) para dar una evaluación objetiva del ajuste simulado al observado (Krause, et al., 2005), para de esta manera contrastar resultados de las mejores simulaciones.

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Todas las simulaciones y sus juegos de parámetros asociados que excedieron un umbral dado de bondad de ajuste (0.5 para NSE y 0 para logNSE, tomados subjetivamente), fueron consideradas como “aceptables”, después de realizar las comparaciones entre los caudales simulados y el caudal observado.

Como indicadores de rendimiento cuantitativo se tomaron las siguientes funciones objetivo e índices de eficiencia:

3.6.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Es una forma de normalizar la función objetivo de mínimos cuadrados. Determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de datos medidos, un ajuste perfecto de este criterio viene dado por la unidad, un ajuste negativo indica que un modelo es “pobre” y no se ajusta a los datos observados. Mientras más cercano a uno sea este criterio estadístico mejor será la bondad de ajuste. Se obtiene de la siguiente manera:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q})^2} \quad \text{Ecu. (10)}$$

En donde Q_o es el caudal observado, Q_s el caudal simulado y \bar{Q} es el promedio del caudal observado sobre el período de datos.

3.6.2 Coeficiente de Nash-Sutcliffe modificado

Para reducir el problema de las diferencias cuadráticas y la sensibilidad resultante en valores extremos por el NSE se calculó el coeficiente de Nash-Sutcliffe, empleando valores logarítmicos del caudal observado y del caudal simulado, como resultado la influencia de caudales bajos incrementa los errores y hace más sensible a la medida del criterio estadístico.

$$\log NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{oi}) - \log(Q_{si}))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{oi}) - (\log \bar{Q}))^2} \quad \text{Ecu. (11)}$$

3.6.3 Root mean square error (RMSE)

Al igual que el índice de eficiencia NSE el RMSE proporciona una evaluación del caudal total simulado y el ajuste en picos (Vaze, Jordan, Beecham, Frost, & Sumerell, 2011), de esta manera estos valores cercanos a 0, estarán correspondidos a valores cercanos a la unidad en el NSE. Se utiliza frecuentemente como una medida de diferencia entre datos simulados y datos observados, estas diferencias individuales son llamadas residuos, el RMSE es la raíz cuadrada que mide la magnitud promedio del



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

error, en donde el valor de 0 significa un ajuste perfecto. Se obtiene de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{n}} \quad \text{Ecu. (12)}$$

Obtiene relativamente un peso alto para errores largos en donde n es el número de puntos en consideración.

3.6.4 Sesgo Relativo BIAS

Es una medida que indica la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que los datos observados, es decir para reflejar la sistemática del modelo para la sub o sobre-producción de caudales (Gupta, Bastidas, Sorooshian, Shuttleworth, & Yang, 1999), un valor de 0 indica un ajuste perfecto. Por tanto valores obtenidos con este indicador se verán contrastados con la curva de duración que será construida para las mejores simulaciones en cada estructura. Se obtiene como:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})}{n} \quad \text{Ecu. (13)}$$

3.6.5 Precisión (AC%)

Utilizado para determinar el porcentaje de datos dentro de las bandas de incertidumbre, generadas con todas las simulaciones “aceptables” y sus juegos de parámetros asociados, mediante la diferencia entre los límites superiores e inferiores de las mismas

3.7 Análisis de incertidumbre

Según Buytaert & Beven (2011), la incertidumbre generada en modelos hidrológicos está determinada principalmente por los errores de datos de entrada de la precipitación, como consecuencia de la distribución espacial y la gran variabilidad climática, fenómeno conocido en las zonas de montaña (Célleri, y col., 2007), en sus estudios no fue posible obtener una cuantificación de la incertidumbre operacional (relacionada con medición de variables de entrada y salida), por tanto se considera en las cinco estructuras conceptuales la predicción total de incertidumbre (Renard, Kavetski, Kuczera, Thyer, & Franks, 2010), generada por:

(i) Incertidumbre de entrada, correspondiente a la estimación de la precipitación en el área de estudio (incertidumbre similar para las cinco estructuras al ser probadas en la misma microcuenca).



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

(ii) Incertidumbre de la estructura conceptual, la cual surge del enfoque agrupado y de las simplificaciones de los procesos hidrológicos en los componentes del modelo, como consecuencia de la falta de conocimiento de la dinámica microcuenca.

(iii) Incertidumbre de parámetros, que refleja la incapacidad para obtener los valores exactos de los mismos en el modelo debido a la longitud finita, incertidumbre en el datos de calibración, comprensión de un proceso complejo, aproximaciones de modelos de transmisividad, etc.

Para la generación de bandas de incertidumbre y determinación de sensibilidad de parámetros principales para todas las estructuras se utilizó la metodología GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) propuesto por Beven & Binley (1992). El supuesto básico de esta metodología establece que, para una serie de datos dada, un modelo único de mejor ajuste no existe, de esta manera, se toman en cuenta los varios sets o conjuntos de parámetros que brindan simulaciones “aceptables”.

Como parte de esta metodología y dentro de un proceso de simulaciones Monte Carlo, se evaluaron varios conjuntos de parámetros, para encontrar regiones de comportamiento en el espacio de muestreo, en las cuales se obtuvieron las simulaciones “aceptables”, de esta manera se identificaron los parámetros sensibles o no, de las diferentes estructuras conceptuales

Los límites de comportamiento aceptado se establecieron en el 90% para todos los datos, por tanto, todas las simulaciones realizadas fueron comparadas con las respectivas bandas de incertidumbre de cada estructura en un intervalo de confianza del 90%.

3.8 Parámetros de evaluación de las Estructuras Conceptuales.

La evaluación de las estructuras conceptuales se realizó mediante un análisis cuantitativo y cualitativo, de esta manera se aceptaron como modelos parsimoniosos y bien definidos aquellos que superaron los siguientes parámetros de evaluación cuantitativa durante el periodo de validación:

(i) índice de eficiencia de NSE mayor a 0.7.

(ii) índice de logNSE mayor a 0.7.

(iii) porcentaje de datos dentro de la banda de incertidumbre, (precisión) mayor al 70%.

La evaluación cualitativa de los cinco modelos, se basó en un análisis visual relacionado a la respuesta sistemática de los modelos para sobre o sub-predicción de



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

caudal (Krause, y col., 2005); (Houghton-Carr, 1999), aplicado a las curvas de duración de flujo horario así como los límites de incertidumbre, la anchura de estos límites se pueden utilizar directamente para comparar la calidad de los diferentes modelos, la banda de incertidumbre estrecha que enmarque las observaciones, indica una buena representación del sistema modelado (Buytaert & Beven, 2011).

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Lluvia-escorrentía

La información hidrométrica, muestra que la precipitación promedio en la microcuenca monitoreada es de 1277 mm año^{-1} , una descarga de 27.4 l/s/km^2 , con un coeficiente de escorrentía de 0.68. La distribución espacial de la precipitación en la cuenca se muestra homogénea debido a que no existen diferencias significativas en la cantidad de lluvia registrada a lo largo de la misma, (refiérase a la figura 1) en la estación $P1=1282 \text{ mm año}^{-1}$, $P2=1213 \text{ mm año}^{-1}$, $P3=1142 \text{ mm año}^{-1}$ y $P4=1428 \text{ mm año}^{-1}$. Adicionalmente, la intensidad de la precipitación es baja durante todo el periodo de datos utilizado, exhibiendo intensidades menores a 10 mm h^{-1} (excepto un registro de 15 mm h^{-1}), intensidades similares descritas en estudios previos de Crespo y col. (2011b) y Buytaert y col. (2005).

Respecto a la relación lluvia-escorrentía, la microcuenca muestra una rápida respuesta del caudal frente a eventos de precipitación. El flujo superficial por exceso de infiltración (flujo Hortoniano), es muy improbable que exista. Esto se ve reflejado en el evento sucedido el 4 de octubre del 2011 (evento de lluvia de 15 mm h^{-1}) que no genero pico en la descarga, debido a las condiciones antecedentes de humedad del suelo, que en comparación a eventos de menor intensidad pero de larga duración, generan los máximos de caudal en los registros de descarga, contribuidos de este flujo por exceso de saturación.

4.2 Comparación de las estructuras conceptuales durante el periodo de calibración y validación.

Los indicadores del rendimiento de estructuras conceptuales, BIAS, RMSE, NSE, log(NSE) y precisión (AC%), para el periodo de calibración y validación figuran en la tabla 3.

En los análisis realizados para las 5 estructuras conceptuales se reflejó una clara diferencia entre los valores obtenidos de los periodos de calibración y validación (ver tabla 3). Los mejores resultados se obtuvieron durante el periodo de calibración, con valores de NSE entre 0.83 y 0.9, valores de precisión superiores al 91%.

Debido a los valores obtenidos en los indicadores RSME y BIAS, los cuales son similares y bajos en las 5 estructuras conceptuales, el análisis de los resultados de las modelaciones se centraran en los indicadores de NSE, logNSE, y precisión (AC%) en el los periodos de calibración y validación.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Tabla 3 Indicadores del rendimiento del modelo para el periodo de calibración y validación.

Estructura Conceptual	NSE		Log NSE		AC [%]		RMSE [mm]		BIAS [mm]	
2RS pow	0.83	(0.68)	0.80	(0.48)	91	(68)	0.06	(0.07)	0.005	(0.023)
2RS exp	0.88	(0.73)	0.25	(0.68)	93	(96)	0.05	(0.03)	-0.014	(0.005)
3RSa pow	0.88	(0.71)	0.79	(0.70)	96	(85)	0.05	(0.04)	-0.002	(0.016)
3RSa exp	0.88	(0.80)	0.77	(0.74)	94	(75)	0.05	(0.04)	-0.008	(0.011)
3RSb pow	0.86	(0.66)	0.63	(0.13)	95	(47)	0.06	(0.06)	0.012	(0.026)
3RSb exp	0.88	(0.78)	0.82	(0.63)	92	(97)	0.05	(0.04)	-0.002	(0.018)
2RP pow	0.90	(0.83)	0.73	(0.53)	94	(89)	0.04	(0.03)	-0.012	(0.005)
2RP exp	0.88	(0.83)	0.85	(0.69)	95	(97)	0.05	(0.03)	-0.004	(0.014)
3RP pow	0.89	(0.77)	0.33	(0.48)	97	(85)	0.04	(0.04)	-0.002	(0.018)
3RP exp	0.87	(0.70)	0.78	(0.54)	97	(86)	0.06	(0.04)	0.003	(0.023)

Leyenda: Valores entre paréntesis () corresponden al periodo de validación; NSE, coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe; logNSE, logaritmo de la eficiencia de Nash-Sutcliffe; AC, precisión (% observaciones dentro de los límites de predicción); RMSE, raíz del error medio cuadrático; BIAS, sesgo relativo.

La estructura 2RS exp subestima los flujos base en los periodos secos (figura 5a), aunque presenta un buen comportamiento para la generación de caudales pico, esto debido a que sus dos reservorios muestran una dinámica rápida (resultados no mostrados). Mientras que la estructura 2RS pow presenta un mejor ajuste a flujos lentos no simula de manera adecuada los caudales pico (figura 5b). Lo que contrasta con los índices de NSE y log NSE obtenidos en el periodo de calibración, 0.83 y 0.8, para la estructura 2RS pow 0.88 y 0.25, para la estructura 2RS exp.

Apoyados en los índices obtenidos durante el periodo de validación de las estructuras 2RS, se muestra que no son una buena representación del sistema. Valores de NSE y log NSE de 0.68 y 0.48 para 2RS pow, y valores de 0.73 y 0.68 para 2RS exp, contrastan que la estructura 2RS se debería descartar al no cumplir los parámetros de evaluación para las estructuras.

Mediante la adición de un reservorio de dinámica lenta, en las estructuras 3RSa pow y 3RSa exp se obtuvieron mejores rendimientos durante los periodos secos, contrastados en valores obtenidos de logNSE entre 0.77 y 0.79, en donde las curvas de recesión de periodos secos al igual que el ajuste de caudales pico, muestran similitud



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

en la descarga observada y simulada, aunque todavía existe una ligera subestimación de los flujos lentos (ver figura 5a y 5b). Ambas estructuras muestran semejanzas en los índices durante el periodo de calibración, NSE de 0.88, y la precisión (AC%) presenta valores superiores al 94 %.

Los índices obtenidos para el periodo de validación (tabla 3), revelan la superioridad de las estructuras 3RSa (con ecuaciones de transferencia exponenciales o potenciales), en donde los valores de los índices superan los parámetros de evaluación de las estructuras conceptuales, con valores de NSE y logNSE superiores a 0.7, el porcentaje de datos dentro de la banda de incertidumbre (AC%) muestra valores superiores al 75%.

La estructura 3RSb, al igual que la 3RSa, presenta un mejor desempeño en el ajuste de flujos lentos y de caudales pico, en comparación a la 2RS, con valores de NSE y logNSE de 0.86 y 0.62 para 3RSb *pow*, 0.88 y 0.82 para 3RSb *exp*, con un AC% mayor al 92%, (estos resultados no muestran superioridad con respecto a la estructura 3RSa) en el periodo de calibración. Sin embargo durante el periodo de validación las estructuras 3RSb no superaron los parámetros de evaluación (ver tabla 3), aun así se obtuvo un mejor desempeño en la estructura 3RSb *exp*, con un NSE de 0.78 y logNSE de 0.63 y un AC% de 97%, reflejando el mejor desempeño de todas las estructuras con ecuaciones de transferencia exponencial.

Por lo general en modelación hidrológica, la calidad de los valores cuantitativos de los criterios de eficiencia se mantiene durante el periodo de calibración y validación en un modelo bien identificado y no sobre-parametrizado (Houghton-Carr, 1999). Además cuando se implementa un modelo de estructura más complejo, este resulta generalmente sobre-parametrizado y, por tanto, no identificable (Willems, 2014). Resultados que no se reflejan en la estructura 3RSa, mostrando la parsimonia e identificabilidad de la misma a pesar de ser una estructura compleja, ya que la misma no depende de las ecuaciones de transferencia utilizadas en comparación a las demás evaluadas.

El análisis de las 2 estructuras conceptuales en paralelo (2RP y 3RP) revelan la clara superioridad del modelo con 2 reservorios en paralelo, el cual muestra un mejor desempeño utilizando ecuaciones de transferencia potencial o exponenciales durante el periodo de calibración, NSE de 0.87-0.90 y logNSE de 0.73 – 0.85 respectivamente, en donde las curvas de recesión de periodos de sequía y los caudales pico muestran similitud entre la simulación y el caudal observado. Sin embargo durante el periodo de validación la estructura con ecuaciones de transferencia exponencial 2RP *exp*, es la



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

que presenta un mejor rendimiento, con un logNSE de 0.69, NSE de 0.83 y un AC% de 97%.

La adición de un tercer reservorio en la estructura (3RP), no trascendió en el rendimiento durante las simulaciones (ver tabla 3), en la cual el tercer reservorio simula la contribución de flujo a través de la roca fractura bajo el horizonte mineral, reflejando que esta contribución de aguas subterráneas, es despreciable en el sistema bajo estudio, este reservorio contribuye menos del 6% del total de caudal simulado. Además los valores de los índices de eficiencia, obtenidos durante el periodo de validación para logNSE, son menores a 0.54, (ver tabla 3) y no cumple los parámetros de evaluación, contrastando que esta estructura no es buena representación del sistema simulado y por tanto se descarta.

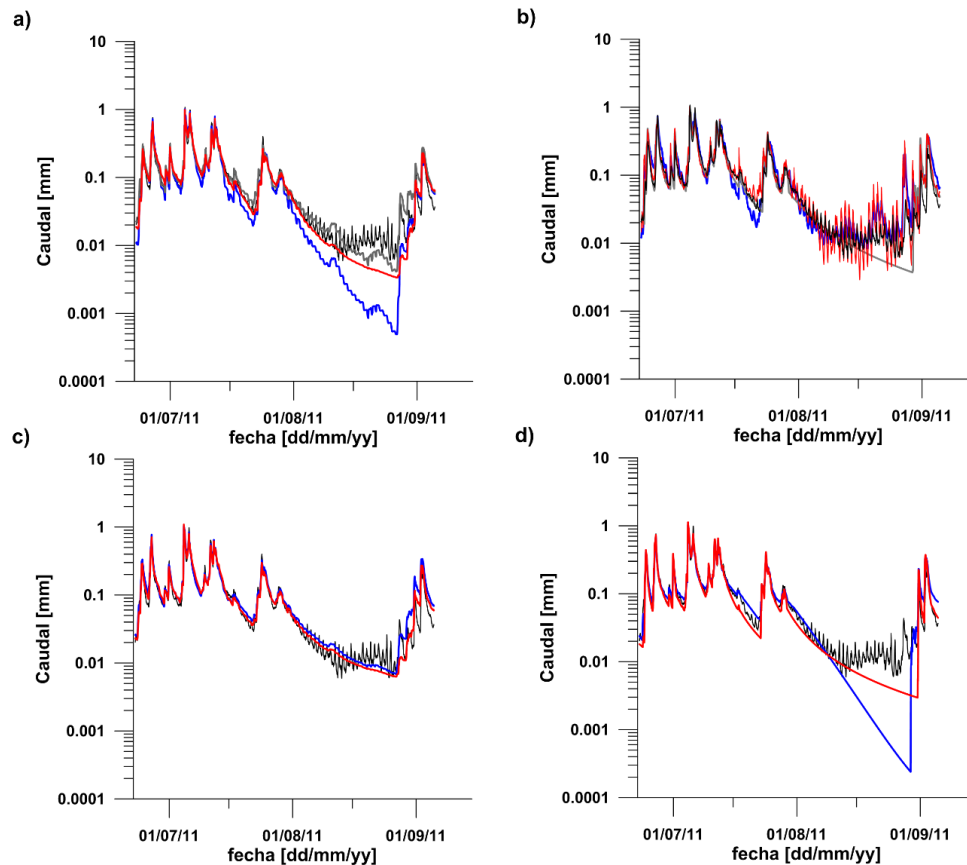


Figura 5 Caudal observado y mejores simulaciones para las 5 estructuras y sus variantes (exp y pow).
(Escala logarítmica)

Leyenda: a). Caudal observado (---), caudal simulado 2RSexp (---), caudal simulado 3RSaexp (---), caudal simulado 3RSbexp (---). b). Caudal observado (---), caudal simulado 2RSpow (---), caudal simulado 3RSapow (---), caudal simulado 3RSbpow (---). c). Caudal observado (---), caudal simulado 2RPexp (---), caudal simulado 3RPexp (---). d). Caudal observado (---), caudal simulado 2RPpow (---), caudal simulado 3RPpow (---).

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

La predicción incorrecta de los flujos máximos durante los períodos húmedos y secos de todas las estructuras conceptuales, se debe a una subestimación de la distribución espacial de la lluvia (Willems, 2001); (Buytaert & Beven, 2011), entre otros, los errores de precipitación corresponden a la medición puntual de la misma, producto de la subestimación de lluvia de entrada por parte del pluviógrafo utilizado para registrar la precipitación en las cuatro estaciones de la microcuenca, en comparación a otros sensores de mejor precisión (resultados no mostrados). Así también como la lluvia oculta (intercepción de la neblina).

La figura 6 representa para las cinco estructuras caudal observado y los límites de incertidumbre del 90% en la descarga simulada, las figuras de la izquierda corresponden a los modelos con reservorios exponenciales y las figuras de la derecha a reservorios con ley de potencia. En la figura 7 se muestran el caudal observado, caudal simulado y el intervalo del 90% de confianza para las curvas de duración de flujo horario para las cinco estructuras conceptuales, a la izquierda las estructuras con reservorios exponenciales y a la derecha las estructuras con reservorios con ley de potencia

Los análisis realizados en la para las estructuras en serie, muestran que los límites de incertidumbre del 95% de la curva de caudales representan la mayoría de los eventos de precipitación y las curvas de recesión en la simulación, sin embargo, el límite inferior de incertidumbre del 5 % subestima significativamente los valores de la descarga durante flujos lentos de periodos secos (ver figura 6).

Comparaciones entre la estrechez de las bandas de incertidumbre generadas para las estructuras en serie, revelan que mediante la adición del reservorio de dinámica lenta se reduce la amplitud de la banda de incertidumbre, generada con un intervalo de confianza del 90%, tanto en la estructura 3RSa y 3RSb, al igual que en la banda de incertidumbre generada para las curvas de duración horarias de caudal de la figura 7. La estructura 3RSa exp muestra la menor amplitud, contrastando que es la mejor representación del sistema (a pesar de que el número de parámetros es mayor en la misma), esta incertidumbre está relacionada con la sensibilidad de los parámetros de las estructuras conceptuales (Renard, Kavetski, Kuczera, Thyer, & Franks, 2010),

Los diagramas de dispersión “dotty plots” (refiérase a la figura 8), utilizados para explorar la sensibilidad de los parámetros (Spear & Hornberger, 1980), que se obtuvieron en función de las simulaciones “aceptables”, revelaron que los parámetros sensibles (parámetros de transmisividad de flujo horizontal), de la estructura conceptual 3RSb están pobremente identificados en comparación a los de la estructura 3RSa.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

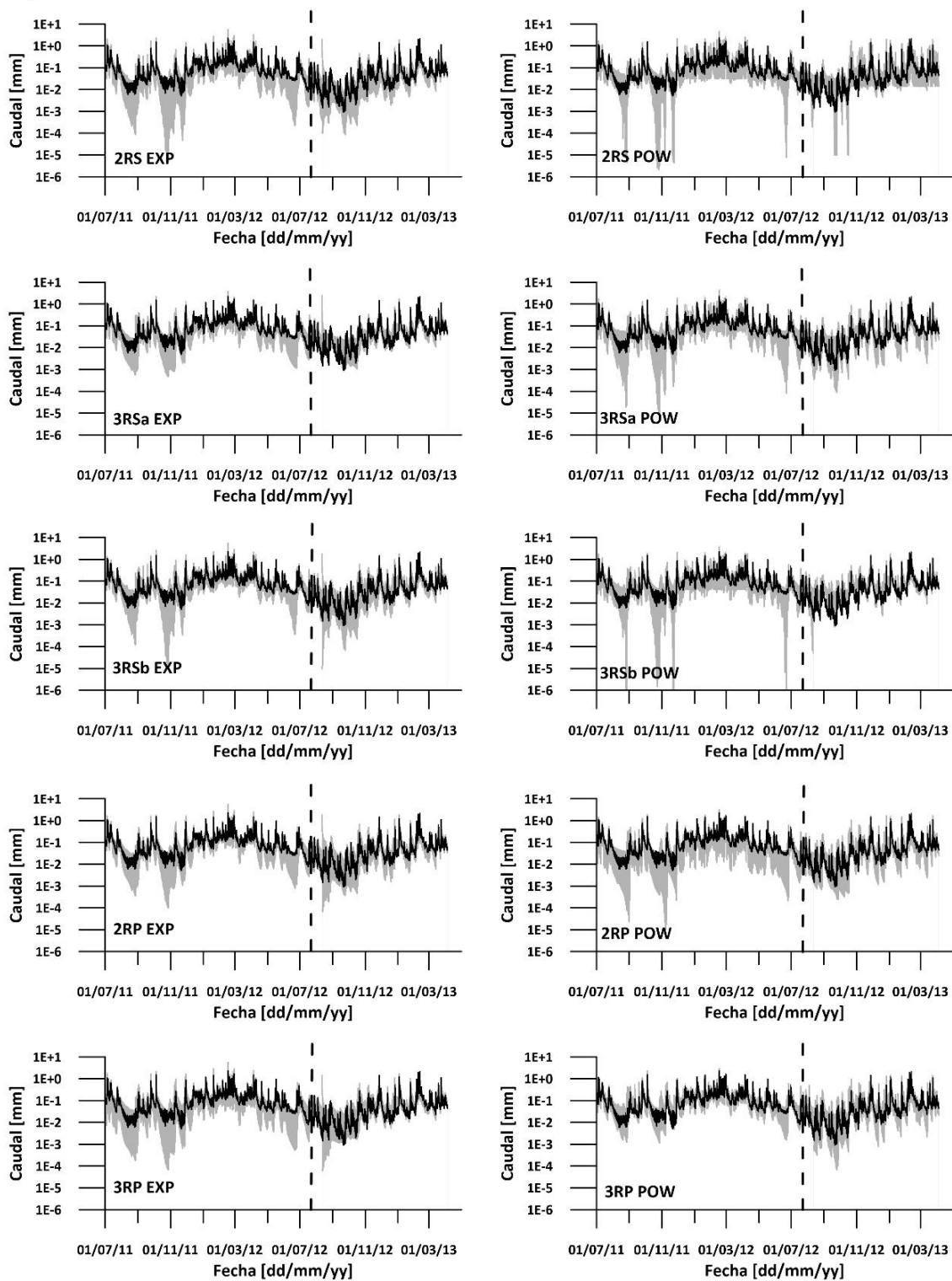


Figura 6 Descarga observada y límites de incertidumbre del 5 y 95% de la descarga simulada de las estructuras analizadas.

Leyenda: Para el periodo de calibración en la parte derecha de los gráficos y validación en la parte izquierda separados por líneas entrecortadas.

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

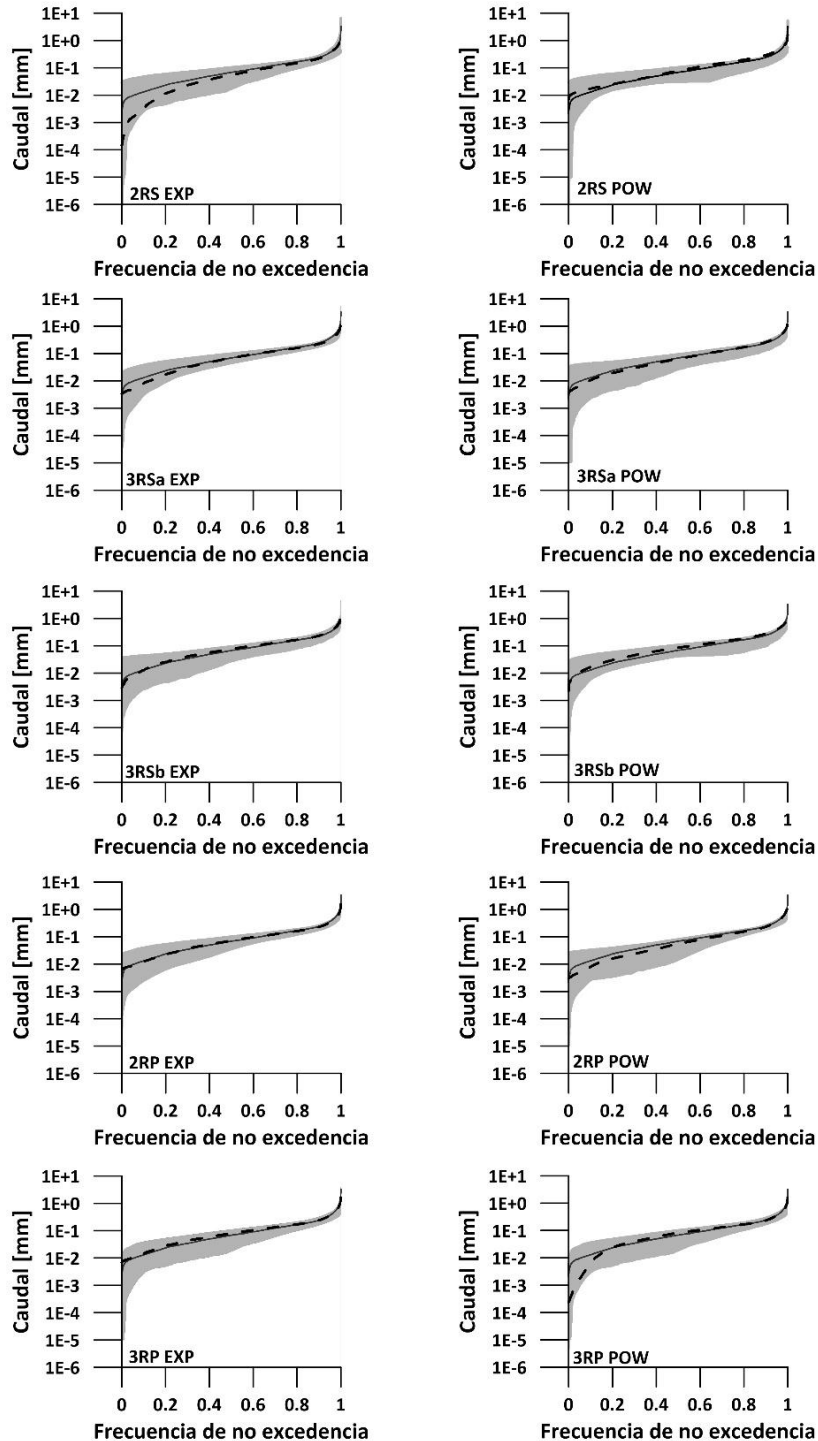


Figura 7 Curvas de duración horarias de caudal para las 5 estructuras conceptuales y límites de incertidumbre del 5 y 95%.

Legenda: Descarga observada línea punteada, descarga simulada línea entrecortada y límites de incertidumbre del 5 y 95% color, las figuras de la izquierda corresponden a los modelos con Reservorios exponenciales y las figuras de la derecha a Reservorios con ley de potencia.

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Al igual que las estructuras en serie, las estructuras con dos y tres reservorios en paralelo revelan que los límites de incertidumbre del 95% de la curva de caudales representan adecuadamente la mayoría de los eventos de precipitación, sin embargo, el límite inferior de incertidumbre del 5% subestima significativamente los valores de la descarga durante flujos bajos en la estructura 3RP, mientras que en la estructura 2RP este límite inferior del 5% muestra una amplitud menor. Si comparamos las bandas de incertidumbre de las estructuras 2RP exp y 2RP pow, la estructura con ecuaciones exponenciales es la que presenta una menor amplitud.

Los parámetros de ambas estructuras en paralelo tienen una mayor sensibilidad en los que dan el ruteo (función de transferencia), la realización de las comparaciones de las estructuras 2RP, se observó que los parámetros de la estructura 2RP pow no están bien definidos en comparación a los del modelo 2RP exp (ver figura 8), mostrando mayor sensibilidad en los parámetros del reservorio que simula el estrato orgánico.

Además, la calidad de las curvas de duración de flujo horario simulada, para las estructuras 2RS y 3RP contrastan la evaluación cuantitativa realizada, en donde se determinó que estas estructuras, no son una buena representación del sistema, en comparación a las curvas de duración de las estructuras 3RSa y 2RP, muestran un mejor desempeño y ajuste en los caudales bajos y altos (ver figura 7).

La evaluación realizada a las estructuras conceptuales revela que las estructuras 2RP exp y las dos variantes de la estructura 3RSa brindan un mejor desempeño, con una incertidumbre aceptable en comparación a las demás estructuras probadas, estas además presentan parámetros físicamente interpretables, los más importantes relacionados al almacenamiento de agua en los suelos, donde los valores del punto de saturación, capacidad de campo y punto de marchitez son semejantes a los valores medios obtenidos en campo de cada estrato (tabla 1).

La variabilidad de estos parámetros se observa en la figura 9, en las cuales se exponen los resultados de los análisis de Box-Plots de los parámetros del suelo para las estructuras 2RP exp y 3RSa, se observa que los parámetros no presentan un sesgo considerable en su distribución hacia ninguno de los cuartiles, pero sus dispersiones son variables para los distintos parámetros en comparación con los resultados obtenidos en laboratorio, situándose en la mayoría de los casos dentro de los valores medios con la excepción del punto de saturación del estrato mineral en las dos estructuras.

Los valores de los parámetros de las funciones de transferencia de flujo horizontales (ver tabla 4) en las estructuras 2RP y 3RSa, tienen gran influencia en las recesiones de los flujos como se explica en Moore, (1997), en este estudio se obtuvo que los rangos "óptimos" deberían estar para la transferencia exponencial en el intervalo 0.15-0.5 para

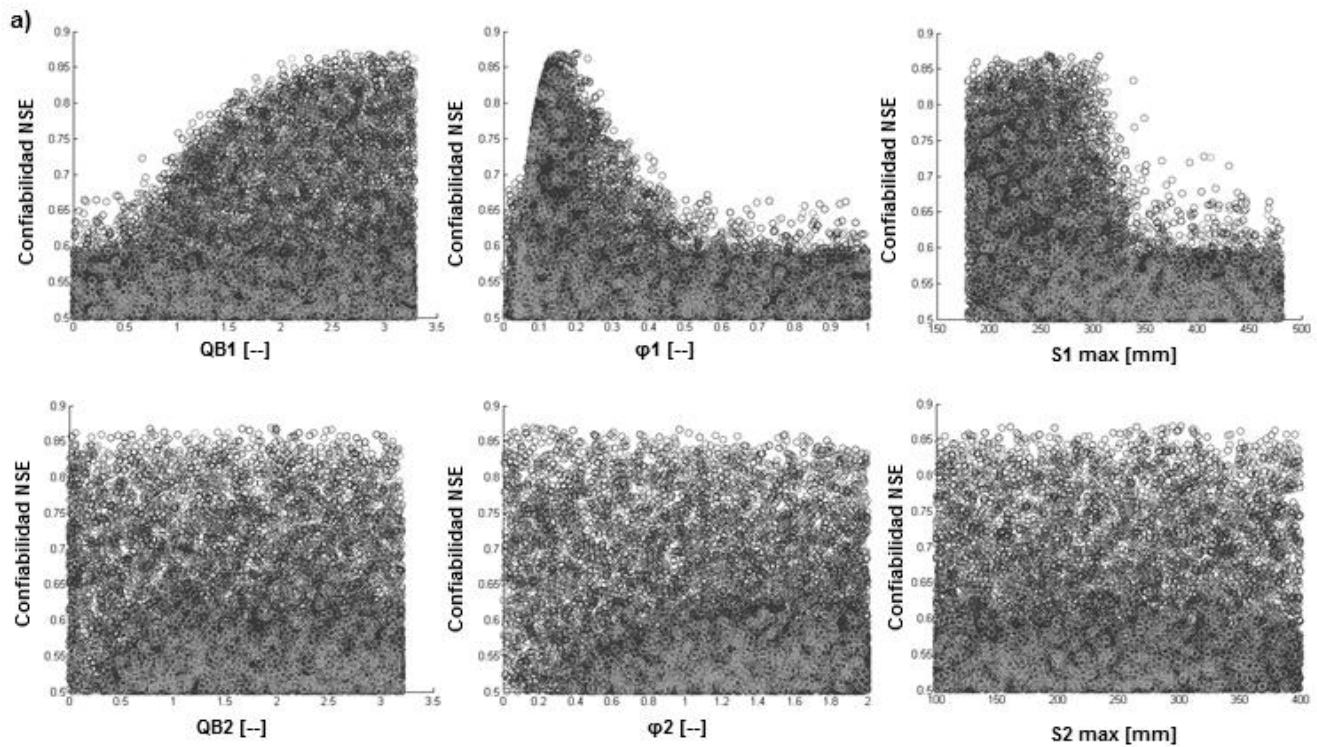


UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

QB y 1.5-3 para ϕ , y para la transferencia con ley de potencias entre 0.000115-0.2 para α y 1.15-2.5 para β , los valores de β en las ecuaciones de ley de potencias son comparables con los resultados expuestos por (Moore, 1997).

De los resultados de los parámetros del flujo vertical K1 y K3, se obtienen diferentes resultados entre las dos estructuras, siendo la estructura 2RP la que mejor resultados presenta para los reservorios paralelos, donde es notable la sensibilidad, resultados similares a los obtenidos por Angeli, Buma, Gasparetto, & Pasuto, (1998).



Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño

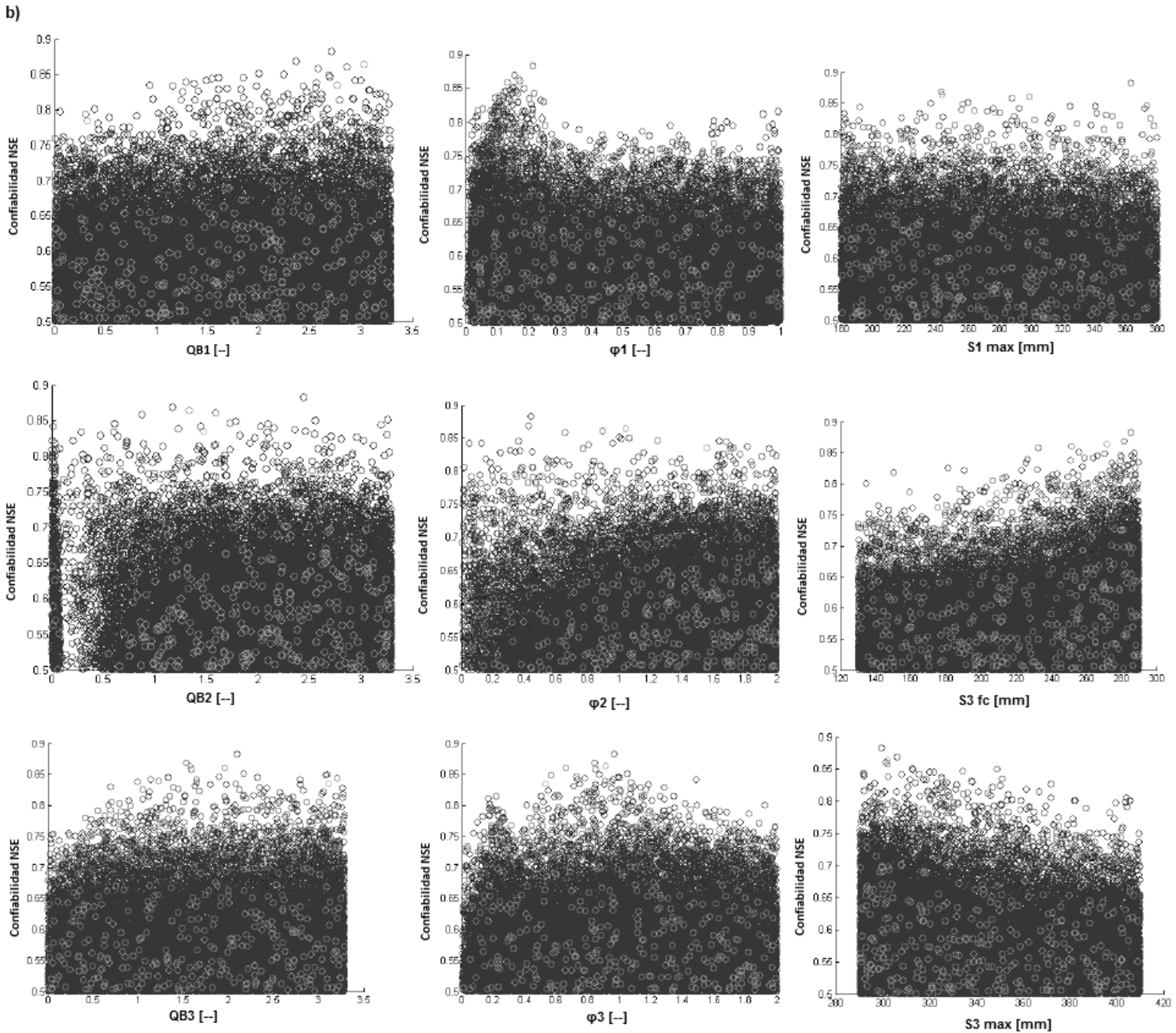


Figura 8 Dotty plots de los parámetros sensibles de las estructuras 2RP exp y 3RSa exp.

Leyenda: a) Parámetros de la función de transferencia del modelo del suelo para la estructura 2RP exp, b) Parámetros de la función de transferencia del modelo del suelo para la estructura 3RSa exp.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

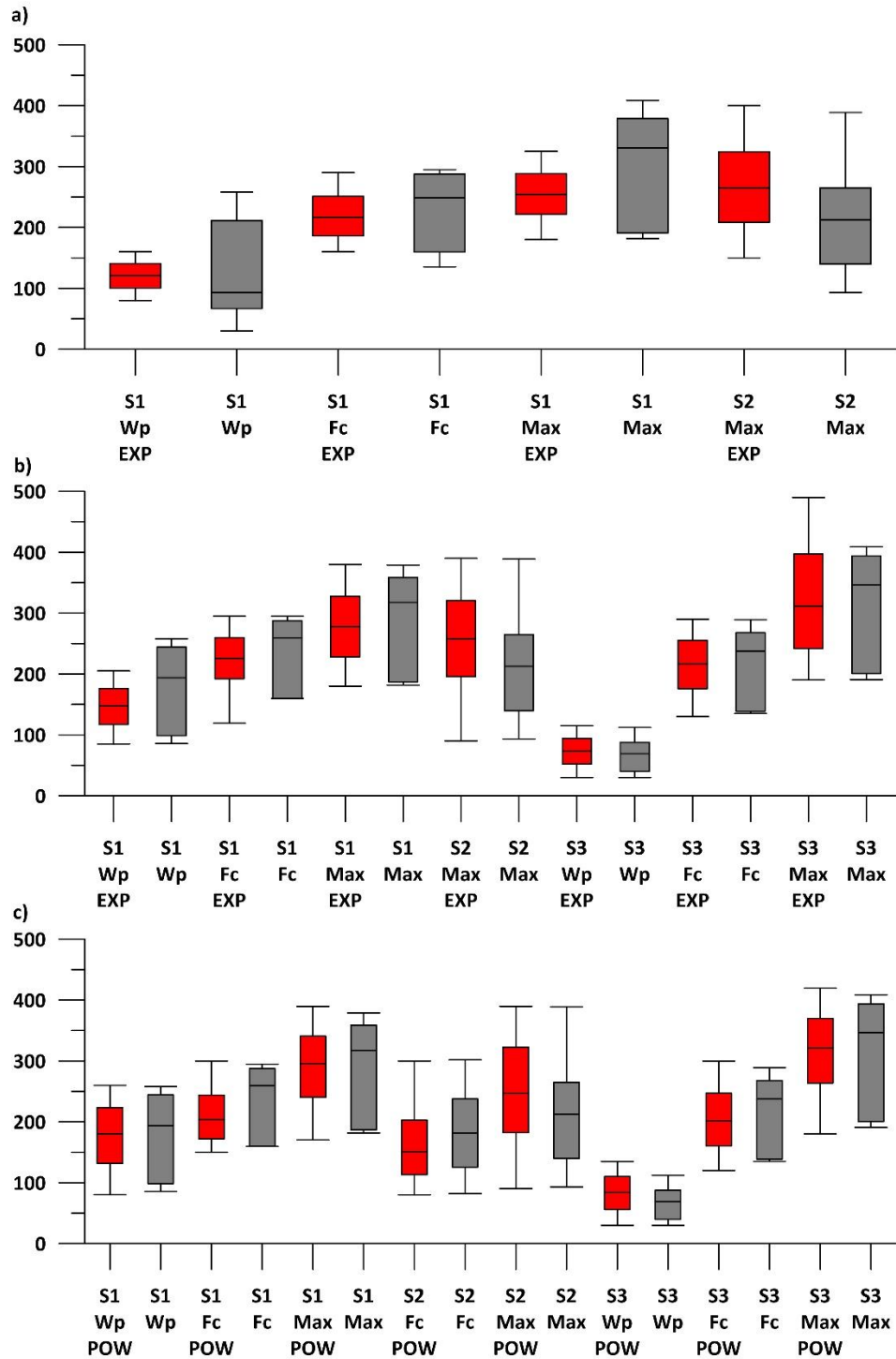


Figura 9 Análisis de los parámetros calibrados del suelo vs los obtenidos en laboratorio.

Leyenda: **a)** Parámetros del modelo del suelo para la estructura 2RP exp, **b)** Parámetros del modelo del suelo para la estructura 3RSa exp, **c)** Parámetros del modelo del suelo para la estructura 3RSa pow.

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Tabla 4 Parámetros óptimos de las estructuras 3RSa y 2RP.

Parámetro	3RSa EXP	3RSa POW	2RP EXP
B	0.48	0.54	0.53
ω_0 [m ² /m ²]	1.99	1.7	1.69
QB1	2.7	8.09E-03	2.89
ϕ_1	0.21	1.74	0.21
QB2	2.44	2.58E-04	1.54
ϕ_2	0.44	2.01	0.2
QB3	2.1	0.17	---
ϕ_3	0.97	1.55	---
S1max [mm]	363.12	202.77	259.06
S1fc [mm]	327.46	157.59	239.01
S1wp [mm]	87.97	115.97	88.29
S2max [mm]	199.52	205.31	289.86
S2fc [mm]	---	155.2	---
S2wp [mm]	---	---	---
S3max [mm]	299.2	282.74	---
S3fc [mm]	285.47	200.49	---
S3wp [mm]	61.5	111.32	---
K1 [hr ⁻¹]	134.86	27.65	40.55
K3 [hr ⁻¹]	197.2	277.38	---

Leyenda: Para la estructura **3RSa pow**, los parámetros **QB** representan los parámetros α y los parámetros ϕ representan los β de la ecu.7. Parámetros que no intervienen en la estructura representados por (---).

4.3 Evaluación de las ecuaciones de transferencia del modelo almacenamiento-flujo de salida, para recesiones de caudal

En general los flujos lentos no han sido adecuadamente simulados por modelos hidrológicos, por tanto, hay una necesidad de mejorar los modelos hidrológicos para la predicción de estos flujos (Hamid, Willems, Wyseure, & Feyen, 2007), (Staudinger, Stahl, Seibert, Clark, & Tallaksen, 2011). Modelaciones anteriores, realizadas en la microcuenca contrastan lo mencionado, ya que se presentó un pobre ajuste a las recesiones de caudal de flujos lentos, (Crespo P., y col., 2012) (Vázquez, 2010), sin embargo se obtuvieron valores aceptables de NSE y esto debido a la sensibilidad que tiene este criterio de eficiencia al ajuste de picos o valores extremos en la descarga (McCuen, Knight, & Cutter, 2006). Debido a la rápida respuesta de descarga que presenta la microcuenca durante eventos de precipitación (Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2012); (Crespo P., y col., 2012).

Todos los modelos con reservorios exponenciales muestran un mejor desempeño en el ajuste de recesiones de caudal aún más en flujos lentos. Lo cual se observa en valores obtenidos de log NSE, que en calibración son superiores a 0.77, excepto en el caso del modelo 2RS exp (estructura descartada), mientras los modelos con reservorios con ley



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

de potencia brindan una mejor simulación en los picos. Esto debido a la rápida respuesta que se tiene en comparación a la de los reservorios exponenciales. Los resultados se justifican en la figura 10a, en donde se observa la curva de recesión obtenida con los parámetros calibrados para la estructura 3RSa pow y 3RSa exp, revelando el mejor ajuste de la recesión utilizando reservorios exponenciales y que es el que predomina en la microcuenca, debido a la alta retención y regulación de agua almacenada en los estratos de suelo (figura 10b).

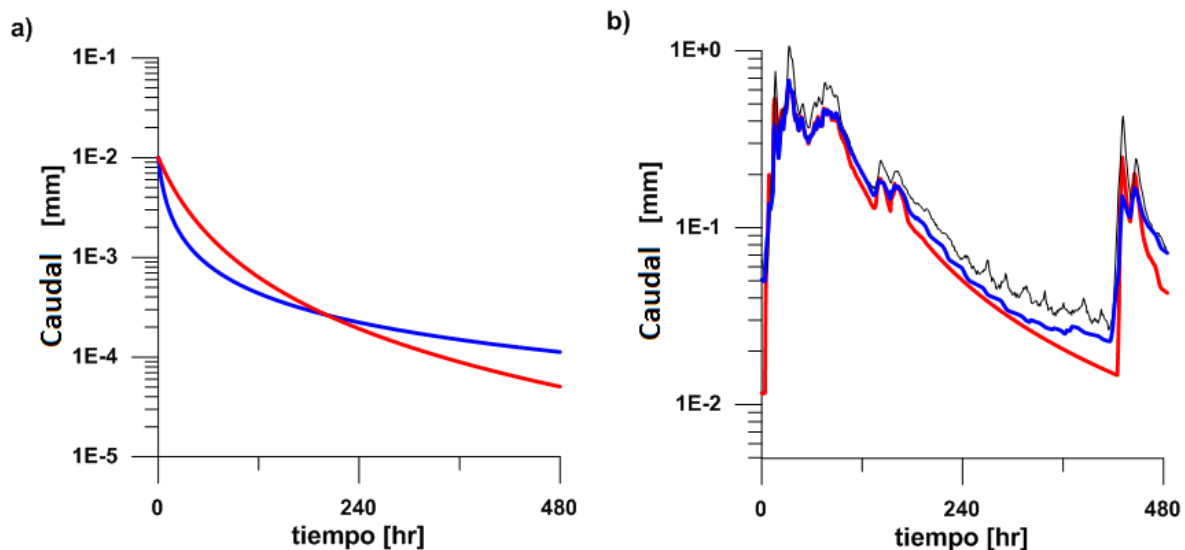


Figura 10 Curvas de recesión de la estructura 3RSa.

Leyenda: a). Curva de recesión de los parámetros calibrados de las estructuras 3RSa pow (---) y 3RSa exp (---). b). Simulaciones 3RSa pow (---), 3RSa exp (---) y caudal observado (---).

Los reservorios exponenciales muestran la capacidad de simular correctamente el contenido antecedente de humedad, y por tanto brindan un mejor desempeño en el ajuste de las recesiones de caudal, en comparación a reservorios potenciales, o reservorios lineales utilizados en modelaciones de ecosistemas similares, los cuales no mostraron esta habilidad para generar adecuadamente las curvas de recesión durante los periodos húmedos y secos (Buytaert & Beven, 2011).

Debido a la respuesta más lenta que se obtuvo al utilizar reservorios exponenciales, estos poseen más cantidad de agua en comparación a un reservorio con ley de potencia, que frente a una recarga considerable durante un evento de precipitación llega a saturarse. Por ende se obtuvo la generación de flujo por exceso de saturación (flujo directo). Esto ocurrió en todas las estructuras con este modelo de transferencia (ver tabla 5), desplazando o realizando un efecto de empuje de agua almacenada



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

cuando se da la entrada de cantidad nueva de agua. Hipótesis de funcionamiento acorde a resultados de Crespo, y col., (2012).

4.4 Interpretación de la producción de flujos a través del estrato orgánico y mineral

Para el siguiente análisis se hace referencia a los resultados de respuesta hidrológica del suelo y sus aportes de flujo en las simulaciones, los resultados de aportes de flujo están referenciados en la tabla 5, la cual presenta información del porcentaje de aporte de flujo correspondiente a cada reservorio dentro del sistema para las estructuras que son una buena representación del sistema bajo estudio.

Los resultados obtenidos de las modelaciones y los indicadores de rendimiento las estructuras 3RSa (exp-pow) y 2RPexp reflejan la capacidad de modelar de manera correcta el funcionamiento hidrológico de la cuenca, haciendo énfasis en habilidad de simular la hidrología sub-superficial en los reservorios. Demostrando que el aporte del flujo hacia el efluente es preferencialmente sub-superficial. Durante los periodos húmedos se tiene mayor influencia de los estratos orgánicos, mientras que el aporte de flujo por el estrato mineral presenta relevancia en los periodos secos (Crespo P., y col., 2011a), (Crespo P., y col., 2011b), (Crespo P., y col., 2012). Además cumplen las condiciones expuestas por (Buytreart, 2004a), en las que se expone que los estratos de suelo orgánicos como Andosoles (Ah) cumple una función de alta retención de agua dentro de los ecosistemas de paramo alto-andino.

En los resultados de la estructura 2RP exp, se obtuvo dinámicas que contrastan las hipótesis de funcionamiento de los estratos orgánicos y estrato mineral. El reservorio que simula los estratos orgánicos, reservorio de dinámica rápida, presentan una capacidad almacenamiento de 260 mm, el flujo simulado por este reservorio representa el 64.8% del total, mientras que el reservorio utilizado para simular el aporte del estrato mineral presenta una capacidad de 290mm y un aporte del 36% del total de caudal simulado.

El aporte de flujo rápido y lento de la estructura 3RSa no mostro diferencias significativas para las dos variantes, con ecuaciones de transferencia potencial y exponencial, valores entre 78 y 73.4% para flujo rápido, mientras que para flujo lento entre 22 y 26.4% respectivamente, además de un 0.2% de flujo directo por exceso de saturación en la estructura 3RSa exp que se produjo en el reservorio que simula el estrato Histosol, el cual se encuentra próximo a la rivera del rio del sistema bajo estudio.

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Tabla 5 Contribución del flujo por reservorio [%].

Estructura Conceptual	Directo	Reservorio 1	Reservorio 2	Reservorio 3
3RSa pow	0.0	32.05	45.66	22.29
3RSa exp	0.2	40.2	33.2	26.4
2RP exp	0.2	63.9	36	---

Leyenda: Valores representados por (---), indica que la estructura no presenta reservorio

4.5 Interpretación de procesos

Uno de los desafíos de la modelación hidrología, es obtener resultados de la cuenca en estudio que sean acordes a las características internas de los procesos, esta perspectiva ha sido ampliamente utilizada en la modelación para aclarar varios aspectos del comportamiento del sistema que no son muy claros, por ejemplo la respuesta de la cuenca a las propiedades del suelo (Fenicia, Savenije, Matgen, & Pfister, 2008).

Al probar las 5 estructuras conceptuales se obtuvieron resultados que demuestran procesos que son imprescindibles para el funcionamiento del sistema, la contribución de flujos para el caudal es principalmente sub-superficial y está controlada por las propiedades de los suelo, las tasas de evapotranspiración son bajas alrededor de 1 mm día⁻¹, el flujo superficial se produce en las cercanías del río y por exceso de saturación.

Como se mencionó la producción de caudal es preferencialmente sub-superficial y está controlada por las propiedades físicas del suelo, como la porosidad, debido a la alta capacidad de almacenamiento.

En la evaluación de la estructura 2RS, se determinó que usar un reservorio para simulación de flujo lento durante periodos secos es imprescindible en la conceptualización, por esta razón la estructura 2RS no presentó un buen desempeño en el ajuste de los flujos lentos al no utilizar este reservorio. Por tal motivo se descartó como una buena representación del sistema, de igual manera la estructura 3RP, que presentó en su conceptualización un tercer reservorio que simuló el aporte de aguas profundas en el sistema, no brindó un mejor desempeño con relación a sus similar 2RP. Reflejando que el aporte de aguas profundas en el sistema es despreciable, y por tanto se descarta como representación del sistema. Contrastando la hipótesis de Crespo P., y col., (2012), que menciona, que los estratos orgánicos y minerales son suficientes para simular la conversión de precipitación a escorrentía

En comparación de las mejores estructuras obtenidas (3RSa exp y 2RP exp), la estructura 3RSa exp brinda una mejor comprensión del sistema bajo estudio y de los procesos trascendentales en la conversión de la precipitación en escorrentía. Debido a que brinda la conceptualización de una conectividad hidrológica de los estratos de



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

suelo, en donde los Andosoles ubicados generalmente en las partes altas de la microcuenca (es decir en la ladera) recargan a los Histosoles ubicados en las riberas de los ríos, que derivan en el cierre de la misma. Mientras que en 2RP el reservorio superior, representa una superposición de los estratos orgánicos Andosol e Histosol.

En la estructura 3RSa exp, se obtuvieron resultados que contrastan las hipótesis de funcionamiento de los estratos orgánicos, para generar flujo durante periodos húmedos y secos. Los flujos simulados a través de los Histosoles de la estructura conceptual, contribuyen flujo lento para periodos de sequía al igual que flujo de periodos húmedos, resultados similares a los descritos por Mosquera, y col. (2014); (Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2012) que mencionan que el aporte de flujo a través de los Histosoles se da a través de todo el año. Mientras que en la estructura 3RSa pow el aporte de flujo lento es exclusivo del reservorio que representa el estrato mineral (ver figura 11).

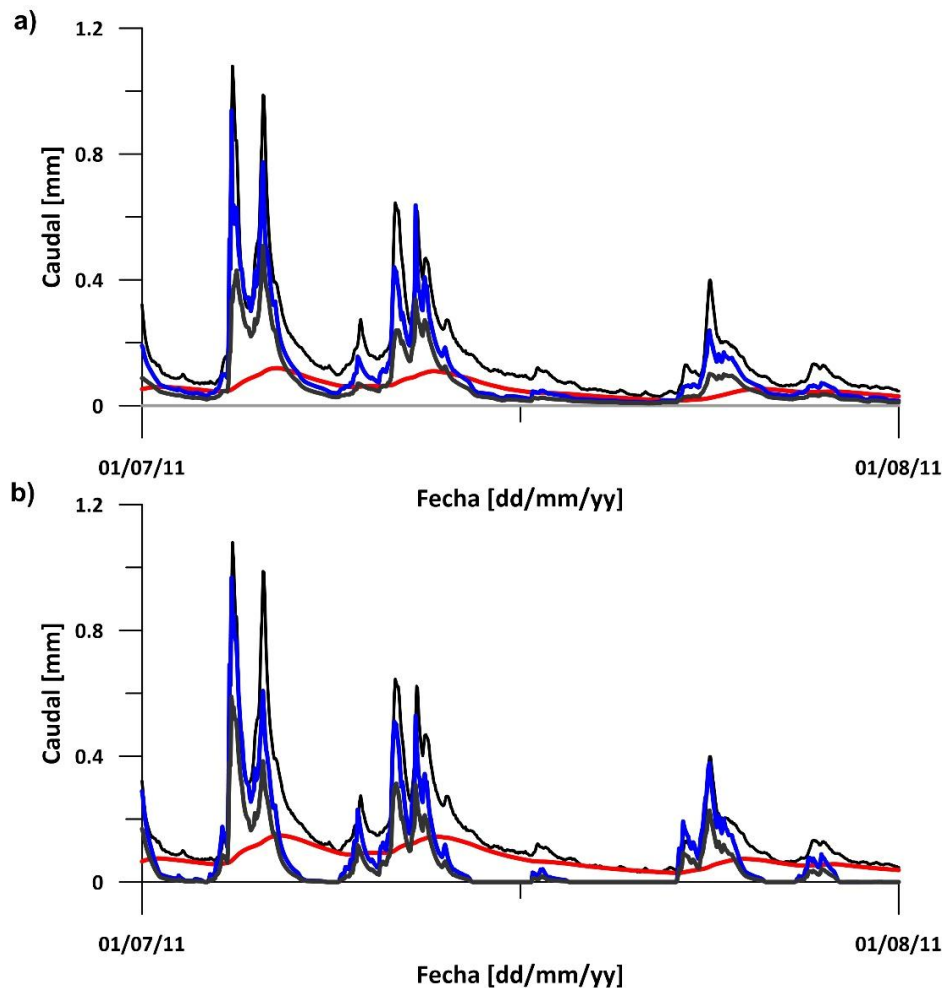


Figura 11 Contribución de Flujos por Reservorio, estructura 3RSa.

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Leyenda: a) Estructura 3RSa exp, b) estructura 3RSa pow. Caudal observado (---); Estrato orgánico H (---); Estrato orgánico Ah (---); Estrato mineral C (---).

El flujo por exceso de saturación se produjo únicamente en los reservorios que simulan el estrato orgánico Histosol de la estructura 3RSa exp, los cuales se encuentran próximos al río del sistema bajo estudio, contrastando la hipótesis de funcionamiento de Crespo P., y col., 2011a. la cual menciona que el flujo superficial es probable que se produzca cerca de los ríos, durante períodos húmedos y debido a exceso de saturación.

En lo referente a la evapotranspiración actual (ETa), los resultados de la evapotranspiración diaria obtenidos en las simulaciones para las mejores estructuras (3RSa y 2RPexp), oscilan entre 1.04 a 1.12 mm día⁻¹, valores aproximados al obtenido mediante la resta de la precipitación y el caudal observado ($ETa = P - Q$), que es de 0.99 mm día⁻¹, contrastando un buen desempeño del modelo de evapotranspiración utilizado, los valores de evapotranspiración de los modelos se presentan en la tabla 6.

Mediante estos valores se obtiene que la evapotranspiración en las diferentes estructuras tienen un mismo patrón de evaporación del suelo como de transpiración de la vegetación, siendo mucho mayor el aporte de transpiración de la vegetación que la evaporación del suelo.

Tabla 6 Evapotranspiración diaria.

Estructura Conceptual	ETa diaria [mm]
3RSa exp	1.12
3RSa pow	1.04
2RP exp	1.07



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

5 CONCLUSIONES

Basado en los indicadores de rendimiento, todas las estructuras conceptuales son capaces de predecir la escorrentía durante el periodo de calibración. Sin embargo durante el periodo de validación se descartan estructuras que no son una buena representación del sistema, en función de los parámetros de evaluación propuestos. Resultando que la estructura que presenta el mejor desempeño es la 3RSa la cual no depende de las ecuaciones de transferencia utilizadas.

En general las mejores simulaciones se presentan en las estructuras conceptuales con reservorios exponenciales, en donde las curvas de recesión muestran similitud entre la descarga simulada y observada. En las estructuras con estos reservorios se produce flujo directo por exceso de saturación (despreciable en comparación a los producidos en el modelo de la sub-superficie), en el reservorio más próximo a la rivera del río. Contrastando los estudios realizados por Crespo P. , y col., (2011a).

Los flujos rápidos de periodos húmedos son correctamente simulados por los reservorios que representan los estratos orgánicos. Mientras que en condiciones secas el reservorio que simula el horizonte mineral, domina la contribución de flujo. Mientras que la contribución de flujo por la parte superior de la roca fracturada es depreciable en comparación a los demás estratos de suelo.

Los mejores modelos obtenidos son: la representación estructural 3RSa y 2RP, estos modelos muestran un rendimiento suficiente y una incertidumbre aceptable. Estas estructuras simulan de manera correcta la rápida respuesta que se tiene desde un caudal lento hacia un pico, siguiendo la transición de un periodo seco a un lluvioso. De esta manera se refleja que el concepto y enfoque del *reservorio de almacenamiento*, el cual está en función del contenido de humedad del suelo, simula correctamente la hidrología de la sub-superficie de la microcuenca.

El modelo 3RSa da un mejor ajuste a los caudales pico de periodos lluviosos que el modelo 2RP, en su conceptualización los Histosoles mantienen un mayor contenido de humedad, debido a la contribución proveniente de los Andosoles (ubicados generalmente en la ladera), que durante periodos húmedos y secos contribuye a la descarga, resultados acordes a estudios de Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, (2012).

En adición se podría mencionar que el enfoque agregado de las estructuras conceptuales en paralelo, en comparación a sus similares en serie, no representa de manera adecuada la dinámica entre ladera, depresiones y mesetas cóncavas



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

saturadas de la microcuenca, que en estudios realizados por Beven (2001); Beven & Freer (2001), muestran una contribución directa para la generación de picos del hidrograma durante eventos de precipitación, y por esta razón las estructuras en serie brindan un mejor ajuste de picos durante periodos húmedos.

Probar modelos conceptuales con variaciones en su estructura, muestran tener un potencial para identificar procesos hidrológicos.

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

6 RECOMENDACIONES

El modelo 3RSa en comparación al modelo 2RP, muestra una superior riqueza conceptual que podría ser utilizada en investigaciones futuras que incorporen nuevas metodologías y datos, como información de trazadores isotópicos naturales de los que se dispone actualmente, pudiéndose generar también un modelo distribuido, debido a que representan la conectividad hidrológica del paisaje. Por otra parte el modelo 2RP podría ser utilizado para un modelo exclusivo de lluvia escorrentía.

Los modelos conceptuales muestran una ventaja debido a su simplicidad, y en este estudio muestran una gran relación con los estratos de suelo para la generación de flujo, por tanto este enfoque, podría ser aplicado a micro-cuencas no aforadas en donde se conozca a detalle el perfil, disposición y composición de los diferentes estratos de suelo.

Además según Krause, y col., (2005), Una de las razones para modelar es para proporcionar un medio de evaluación de mejoras en el enfoque de la modelación a través de: (i) ajuste de los valores de parámetros, (ii) modificaciones estructurales, (iii) inclusión de información adicional de observación. Que en este estudio reflejaron un mejor desempeño en comparación a modelaciones anteriores, de esta manera para futuras simulaciones y conceptualizaciones se podría utilizar este enfoque de modelación hidrológica.



7 REFERENCIAS

- Aghakouchak, A., & Habid, E. (2010). Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes. *Int. J. Engng Ed*, 963-973.
- Angeli, M. G., Buma, J., Gasparetto, P., & Pasuto, A. (1998). A combined hillslope hydrology/stability model for low-gradient. *Engineering Geology* 49, 1-13.
- Beven, K. (2001). On hypothesis testing in hydrology. *Hydrol. Process.*, 15, 1655-1657.
- Beven, K. J. (2003). *Rainfall-runoff Modelling: the primer*. Chichester: Wiley and Sons.
- Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol. Process.*, 6, 279-298.
- Beven, K., & Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *J. Hydrol* 249, 11-29.
- Bonell, M., McDonnell, J., Scatena, F., Seibert, J., Unlenbrook, S., & van Lanen, H. (2006). Charting a course for synergies within international water research programs in gauged and ungauged basins. *Hidrological Processes*, 1867-1874.
- Bücker, A., Crespo, P., Frede, H.-G., & Breuer, L. (2011). Solute behavior and export rates in neotropical montane catchments under different land-uses. *Journal of Tropical Ecology*, 305-317.
- Buytaert, W., & Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrol. Process.*, 1784–1799.
- Buytaert, W., Célleri, R., Willems, P., De Bievre, B., & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*(329), 413-421.
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in the south Ecuador. *Hydrol. Process*, 3985-3997.
- Buytreart, W. (2004). The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology. *Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, Katholieke Universiteit Leuven*.
- Celleri, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical Andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development*, 350-355.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

- Célleri, R., Buytaert, W., Tobon, C., Crespo, P., Molina, J., & Feyen, J. (2010). Understanding the hydrology of tropical Andean ecosystems through an Andean network of basins. *IAHS Publ.*, 336, 209-212.
- Célleri, R., Crespo, P., De Bièvre, B., & Acosta, L. (2011). Una iniciativa regional de monitoreo hidrológico de ecosistemas andinos. 5.
- Célleri, R., Willems, P., & Feyen, J. (2010). Evaluation of a data-based hydrological model for simulating the runoff of a medium sized Andean basins. *Maskana*, 61-77.
- Clark, M. P., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2011). Pursuing the method of multiple working hypotheses for hydrological modeling. *Water. Resour. Res.*, 16.
- Coltori, M., & Ollier, C. D. (2000). Geomorphic and tectonic evolution of the Ecuadorian Andes. *Geomorphology*, 1-19.
- Crespo, P. (2012). Analysis of the rainfall runoff processes of Andean ecosystems in Southern Ecuador: using hydrometric, tracers and modeling approaches.
- Crespo, P., Bücker, A., Feyen, J., Vaché, K., Frede, H.-G., & Breuer, L. (2011b). Preliminary evaluation of the runoff processes in a remote mountain cloud forest basin using Mixing Model Analysis and Mean Transit Time. *Hydrological Process*. doi:10.1002/hyp.8382
- Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H.-G., & Ramirez, M. (2011a). Identifying controls of the hydrological response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407, 164-174.
- Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Célleri, R., Frede, H., Ramírez, M., & Breuer, L. (2012). Development of a conceptual model of the hydrologic response of tropical Andean micro-catchments in Southern Ecuador. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9, 1-37.
- Cuesta, F., & Becerra, M. T. (2012). Biodiversidad y cambio climático en los andes: Importancia del monitoreo y el trabajo regional. *Revista Virtual REDESMA*, 6(1), 27.
- FAO/ISRIC/ISSS. (1988). World Reference Base for Soil Resources. *World Soil Sources Reports, FAO (84)*, 88.
- Fenicia, F., Savenije, H. H., Matgen, P., & Pfister, L. (2008). Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement. *Water Resources Research*, 44, 13. doi:10.1029/2006WR005563
- Fernández M., M., Vela M., A., & Castaño F., S. (1997). La utilización de modelos en hidrología. *Ensayos: Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, 305-318.

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

- Gupta, H. V., Bastidas, L. A., Sorooshian, S., Shuttleworth, W. J., & Yang, Z. L. (1999). Parameter estimation of a land surface scheme using multicriteria methods. *Journal of Geophysical Research*, 491-503.
- Hamed, R., Willems, P., Wyseure, G., & Feyen, J. (2007). Parameter estimation in semi-distributed hydrological catchment modelling using a multi-criteria objective function. *Hydrol. Process.*, 2998-3008.
- Houghton-Carr, H. A. (1999). Assessment criteria for simple conceptual daily rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal* 44, 237-263.
- Kirchner, J. W. (2009). Catchments as simple dynamical systems: Catchment. *Water Resour. Res.*, 45, 1-34.
- Mazzilli, N., Guinot, V., & Jourde, H. (2012). Sensitivity analysis of conceptual model calibration to initialisation bias. Application to karst spring discharge models. *Adv. Water Resour.* 42, , 1-16.
- McCuen, R., Knight, Z., & Cutter, A. (2006). Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. *J. Hydrol*, 597-602.
- McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Vaché, K., Dunn, S., Grant, G., Haggerty, R., . . . Weiler, M. (2007). Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. *Water Resour. Res.*, 43, 1-6.
- Moore, R. D. (1997). Storage-outflow modelling of streamflow recessions, with. *Journal of Hydrology* 198 , 260-270.
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., & Crespo, P. (2012). Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de escorrentía en zonas Andinas de páramo húmedo: mediante el uso de los isótopos estables deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$). *MASKANA*, vol. 3, 87-105.
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., Crespo, P., Celleri, R., & Feyen, J. (2014). Delineation of the streamflow contributing components in a wet Andean. *En Revisión*, 1-22.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *J. Hydrol*, 282-270.
- Novák, V., & Havrila, J. (2005). Transpiration of Plants: A Review of Calculation Methods. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 5.
- Padrón, R. (2013). Analisis de la estructura de a lluvia del paramo. *Universidad de Cuenca. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil*, 48-63.
- Ponce, V. M. (1989). Cathment Modeling. En V. M. Ponce, *Engineering Hydrology: Principles and Practices* (págs. 389-451). Prentice Hall.

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

- Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., Thyer, M., & Franks, S. W. (2010). Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. *Water Resources Research*, 46, 1-22.
- Roa-Garcia, M. C., & Weiler, M. (2010). Integrated response and transit time distributions of watersheds by combining hydrograph separation and long-term transit time modeling. *Hydrol. Earth Syst.*, 1537-1549.
- Roa-Garcia, M. C., Brown, S., Schreier, H., & Lavkulich, L. M. (May de 2011). The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resour. Res.*, 47(5). doi:10.1029/2010WR009582
- Rodriguez, E., Schwarzkopf, T., Gamez, L. E., Dugarte, W., & Dulhoste, R. (2011). Canopy structure and woody species distribution at the upper treeline in the Venezuelan Andes. *Ecotropicos*, 47-59.
- Sharad K, J., & Sudheer, K. P. (2008). Fitting of Hydrologic Models: A Close Look at the Nash–Sutcliffe Index. *J. Hydrol*, 981-986.
- Spear, R. C., & Hornberger, G. M. (1980). Eutrophication in peel inlet—II. Identification of critical uncertainties via generalized sensitivity analysis. *Water Resour. Res.*, 43-49.
- Staudinger, M., Stahl, K., Seibert, J., Clark, M. P., & Tallaksen, L. M. (2011). Comparison of hydrological model structures based on recession and low flow simulations. *Hydrol. Earth. Syst*, 3447-3459.
- Tetzlaff, D., Uhlenbrook, S., Eppert, S., & Soulsby, C. (2008). Does the incorporation of process conceptualization and tracer data improve the structure and performance of a simple rainfall-runoff model in a Scottish mesoscale catchment? *Hydrol. Process*, 2461-2474.
- Thiessen, A. H. (1911). Precipitation averages for large areas. *Mon. Wea. Rev.*, 39, 1082-1089.
- Vaze, J., Jordan, P., Beecham, R., Frost, A., & Sumerell, G. (2011). Guidelines for rainfall-runoff modelling: towards best practice model application. *eWater CRC*, 1-48.
- Vázquez, R. F. (2010). Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano. *MASKANA*, 79-90.
- Wagener, T., Lees, M. J., & Wheater, H. S. (2002). A toolkit for the development and application of parsimonious hydrological models. *Mathematical models of large watershed hydrology.*, 1, 87-136.

Autores:

Edgar Cristóbal Albuja Silva
Daniel Orlando Tenelanda Patiño



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Willems, P. (2001). Stochastic description of the rainfall input errors in lumped hydrological models. *Stochastic environmental research and risk assessment* , 132-152.

Willems, P. (2014). Parsimonious Rainfall-runoff Model Construction Supported by Time Series Processing and Validation of Hydrological Extremes – Part 1: Stepwise Model-Structure Identification and Calibration Approach. *J. Hydrol.* 510, 578-590.

Wittenber, H. (1994). Nonlinear analysis of flow recession curves. *FRIENDS: Flow Regimes from International and Experimental Network Data*, 61-67.

Xu, C.-y. (2002). *Textbook of Hydrologic Models*. Uppsala, Sweden: Uppsala University, Department of Earth Sciences, Hydrology.