

# UCUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

**“Desarrollo del Enfoque de Múltiples-Hipótesis para la Conceptualización de Procesos Hidrológicos en una cuenca de Páramo Andino del Norte del Ecuador usando Modelos de Lluvia-Escorrentía”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental

Autoras:

Magaly Estefanía García González

CI: 0302401278

Correo electrónico: [estefaniagarciag07@gmail.com](mailto:estefaniagarciag07@gmail.com)

Karla Tatiana Reinoso Luzuriaga

CI: 0302006697

Correo electrónico: [tatianareinoso96@gmail.com](mailto:tatianareinoso96@gmail.com)

Director:

Ing. Patricio Javier Crespo Sánchez, PhD

CI: 0102572773

Tutor:

Ing. Juan Patricio Pesántez Vallejo, MSc.

CI: 0104894530

**Cuenca, Ecuador**

14 - Julio - 2022

## **Resumen:**

La comprensión de la hidrología de los páramos es de vital importancia, pues son los encargados de regular los procesos hidrológicos y garantizar la provisión de agua para la población. Debido a ello, se han realizado varios estudios de modelación hidrológica en el Ecuador, sin embargo, los mismos se han centrado en los páramos del Sur. El presente proyecto se centra en el estudio de dos microcuencas de páramo del norte de Ecuador que forman parte de la Unidad Hidrográfica Jatunhuaycu (UHJ). Con el objetivo de conceptualizar sus procesos hidrológicos, se desarrolló un enfoque de modelación de lluvia-escorrentía basado en múltiples hipótesis. Se probaron modelos de dos y tres reservorios en paralelo para las microcuencas mencionadas, los mismos que ya han dado resultados satisfactorios en otras zonas de páramo. Es interesante decir que, aunque las microcuencas se encuentran en la misma unidad hidrográfica, una junto a la otra, se obtuvieron diferentes coeficientes de escorrentía (CE) para cada una (0.08 y 0.41). En general se observó que el modelo de tres reservorios en paralelo tuvo un mejor rendimiento, sin embargo, en la microcuenca con menor CE se tuvo que incluir una pérdida de agua por infiltración profunda para hacer posible simular el caudal a su salida. En conclusión, esta tesis señala la posibilidad de encontrar diferencias importantes entre microcuencas cercanas y la importancia de los flujos en todos los estratos de suelo para mantener la dinámica en los caudales de las mismas. Esto puede ayudar a los tomadores de decisiones a tener claro la importancia de los suelos de estas cuencas, así como tener en cuenta las diferencias que se pueden encontrar en las mismas. Por lo que es necesario un monitoreo constante para su adecuada gestión.

**Palabras claves:** Páramo. Estructuras conceptuales. Modelación hidrológica. NSGA II. Jatunhuaycu.

**Abstract:**

Understanding the hydrology of the páramos is of vital importance, since they are responsible for regulating hydrological processes and guaranteeing water supply for the population. Because of this, several hydrological modeling studies have been carried out in Ecuador, however, they have focused on southern páramo areas of the country. The present project focuses on the study of two páramo micro-catchments in northern Ecuador that are part of the Jatunhuaycu Hydrographic Unit (UHJ). In order to conceptualize their hydrological processes, a rainfall-runoff modeling approach based on multiple hypotheses was developed. Two- and three-reservoir models were tested in parallel for the above-mentioned micro-catchments, which have already yielded satisfactory results in other paramo areas. Interestingly, although the micro-catchments are located in the same hydrographic unit next to each other, different runoff coefficients (EC) were obtained for each one (0.08 and 0.41). In general, it was observed that the model with three reservoirs in parallel had a better performance; however, in the micro-catchments with the lowest EC, a water loss due to deep infiltration had to be included to make it possible to simulate the flow at its outlet. In conclusion, this thesis points out the possibility of finding important differences between nearby micro-catchments and the importance of flows in all soil layers to maintain the dynamics in their flows. This can help decision makers to be clear about the importance of the soils in these catchments, as well as to consider the differences that can be found in these catchments. So that constant monitoring is necessary for their proper management.

**Keywords:** Paramo. Conceptual structures. Hydrological modeling. NSGA II. Jatunhuaycu

## Índice del Trabajo

Resumen: .....	1
Abstract: .....	2
AGRADECIMIENTOS .....	10
DEDICATORIAS .....	11
1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1 Problemática y Justificación .....	13
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo General .....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
1.3 Marco Teórico.....	16
1.3.1 Ecosistema de Páramo .....	16
1.3.2 Ciclo Hidrológico del Páramo .....	16
1.3.2.1 Precipitación .....	16
1.3.2.2 Coeficiente de escorrentía .....	17
1.3.2.3 Evapotranspiración .....	17
1.3.3 Modelación Hidrológica .....	17
1.3.3.1 Modelo Conceptual .....	18
1.3.4 Algoritmo Genético .....	19
2. MATERIALES .....	20
2.1 Área de estudio.....	20
2.2 Monitoreo y obtención de los datos.....	22
3. METODOLOGÍA .....	24
3.1. Control de la calidad de datos.....	24
3.2 Cálculo del coeficiente de escorrentía .....	25
3.3 Cálculo de la evapotranspiración .....	25
3.4 Estructuras conceptuales.....	26
3.4.1 Dos reservorios en paralelo (2RP).....	27
3.4.2 Tres reservorios en paralelo (3RP).....	28
3.4.3 Dos reservorios en paralelo con pérdida por infiltración profunda (2RPP).....	29

3.4.4	Tres reservorios en paralelo con pérdida (3RPP) .....	31
3.5	Parámetros de calibración de los modelos .....	32
3.6	Ecuaciones de balance hídrico .....	33
3.7	Funciones de transferencia .....	34
3.7.1	Funciones potenciales .....	34
3.7.2	Funciones lineales .....	34
3.7.3	Funciones de percolación .....	35
3.8	Calibración .....	35
3.9	Criterios de selección de los modelos .....	39
3.9.1	Criterio de información de Akaike (AIC) .....	39
3.9.2	Criterio de información Bayesiano (BIC) .....	40
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	40
4.1	Características hidrológicas .....	40
4.1.1	Coeficiente de escorrentía .....	42
4.1.2	Evapotranspiración .....	43
4.2	Calibración .....	45
4.3	Rendimiento del modelo .....	46
4.4	Parámetros Calibrados .....	48
4.5	Análisis de Criterio de Información de Akaike y Criterio de Información Bayesiano .....	49
4.6	Selección del mejor modelo .....	50
5.	CONCLUSIONES .....	52
6.	RECOMENDACIONES .....	53
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	54

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Equipos de las estaciones meteorológicas .....	23
<b>Tabla 2:</b> Parámetros calibrados de los diferentes modelos aplicados .....	32
<b>Tabla 3:</b> Valores referenciales de Nash-Sutcliffe empleados en el rendimiento del modelo .....	37
<b>Tabla 4:</b> Parámetros del Algoritmo Genético NSGA II .....	38
<b>Tabla 5:</b> Coeficientes de escorrentía en los años de estudio .....	43
<b>Tabla 6:</b> Criterios de eficiencia de los modelos de cada una de las microcuencas .....	47
<b>Tabla 7:</b> Valores óptimos de los parámetros calibrados para la modelación de las microcuencas de estudio.....	48
<b>Tabla 8:</b> Criterio de Información de Akaike y Criterio de Información Bayesiano.....	50

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Ubicación del área de estudio. ....	22
<b>Figura 2:</b> Esquema de trabajo .....	24
<b>Figura 3:</b> Modelo de dos reservorios en paralelo.....	28
<b>Figura 4:</b> Modelo de tres reservorios en paralelo. ....	29
<b>Figura 5:</b> Modelo de dos reservorios en paralelo con pérdida. ....	30
<b>Figura 6:</b> Modelo de tres reservorios en paralelo con pérdida. ....	31
<b>Figura 7:</b> Precipitación para las dos microcuencas. ....	42
<b>Figura 8:</b> Evapotranspiración de referencia en los años de estudio.....	44
<b>Figura 9:</b> Diagrama de Pareto. ....	46
<b>Figura 10:</b> Caudal Observado y Caudal simulado de la microcuenca (M2) en escala logarítmica. ....	46
<b>Figura 11:</b> Caudal Observado y Caudal simulado de la microcuenca (M3) en escala logarítmica. ....	48

## Índice de Ecuaciones

<b>Ecuación 1:</b> Coeficiente de escorrentía.....	25
<b>Ecuación 2:</b> Penman-Monteith .....	26
<b>Ecuación 3:</b> Función Potencial.....	34
<b>Ecuación 4:</b> Función Lineal.....	34
<b>Ecuación 5:</b> Función de recarga .....	35
<b>Ecuación 6:</b> Coeficiente de Eficiencia Nash Sutcliffe .....	36
<b>Ecuación 7:</b> Coeficiente de Eficiencia de Kling-Gupta.....	36
<b>Ecuación 8:</b> Criterio de información de Akaike.....	39
<b>Ecuación 9:</b> Criterio de Información Bayesiano (BIC) .....	40

## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Karla Tatiana Reinoso Luzuriaga en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Desarrollo del Enfoque de Múltiples-Hipótesis para la Conceptualización de Procesos Hidrológicos en una cuenca de Páramo Andino del Norte del Ecuador usando Modelos de Lluvia-Escorrentia", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de julio de 2022



Karla Tatiana Reinoso Luzuriaga

C.I: 0302006697

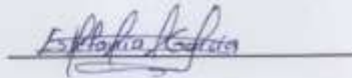
## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Magaly Estefanía García González en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Desarrollo del Enfoque de Múltiples-Hipótesis para la Conceptualización de Procesos Hidrológicos en una cuenca de Páramo Andino del Norte del Ecuador usando Modelos de Lluvia-Escorrentía", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 14 de julio de 2022



Magaly Estefanía García González

C.I: 0302401278



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Karla Tatiana Reinoso Luzuriaga, autora del trabajo de titulación "Desarrollo del Enfoque de Múltiples-Hipótesis para la Conceptualización de Procesos Hidrológicos en una cuenca de Páramo Andino del Norte del Ecuador usando Modelos de Lluvia-Escorrentía", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 14 de julio de 2022



Karla Tatiana Reinoso Luzuriaga


C.I: 0302006697

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Magaly Estefanía García González, autora del trabajo de titulación "Desarrollo del Enfoque de Múltiples-Hipótesis para la Conceptualización de Procesos Hidrológicos en una cuenca de Páramo Andino del Norte del Ecuador usando Modelos de Lluvia-Escorrentia", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 14 de julio de 2022



Magaly Estefanía García González

C.I: 0302401278

## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia queremos agradecer a Dios por habernos permitido vivir nuevas y maravillosas experiencias en nuestro campo universitario. Gracias a nuestra Universidad y profesores por hacer parte de nuestro proceso de formación profesional y personal.

Agradecemos a la Estación Científica Agua y Páramo – FONAG – EMAPS por ser los auspiciantes y habernos apoyado en nuestro trabajo de titulación. Así como también al Ing. Patricio Crespo y al Ing. Juan Pesántez, quienes han sido una guía y nos han brindado ayuda en cada momento del desarrollo del presente trabajo.

Por último, queremos agradecer a cada uno de nuestros familiares y amigos que han estado pendientes de nosotros y han sido nuestra fuerza para poder culminar esta etapa de la carrera.

Gracias a todos.

## DEDICATORIAS

La presente tesis está dedicada principalmente a Dios y a mis padres Francisco y Sara, quienes han sido mis pilares y mis fuerzas a lo largo de mi carrera y de mi vida. Papá y mamá gracias por levantarme los ánimos y no dejarme rendir en los momentos en los que sentía que caía, por siempre acompañarme en las madrugadas a la parada del bus, por tener mi alimento listo cada que llegaba a casa, y por muchas cosas más.

De igual manera, dedico a mis hermanos Emanuel y Cecilia por motivarme y ser mi ejemplo a seguir. A mis sobrinos Francis y Daaron por distraerme y sacarme sonrisas cuando mi mente se me bloqueaba. A mis abuelitos Manuel, Adela y Amada, a mis tíos (en memoria de mi tío Luis), tías, primos y primas por siempre brindarme palabras de aliento y decirme lo orgullosos que están de mí. A Fernando, quién durante estos años de carrera ha sido mi compañero de aventuras, mi confidente y mi apoyo.

También se la dedico a mis amigos y amigas, quienes se han convertido en mi familia y han sabido aconsejarme, animarme y apoyarme en todos los momentos de mi vida. A mi gran compañera y amiga Tatiana quien me acompañó a lo largo de la realización de este trabajo. Dedico también esta tesis a mis eternos grupos de amigos del colegio (Nosotros somos locos), de la universidad (Escuadrón del Horror, Los Mijos, Las lentis, Las monitas, Profes), del barrio (Belies), de la iglesia (Jufra), de las pasantías (INGEA, Luchitos) y de la vida en general.

Por último, quiero dedicar este trabajo a mis compañeros de las diferentes aulas, ciclos, materias, quienes me han sabido dejar valiosos consejos y enseñanzas, que me han permitido avanzar a lo largo de mi camino.

Magaly Estefanía

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios por guiarme, darme fortaleza y concederme la sabiduría para culminar este objetivo, al igual a mis ángeles en el cielo quienes guían mis pasos.

De manera muy especial dedico este trabajo a mi madre Ana, quien siempre confió en mí y a pesar de cada obstáculo estuvo para levantarme y guiarme en este largo camino. Mil gracias por cada sacrificio que hiciste por mí, porque gracias a ello hoy culmino una etapa importante en mi vida, viviré eternamente agradecida contigo por enseñarme que el esfuerzo y la perseverancia son herramientas que te permiten cumplir tus sueños.

A mis hermanos, cuñada y sobrinas Byron, Walter, Irina, Emily y Jhomara, quienes supieron brindarme palabras de aliento para continuar y nunca me dejaron sola.

A Ángel quien estuvo en los momentos más difíciles para ser la fortaleza que necesitaba, impulsándome siempre a seguir y recordándome que cada esfuerzo tendrá su recompensa, gracias por ser mi apoyo y compañía.

A mis amigos y amigas de la universidad que permitieron que esta etapa universitaria fuera una experiencia inigualable. En especial a mi amiga y compañera de tesis Estefanía, gracias por cada una de las experiencias vividas, por cada uno de los consejos, el cariño y sobre todo por el apoyo incondicional.

Karla Tatiana

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Problemática y Justificación

Los páramos son ecosistemas naturales que se encuentran distribuidos a lo largo de los Andes (Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela hasta Costa Rica y Panamá), en zonas frías y de alta montaña (Hofstede *et al.*, 2014; Cárdenas & Tobón, 2017). Estos ecosistemas son los encargados de almacenar y a su vez de regular el agua que proviene de la precipitación y descongelamiento de nieve principalmente (Mena, Josse & Medina, 2000), garantizando así la provisión de agua para las comunidades o población de las zonas cercanas a estos ecosistemas (Díaz, Navarrete & Suárez, 2005; Soria, 2016).

Los procesos que forman parte de la hidrología de los páramos, se inician básicamente por la entrada de agua al ecosistema, proveniente principalmente de la precipitación, que es de alta frecuencia, baja intensidad y larga duración (Llambí *et al.*, 2012; Chuncho & Chuncho, 2019). Se sigue con la evaporación de una parte de esta lluvia y del agua almacenada en los suelos, la transferencia de su restante a través de los suelos y la consecuente generación de escorrentía (Buytaert *et al.*, 2006a; Llambí *et al.*, 2012). El entendimiento de la suma de estos procesos puede proporcionar bases sólidas para un adecuado manejo del recurso hídrico.

Desde hace varias décadas estos ecosistemas están siendo degradados y amenazados por diferentes actividades antrópicas como la ganadería, agricultura, incendios, deforestación, etc (Vargas, 2013; Bacca & Burbano, 2018). Sin embargo, la afección más grave posiblemente esté dada por el cambio climático que afectará a su hidrología, debido a la alteración en los patrones de precipitación, causando probablemente cambios bruscos en la dinámica de escorrentía y por ende en la disponibilidad de agua en las cuencas (Zúñiga, Muñoz & Arumí, 2012; Mora *et al.*, 2014). De igual manera, pueden darse alteraciones en la temperatura, humedad y presión atmosférica, lo cual podría

provocar cambios en la evapotranspiración de estos ecosistemas (Mora *et al.*, 2014).

Debido a la importancia de comprender estos ecosistemas se han realizado varios estudios en el Ecuador, especialmente de los páramos del sur, los cuales pueden llegar a presentar diferencias marcadas con aquellos del norte (Aguirre & Torres, 2014). Los páramos del norte que inician desde los 3 500 y 4 000 m s.n.m, presentan un rango de precipitación que va desde los 500 a 3000 mm anualmente, por lo que son considerados más húmedos, con coeficientes de escorrentía 0.08 y 0.37 (Chicaiza *et al.*, 2002; Ochoa *et al.*, 2016; Luteyn, s.f). Por el contrario, los páramos del sur que inician desde los 2 800 m s.n.m son considerados menos húmedos, debido a su precipitación que tiene un rango que va desde 500 a 1500 mm\*año<sup>-1</sup>, con coeficientes de escorrentía entre 0.28 y 0.74 (Chicaiza *et al.*, 2002; Crespo *et al.*, 2012; Hofstede *et al.*, 2014; Cabrera, Timbe & Crespo, 2019).

Aunque se han realizado muchos estudios sobre la generación de escorrentía en los páramos, los del norte presentan información limitada y los datos que se tiene sobre estos ecosistemas, no han sido los suficientes para conocer con certeza los procesos hidrológicos que en ellos se desarrollan (Hofstede *et al.*, 2014; Mosquera *et al.*, 2015; Valencia & Tobón, 2017). Esto puede ser debido a la deficiente calidad de información climática, puesto que se encuentran sobre volcanes activos, en relieves que complican el acceso y la instalación de estaciones de monitoreo (Hofstede *et al.*, 2014; Valencia & Tobón, 2017). También porque la mayoría de estudios que se han realizado son de carácter socioeconómico (Hofstede *et al.*, 2014), y porque existe poca interdisciplinariedad entre los campos de ciencias ambientales y por la existencia de pocos procedimientos de tratamiento de información (Buytaert *et al.*, 2006a; Torres & Proaño, 2018; Mosquera, 2019).

A nivel de cuencas, los modelos hidrológicos se han convertido en herramientas indispensables usadas para innumerables propósitos, como la investigación, planificación, gestión y manejo de recursos, ya que permiten entender el estado

de las mismas (Esquivel *et al.*, 2016; Ochoa *et al.*, 2019). Entre las formas de estudiar estos modelos se destaca el enfoque de múltiples hipótesis (MHMT) (Clark *et al.*, 2011). Este enfoque puede llegar a ser más holístico y sistemático en comparación con los enfoques tradicionales, en donde la consideración de un único (o limitado) factor de cambio puede conducir a sesgos confirmatorios (Harrigan *et al.*, 2014). Además de que este enfoque logra estudios más robustos y operacionalmente confiables (Clark *et al.*, 2011; Harrigan *et al.*, 2014).

Por lo mencionado, en el presente trabajo se aplica en la modelación el enfoque de múltiples hipótesis para esclarecer o verificar el funcionamiento hidrológico del páramo de dos microcuencas de la Unidad Hidrológica Jatunhuaycu (UHJ). Esto anterior debido a la importancia que tienen como fuente de agua para la población aguas abajo de los mismos. Este trabajo logrará contribuir a una gestión adecuada de los recursos hídricos de la zona y servirá como ayuda complementaria para futuros estudios del funcionamiento hidrológico del páramo.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo General

- Desarrollar el enfoque de múltiples hipótesis con la finalidad de elegir aquellos modelos de lluvia-escorrentía que representen adecuadamente los procesos hidrológicos en microcuencas de la Unidad Hidrográfica Jatunhuaycu.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Proponer diferentes modelos de lluvia-escorrentía basados en la literatura actual para microcuencas de la Unidad Hidrográfica Jatunhuaycu.
- Identificar aquellas funciones de transferencia que ayuden a calibrar y validar los modelos adecuadamente.
- Identificar las mejores hipótesis conceptuales para microcuencas de la Unidad Hidrográfica Jatunhuaycu.



## 1.3 Marco Teórico

### 1.3.1 Ecosistema de Páramo

El páramo es un ecosistema de formaciones accidentadas, en su mayoría de origen glaciar, que presentan una variedad de lagos, humedales y pantanos (Buytaert *et al.*, 2006b; Buytaert, Iñiguez & De Bièvre, 2007). Su temperatura es baja, con alta nubosidad, niebla, lloviznas, baja presión atmosférica y vientos fuertes (Cárdenas & Tobón, 2017). Este ecosistema se encuentra habitado en su gran mayoría por musgos y pajonales que ayudan a la regulación y captación de agua, y en conjunto con los arbustos mantienen, protegen y recargan acuíferos (Garavito, 2015). La mayor parte de los suelos son los denominados Andosoles, ricos en materia orgánica, por lo que absorben y retienen agua con facilidad (Hofstede, 1997; Cárdenas & Tobón, 2017).

### 1.3.2 Ciclo Hidrológico del Páramo

La entrada de agua al páramo está dada por la precipitación, niebla y rocío, misma que es interceptada por la vegetación (Hofstede, 1997; Hofstede *et al.*, 2014). Parte del agua cae al suelo, humedeciéndolo e infiltrándose a capas inferiores (Ocampo & Vélez, 2013; Valencia & Tobón, 2017). Cuando la intensidad de la caída de agua es alta, parte de esta agua no se infiltra y ocasionará la formación de charcos en las diferentes concavidades de los páramos (Llambí *et al.*, 2012; Oseguera, 2018). En ocasiones al llenarse estos charcos, el agua puede comenzar a rebosar y caer por las pendientes hacia los diferentes cuerpos de agua, en un proceso de escorrentía superficial (Díaz *et al.*, 2005; Buytaert *et al.*, 2007). El agua retenida en el suelo puede ser absorbida por la vegetación y posteriormente ser transpirada para retornar a la atmósfera como vapor de agua (Llambí *et al.*, 2012; Valencia & Tobón, 2017).

#### 1.3.2.1 Precipitación

La cantidad de lluvia anual en la mayoría de los páramos es de aproximadamente 1000 mm, pudiendo llegar en ocasiones a 500 mm o hasta más de 3000 mm, teniendo principalmente una frecuencia alta y baja intensidad (Hofstede, 1997; Buytaert *et al.*, 2007).

## 1.3.2.2 Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía es la relación entre el caudal y la precipitación (Q/P), su valor en las cuencas naturales está entre 0.37 - 0.72 (páramo), 0.60 (jalca) y 0.30 - 0.70 (puna) (Ochoa *et al.*, 2016). Sin embargo, en los páramos del Antisana se han observado valores entre 0.08 y 0.37 (Ochoa *et al.*, 2016; Torres & Proaño, 2018). Estos valores van a variar dependiendo de la ubicación, geología, de la intensidad, tipo y cantidad de precipitación, humedad, tipo y cobertura de suelo, etc. (Martínez de Azagra, 2006).

## 1.3.2.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración es un componente del ciclo hidrológico que combina el proceso de evaporación o pérdida de agua entre la superficie del suelo y la atmósfera, donde se tiene agua que es la interceptada y evaporada desde la vegetación y desde el suelo (Maffei, 2012; Córdova, Carrillo & Céleri, 2013; Contreras, 2015). Es decir, es la evaporación que se tiene hacia la atmósfera en donde se suma todas las pérdidas de agua que se tengan desde el suelo o vegetación y que retornan a la atmósfera (Alvarado, 2009; Jumbo, 2017). El valor de la evapotranspiración anual en los Páramos está aproximadamente entre 646 y 723  $\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$ , y los valores diarios están comprendidos entre 1 y 1.5  $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$  (Buytaert *et al.*, 2007; Córdova *et al.*, 2015; Ochoa *et al.*, 2016; Soria, 2016).

## 1.3.3 Modelación Hidrológica

Un modelo hidrológico puede ser definido como una simplificación de un sistema natural (Mendoza *et al.*, 2002). Los modelos son usados para predecir el comportamiento del sistema y comprender sus procesos hidrológicos, esto a partir de una descripción primero conceptual y después matemática de sus aspectos más representativos y una predicción de su interrelación al momento de dar una respuesta a un factor externo como la precipitación (Devia *et al.*, 2015, Clark *et al.*, 2011). Por otro lado, los modelos de lluvia-escorrentía están basados en ecuaciones que reflejan los diferentes procesos de las cuencas estudiadas, estas ecuaciones incluyen parámetros calibrables de acuerdo a las características del sistema estudiado (Jung, Choi, & Kim, 2017).

En la actualidad existe una gran variedad de modelos que son de suma importancia para la gestión de recursos hídricos (Devia *et al.*, 2015). Estos se pueden clasificar de acuerdo a la presencia de variables aleatorias, a su distribución en el espacio y por la conceptualización de procesos (Dwarakish & Ganasri, 2015). En base a la variabilidad espacial se hace referencia a modelos agrupados, distribuidos y semi-distribuidos. Los modelos agrupados representan a la cuenca hidrográfica como una sola unidad descartando la variabilidad espacial, mientras que los modelos distribuidos son aquellos que toman en cuenta las variaciones espaciales y sus parámetros, realizando una caracterización explícita de los procesos y patrones a partir de la división de la cuenca en pequeñas unidades (Moradkhani & Sooroshian, 2009). Con respecto al modelo semi-distribuido, este divide a toda la cuenca en subcuencas y en unidades de respuesta hidrológica con base en otras variables además de las de suelo (Dwarakish & Ganasri, 2015).

Por otro lado, los modelos se pueden llamar estocásticos y deterministas. Los estocásticos hacen predicciones estadísticas, es decir generan varios datos de salida de una misma entrada, mientras que los deterministas generan una sola salida de una sola entrada de datos (Dwarakish & Ganasri, 2015). Por último, de acuerdo a la conceptualización de procesos, se tiene a los modelos físicos, conceptuales y empíricos. Los físicos también llamados mecanicistas usan variables medibles tanto en tiempo como en espacio (Devia *et al.*, 2015). Los conceptuales simplifican los procesos físicos de generación de escorrentía en una cuenca y los empíricos establecen una relación entre lluvia y escorrentía, considerando muy poco los procesos internos del sistema (Dwarakish & Ganasri, 2015).

### 1.3.3.1 Modelo Conceptual

El modelo conceptual se encuentra dentro de los modelos más populares para comprender la relación entre precipitación y escorrentía debido a que el mismo no necesita de demasiada información (Toledo *et al.*, 2015, Paik *et al.*, 2005). Los modelos conceptuales de balance hídrico pretenden simular los procesos

hidrológicos conceptualizando a la cuenca como un conjunto de reservorios que están interconectados, a través de los cuales el agua entra como precipitación y sale como caudal (Ocampo & Vélez, 2013). Son considerados fáciles de usar, sin embargo, su grado de complejidad está basado en la estructura, las funciones usadas y el número de procesos modelados, ya que estas pueden ir desde estructuras simples (4 parámetros) hasta estructuras complejas (20 o más parámetros) (Chiew, 2010).

El Enfoque de Hipótesis Múltiples de Trabajo (MHMT) ofrece un enfoque basado en el desarrollo y prueba de hipótesis de cambio (Elliott & Brook, 2007). El MHMT se basa en el desarrollo de algunas hipótesis antes del análisis, las cuales pueden explicar el fenómeno observado (Chamberling, 1965). Sin embargo, el alcance de este objetivo puede basarse en la posibilidad de que múltiples hipótesis puedan ser válidas simultáneamente, lo que aumenta la posibilidad de descubrir posibles interacciones y sinergias entre hipótesis (Harrigan *et al.*, 2014).

#### 1.3.4 Algoritmo Genético

El algoritmo genético está fundamentado en los principios de la evolución de las especies tanto de la selección natural como de la “supervivencia del más fuerte” (Murillo, Figueroa & Guerrero, 2016; Avelar *et al.*, 2019). Se trabaja sobre un conjunto de soluciones potenciales denominado población, misma que está conformada por individuos cuyos “cromosomas” son la codificación de cadenas de características o genes que representan a las variables involucradas (Hernández *et al.*, 2012).

Cada una de las soluciones van evolucionando o mejorando a través de las generaciones por medio de procesos de cruzamiento y mutación (Gestal *et al.*, 2010; Avelar *et al.*, 2019). Cada solución se diferencia de acuerdo a su aptitud<sup>1</sup>, por lo que los individuos de una generación con mayor aptitud o mayor adaptación al problema serán seleccionados para reproducirse, convirtiéndose en

---

<sup>1</sup> Este valor cuantifica la calidad de la solución y permite comparar soluciones de la misma generación y/o con soluciones de generaciones anteriores.

descendientes de la próxima generación (Hernández *et al.*, 2012; Murillo *et al.*, 2016)

El Algoritmo Genético Multiobjetivo basado en el *Algoritmo Genético de clasificación no dominado II* (NSGA-II), permite obtener un conjunto de soluciones óptimas a problemas con múltiples objetivos (pueden ser estadísticos que evalúan la capacidad del modelo de reproducir la realidad) (Saucedo, 2014; De Greiff & Rivera, 2018). De esta forma no se descartan soluciones que pudieron haber sido rechazadas en el algoritmo mono-objetivo, favoreciendo de esa manera la diversidad en la población (Saucedo, 2014; Alonso, Jiménez & Martínez, 2017; De Greiff & Rivera, 2018).

## 2. MATERIALES

### 2.1 Área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en la Unidad Hidrográfica Jatunhuaycu (UHJ), ubicada al norte del Ecuador, en el cantón Archidona perteneciente a la provincia de Napo (Soria, 2016). La UHJ se encuentra dentro del Área de Conservación Hídrica Antisana (ACHA), en la zona de amortiguamiento de la Reserva Ecológica Antisana (*Figura 1*), a una altitud que va entre 3960 a 4600 m s.n.m, con una superficie aproximada de 15.86 km<sup>2</sup> (Aguirre, Torres & Velasco, 2013; Jumbo, 2017). La UHJ se encuentra dividida en microcuencas, con formas que van desde la ovalada hasta la elongada (IMHEA, 2013).

El clima de la zona es frío de alta montaña, caracterizado por ser de tipo húmedo y muy húmedo, debido a que su humedad es relativamente alta y se encuentra la mayor parte del tiempo en un 90% (Aguirre, Torres & Velasco, 2013; Jumbo, 2017). Su temperatura oscila alrededor de los 8°C, con un máximo de 20°C y un mínimo de 0°C (Aguirre, Torres & Velasco, 2013). El total de la lluvia anual es irregular y fluctúa entre los 641 mm a 849 mm, dicha precipitación es de larga duración con una intensidad débil (Ochoa *et al.*, 2016; Yáñez *et al.*, 2019). En específico, los valores de precipitación registrados por el Fondo para la Protección

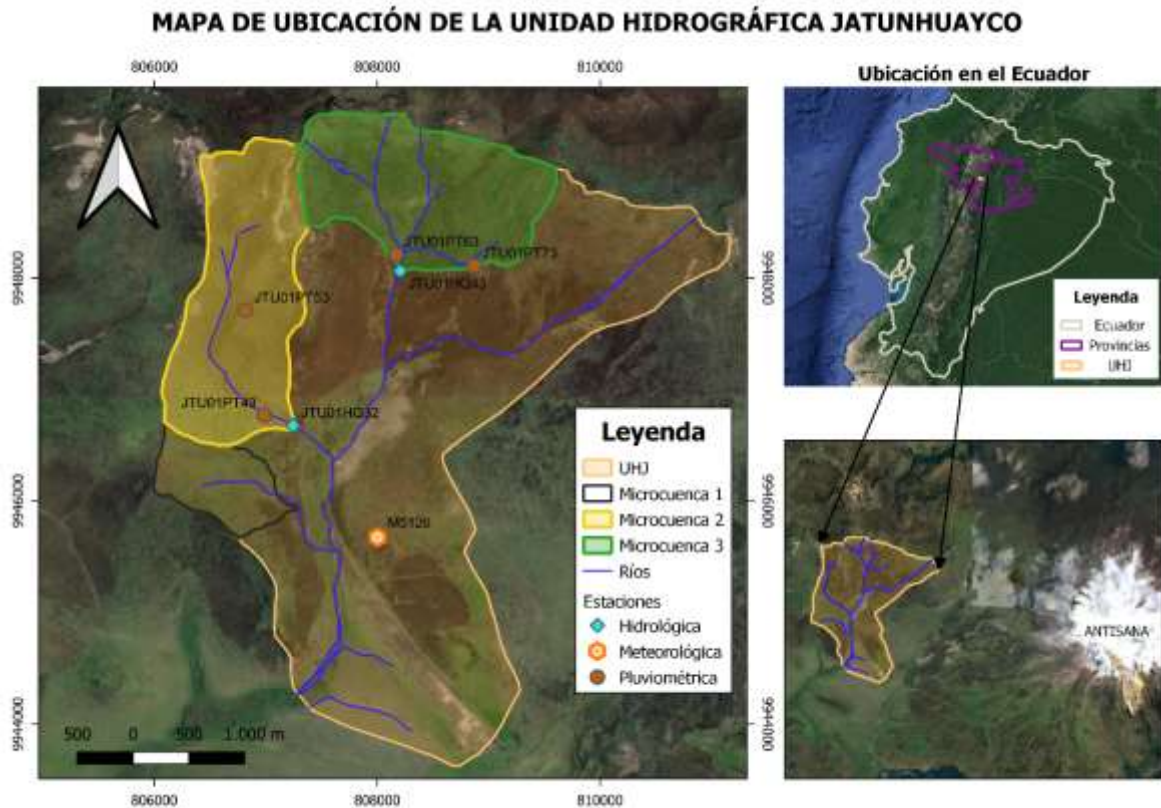
del Agua FONAG son de 994.81, 967.84 y 953.85 mm\*año<sup>-1</sup>, para los años 2018, 2019 y 2020, respectivamente.

En la zona existen tres tipos de formaciones vegetales, páramo herbáceo, páramo de almohadillas y páramo de pajonal distribuidos a lo largo de la UHJ (Torres, 2014; Soria, 2016). El relieve de la cuenca es irregular, pues se encuentra formado por colinas, montañas y valles, con cimas alargadas y redondeadas, cuyas pendientes van desde planas (0°) hasta abruptas (mayores a 45°) (Torres, 2014; Játiva 2018). Presenta también una variedad de sustratos o paredes rocosas del periodo Paleozoico y formaciones superficiales del periodo Cuaternario (Aguirre & Torres, 2014; Jumbo, 2017).

Los suelos de la cuenca son de origen volcánico, en su mayoría Andosoles con presencia de limos negros en un porcentaje de 48.55%, arena en un 44.27% y arcilla en un 7.18% (Jumbo, 2017). Al ser suelos volcánicos, presentan andesitas y morrenas que son producto de las diferentes glaciaciones ocurridas por la presencia del Antisana (Játiva, 2018). Estos suelos jóvenes son profundos, con un pH entre 3.9 y 5.4, son ricos en materia orgánica y sus horizontes no son tan diferenciados (Aguirre, Torres & Velasco, 2013).

Para el análisis y la aplicación de los modelos conceptuales se seleccionaron dos de las microcuencas que conforman la UHJ, microcuenca dos (M2) y microcuenca tres (M3). Estas microcuencas se forman en la parte occidental de la cuenca del río principal, la M2 que tiene un área aproximada de 2.51 km<sup>2</sup> y la M3 de 2.34 km<sup>2</sup> (Jumbo, 2017).





**Figura 1:** Ubicación del área de estudio.

La UHI se ubica dentro del Área de Conservación Hídrica Antisana en zona de amortiguamiento de la Reserva Ecológica Antisana.

Fuente: FONAG  
Elaborado por: Autoras, 2022

## 2.2 Monitoreo y obtención de los datos

La Unidad Hidrográfica Jatunhuaycu está siendo monitoreada por el Fondo para la Protección del Agua-FONAG y por la Empresa Pública Metropolitana de Agua y Saneamiento de Quito-EPMAPS. Las mencionadas instituciones proporcionaron las bases de datos de sus diferentes estaciones para la realización del presente estudio.

Se utilizaron datos de dos estaciones meteorológicas denominadas Jatunhuaycu (M5126) y La Mica (C10), de cuatro pluviómetros (JTU01PT42, JTU01PT53, JTU01PT63 y JTU01PT73) y de dos hidrómetros (JTU01HQ32 y JTU01HQ43). El período de la información recolectada está comprendido desde el 1/01/2018 al 31/12/2020.

Los datos de caudal son medidos en los puntos de cierre de las microcuencas a través de equipos de marca INW, Instrumentación Northwest, Modelo PT2X. En lo que respecta a la precipitación, esta es medida por pluviómetros de marca Texas modelo TE525MM, acoplados a registradores de datos HOBO o Campbell - CR200X (IMHEA, 2013; FONAG, 2022).

Los datos de las variables de las estaciones meteorológicas M5126 y C10, provienen de los diferentes equipos e instrumentos descritos en la *Tabla 1*.

*Tabla 1: Equipos de las estaciones meteorológicas*

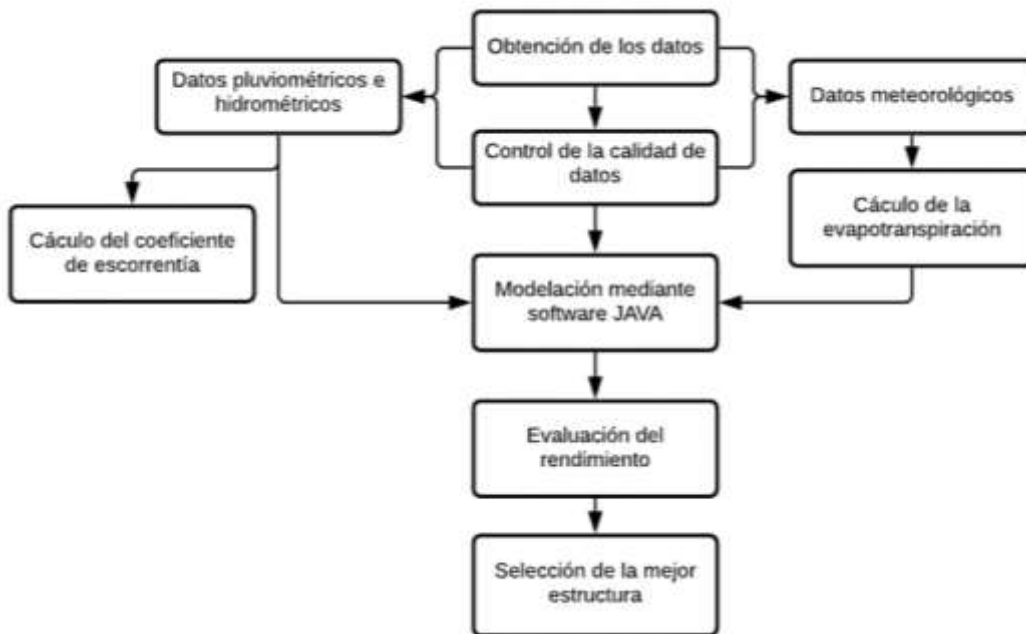
<b>Estación meteorológica M 5126 (Jatunhuaycu)</b>		
<b>Parte/Sensor</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
Sensor de Humedad	TEKBOX	TBSHT06
Sensor de presión atmosférica	Vaisala	PTB110
Pluviómetro	Texas Electronics	TR-525M
Sensor de radiación	Kipp & Zonen	CMA6
Viento	Vaisala	WMT702
<b>Estación meteorológica C 10 (La Mica)</b>		
<b>Parte/Sensor</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
Humedad y temperatura	Vaisala	HMP155A
Pluviómetro	Young	52203
Sensor de viento	Young	86000
Presión barométrica	Vaisala	Baro-1
Radiación solar	Kipp Zonen	SP Lite 2

Fuente: FONAG & EMAPS, 2022



### 3. METODOLOGÍA

La realización del presente trabajo se basó en cinco pasos principales (ver Figura 2). Se inició, con la obtención de los datos, para luego seguir con el control de la calidad de los mismos. Posteriormente se realizó la modelación de las diferentes estructuras propuestas mediante el software JAVA, para luego evaluar el rendimiento de los resultados obtenidos de la modelación. Y finalmente se procedió a seleccionar la mejor estructura para cada una de las microcuencas en estudio.



**Figura 2:** Esquema de trabajo  
Fuente: Autoras, 2022

#### 3.1. Control de la calidad de datos

Para obtener bases de datos completas de cada una de las variables requeridas para nuestro estudio, se aplicaron varios procesos de análisis. Las variables utilizadas de las estaciones meteorológicas M5126 y C10 fueron precipitación, presión atmosférica, humedad, radiación solar y velocidad del viento. Se utilizaron también los datos de dos estaciones pluviométricas y una estación hidrométrica tanto para la microcuenca M2 (JTU01PT42, JTU01PT53, JTU01HQ32) como para la microcuenca M3 (JTU01PT63 y JTU01PT73, JTU01HQ43).

Las bases de datos de las variables proporcionadas se encontraban en una frecuencia horaria y fueron convertidas a una frecuencia diaria. Posteriormente a cada una de las bases de datos se le sometieron a un análisis exploratorio con el fin de detectar datos faltantes y para verificar si los mismos guardan coherencia entre sí. Los vacíos encontrados en los datos fueron rellenados mediante correlación con la estación más cercana (coeficiente de correlación > 0.6), considerado adecuado para esta aplicación (*Figura 1*) (Ramos, Bautista & Valdez, 2010; Herrera, Campos & Carrillo, 2017).

### 3.2 Cálculo del coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía se calculó a partir de la precipitación y caudales provenientes de las series de datos rellenados de los pluviómetros e hidrómetros cercanos a cada una de las microcuencas en estudio, tal como se menciona en el apartado 3.1 (*ver Figura 1*). Se calculó un coeficiente de escorrentía para cada una de las microcuencas seleccionadas. La fórmula aplicada fue la utilizada en los trabajos de Campos (2008) y Sánchez (2017).

*Ecuación 1: Coeficiente de escorrentía*

$$C = \frac{Q * 360}{I * A}$$

*C*: Coeficiente de escorrentía (adimensional).

*Q*: Volumen o caudal (m<sup>3</sup>\*s<sup>-1</sup>).

*I*: Intensidad de la lluvia (mm\*h<sup>-1</sup>).

*A*: Área de la cuenca o vertiente (ha).

### 3.3 Cálculo de la evapotranspiración

El cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), se realizó a partir de los datos diarios de las variables de la estación meteorológica M5126 previamente rellenada. El valor de la evapotranspiración de la microcuenca M2 y M3 fue el mismo, puesto que se tuvo una estación meteorológica dentro de la UHJ cercana a ambas cuencas (aproximadamente a 1.21 Km y 2.42 Km a la salida de M2 y M3 respectivamente).

Para obtener la evapotranspiración de la superficie hipotética de referencia se aplicó la fórmula de Penman-Monteith (FAO, 2006).

**Ecuación 2:** Penman-Monteith

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

$ET_o$ : Evapotranspiración de referencia (mm\*dia<sup>-1</sup>).

$R_n$ : Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ\*m<sup>-2</sup>\*dia<sup>-1</sup>).

$G$ : Flujo del calor de suelo (MJ\*m<sup>-2</sup>\*dia<sup>-1</sup>).

$T$ : Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).

$u_2$ : Velocidad del viento a 2 m de altura (m\*s<sup>-1</sup>).

$e_s$ : Presión de vapor de saturación (kPa).

$e_a$ : Presión real de vapor (kPa).

$e_s - e_a$ : Déficit de presión de vapor (kPa).

$\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa\*°C<sup>-1</sup>).

$\gamma$ : Constante psicrométrica (kPa\*°C<sup>-1</sup>).

### 3.4 Estructuras conceptuales

Los modelos conceptuales de lluvia-escorrentía están basados en imitar o simular la hidrología del perfil del suelo mediante la organización de conceptos a manera de hipótesis (Crespo *et al.*, 2012; Jumbo, 2017). Pues el suelo es el componente físico que controla en gran medida el proceso que convierte la lluvia en escorrentía (Crespo, 2012).

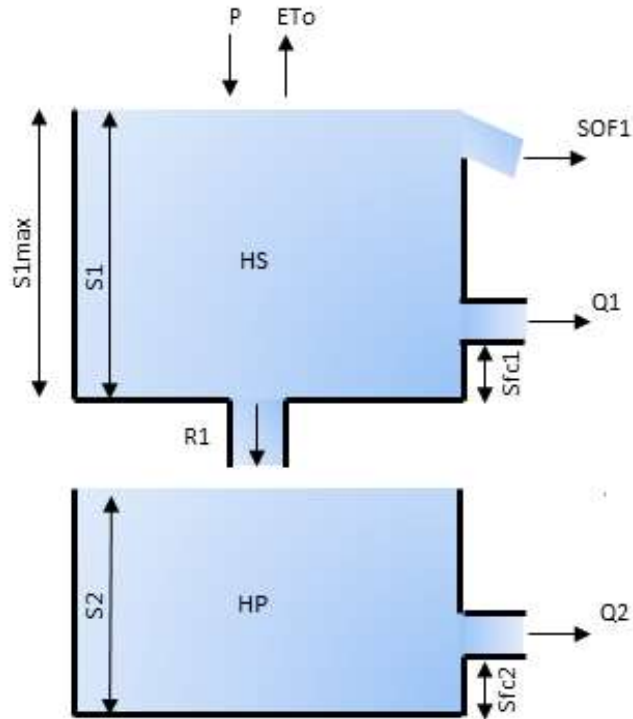
Se probaron modelos de dos y tres reservorios en paralelo para la microcuenca M3 y para la microcuenca M2. A la microcuenca M2 también se le probó con modelos de dos y tres reservorios en paralelo que incluyeron una salida o pérdida de agua en los últimos reservorios. A continuación, se explica detalladamente cada modelo.

## 3.4.1 Dos reservorios en paralelo (2RP)

Este modelo consta de dos reservorios, el primero que representa al horizonte superficial (HS), en el cual existe un ingreso de agua dado por la precipitación (P) principalmente. Existe también una pérdida de agua que es la interceptada y evaporada desde la vegetación y desde el suelo, proceso conocido como evapotranspiración (ET) (Weber, Dasso & Joquera, 2010; Maffei, 2012). Y como salidas de agua se tiene, el flujo superficial por exceso de saturación (SOF) que es el resultado de la precipitación que no fue interceptada, almacenada o infiltrada en el suelo. Además, un caudal  $Q_1$  proveniente del agua que excede la capacidad de campo del horizonte superficial (Sfc), mediante una ecuación de transferencia logarítmica (Weber *et al.*, 2010).

Al final del primer reservorio se tiene una recarga  $R_1$  que va directo al segundo reservorio que simula el horizonte profundo (HP). En este tenemos una salida de caudal  $Q_2$  proveniente del agua que percoló del horizonte superficial y que excede la capacidad de campo de este segundo horizonte y lo hace a través de una función de transferencia lineal (*Figura 3*).

El caudal total está dado por la suma de cada uno de los caudales de los dos horizontes, más el flujo de agua por exceso de saturación.



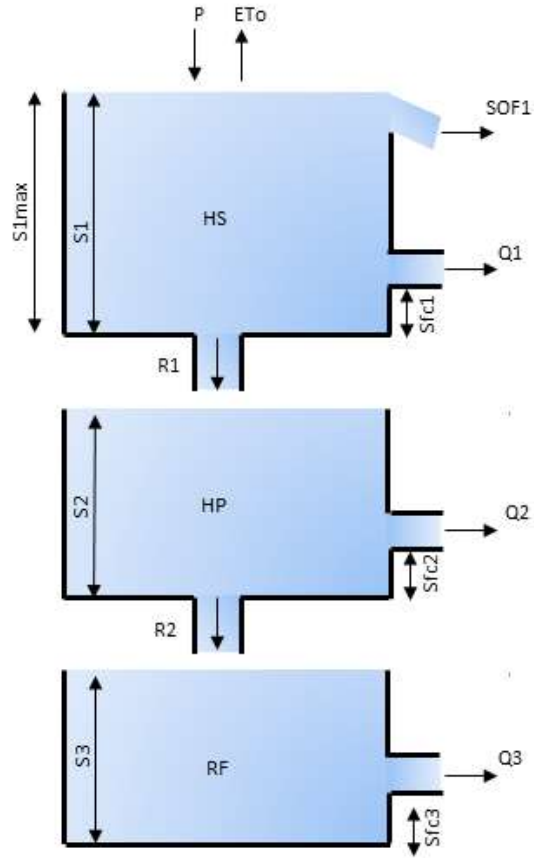
**Figura 3:** Modelo de dos reservorios en paralelo.

**P:** Precipitación, **ET<sub>0</sub>:** Evapotranspiración de referencia, **SOF1:** Flujo superficial por exceso de saturación, **Q1:** Caudal saliente del primer reservorio, **S1:** Almacenamiento de agua en el suelo del primer reservorio, **Sfc1:** Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo del primer reservorio, **S1max:** Capacidad máxima de retención de humedad del suelo, **R1:** Recarga, **S2:** Almacenamiento de agua en el suelo del segundo reservorio, **Q2:** Caudal saliente del segundo reservorio, **Sfc2:** Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo del segundo reservorio, **HS:** Horizonte superficial, **HP:** Horizonte profundo.

### 3.4.2 Tres reservorios en paralelo (3RP)

En este caso para representar la hidrología del suelo se aplica una estructura de tres reservorios, con la intención de que se imiten los componentes del flujo de aguas subterráneas (Crespo, 2012; Correa *et al.*, 2017).

Su estructura es similar a la de 2RP, con la diferencia de que el segundo reservorio denominado horizonte profundo, recarga (R2) hacia un tercer reservorio llamado roca fracturada, mismo que produce un caudal de salida (Q3) (Figura 4). El caudal resultante es la suma de los caudales que salen de cada uno de los horizontes más el flujo por exceso de saturación.



**Figura 4:** Modelo de tres reservorios en paralelo.

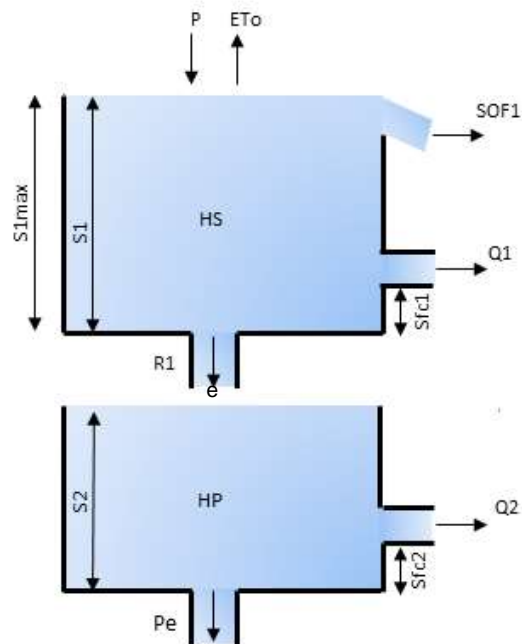
**P:** Precipitación, **ET<sub>0</sub>:** Evapotranspiración de referencia, **SOF1:** Flujo superficial por exceso de saturación, **Q1:** Caudal saliente del primer reservorio, **S1:** Almacenamiento de agua en el suelo del primer reservorio, **Sfc1:** Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo del primer reservorio, **S1max:** Capacidad máxima de retención de humedad del suelo, **R1:** Recarga, **S2:** Almacenamiento de agua en el suelo del segundo reservorio, **Q2:** Caudal saliente del segundo reservorio, **Sfc2:** Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo del segundo reservorio, **R2:** Recarga dos, **Q3:** Caudal saliente del tercer reservorio, **S3:** Almacenamiento de agua en el suelo del tercer reservorio, **Sfc3:** Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo del segundo reservorio, **HS:** Horizonte superficial, **HP:** Horizonte profundo, **RF:** Horizonte de roca fracturada.

### 3.4.3 Dos reservorios en paralelo con pérdida por infiltración profunda (2RPP)

Este modelo se aplicó únicamente en la microcuenca M2 ( $CE = 0.08$ ), debido a que en el valor resultante del balance hídrico existía una considerable cantidad de agua que no sale como caudal y que no es evapotranspirada. Por lo que este valor no se asemejaba a la precipitación que ingresaba, teniendo así la probabilidad de la existencia de una infiltración profunda o un trasvase a otras cuencas. Es por ello

que se planteó la hipótesis de la existencia de pérdidas o salidas de agua en el último horizonte.

Esta estructura es similar a la de los 2RP, con la única diferencia que en el segundo reservorio conocido como horizonte profundo se tiene otra salida de agua aparte del caudal  $Q_2$ , que en el presente trabajo lo consideramos como pérdida. Esta pérdida simula una infiltración profunda, un porcentaje de agua que no logra llegar al caudal en el punto de medición que se necesita simular (*Figura 5*). De esta manera, el caudal total es la suma de los caudales de los dos horizontes más el flujo por exceso de saturación.

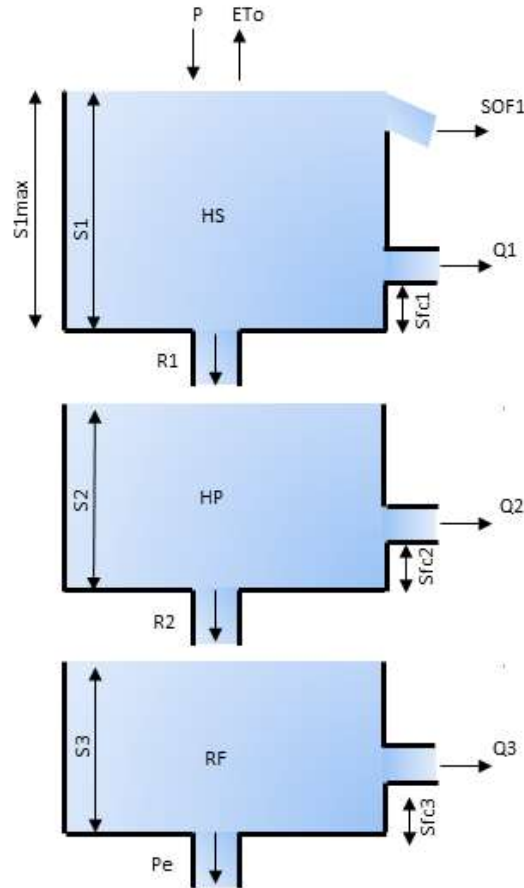


**Figura 5:** Modelo de dos reservorios en paralelo con pérdida.

**P:** Precipitación, **ET<sub>o</sub>:** Evapotranspiración de referencia, **SOF1:** Flujo superficial por exceso de saturación, **Q1:** Caudal saliente del primer reservorio, **S1:** Almacenamiento de agua en el suelo del primer reservorio, **S1max:** Capacidad máxima de retención de humedad del suelo, **R1:** Recarga, **S2:** Almacenamiento de agua en el suelo del segundo reservorio, **Q2:** Caudal saliente del segundo reservorio, **Sfc2:** Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo del segundo reservorio, **Pe:** Pérdida de flujo de agua, **HS:** Horizonte superficial, **HP:** Horizonte profundo.

## 3.4.4 Tres reservorios en paralelo con pérdida (3RPP)

Este modelo también fue aplicado a la microcuenca M2. La estructura es similar a la expuesta en la sección 3.4.2, con la diferencia de que se le añadió en su último horizonte de roca fracturada una pérdida de agua por infiltración profunda (*Figura 6*). El caudal total es la suma de los tres caudales provenientes de los tres reservorios u horizontes más el flujo por exceso de saturación.



**Figura 6:** Modelo de tres reservorios en paralelo con pérdida.

**P:** Precipitación, **ET<sub>0</sub>:** Evapotranspiración de referencia, **SOF1:** Flujo superficial por exceso de saturación, **Q1:** Caudal saliente del primer reservorio, **S1:** Almacenamiento de agua en el suelo del primer reservorio, **S1<sub>fc1</sub>:** Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo del primer reservorio, **S1<sub>max</sub>:** Capacidad máxima de retención de humedad del suelo, **R1:** Recarga, **S2:** Almacenamiento de agua en el suelo del segundo reservorio, **Q2:** Caudal saliente del segundo reservorio, **S1<sub>fc2</sub>:** Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo del segundo reservorio, **R2:** Recarga dos, **Q3:** Caudal saliente del tercer reservorio, **S3:** Almacenamiento de agua en el suelo del tercer reservorio, **S1<sub>fc3</sub>:** Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo del segundo reservorio, **Pe:** Pérdida de flujo de agua, **HS:** Horizonte superficial, **HP:** Horizonte profundo, **RF:** Horizonte de roca fracturada.



### 3.5 Parámetros de calibración de los modelos

Se calibraron diferentes parámetros para los modelos aplicados en las microcuencas en estudio. En la microcuenca M3 el modelo de dos reservorios en paralelo (2RP) se calibró con un total de ocho parámetros, y el modelo de tres reservorios en paralelo (3RP) con once parámetros. Mientras que para la microcuenca M2 el modelo de dos reservorios en paralelo con pérdida (2RPP) se calibró con diez parámetros y con trece parámetros el modelo 3RPP, esto debido a que se le sumaron dos parámetros por la presencia de un flujo de agua considerado como pérdida en el último horizonte (SAm<sub>max</sub>, bp). Los diferentes parámetros calibrados en los modelos de cada una de las microcuencas se muestran en la *Tabla 2*.

**Tabla 2:** Parámetros calibrados de los diferentes modelos aplicados

Parámetros calibrados	Microcuenca M3		Microcuenca M2	
	Modelos		Modelos	
	2RP	3RP	2RPP	3RPP
a	x	x	x	x
b	x	x	x	x
R	x	x	x	x
alpha ( $\alpha$ )	x	x	x	x
RH		x		x
bRF		x		x
SMmax	x	x	x	x
Ket	x	x	x	x
init_upper	x	x	x	x
init_upperH		x		x
init_groundwater	x	x	x	x
SAm <sub>max</sub>			x	x
bp			x	x
<b>Total de parámetros calibrados</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>13</b>

\*La x indica los parámetros que fueron calibrados en el modelo de la columna correspondiente.

**a:** Coeficiente de velocidad de la función de potencia. **b:** Coeficiente que controla la velocidad de descarga en los suelos inferiores. **r:** Parámetro de la tasa de drenaje vertical que controla el flujo de recarga desde la capa superior de suelo a la inferior. **alpha:** Parámetro no lineal (forma de la curva de la descarga). **RH:** Parámetro de la tasa de drenaje vertical que controla el flujo de recarga desde la capa superior de suelo a la inferior o capa de roca fracturada. **bRF:** Coeficiente que controla la velocidad de descarga en los suelos inferiores de roca fracturada. **SMmax:** Umbral de agua requerido para que se genere un flujo por exceso de saturación. **Ket:** Parámetro de corrección de evapotranspiración real. **init\_upper:** Valor inicial de contenido de agua del horizonte superficial. **init\_upperH:** Valor inicial de contenido de agua del horizonte de roca fracturada. **init\_groundwater:** Valor inicial de contenido de agua del horizonte profundo. **SAmx:** Umbral de agua requerido para que se genere una pérdida. **bp:** Coeficiente que controla la velocidad de pérdida de agua.

### 3.6 Ecuaciones de balance hídrico

El flujo o caudal total ( $Q_t$ ) de los modelos presentados anteriormente, está dado por la suma algebraica de cada uno de los flujos horizontales de los reservorios que forman el modelo, incluyendo el flujo por exceso de saturación.

Los almacenamientos de agua en el suelo ( $t$ ), están dados por el ingreso de la precipitación ( $t$ ) y la salida del flujo superficial por exceso de saturación  $SO(t)$ , por evapotranspiración  $ETa(t)$ , por flujo lateral  $Q(t)$  y por recarga  $R(t)$ . Para el caso de los modelos 2RPP y 3RPP, se incluye la salida por pérdida  $Pe(t)$ .

A continuación, se muestran las ecuaciones de almacenamiento:

#### *Modelo de dos reservorios en paralelo (2RP)*

$$S1(t) = S1(t - 1) + P(t) - SOF1(t) - ETa(t) - Q1(t) - R1(t)$$

$$S2(t) = S2(t - 1) + R1(t) - Q2(t)$$

#### *Modelo de tres reservorios en paralelo (3RP)*

$$S1(t) = S1(t - 1) + P(t) - SOF1(t) - ETa(t) - Q1(t) - R1(t)$$

$$S2(t) = S2(t - 1) + R1(t) - Q2(t) - R2(t)$$

$$S3(t) = S3(t - 1) + R2(t) - Q3(t)$$

#### *Modelo de dos reservorios en paralelo con pérdida (2RPP)*

$$S1(t) = S1(t - 1) + P(t) - SOF1(t) - ETa(t) - Q1(t) - R1(t)$$

$$S2(t) = S2(t - 1) + R1(t) - Q2(t) - Pe(t)$$

## Modelo de tres reservorios en paralelo con pérdida (3RPP)

$$S1(t) = S1(t - 1) + P(t) - SOF1(t) - ETa(t) - Q1(t) - R1(t)$$

$$S2(t) = S2(t - 1) + R1(t) - Q2(t) - R2(t)$$

$$S3(t) = S3(t - 1) + R2(t) - Q3(t) - Pe(t)$$

### 3.7 Funciones de transferencia

#### 3.7.1 Funciones potenciales

Los reservorios superficiales de las estructuras que representan flujos rápidos fueron modelados con la aplicación de una función logarítmica. Los flujos de salida de los horizontes superficiales se producen cuando se excede la capacidad de campo del mencionado horizonte (Kirchner, 2009; Birkel *et al.*, 2009).

#### **Ecuación 3:** Función Potencial

$$Q = a * (S(t) - S_{fc})^{1+\alpha}$$

$Q$ : Caudal de salida del horizonte superficial.

$a$ : Coeficiente que controla la velocidad de la función potencia.

$S(t)$ : Almacenamiento de agua en el suelo.

$S_{fc}$ : Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo.

$\alpha$ : Parámetro no lineal (curva de descarga).

#### 3.7.2 Funciones lineales

Los reservorios profundos de las estructuras que presentan flujos lentos, fueron modelados a través de la aplicación de una ecuación lineal. Al ser lineal se habla de un reservorio donde el agua se escurre lentamente y que en cualquier momento el flujo base puede llegar a ser proporcional al volumen de agua disponible en el reservorio (Fenicia *et al.*, 2007; Mena, 2010; Cabrera, 2017; Gualco, 2018).

#### **Ecuación 4:** Función Lineal

$$Q = b * (S(t) - S_{fc})$$

$Q$ : Caudal de los horizontes profundos.

$b$ : Coeficiente que controla la velocidad de descarga de las capas inferiores del suelo.

$S(t)$ : Almacenamiento de agua en el suelo.

$S_{fc}$ : Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo.

### 3.7.3 Funciones de percolación

Esta función es aplicada para modelar el flujo vertical del agua que va desde un reservorio superior hacia un inferior. Se aplica una ecuación lineal para calcular el flujo de salida (Clark *et al.*, 2011; Birkel, Soulsby & Tefzlaff, 2014).

**Ecuación 5:** Función de recarga

$$R = r * (S(t) - S_{fc})$$

$R$ : Recarga.

$r$ : Parámetro de la tasa de drenaje vertical que controla el flujo de recarga.

$S(t)$ : Almacenamiento de agua en el suelo.

$S_{fc}$ : Umbral de agua requerido para que se genere el flujo en el suelo.

### 3.8 Calibración

La calibración de los parámetros usados en cada modelo se realizó mediante el uso del algoritmo genético de clasificación no dominada II (NSGA-II). El proceso de calibración se llevó a cabo desde el mes de enero de 2018 hasta el mes de febrero de 2020 (70 % de los datos) y el proceso de validación desde febrero de 2020 a diciembre de 2020 (30 % de los datos). La división de los porcentajes de datos para la calibración y validación se basó en lo mencionado por Klemeš (1986) y Shen, Tolson & Mai (2022), quienes manifiestan que se debe usar un segmento de datos largo y significativo para calibración (70%), dejando el resto para validación (30%). Para obtener los resultados del rendimiento de los modelos conceptuales se consideró dos funciones objetivo, el coeficiente de eficiencia Nash Sutcliffe (NSE) y el de eficiencia Kling-Gupta (KGE).

El NSE es una herramienta estadística de uso frecuente en la modelación hidrológica, debido a que refleja mejor las características deseables e indeseables

del modelo interesado, obtiene un valor mayor a medida que aumenta la calidad del modelo (Zeybeck, 2018). Es decir, determina cuánto de la variabilidad que se tiene producto de las observaciones (real) es explicada por la simulación (modelado) que se realiza (Cabrera, 2013; Martínez, 2014).

Una simulación o ajuste perfecto se da cuando el valor de NSE es 1, y valores negativos o menores a 0.2 o a  $-\infty$  indica que el modelo no se ajusta correctamente a los datos observados, por lo que se considera insuficiente o pobre (Mathevet *et al.*, 2006; Magaña, Bâ & Guerra, 2013; Cruz *et al.*, 2018).

El cálculo de NSE se define de la siguiente manera:

**Ecuación 6:** Coeficiente de Eficiencia Nash Sutcliffe

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_{obs}(t) - Q_{obs})^2}$$

*NSE*: Coeficiente de eficiencia Nash Sutcliffe.

$Q_{sim}(t)$ : Descarga simulada en el tiempo (t).

$Q_{obs}(t)$ : Descarga observada en el tiempo (t).

$Q_{obs}$ : Caudal medio observado.

*T*: Longitud de la serie temporal.

El KGE al provenir de la descomposición del NSE, resuelve los inconvenientes de subestimación de valores máximos, combinando la correlación, el sesgo y los coeficientes de variación de una manera equilibrada (Gupta *et al.*, 2009; Zúñiga, Muñoz & Arumi, 2012). Su rango varía entre 0 a 1, donde KGE cercano a 1 demuestra un acorde perfecto entre simulaciones y observaciones, y mientras más se acerca a cero va siendo un acorde deficiente (Knoben, Freer & Woods, 2019; Santos, Thirel & Perrin, 2018).

**Ecuación 7:** Coeficiente de Eficiencia de Kling-Gupta

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$$

$KGE$ : Coeficiente de eficiencia Kling-Gupta.

$r$ : Coeficiente de correlación entre las observaciones y simulaciones.

$\beta$ : Término de sesgo.

$\gamma$ : Relación entre los coeficientes de variación simulados y observados.

Los valores referenciales en los cuales se miden las funciones objetivo se muestran en la *Tabla 3*. Los valores referenciales para el criterio de eficiencia de Kling-Gupta ( $KGE$ ) no se encuentran definidos, por lo que se tomarán los rangos de ajuste del criterio de eficiencia de Nash-Sutcliffe, debido a que los dos se encuentran vinculados (Zúñiga, Muñoz & Arumi, 2012).

**Tabla 3:** Valores referenciales de Nash-Sutcliffe empleados en el rendimiento del modelo

<b>NSE</b>	<b>Ajuste</b>
< 0.20	Insuficiente
0.20 - 0.40	Satisfactorio
0.40 - 0.60	Bueno
0.60 - 0.80	Muy bueno
> 0.80	Excelente

Fuente:(SENAMHI, 2016)

Según Wang et al. (2019), la correcta ejecución del NSGA-II depende de una serie de parámetros como: el tamaño de la población, la tasa de cruce, el índice de distribución para el cruce binario simulado, la tasa de mutación, el índice de distribución de la mutación polinómica y el número de evaluaciones. Teniendo como parámetro más importante el tamaño de la población debido a que una mayor diversidad viene dada por una mayor población (Zhang *et al.* 2010). Por otro lado, los índices de distribución de cruce y mutación son parámetros de alta significancia debido a la importancia de tener un control de la diversidad de las soluciones descendientes (Zhang *et al.*, 2016).

Se realizaron numerosas pruebas con diferentes valores en los parámetros del algoritmo genético NSGA II usados para la calibración de los modelos. Los valores con los que se partieron eran muy generales y se fueron cambiando con el

objetivo de mejorar la eficiencia de los modelos. Estas modificaciones también fueron realizadas tomando en cuenta diferentes consideraciones. Entre estas tenemos, el tamaño de la población, para la cual se consideró lo mencionado por Gestal et. al (2010), quienes señalan que al tomar valores pequeños de población la diversidad se disminuye. Mientras que al considerar valores grandes la diversidad aumenta, por lo que se puede llegar a encontrar el óptimo de mejor manera (Cano, Correa & Gómez, 2018).

Por otro lado, se tiene a las tasas de cruce, las cuales ayudan a obtener nuevas mejores soluciones a partir de otras. En esta, se consideró lo señalado por Gestal et al. (2010), donde se menciona que, si se toma una elevada tasa de cruce, el algoritmo pierde diversidad. Para el caso de la tasa de mutación se tomó en cuenta lo dicho por Orozco (2017), que recomienda usar valores pequeños para evitar que se introduzcan un sin número de individuos no deseados y se den alteraciones en los resultados esperados. Sin embargo, cabe recalcar que el mejor conjunto de parámetros para el algoritmo varía según la complejidad del modelo y de las funciones objetivo usadas (Jung, Choi, & Kim, 2017, Zhang *et al.*, 2016). Finalmente, los valores que mejores resultados brindaron son los contenidos en la *Tabla 4*.

**Tabla 4:** *Parámetros del Algoritmo Genético NSGA II*

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
Tamaño de la población	200
Índice de distribución de la mutación polinómica	10
Número de evaluaciones	100000
Tasa de cruce	0.9
Tasa de mutación	0.1
Índice de distribución para el cruce binario simulado	20

Fuente: Autoras, 2022

## 3.9 Criterios de selección de los modelos

Para medir la calidad relativa de los modelos aplicados para cada una de las microcuencas en estudio, se empleó los criterios de información Akaike (AIC) y el Bayesiano (BIC).

### 3.9.1 Criterio de información de Akaike (AIC)

Es un procedimiento de bondad de ajuste del modelo y de la complejidad del mismo, permitiendo que se seleccione el modelo más adecuado que represente los datos experimentales (Martínez *et al.*, 2009; Oseguera, 2018). El ajuste del modelo está dado por el logaritmo de máxima verosimilitud mientras que, la complejidad está dada por el número de parámetros (Calderón, Navarrete y Díaz, 2016).

Existe una penalización del modelo relacionado con su número total de parámetros, por lo que lo más probable es que se tenga un mejor ajuste del modelo si el número de parámetros aumenta (Guzmán, Morales & Balart, 2014). El mejor modelo es el que tiene el menor valor de AIC (Domínguez *et al.*, 2009; Noguera, Ortiz y Marin, 2011).

**Ecuación 8:** Criterio de información de Akaike

$$AIC = 2k - 2\ln(L)$$

*AIC*: Criterio de información de Akaike.

*k*: Número de parámetros en el modelo estadístico.

*ln*: Logaritmo.

*L*: Máximo valor inicial de la función de verosimilitud para el modelo estimado.

Según Díaz (2002) y Engelhardt (2014), este criterio puede ser simplificado para fines prácticos de la siguiente manera:

$$AIC = 2k - n\ln(\sigma^2)$$
$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\gamma(h_i) - \gamma^*(h_i))^2}{n}$$



*AIC*: Criterio de información de Akaike.

*k*: Número de parámetros en el modelo estadístico.

*ln*: Logaritmo.

$\sigma^2$ : Estimación de la varianza de los residuos.

*n*: Número total de valores estimados.

### 3.9.2 Criterio de información Bayesiano (BIC)

Es un criterio de bondad de ajuste construido con el mismo fin que el AIC, pues se deriva del mismo. Por lo que se basa también en la verosimilitud que está integrada en la teoría bayesiana (Domínguez *et al.*, 2009). Evalúa los modelos en términos de la suma de los cuadrados de los residuos, de manera que se logre encontrar el número de periodos rezagados que provocan que el modelo se minimice (Amaya, 2018; Rodó, 2020).

El BIC facilita la evaluación del rendimiento del modelo con un término de penalización por el número de parámetros calibrados (Birkel & Soulsby, 2016). Al igual que el AIC, se prefiere el modelo con el BIC más bajo (Abreu, Abreu & Iglesias, 2015).

Según Engelhardt (2014), este criterio es calculado de la siguiente manera:

**Ecuación 9:** Criterio de Información Bayesiano (BIC)

$$BIC = n \log(\sigma^2) + k \log(n)$$

*BIC*: Criterio de información Bayesiano.

*n*: Número total de valores estimados.

$\sigma^2$ : Estimación de la varianza de los residuos.

*k*: Número de parámetros en el modelo estadístico.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

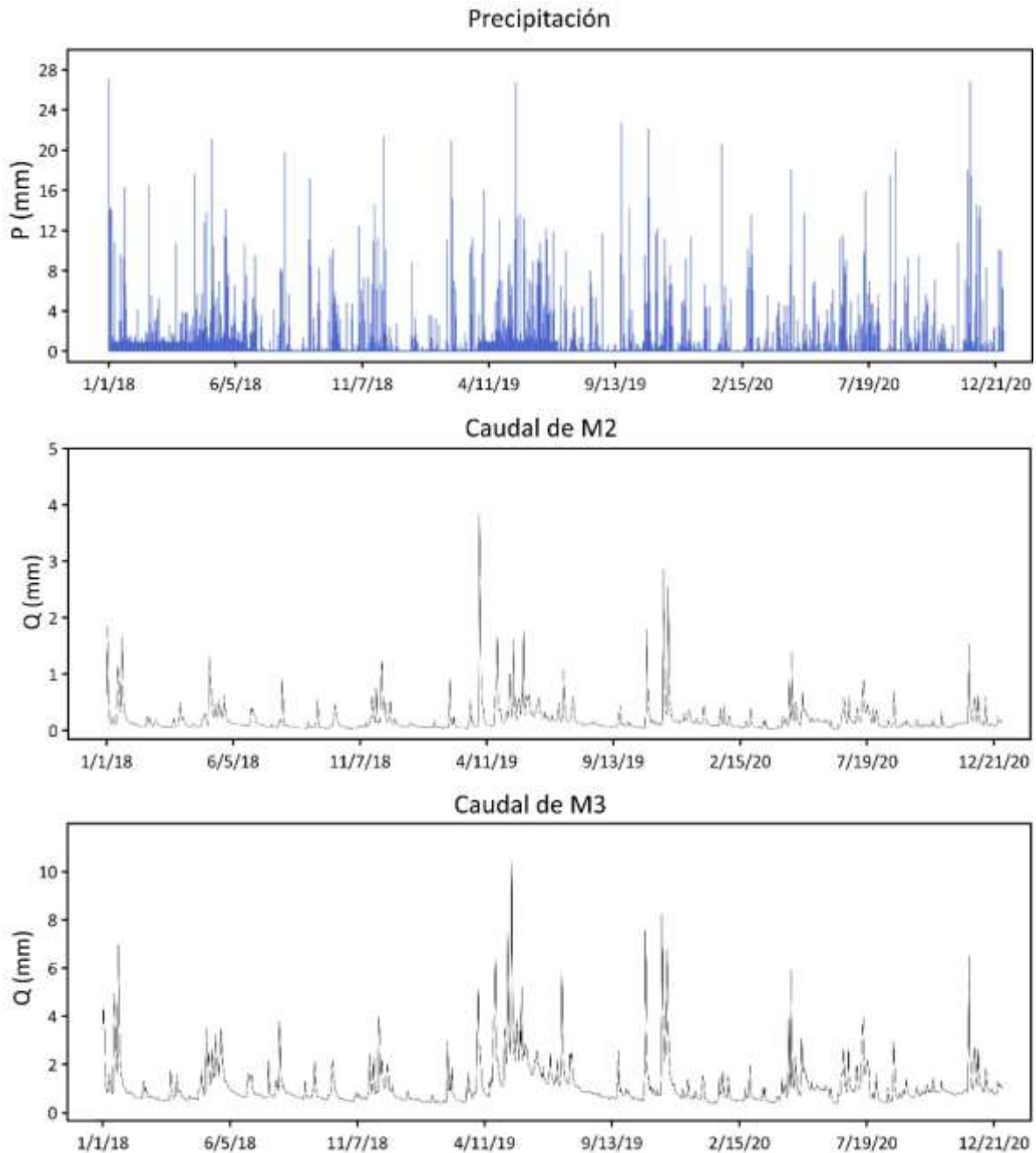
### 4.1 Características hidrológicas

Con los datos obtenidos de los hidrómetros, los que se encuentran en el punto de cierre de cada una de las microcuencas seleccionadas, se calculó el caudal diario

promedio, obteniendo para la microcuenca M2 un caudal de  $5.80 \text{ l*s}^{-1}$  y para la microcuenca M3 de  $30.76 \text{ l*s}^{-1}$ . Lo cual concuerda con la información revisada, en donde se obtuvo registros del caudal diario promedio de  $4.72 \text{ l*s}^{-1}$  y de  $23.16 \text{ l*s}^{-1}$  para la microcuenca M2 y M3, respectivamente (Jumbo, 2017). Puede notarse de manera clara que la diferencia en los caudales de la microcuenca dos y tres se mantiene desde el periodo de estudio 2014-2016 que fue realizado por Jumbo, 2017, hasta el periodo de nuestro estudio 2018-2020.

En cuanto a la precipitación, se calculó el total anual para los años 2018, 2019 y 2020, siendo de 994.81, 967.84 y 953.85  $\text{mm*año}^{-1}$  respectivamente, y una precipitación media diaria de  $2.57 \text{ mm*día}^{-1}$ . Estos resultados obtenidos se asemejan al rango de valores de precipitación anual obtenido por Jumbo (2017), que va de 735.4 a 848.5  $\text{mm*año}^{-1}$  para la microcuenca M2 y M3, respectivamente, durante su periodo de estudio que fue desde el 2014 al 2016, y una precipitación media diaria de 1.85 a  $2.50 \text{ mm*día}^{-1}$ . Un rango de valores similares para la zona de estudio se expone en el trabajo realizado por Ochoa et al. (2016), donde se obtienen precipitaciones anuales de 641 a 849  $\text{mm*año}^{-1}$ .

La *Figura 7* nos muestra que para una misma precipitación que cae sobre las dos microcuencas en estudio, la producción de caudal que sale de la microcuenca M2 es más bajo que el que sale de la microcuenca M3, a pesar de estar tan cerca una de la otra y de tener áreas aproximadas. Lo cual ratifica la diferencia que existe en el caudal que sale de las microcuencas, pues el caudal de la microcuenca M2 está entre  $4.72 \text{ l*s}^{-1}$  (0.16 mm) y  $5.80 \text{ l*s}^{-1}$  (0.20 mm) y de la microcuenca M3 entre  $23.16 \text{ l*s}^{-1}$  (0.86 mm) y  $30.76 \text{ l*s}^{-1}$  (1.14 mm).



**Figura 7:** Precipitación para las dos microcuencas.  
Caudal de la microcuenca M2. Caudal de la microcuenca M3.  
Fuente: Autoras, 2022

#### 4.1.1 Coeficiente de escorrentía

El valor promedio del coeficiente de escorrentía de los años en estudio, es de 0.08 y 0.41 para las microcuencas M2 y M3 respectivamente (*Tabla 5*). Los valores resultantes tienen similitud a los obtenidos por Ochoa et al. (2016), en donde se obtuvo valores de 0.08 y 0.37 para las microcuencas M2 y M3 respectivamente.

Diferenciándose de los valores de coeficiente de escorrentía de los páramos del Sur del Ecuador cuyo rango va de 0.28 a 0.74 (Crespo *et al.*, 2012; Torres & Proaño, 2018). La diferencia entre los valores del coeficiente de escorrentía de los páramos del Antisana y los del Sur del Ecuador, puede ser probablemente porque los horizontes de los suelos del sur son menos profundos, se mantienen saturados y la vegetación que posee tiene un bajo consumo de agua (Crespo *et al.*, 2012; Ochoa *et al.*, 2020; Vanacker, 2021). En esta diferencia de los coeficientes de escorrentía, también puede influir la pendiente, textura y ocupación del suelo (Valencia, Serrano & Galárraga, 2014; González *et al.*, 2016).

**Tabla 5:** Coeficientes de escorrentía en los años de estudio

<b>Año</b>	<b>Microcuenca M2</b>	<b>Microcuenca M3</b>
2018	0.08	0.43
2019	0.09	0.43
2020	0.08	0.37
<b>Promedio</b>	<b>0.08</b>	<b>0.41</b>

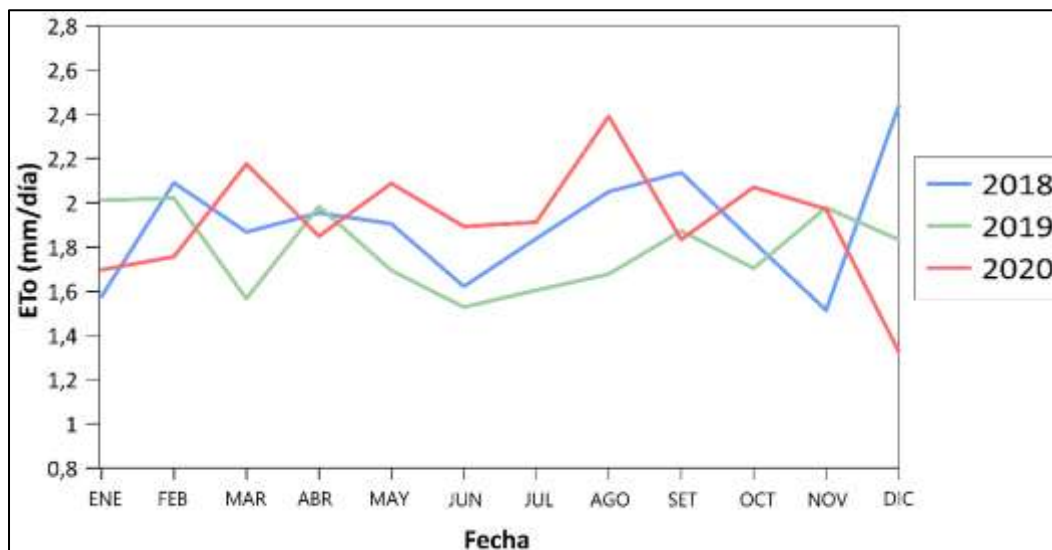
*Fuente: Autoras, 2022*

#### 4.1.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración de referencia calculada durante los tres años de estudio tiene un promedio de  $1.70 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  y de  $681.85 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$  (Figura 8), para las dos microcuencas. Este valor es superior a lo mencionado en Torres (2016), en donde la evapotranspiración de referencia en la zona del Antisana se encontraba alrededor de  $1.55 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  y  $564.88 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$ . Esto puede deberse a la diferencia en el tiempo de estudio, puesto que la precipitación para nuestro periodo de estudio (36 meses) tuvo un promedio de  $2.57 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ , en contraste al trabajo de Torres (16 meses) donde se obtuvo una precipitación de  $2.05 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ . En lo que respecta al estudio de Jumbo (2016), la evapotranspiración promedio de referencia fue de  $2.14 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  (24 meses), con una precipitación de  $2.17 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$ . La diferencia con Jumbo, probablemente se deba a que el cálculo de la evapotranspiración fue realizado con variables de la estación meteorológica Humboldt (M5034), ubicada en la cuenca del Antisana a 4010 m s.n.m

(actualmente inactiva), en comparación a la estación meteorológica Jantuhuaycu (M5126) usada en nuestro estudio ubicada a 4052 m s.n.m, además, de la diferencia en el tiempo de estudio.,

Con la calibración del parámetro para la obtención de la evapotranspiración real (Ket) a partir de la evapotranspiración de referencia se tuvo un promedio de evapotranspiración real de  $1.15 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  durante el periodo de estudio. Lo cual concuerda con los valores descritos en el trabajo de los Componentes del Balance Hídrico en los Páramos de Jatunsacha, Ecuador, mismo que se sitúa cercano a nuestra zona de estudio. Los valores de evapotranspiración van de  $0.60$  a  $1.68 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$  para los páramos del Antisana (Torres & Proaño, 2018). Mientras que, en los páramos del Sur del Ecuador, como es el caso de la cuenca de Zhurucay, los valores están entre  $1.74 \pm 0.28$  (max. = 5.1, min. = 0.3)  $\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$  (Carrillo *et al.*, 2019). La variabilidad de los valores de evapotranspiración en los páramos puede deberse al reemplazo de la vegetación natural de pajonal por pasto o parcelas cultivadas, en este caso suelos en recuperación (Byers, 2000). También a la textura del suelo, al color oscuro del mismo, así como a la temperatura de la superficie del suelo, especialmente en los primeros centímetros (Sarmiento, 2000).



**Figura 8:** Evapotranspiración de referencia en los años de estudio.  
Fuente: Autoras, 2022

## 4.2 Calibración

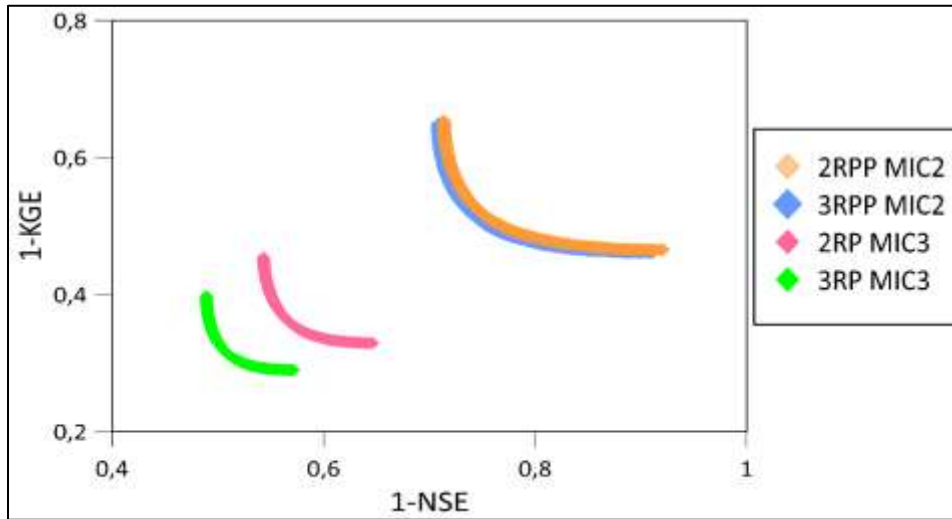
Previo a la presentación de los resultados obtenidos en los diferentes análisis realizados, queremos hacer mención que se partió de la hipótesis de que las microcuencas de estudio al ser cercanas tendrían un funcionamiento hidrológico similar. Es por ello que se modeló primero la microcuenca M3, debido a que la misma presentaba un coeficiente de escorrentía mayor (0.41) y cerrar el balance hídrico. Esto anterior puesto que al considerar al agua que sale como caudal y como evapotranspiración, el valor resultante se asemeja a la precipitación que ingresa en la microcuenca, cerrando de esta manera el balance hídrico.

La calibración multiobjetivo de los parámetros de los modelos, cuyo resultado se presenta como un conjunto de soluciones. Se inició con 100000 evaluaciones, a partir de las cuales se seleccionaron un total de 200 conjuntos de parámetros, cuyos valores se encontraron dentro del rango previamente establecido para cada parámetro.

Los resultados obtenidos en la calibración de los modelos, fueron evaluados a partir de la aplicación de dos funciones objetivo NSE y KGE. Con el fin de optimizar los valores de estas funciones objetivo se realizaron diagramas de Pareto, los mismos que nos permiten comparar y a su vez evaluar los conjuntos de parámetros óptimos de calibración a través de las diferentes funciones objetivo (Khu & Madsen, 2005). De manera que nos ayuda a elegir las mejores soluciones, evitando un sin fin de especificaciones o prioridades de las mencionadas funciones objetivo. El diagrama presentado en la *Figura 9*, es el resultado obtenido después de varios ajustes en los rangos de los parámetros y por lo tanto de la calibración de los modelos aplicados para las microcuencas en estudio.

En la *Figura 9*, podemos visualizar que los modelos de la microcuenca M2 no presentan mucha diferencia en su análisis con las funciones objetivo, pues tanto el modelo 2RPP y 3RPP presentan una curvatura y rangos de valores similares. Los rangos de valores de NSE para el modelo 2RPP está entre 0.08 y 0.29, el KGE entre 0.35 y 0.53. Para el modelo de 3RPP el rango del NSE está entre 0.09 y 0.29, el KGE entre 0.35 y 0.54. Mientras que en la microcuenca M3 es más notorio

que la mejor curvatura y mayor rango de valor de las funciones objetivo lo presenta el modelo 3RP. Pues el modelo de 2RP tiene menores rangos de valores de NSE (0.35 - 0.46) y KGE (0.55 - 0.67), y el modelo de 3RP presenta valores mayores de NSE (0.42 - 0.51) y KGE (0.60 - 0.71). Lo cual podría significar que los rangos de los parámetros de este último modelo pueden brindar mejores resultados en la modelación de esta microcuenca.



**Figura 9:** Diagrama de Pareto.

En este caso los ejes representan los valores optimizados. Eje y:  $1 - KGE$  y eje x:  $1 - NSE$ . Siendo los valores cercanos a 0 los que mejor se ajustan a las condiciones reales de caudal de la cuenca.

Fuente: Autoras, 2022

### 4.3 Rendimiento del modelo

El rendimiento de los modelos fue clasificado en base a la *Tabla 3*, donde constan los valores referenciales para la función objetivo NSE. El mejor rendimiento es aquel que presenta un valor mayor a 0.80 y el rendimiento insuficiente o pobre es aquel que tiene un valor menor a 0.20. En base a lo mencionado anteriormente y a los valores resultantes de las funciones objetivo NSE y KGE mostrados en la *Tabla 6*, podemos decir que el rendimiento de los modelos se encuentra dentro de la clasificación de valores satisfactorios ( $> 0.20$ ) a muy buenos ( $> 0.60$ ).

Los valores registrados en la *Tabla 6*, en lo que respecta a los dos modelos aplicados para la microcuenca (M2), no varían de manera considerable. Los modelos de 2RPP y de 3RPP tiene un rendimiento satisfactorio ( $> 0.20$ ) si es medido por el NSE y bueno ( $> 0.40$ ) si es medido por KGE en lo que se refiere a la



calibración. Para el caso de los resultados obtenidos de la validación los rendimientos van de buenos ( $NSE > 0.40$ ) a muy buenos ( $KGE > 0.60$ ), esto según los rangos de valores de la *Tabla 3*.

Como la diferencia en el rendimiento de los modelos de la microcuenca M2 es mínima y sus resultados van de satisfactorios ( $> 0.20$ ) a buenos ( $> 0.40$ ), se puede deducir que esta microcuenca probablemente sí presente una salida o pérdida de agua. Los valores máximos de los criterios de eficiencia en el modelo 2RPP son  $NSE = 0.29$  y  $KGE = 0.53$ , y para el modelo de 3RPP son  $NSE = 0.29$  y  $KGE = 0.54$ .

Con respecto a la microcuenca M3, se puede notar claramente una diferencia en los valores de rendimiento tanto del NSE como del KGE en cada uno de los modelos aplicados. Sin embargo, los dos modelos son considerados buenos ( $> 0.40$ ) si son medidos por el NSE y muy buenos ( $> 0.60$ ) si son medidos por el KGE. El modelo de 3RP cuyos valores son un tanto mayores al modelo de 2RP, tiene un  $NSE = 0.51$  y  $KGE = 0.71$ . Y el modelo de 2RP tiene un  $NSE = 0.46$  y  $KGE = 0.67$  (ver *Tabla 6*).

**Tabla 6:** Criterios de eficiencia de los modelos de cada una de las microcuencas

	Microcuenca M2		Microcuenca M3	
	2RPP	3RPP	2RP	3RP
<b>NSE</b>	0.2862	<b>0.2909</b>	0.4569	<b>0.5109</b>
<b>KGE</b>	0.5348	<b>0.5375</b>	0.6713	<b>0.7105</b>
<b>NSEV</b>	<b>0.4295</b>	0.4292	<b>0.3932</b>	0.2895
<b>KGEV</b>	<b>0.6679</b>	0.6651	<b>0.7014</b>	0.6601

\* Los valores en negrita son los considerados mejores para cada función objetivo.  
Fuente: Autoras, 2022

Como observamos en la *Tabla 6*, los mejores modelos para la representación del funcionamiento hidrológico de las microcuencas, de acuerdo a los valores de rendimiento no son los mismos en la calibración como en la validación. El rendimiento en la validación es mayor al de la calibración en la microcuenca M2.



Mientras que en la microcuenca M3 los valores de rendimiento de la validación son menores a los de la calibración.

#### 4.4 Parámetros Calibrados

Los rangos de valores obtenidos de los parámetros calibrados y validados se muestran en la *Tabla 7*. Así como también los valores de los percentiles 5 y 95 para cada uno de los parámetros de los modelos de las microcuencas M2 y M3. Estos rangos varían entre microcuencas, posiblemente debido a las diferencias en su topografía, específicamente de sus pendientes, pues la microcuenca dos presenta pendientes menos pronunciadas que la microcuenca 3.

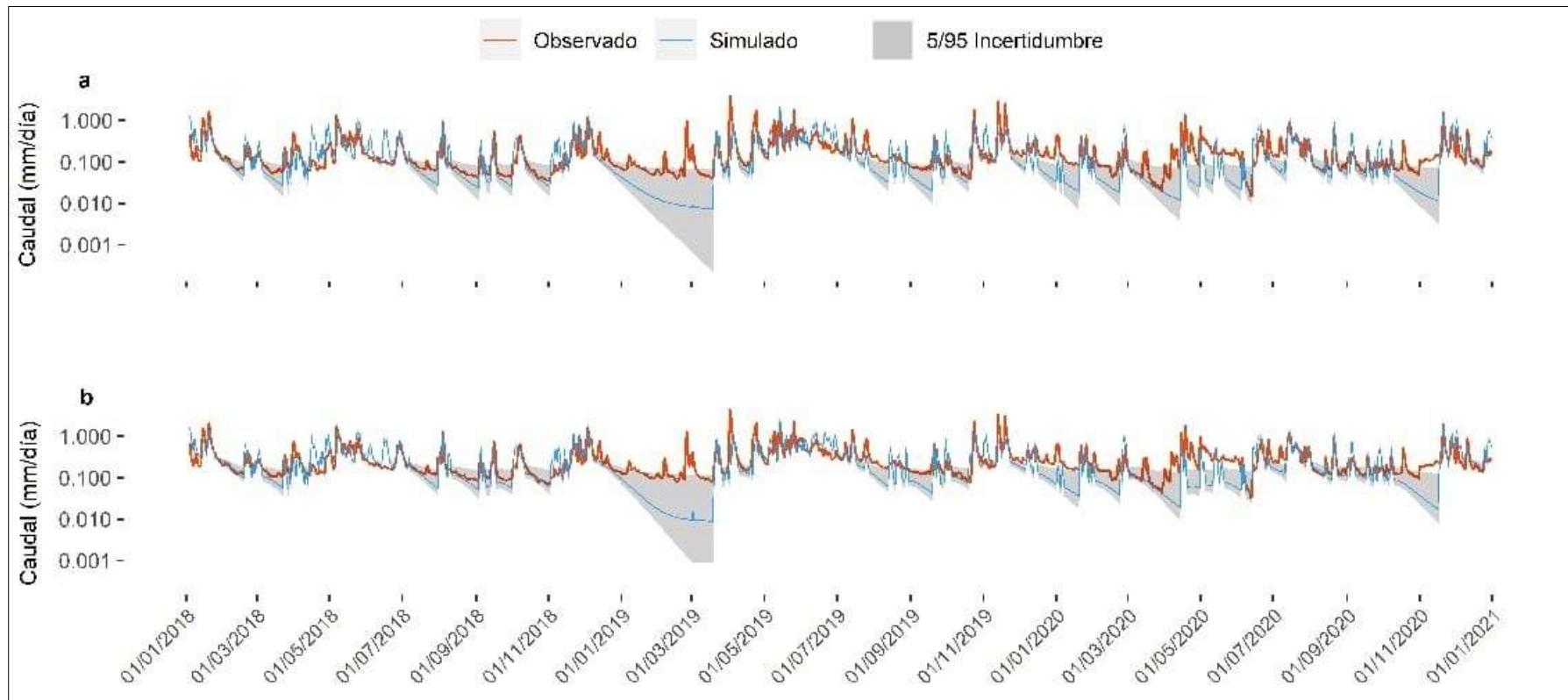
**Tabla 7:** Valores óptimos de los parámetros calibrados para la modelación de las microcuencas de estudio.

Parámetros	Rango de Calibración	Microcuenca M2				Microcuenca M3	
		2RPP		3RPP		3RP	
		Perc.5	Perc.95	Perc.5	Perc.95	Perc.5	Perc.95
a	0.001 - 0.5	0.0306	0.0577	0.0319	0.0594	0.1093	0.1534
b	0.0 - 0.1	0.0022	0.0033	9.96E-09	1.26E-06	0.0189	0.0275'
R	0.0 - 0.5	0.4980	0.4999	0.4944	0.4999	0.4166	0.4705
alpha	0.0 – 1.6	2.30E-05	0.0073	3.30E-05	0.0079	3.48E-06	0.0015
bRF	0.0001 – 0.01	–	-	0.0033	0.0046	0.0005	0.0008
bp	0.0 – 0.08	0.0534	0.0612	0.0782	0.7999	–	-
RH	0.001 – 0.4	–	-	0.1174	0.1424	0.0279	0.03681
SMmax	0.0 – 100.0	29.6007	30.2399	29.5516	30.2086	23.5561	23.6983
SAMax	0.0 – 40.0	0.0036	32.2575	0.0006	19.6887	–	-
Ket	0.6 – 1.0	0.6000	0.6258	0.6000	0.6267	0.6000	0.6000
init_upper	0.0 – 100.0	5.0449	98.5182	31.1235	65.3147	38.5382	88.9921
init_upperH	0.0 – 100.0	–	-	37.1184	98.1152	0.0046	8.7018
init_ground water	0.0 – 100.0	6.7688	91.8491	47.2242	93.6074	0.4327	8.5175

Fuente: Autoras, 2022

Los hidrogramas presentados en las *Figuras 10 y 11*, muestran una comparación de los caudales observados, simulados y los límites de incertidumbre para los modelos conceptuales aplicados en las microcuencas M2 y M3.

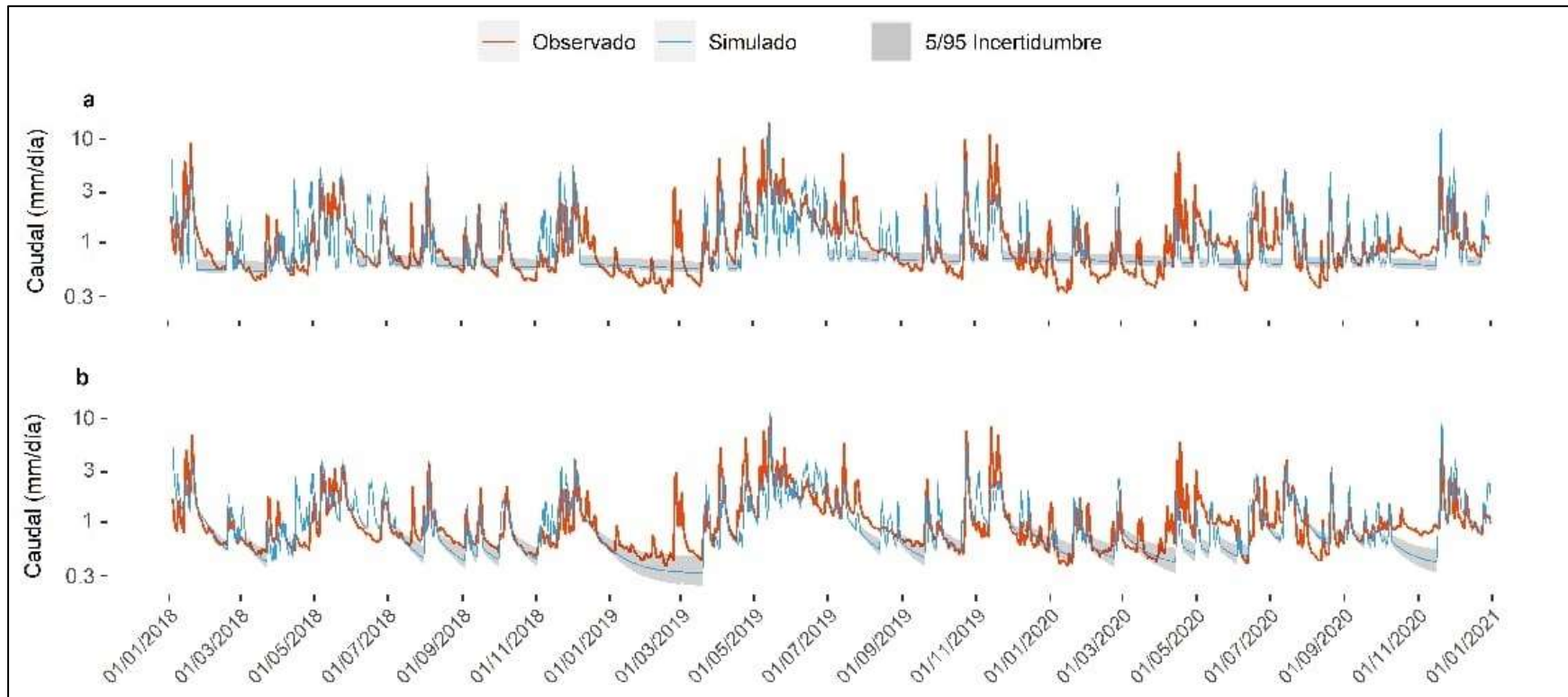
En el caso de la microcuenca M2 se procedió en un inicio a realizar la simulación con el mismo rango de parámetros calibrados para la microcuenca M3. Sin embargo, se obtuvo una simulación con una descarga muy rápida de los reservorios y donde no se consideraban los flujos base. Debido a ello, se consideró el agregar parámetros de pérdida o fuga de agua en los últimos reservorios que representan a los horizontes profundos. Esta agregación resultó en una mejor simulación de los modelos para esta microcuenca (*Figura 10*).



**Figura 10:** Caudal Observado y Caudal simulado de la microcuenca (M2) en escala logarítmica. Las bandas de incertidumbre indican la variabilidad de los parámetros. a) Modelo 2RPP, b) Modelo 3RPP

Fuente: Autoras, 2022

La *Figura 10a* representa el modelo de 2RPP, si bien es cierto algunos caudales base están sobre -o sub- estimados, sin embargo, ciertas fluctuaciones del caudal y caudales pico están mejor representados. Por otro lado, la *Figura 10b* muestra el modelo de 3RPP donde se puede ver una similitud considerable con el modelo de 2RPP. La mínima diferencia radica en que algunas de las bandas de incertidumbre son más estrechas en el modelo 3RPP en comparación con el modelo de 2RPP. En este caso los dos modelos han demostrado similitudes entre el caudal simulado y observado de la microcuenca (M2), pues los hidrogramas de los dos modelos no muestran una diferencia representativa.



**Figura 11:** Caudal Observado y Caudal simulado de la microcuenca (M3) en escala logarítmica. Las bandas de incertidumbre indican la variabilidad de los parámetros. a) Modelo 2RP, b) Modelo 3RP  
 Fuente: Autoras, 2022

En cuanto a la microcuenca M3, la *Figura 11a* que representa el modelo de 2RP en el cual el caudal simulado presenta un desfase en las fluctuaciones, los flujos base están siendo subestimados y la mayoría de caudales pico apenas presentan concordancia con respecto al caudal observado. Lo contrario ocurre en la *Figura 11b* del modelo 3RP, donde se muestra una mejora considerable en el caudal simulado. Los picos, fluctuaciones y caudales base se encuentran mejor representados.

Por lo tanto, el modelo que representa de una mejor manera el funcionamiento hidrológico de la microcuenca M3, es el de 3RP. Es decir, que el agua proveniente de los horizontes profundos, en este caso el de roca fracturada cuya respuesta es lenta contribuye significativamente al caudal, sobre todo de los flujos base. Lo cual es similar a lo mencionado en el estudio de Crespo (2012), en donde se tuvo al modelo de tres reservorios en paralelo como el que mejor predice el proceso de escorrentía en el ecosistema de páramo. Diferenciando con los estudios hechos por Albuja & Tenelanda (2015), en una microcuenca del Sur de Ecuador, en donde la adición de un tercer reservorio de flujo subterráneo no contribuyó de manera significativa al caudal de salida.

#### 4.5 Análisis de Criterio de Información de Akaike y Criterio de Información Bayesiano

La *Tabla 8* muestra los diferentes valores obtenidos para el Criterio de Información de Akaike (AIC) y para el Criterio de Información Bayesiano (BIC), tanto para el periodo de calibración como para el periodo de validación. El AIC y BIC, nos ayudan a saber que tan bien se ajustan los modelos al sistema penalizando el incremento de número de parámetros, evaluando la parsimonia de los modelos.

Como sabemos la complejidad del modelo está dado por el número de parámetros, en el caso de la microcuenca M2, se prefirió el modelo más simple con el menor número de parámetros. Es decir, al modelo de 2RPP que tiene un valor de AIC y BIC menor en la calibración y validación. Puesto que la selección de la mejor estructura está dada por el modelo que tenga el menor valor de AIC o

BIC (Wang & Liu, 2006). Por otro lado, en la microcuenca M3 el análisis de AIC y BIC para la calibración es menor en el modelo de 3RP, lo contrario ocurre en la validación que, tiene menor valor el modelo de 2RP.

Por lo antes mencionado se determina que, en base a los criterios de información Akaike y Bayesiano, para la microcuenca M2 el mejor modelo es el de 2RPP (10 parámetros). Para la microcuenca M3 el mejor modelo es el de 3RP (11 parámetros), aunque la validación seleccione el modelo de 2RP (8 parámetros). Esta selección se corrobora con lo mencionado por Aliaga (2017), que menciona que la validación demuestra solamente la representatividad y también la estabilidad del conjunto de parámetros que sean calibrados. Por lo que en la validación son aceptables los dos modelos.

**Tabla 8:** Criterio de Información de Akaike y Criterio de Información Bayesiano

Modelos	AIC		BIC		
	Calibración	Validación	Calibración	Validación	
<b>Microcuenca M2</b>	2RPP	<b>-863.6154</b>	<b>-514.8411</b>	<b>-854.7788</b>	<b>-509.6560</b>
	3RPP	-861.5352	-512.0481	-850.0476	-505.3075
<b>Microcuenca M3</b>	2RP	-139.4954	<b>-121.0323</b>	-130.6588	<b>-115.8472</b>
	3RP	<b>-172.3331</b>	-103.5530	<b>-160.8454</b>	-96.8123

\*Los valores en negrita representan el AIC y BIC mínimo seleccionado para cada modelo y periodo (calibración o validación).

Fuente: Autoras, 2022

#### 4.6 Selección del mejor modelo

Una vez aplicadas las diferentes pruebas y criterios a los modelos de las microcuencas en estudio, se procedió a la selección del modelo que represente de manera adecuada la hidrología de cada microcuenca.

En relación al funcionamiento hidrológico de la microcuenca M2 (CE = 0.08), el mejor modelo resultó ser el de tres reservorios en paralelo con pérdida (3RPP), modelo con el mayor número de parámetros. Esto debido a que se obtuvo un valor mayor en los criterios de eficiencia (NSE = 0.29 y KGE = 0.54). Por otro lado, el análisis de los criterios de información (AIC= -863.62 y BIC= -854.78), muestran

que el mejor modelo es el de dos reservorios en paralelo con pérdida (2RPP). Sin embargo, según lo representado en el hidrograma (*Figura 10*), se puede decir que los dos modelos siguen una tendencia similar por lo que los dos podrían ser aplicables a esta microcuenca. Lo cual concuerda con los resultados obtenidos en los criterios de evaluación (NSE y KGE), donde se muestra que la diferencia entre los modelos es mínima (*Tabla 6*).

Como se ha mencionado anteriormente, para la simulación de la hidrología de esta microcuenca se requiere que exista una salida de agua del horizonte profundo. Por lo que, el último reservorio de los modelos aplicados tiene una salida adicional de agua, la cual no es considerada como una contribución a la escorrentía, lo que es consistente con lo mencionado en el estudio de selección de modelos conceptuales para la regionalización de la lluvia-escorrentía (Lee *et al.*, 2004). Esta fuga o pérdida de agua, puede estar relacionada a la ubicación geológica de la microcuenca o a la presencia de zonas lacustres o palustres (Jumbo, 2017). Sin embargo, para que exista esta pérdida probablemente el agua deba alcanzar cierto contenido de humedad, para que el agua sea transportada a horizontes profundos (Olivia, Noy & Cibils, 2001).

En lo que respecta a la microcuenca M3 (CE = 0.41), el mejor modelo que la representa es el de tres reservorios en paralelo (3RP), con el mayor número de parámetros. Los resultados de los criterios de eficiencia evidencian tener un valor mayor en este modelo (NSE = 0.51 y KGE = 0.71). Al igual que las funciones objetivo (NSE y KGE), los criterios de información AIC y BIC tuvieron los mejores valores en este modelo (*Tabla 8*). Ratificándose, con el hidrograma (*Figura 11b*), donde se puede notar claramente que este modelo representa un mejor ajuste de los datos simulados con los datos observados.

La selección de un modelo que simule de manera adecuada las microcuencas en estudio representa un desafío. Cada modelo posee características diferentes, lo cual conlleva a que se vea favorecida por criterios distintos, es por ello que se requiere de mayor información hidrológica que permita resolver estas diferencias. Sin embargo, se muestra que los modelos con mayor número de parámetros son



los más favorables para las microcuencas de estudio. Un resultado similar fue el obtenido en una cuenca al sur de Costa Rica, donde se probaron diferentes modelos, obteniendo como resultado que los de mayor complejidad (más de 8 parámetros) son los que mejor se ajustan a la cuenca estudiada (Birkel & Soulsby, 2016). Esto podría respaldar que las cuencas de páramo pueden llegar a presentar complejidades y que es necesario por ejemplo para tener mejores simulaciones de caudal, flujos rápidos y lentos en diferentes estratos de suelo.

## 5. CONCLUSIONES

En base a la información disponible en la UHJ se realizó la propuesta de varias estructuras que podrían adaptarse a los procesos hidrológicos que suceden en el ecosistema de páramo. Realizada la modelación y obtenidos los resultados pudimos llegar a las siguientes conclusiones:

- A pesar de que las dos microcuencas en estudio se encuentran cercanas y presentan áreas similares, su comportamiento hidrológico es diferente. Por lo que las hipótesis conceptuales que mejor simulan los caudales observados son diferentes para cada microcuenca en estudio. Esto indica la alta variabilidad que se puede presentar en estas unidades hidrográficas, variabilidad que podría atribuirse principalmente a la geología.
- Las funciones de transferencia identificadas para cada una de las microcuencas fueron la potencial y la lineal. La potencial fue aplicada en los horizontes superficiales del suelo y las lineales para representar tanto a los horizontes profundos como a la recarga que se da desde un horizonte superior a un inferior. Esto permitió que se puedan simular los flujos pico, base, así como las demás fluctuaciones del caudal.
- La hipótesis conceptual de tres reservorios en paralelo con pérdida (3RPP), es la más aceptada para microcuenca M2 (CE = 0.08). Para esta cuenca es necesario simular flujos rápidos y lentos en el suelo, proveniente desde diferentes estratos de suelo, para una mejor simulación.
- La hipótesis conceptual de tres reservorios en paralelo (3RP), es la que obtuvo un mayor rendimiento para la microcuenca M3 (CE = 0.41), por lo que el caudal simulado se ajustó de mejor manera al caudal observado.

- Los criterios de eficiencia (NSE y KGE) así como también de los criterios de información (AIC y BIC), no muestran una diferencia marcada para los dos modelos aplicados (2RPP y 3RPP) en la microcuenca M2.
- En la microcuenca M2 se probaron modelos sin pérdida, donde se obtuvieron resultados no satisfactorios, pues los flujos base no se tomaban en cuenta al momento de la simulación, lo cual valida la pérdida de agua por infiltración profunda o trasvase a otras cuencas.
- En la microcuenca M2 se consideró para que sea posible la simulación, un flujo de agua saliente que no se pierde por evaporación, ni sale por caudal, por lo que probablemente se infiltra, siendo un flujo de agua que se pierde desde el último horizonte de suelo, hacia la roca.
- En la microcuenca M3, se debe considerar una percolación hacia un horizonte profundo, en este caso denominado de roca fracturada, cuya dinámica podría presentar una respuesta lenta y que contribuye significativamente al caudal, contribuyendo a los flujos base.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda llevar un adecuado mantenimiento y pre procesamiento de datos, con el fin de contar con series de datos completas o que tengan la menor cantidad de vacíos, permitiendo tener simulaciones mucho más precisas.
- Se recomienda además generar o disponer de mapas de uso y cobertura de suelo, que permitan corroborar los resultados obtenidos en las simulaciones. Esto a partir de diferentes parámetros como humedad o capacidad de campo, etc. Los cuales permitirán la aplicación de modelos semi-distribuidos, que probablemente pueden tener una mejor respuesta para las microcuencas estudiadas.
- Se recomienda en lo posible levantar información en campo, de manera que permita reducir la incertidumbre de los modelos al contar con mejor información de entrada. Por ejemplo, cuantificar la evapotranspiración real,

o los cambios de almacenamiento mediante monitoreo de humedad del suelo en gradientes, contar con trazadores biogeoquímicos, etc.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Abreu, A., Abreu, J., & Iglesias, I. (2015). Interfaz gráfica en Matlab para el Cálculo de criterios de bondad de ajuste. *Ingeniería Matemáticas y Ciencias de la Información*, 3(5), 13-21. <http://dx.doi.org/10.21017/rimci.2016.v3.n5.a1>
- Aguirre, N., & Torres, J. (2014). *Restauración Ecológica De Los Páramos De Jatunhuaycu: Degradación, Sistemas De Referencia Y Estrategias De Restauración*. Fondo para la Protección del Agua-FONAG. <http://www.fonag.org.ec/web/wp-content/uploads/2019/09/16-min.pdf>
- Aguirre, N., Torres, J., & Velasco, P. (2013). *Guía Para La Restauración Ecológica En Los Páramos Del Antisana*. Ministerio del Ambiente. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/07/Gu%C3%ADa-Metodo%C3%B3gica-restauracion-p%C3%A1ramos.pdf>
- Albuja, E., & Tenelanda, D. (2014). *Desarrollo de un modelo conceptual de lluvia - escorrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la Cuenca altoandina del Río Zhurucay*. Trabajo Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Civil. Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/19863>
- Aliaga, I. (2017). *Modelación hidrológica de la cuenca del Río Huallaga aguas arriba del punto de control Santa Lorenza*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ingeniería Agrícola. Departamento Académico de Recursos Hídricos. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2780>
- Alonso, J., Jiménez, M., & Martínez, F. (2017). Optimización Energética en tiempo real de la Programación del Riego mediante Algoritmos Genéticos Multi-objetivo Paralelos. *V Jornada de Ingeniería del Agua*. [https://www.researchgate.net/publication/321026733\\_Optimizacion\\_Energetica\\_en\\_Tiempo\\_Real\\_de\\_la\\_Programacion\\_del\\_Riego\\_mediante\\_Algoritmos\\_Geneticos\\_Multi-objetivo\\_Paralelos](https://www.researchgate.net/publication/321026733_Optimizacion_Energetica_en_Tiempo_Real_de_la_Programacion_del_Riego_mediante_Algoritmos_Geneticos_Multi-objetivo_Paralelos)

- Alvarado, C. (2009). *Caracterización Hidrogeológica de las Vertientes Occidentales del Volcán Antisana como parte de los estudios de glaciares y Páramos frente al cambio climático*. Tesis de pregrado de la Universidad Central del Ecuador. Quito.
- Amaya, L. (2018). *Criterio de Akaike para la selección de modelos con transformaciones*. Trabajo previo a la obtención del Título de Profesional en estadística. Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/12544/2018leonelamaya.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Avelar, H., Gutiérrez, L., Zuñiga, I., & Sánchez, Z. (2019). Diseño e implementación de un algoritmo genético para la predicción de una variable. *Computing Science*, 148(8), 187-197. [https://www.rcs.cic.ipn.mx/2019\\_148\\_8/Diseno%20e%20implementacion%20de%20un%20algoritmo%20genetico%20para%20la%20prediccion%20de%20una%20variable.html](https://www.rcs.cic.ipn.mx/2019_148_8/Diseno%20e%20implementacion%20de%20un%20algoritmo%20genetico%20para%20la%20prediccion%20de%20una%20variable.html)
- Bacca, P., & Burbano, D. (2018). Restauración Ecológica De Disturbios Antrópicos Presentes En La Zona Alto Andina. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 36-50. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183502.90>
- Birkel, C., & Soulsby, C. (2016). Linking tracers, water age and conceptual models to identify dominant runoff processes in a sparsely monitored humid tropical catchment. *Hydrological Processes*, 30(24). DOI:10.1002/HYP.10941
- Birkel, C., Soulsby, C., & Tetzlaff, D. (2014). Developing a consistent process-based conceptualization of catchment functioning using measurements of internal state variables. *Water Resources Research*, 50(4), 3481–3501. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2013WR014925>
- Birkel, C., Tetzlaff, D., Dunn, S., & Soulsby, C. (2009). Towards a simple dynamic process conceptualization in rainfall–runoff models using multi-criteria calibration and tracers in temperate, upland catchments. *Hydrological Processes*, 24(3), 260–275. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.7478>

- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2006a). Hidrología Del Páramo Andino: Propiedades, Importancia Y Vulnerabilidad. *Hydrology and water resources*. <https://paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/ES/Hidroparamo2.pdf>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006b). Human Impact On The Hydrology Of The Andean Paramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., & De Bièvre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean Paramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1-2), 22–30. doi:10.1016/j.foreco.2007.06.035
- Byer, A. (2000). Contemporary Landscape Change in the Huascarán National Park and Buffer Zone, Cordillera Blanca, Peru. *Mountain Research and Development*, 20(1), 52-63. [https://bioone.org/journals/mountain-research-and-development/volume-20/issue-1/0276-4741\\_2000\\_020\\_0052\\_CLCITH\\_2.0.CO\\_2/Contemporary-Landscape-Change-in-the-Huascar%  
c3%a1n-National-Park-and-Buffer/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0052:CLCITH\]2.0.CO;2.full](https://bioone.org/journals/mountain-research-and-development/volume-20/issue-1/0276-4741_2000_020_0052_CLCITH_2.0.CO_2/Contemporary-Landscape-Change-in-the-Huascar%c3%a1n-National-Park-and-Buffer/10.1659/0276-4741(2000)020[0052:CLCITH]2.0.CO;2.full)
- Cabrera, J. (2013). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Cabrera, J. (2017). *Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo*. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil. Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/27315/1/TesisFinal.pdf>
- Cabrera, J., Timbe, L., & Crespo, J. (2019). Evaluation Of The HEC-HMS Model For The Hydrological Simulation Of A Paramo Basin. *DYNA*, 86(210), 338-344. doi: 10.15446/dyna.v86n210.70738
- Calderón, D., Navarrete, C., & Díaz, J. (2016). Ajustes de distribuciones probabilísticas para la variable temperatura media multianual para el departamento de Boyacá (Colombia). *Ingeniería Y Región*, 14(2), 113-124. <https://doi.org/10.25054/22161325.698>

- Campos, D. (2008). Calibración del método racional en ocho cuencas rurales menores de 1,650 km<sup>2</sup> de la región hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. *Agrociencia*, 42(6).  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952008000600002#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20Racional%20es%20una,y%20del%20valor%20de%20C](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952008000600002#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20Racional%20es%20una,y%20del%20valor%20de%20C).
- Cano, J., Correa, A., & Gómez, R. (2018). Solving the Order Batching Problem in Warehouses using Genetic Algorithms. *Información Tecnológica*, 29(6).  
[https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000600235&script=sci\\_arttext](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000600235&script=sci_arttext)
- Cárdenas, M., & Tobón, C. (2017). Recuperación Del Funcionamiento Hidrológico De Ecosistemas De Páramo En Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 403-412.  
<http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v20n2/v20n2a18.pdf>
- Carrillo, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 30-47. doi:10.1016/j.agrformet.2018.11.006
- Chamberling, T. (1965). The Method of Multiple Working Hypotheses. *Science*, 148(3671), 754-759. <http://www.jstor.org/stable/1716334>
- Chicaiza, L., Chontasi, R., Correa, G., & Maldonado, P. (2002). *Caracterización Y Diagnóstico De Los Páramos*. Quito, Ecuador. CAMAREN.  
<https://camaren.org/wp-content/uploads/2021/11/Caracterizacion-y-Diagnostico-de-los-paramos.pdf>
- Chiew, F. (2010). Lumped Conceptual Rainfall-Runoff Models and Simple Water Balance Methods: Overview and Applications in Ungauged and Data Limited Regions. *Geography Compass*, 4(3), 206-225.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2009.00318.x>
- Chuncho, C., & Chuncho G. (2019). Páramos del Ecuador, importancia y afectaciones: Una revisión. *Bosques Latitud Cero*, 9(2), 71-83.  
<https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/686>

- Clark, M., Kavetski, D., & Fenicia, F. (2011). Pursuing The Method Of Multiple Working Hypotheses For Hydrological Modeling. *Water Resources Research*, 47(9). <https://doi.org/10.1029/2010wr009827>
- Contreras, J. (2015). *Análisis Comparativo De Cuatro Modelos De Evapotranspiración De Referencia En La Microcuenca Del Río Quinuas*. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Ambiental. Universidad de Cuenca.  
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21725/1/tesis.pdf>
- Córdova, M., Carrillo, G., & Céleri, R. (2013). Errors In The Estimation Of Reference Evapotranspiration Of An Andean Paramo Region Due To The Use Of Monthly, Daily And Hourly Data. *Aqua-LAC*. 5(2), 14-22.  
<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/AqualacVol5N2-Cordova.pdf>
- Correa, A., Windhorst, D., Tetzlaff, D., Crespo, P., Céleri, R., Feyen, J., & Breuer, L. (2017). Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the Andean Páramo. *Water Resources Research*, 53(7), 5998-6017.  
<https://doi.org/10.1002/2016wr020187>
- Crespo, P. (2012). *Analysis Processes Of South Hydrometric Patricio Of The Rainfall Runoff Of Andean Ecosystems Southern Ecuador: Using Hydrometric, Tracers And Modeling Approaches*. Justus-Liebig-Universität Giessen, Germany. [http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2012/8754/pdf/CrespoSanchezPatricio\\_2012\\_05\\_21.pdf](http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2012/8754/pdf/CrespoSanchezPatricio_2012_05_21.pdf)
- Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Céleri, R., Frede, H., Ram, M., & Breuer, L. (2012). Development of a conceptual model of the hydrologic response of tropical Andean micro-catchments in Southern Ecuador. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9, 2475-2510. doi: 10.5194 / hessd-9-2475-2012
- De Greiff, S., & Rivera, J. (2018). Optimización de portafolios de inversión con costos de transacción utilizando un algoritmo genético mutiobjetivo: caso



- aplicado a la Bolsa de Valores de Colombia. *Estudios Gerenciales*, 34(146).  
<https://doi.org/10.18046/j.estger.2018.146.2812>
- Devia, G., Ganasri, B., & Dwarakish, G. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Díaz, M. (2002). *Geoestadística Aplicada*. Instituto de Geofísica UNAM.  
<https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-de-cajamarca/teoria-de-la-educacion/geoestadistica-aplicada-teoria-y-ejemplos/15485772>
- Díaz, M., Navarrete, J., & Suárez, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-49932005000200008](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932005000200008)
- Domínguez, J., Rodríguez, F., Ortega, J., & Flores, A. (2009). Model selection, genetic parameters and genetic trends in national genetic evaluations of Brangus and Salers cattle. *Agrociencia*, 43(2).  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952009000200003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952009000200003&script=sci_arttext)
- Dwarakish, G., & Ganasri, B. (2015). Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches. *Cogent Geoscience*, 1(1). <https://doi.org/10.1080/23312041.2015.1115691>
- Elliot, L., & Brook, B. (2007). Revisiting Chamberlin: Multiple Working Hypotheses the 21<sup>st</sup> Century. *BioScience*, 57(7), 608-614.  
<https://doi.org/10.1641/B570708>
- Engelhardt, I., Aguinaga, J., Mikat, H., Schuth, C., & Liedl, R. (2014). Complexity vs. Simplicity: Groundwater Model Ranking Using Information Criteria. *Groundwater*, 52 (4).
- Esquivel, G., Nevarez, M., Velásquez, M., Sánchez, I., & Bueno, P. (2016). *Modelación Hidrológica De Una Cuenca Del Norte Árido De México Y Su Respuesta A Cambios Ambientales*. II Congreso Nacional de Riego y Drenaje 2016, Chapingo, Edo. de México.



<http://www.riego.mx/congresos/comeii2016/ponencias/extenso/COMEII-16016.pdf>

- Fenicia, F., Savenije, H., Matgen, P., & Pfister, L. (2007). A comparison of alternative multiobjective calibration strategies for hydrological modeling. *Water Resources Research*, 43(3), 1–16. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006WR005098>
- Garavito, L. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *INGENIARE, Universidad Libre-Barranquilla*, 11(19), 127-136. <https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/ingeniare/article/view/530/413>
- Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, J., Dorado, J., & Pazos, A. (2010). *Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética*. Universidad de Coruña. Coruña, España. Editorial: Galego. [https://www.researchgate.net/publication/290392282\\_Introduccion\\_a\\_los\\_Algoritmos\\_Geneticos\\_y\\_la\\_Programacion\\_Genetica](https://www.researchgate.net/publication/290392282_Introduccion_a_los_Algoritmos_Geneticos_y_la_Programacion_Genetica)
- González, A., Alvarez, P., González, M., & Aguirre, Z. (2016). Influence of the land cover on the runoff coefficients at Catamayo River Basin, Ecuador. *CEDAMAZ Revista de la Dirección de investigación*, 6, 50-59. [https://www.researchgate.net/publication/313246215\\_Influence\\_of\\_the\\_land\\_cover\\_on\\_the\\_runoff\\_coefficients\\_at\\_Catamayo\\_River\\_Basin\\_Ecuador](https://www.researchgate.net/publication/313246215_Influence_of_the_land_cover_on_the_runoff_coefficients_at_Catamayo_River_Basin_Ecuador)
- Gualco, L. (2018). *Aplicación de Balance de Energía para Analizar el Fortalecimiento Atmosférico en la Producción de Caudales en un Glaciar Tropical. Caso de Estudio: Glaciar 12 del Volcán Antisana*. Trabajo Previo a la Obtención del Título de Físico. Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19306?mode=full>
- Gupta, H., Kling, H., Yilmaz, K., & Martínez, G. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91. [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169409004843?casa\\_token=igzq\\_0Xs5b0AAAAA:K-CIBVjq9SxfipsLkWlvPiLCPtGx\\_6p8sTQTOenVnMYVUWkFZ63RbbYOalzpOJw4gIHcP3Xox7lv](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169409004843?casa_token=igzq_0Xs5b0AAAAA:K-CIBVjq9SxfipsLkWlvPiLCPtGx_6p8sTQTOenVnMYVUWkFZ63RbbYOalzpOJw4gIHcP3Xox7lv)

- Guzmán, A., Morales, E., & Balart, E. (2014). Individual growth estimation in elasmobranchs: the multi-model inference approach, *Hidrobiológica*, 24 (2). [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-88972014000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972014000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Harrigan, S., Murphy, C., Hall, J., Wilby, R., & Sweeney, J. (2014). Attribution Of Detected Changes In Streamflow Using Multiple Working Hypotheses. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(5), 1935 - 1952. <https://pdfs.semanticscholar.org/6eff/fb3432f0ca795e862a89ddb5baedc55f4491.pdf>
- Hernández, A., Gómez, M., Cabrera, E., Ramos, L., & Maiyourathan, K. (2012). La Calibración de las Propiedades Hidrogeológicas en Modelos de Acuíferos y su Incertidumbre. *Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*. [https://www.researchgate.net/publication/277954847\\_La\\_calibracion\\_de\\_las\\_propiedades\\_hidrogeologicas\\_en\\_modelos\\_de\\_acuiferos\\_y\\_su\\_incertidumbre](https://www.researchgate.net/publication/277954847_La_calibracion_de_las_propiedades_hidrogeologicas_en_modelos_de_acuiferos_y_su_incertidumbre)
- Herrera, C., Campos, J., & Carrillo, F. (2017). Estimation rainfall missing values by linear regression method: Case study Guadalupe Basin, Baja California, Mexico. *Investigación y Ciencia*. 25(11), 34-44. <https://www.redalyc.org/journal/674/67452917005/html/>
- Hofstede, R. (1997). *La Importancia Hídrica del Páramo y Aspectos de su Manejo*. Conferencia Electrónica “Estrategias para la Conservación y Desarrollo Sostenible de Páramos y Punas en la Ecorregión Andina: Experiencias y Perspectivas”. [http://infoandina.org/infoandina/sites/default/files/publication/files/La\\_Importancia\\_H\\_drica\\_del\\_P\\_amo\\_y\\_Aspectos\\_de\\_su\\_Manejo.pdf](http://infoandina.org/infoandina/sites/default/files/publication/files/La_Importancia_H_drica_del_P_amo_y_Aspectos_de_su_Manejo.pdf)
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., Vásquez, A., & Cerra, M. (2014). Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema Páramo. *UICN*, Quito, Ecuador.

- IMHEA. (2013). Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos. <http://imhea.org/monitoreo/sitios-de-monitoreo-imhea/jatunhuaycu-2/>
- Játiva, H. (2018). *Caracterización Hidrológica de las Microcuencas 1, 2 y 3 de la Unidad Hidrográfica Jatunhuaycu*. Trabajo de Investigación Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Geología. Universidad Central del Ecuador.
- Jumbo, Y. (2017). *Definición De Perímetros De Protección En Cuencas Hidrográficas Mediante Modelación Hidrológica Conceptual: Caso De La Cuenca Jatunhuaycu En Las Cercanías Del Volcán Antisana*. Proyecto Previo a la Obtención del Título de Máster en Recursos Hídricos. Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19144/1/CD-8526.pdf>
- Jung, D., Choi, Y., & Kim, J. (2017). Multiobjective Automatic Parameter Calibration of a Hydrological Model. *Water*, 9(3), 187. <https://doi.org/10.3390/w9030187>
- Khu, S., & Madsen, H. (2005). Multiobjective calibration with Pareto preference ordering: An application to rainfall-runoff model calibration. *Water Resources Research*, 41. doi:10.1029/2004WR003041
- Kirchner, J. (2009). Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward. *Water Resources Research*. 45(2). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008WR006912>
- Knoben, W., Freer, J., & Woods, R. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>
- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13–24. doi:10.1080/02626668609491024
- Lee, H., McIntyre, N., Wheater, H., & Young, A. (2005). Selection of conceptual models for regionalisation of the rainfall-runoff relationship. *Journal of*

- Hydrology*, 312(1-4).  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169405000855>
- Llambí, L., Soto, A., Céleri, R., De Bièvre, B., Ocho, B., & Borja, P. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de Páramos*. Proyecto Páramo Andino. Monsalve Moreno. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56479.pdf>
- Luteyn, J. (s.f). Introducción al ecosistema de Páramo. *Missouri Botanical Garden*.  
[http://www.mobot.org/mobot/research/paramo\\_ecosystem/introduction.shtml](http://www.mobot.org/mobot/research/paramo_ecosystem/introduction.shtml)
- Maffei, M. (2012). Performance of Hargreaves equation in the estimating of reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) in a zone of Andean paramo in Trujillo state, Venezuela. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 29, 378-394.  
[https://www.researchgate.net/profile/Miguel-Maffei/publication/287434753\\_Performance\\_of\\_Hargreaves\\_equation\\_in\\_the\\_estimating\\_of\\_reference\\_evapotranspiration\\_ET\\_o\\_in\\_a\\_zone\\_of\\_Andean\\_paramo\\_in\\_Trujillo\\_state\\_Venezuela/links/57ad228f08ae42ba52b29a69/Performance-of-Hargreaves-equation-in-the-estimating-of-reference-evapotranspiration-ET-o-in-a-zone-of-Andean-paramo-in-Trujillo-state-Venezuela.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Miguel-Maffei/publication/287434753_Performance_of_Hargreaves_equation_in_the_estimating_of_reference_evapotranspiration_ET_o_in_a_zone_of_Andean_paramo_in_Trujillo_state_Venezuela/links/57ad228f08ae42ba52b29a69/Performance-of-Hargreaves-equation-in-the-estimating-of-reference-evapotranspiration-ET-o-in-a-zone-of-Andean-paramo-in-Trujillo-state-Venezuela.pdf)
- Magaña, F., Bâ, K., & Guerra, V. (2013). Estimation Of Flood Hydrograph Using Deterministic Modeling And Weather Radar Rainfall. *AGROCIENCIA*. 47(8)  
<http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n8/v47n8a1.pdf>
- Martínez de Azagra, A. (2006). Particularización Al Método De Los Coeficientes De Escorrentía.  
<http://www.oasification.com/archivos/Coeficientes%20de%20escorrent%20%ADa.pdf>
- Martínez, C. (2014). *Impacto Del Cambio Climático En La Hidrología De La Cuenca Del Río Ica*. Tesis Para Obtener El Título De: Ingeniero Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina.  
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1849/P10.M378-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martínez, D., Albín, J., Cabaleiro, J., Peña, T., Rivera, F. & Blanco, V., (2009). El Criterio de Información de Akaike en la Obtención de Modelos Estadísticos

de Rendimiento. *XX Jornadas de Paralelismo.*

[https://www.researchgate.net/profile/Tomas-](https://www.researchgate.net/profile/Tomas-Pena/publication/236279245_El_criterio_de_informacion_de_Akaike_en_la_obtencion_de_modelos_estadisticos_de_Rendimiento/links/58904fa3aca272bc14be3600/El-criterio-de-informacion-de-Akaike-en-la-obtencion-de-modelos-estadisticos-de-Rendimiento.pdf)

[Pena/publication/236279245\\_El\\_criterio\\_de\\_informacion\\_de\\_Akaike\\_en\\_la\\_obtencion\\_de\\_modelos\\_estadisticos\\_de\\_Rendimiento/links/58904fa3aca272bc14be3600/El-criterio-de-informacion-de-Akaike-en-la-obtencion-de-modelos-estadisticos-de-Rendimiento.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Tomas-Pena/publication/236279245_El_criterio_de_informacion_de_Akaike_en_la_obtencion_de_modelos_estadisticos_de_Rendimiento/links/58904fa3aca272bc14be3600/El-criterio-de-informacion-de-Akaike-en-la-obtencion-de-modelos-estadisticos-de-Rendimiento.pdf)

Mathevet, T., Michel, C., Andréassian, V., & Perrin, C. (2006). A bounded version of the Nash-Sutcliffe criterion for better model assessment on large sets of basins. *PUBLICACIÓN DE IAHS*, 307, 211. <https://iahs.info/uploads/dms/13614.21--211-219-41-MATHEVET.pdf>

Mena, P., Josse, C., & Medina, G. (2000). *Los Suelos del Páramo*. Grupo de Trabajo en Páramos del Ecuador (GTP). <https://es-static.z-dn.net/files/d5c/a9751b4293c82c26ef428db85b953254.pdf>

Mena, S. (2010). *Evolución de la Dinámica de los Escurrimientos en Zonas de Alta Montaña: Caso del Volcán Antisana*. Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniera Ambiental. Universidad de Cuenca. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2503/1/CD-3253.pdf>

Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C., & Ortiz, M. (2002). Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. *Investigaciones Geográficas*, 1(47), 36–58. <https://doi.org/10.14350/rig.59164>

Mora, D., Campozaño, L., Cisneros, F., Wyseure, G., & Willems, P. (2014). Climate Changes Of Hydrometeorological And Hydrological Extremes In The Paute Basin, Ecuadorean Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 631–648. <https://doi.org/10.5194/hess-18-631-2014>

Moradkhani H., & Sorooshian S. (2009) General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis. *Hydrological Modelling and the Water Cycle. Water Science and Technology Library*, 63, 1-24. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-77843-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77843-1_1)

- Mosquera, G. (2019). *Cápsula Ecohidrología Tropical: Desafíos Y Oportunidades*. Universidad de Cuenca. <https://www.ucuenca.edu.ec/component/content/article/233-espanol/investigacion/blog-de-ciencia/1448-ecohidrologia>
- Mosquera, G., Lazo, P., Célleri, R., Wilcox, B., & Crespo, P. (2015). Runoff From Tropical Alpine Grasslands Increases With Areal Extent Of Wetlands. *CADENA*, 125, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>
- Murillo, L., Figueroa, G., & Guerrero, O. (2016). Identificación de parámetros de un modelo térmico para un motor trifásico de inducción usando algoritmos genéticos. *Tecnología en Marcha*, 29(2). <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i5.2583>
- Noguera, R., Ortiz, D., & Marin, L. (2011). Comparación de modelos matemáticos para describir curvas de lactancia en cabras Sannen y Alpina. *Livestock Research for Rural Development*, 23(9). <https://lrrd.cipav.org.co/lrrd23/9/nogu23196.htm>
- Ocampo, O., & Vélez, J. (2013). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43-58. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75036967003>
- Ochoa, B., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C., Acosta, L., Villazón, M., Guallpa, M., Gil, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Ochoa, B., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C., Acosta, L., Villazón, M., Guallpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., & Arias, S. (2020). Impactos del uso del suelo sobre la respuesta hidrológica de cuencas andinas. *Forest Trends*. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2020/08/Impactos-del-uso-del-suelo-sobre-la-respuesta-hidrol%C3%B3gica-de-cuencas-andinas.pdf>



- Ochoa, B., Tenelada, D., & Ochoa, E. (2019). Generación Y Actualización De Insumos Y Herramientas Hidroinformáticas E Hidro-Económicas Para Apoyar La Toma De Decisiones En La Planificación Hídrica del FONAG.
- Oliva, G., Noy, M., & Cibils, A. (2001). Fundamentos de ecología de pastizales. Capítulo 3. *El Ambiente en la Patagonia Austral*. [https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-capitulotme\\_3.pdf](https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-capitulotme_3.pdf)
- Orozco, S. (2017). Severe Yellowing Outbreaks in Tomato in Spain Associated with Infections of Tomato chlorosis virus. *Accelerating the world's research*. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31356760/Teoria\\_ag-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1652310396&Signature=PtR0HQf~ba2bsfWbLrReV2fUFzt-2olHKPwJhOyD~sRpl5e3LoHnUwXpw0dU5OtopYOeM~Zyv01knYjSncTsMpa-8MsjnysfueQzGd5hKzo6cevdzatO2V6BvLUaZE0C4XFx4tqdA6MLVHT5bxdIGv9ZEYhFgbgZbvs4kQIMQhWarjzjhiU4-TxtgZDRodgo3vEx1559gyJ-eQsig79QA2S9qNjhnjwipPgyLDEuMJS3iUugNn1hF~scMb5bqpU7eXI0L7wbW9WYogCRCYtnhr0c31BhT7YEMbXYkJBMSwqVly75JX~qq1lxltW33bhGdy26Rlty6fBQo9rtPTzjw\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/31356760/Teoria_ag-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1652310396&Signature=PtR0HQf~ba2bsfWbLrReV2fUFzt-2olHKPwJhOyD~sRpl5e3LoHnUwXpw0dU5OtopYOeM~Zyv01knYjSncTsMpa-8MsjnysfueQzGd5hKzo6cevdzatO2V6BvLUaZE0C4XFx4tqdA6MLVHT5bxdIGv9ZEYhFgbgZbvs4kQIMQhWarjzjhiU4-TxtgZDRodgo3vEx1559gyJ-eQsig79QA2S9qNjhnjwipPgyLDEuMJS3iUugNn1hF~scMb5bqpU7eXI0L7wbW9WYogCRCYtnhr0c31BhT7YEMbXYkJBMSwqVly75JX~qq1lxltW33bhGdy26Rlty6fBQo9rtPTzjw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)
- Oseguera, L. (2018). *Análisis comparativo de modelos hidrológicos para la evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca del Lago de Cuitzeo*. Trabajo previo a la obtención del Título de Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB\\_UMICH/4651/FB-M-2018-1550.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/4651/FB-M-2018-1550.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Paik, K., Kim, J., Kim, H., & Lee, D. (2005). A conceptual rainfall-runoff model considering seasonal variation. *Hydrological Processes*, 19(19), 3837-3850. <https://doi.org/10.1002/hyp.5984>
- Ramos, S., Bautista, R., & Valdez, A. (2010). Statistical study of the correlation between atmospheric pollutants and meteorological variables in northern Chiapas, Mexico. *Universidad y Ciencia*. 26(1). [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-29792010000100005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-29792010000100005&script=sci_arttext)

- Sánchez, J. (2017). *Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación-Escorrentía*. Universidad de Salamanca. <https://www.studocu.com/es/document/universidad-de-salamanca/introduccion-a-la-geologia/hidrologia-superficial-relacion-precipitacion-escorrentia/16876072>
- Santos, L., Thirel, G., & Perrin, C. (2018). Technical note: Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(8), 4583-4591. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4583-2018>
- Saucedo, M. (2014). *Modelación Hidrológica Precipitación-Escorrentía, Usando El Modelo De Thomas Y Algoritmos Genéticos En La Subcuenca Del Rio Quilvire – Tacna*. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo-Geotécnico. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna. [http://redi.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/2805/397\\_2014\\_saucedo\\_oxacopa\\_mm\\_fiag\\_ingenieria\\_geologica\\_geotecnia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://redi.unjbg.edu.pe/bitstream/handle/UNJBG/2805/397_2014_saucedo_oxacopa_mm_fiag_ingenieria_geologica_geotecnia.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sarmiento, L. (2000). Water Balance and Soil Loss Under Long Fallow Agriculture in the Venezuela Andes. *Mountain Research and Development*, 20(3), 246-253. [https://bioone.org/journals/mountain-research-and-development/volume-20/issue-3/0276-4741\(2000\)020%5b0246%3aWBASLU%5d2.0.CO%3b2/Water-Balance-and-Soil-Loss-Under-Long-Fallow-Agriculture-in/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0246:WBASLU\]2.0.CO;2.full](https://bioone.org/journals/mountain-research-and-development/volume-20/issue-3/0276-4741(2000)020%5b0246%3aWBASLU%5d2.0.CO%3b2/Water-Balance-and-Soil-Loss-Under-Long-Fallow-Agriculture-in/10.1659/0276-4741(2000)020[0246:WBASLU]2.0.CO;2.full)
- Shen, H., Tolson, B. A., & Mai, J. (2022). Time to update the split-sample approach in hydrological model calibration. *Water Resources Research*, 58 (3). <https://doi.org/10.1029/2021WR031523>
- Soria, I. (2016). *Evaluación De La Calidad Ecológica Del Río Jatunhuayco En La Zona Asociada A La Captación Jatunhuayco (EPMAPS) Utilizando Comunidades De Macroinvertebrados Como Indicadores De La Calidad Del Agua*. Proyecto Previo A La Obtención Del Título De Ingeniero Ambiental.



- Universidad de Cuenca.  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16736/1/CD-7332.pdf>
- Toledo, C. Muñoz, E., & Zambrano-Bigiarini, M. (2015). Comparison of Stationary and Dynamic Conceptual Models in a Mountainous and Data-Sparse Catchment in the South-Central Chilean Andes. *Advances in Meteorology*, 2015, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2015/526158>
- Torres, J. (2014). *Diseño De Un Modelo De Restauración Ecológica Aplicable A Los Ecosistemas De Páramos Degradados En El Ecuador*. Tesis De Grado Previa A La Obtención Del Título De: Ingeniero Forestal. Universidad Nacional de Loja. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/12183/1/Jonathan%20srael%20Torres%20Celi.pdf>
- Torres, S. 2016. Parámetros de Control de la Dinámica Hidrológica del Páramo de Antisana-Ecuador. Tesis de Maestría de Bosques y Conservación Ambiental. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Torres, S., & Proaño, C. (2018). Componentes del Balance Hídrico en los Páramos Jatunsacha, Ecuador. *La Granja*, 28(2). 55-66. <https://doi.org/10.17163/lgr.n28.2018.04>
- Valencia, J. & Tobón, C. (2017). Influencia De La Vegetación En El Funcionamiento Hidrológico De Cuencas De Humedales De Alta Montaña Tropical. *Ecosistemas*, 26(2), 10-17. doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.02
- Valencia, R., Serrano, D., & Galárraga, R. (2014). Cambios de uso del suelo en cuencas alto andinas y consecuencias en la oferta hídrica. Caso de estudio microcuenca del río Blanco, páramos del Nevado Cayambe, Ecuador. *Revista EPN*, 34(1).
- Vanacker, V. (2021). *Soil chemical weathering in High Andean Ecosystems: the role of soil hydrology in weathering processes*. Earth and Life Institute, UC Louvain, Bélgica. <https://nucleos.uach.cl/noticias/post.php?s=2021-12-09-discutieron-sobre-quimica-del-suelo-en-ecuador>
- Vargas, O. (2013). *Disturbios en los Páramos andinos*. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia.

- [https://www.researchgate.net/profile/Orlando\\_Vargas2/publication/260438569\\_Disturbios\\_en\\_los\\_paramos\\_andinos/links/0a85e53156625db4e1000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Orlando_Vargas2/publication/260438569_Disturbios_en_los_paramos_andinos/links/0a85e53156625db4e1000000.pdf)
- Wang, Q., Wang, L., Huang, W., Wang, Z., Liu, S., & Savic, D. (2019). Parameterization of NSGA-II for the Optimal Design of Water Distribution Systems. *Water*, 11(5), 971. <https://doi.org/10.3390/w11050971>
- Wang, Y. & Q. Liu. 2006. Comparison of Akaike information criterion (AIC) and Bayesian information criterion (BIC) in selection of stock–recruitment relationships. *Fisheries Research*, 77(2), 220-225. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165783605002870>
- Weber, J., Dasso, C., & Joquera, E. (2010). Desarrollo y Calibración de un Modelo Hidrológico de Simulación Mixta. *Mecánica Computacional*, 29, 4013-4037. <http://venus.ceride.gov.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/3280/3203>
- Yáñez, D., Valencia, N., Carvajal, L., Aguas, W., & López, J. (2019). Estructura de la Comunidad de Macroinvertebrados del Río Jatunhuayco, EMAPS, Reserva Ecológica del Antisana, Sistema de captación de agua de Quito. 14, 21-34. [https://www.researchgate.net/publication/337926168\\_Estructura\\_de\\_la\\_comunidad\\_de\\_Macroinvertebrados\\_del\\_Rio\\_Jatunhuayco\\_EPMAPS\\_Reserva\\_Ecologica\\_Antisana\\_sistema\\_de\\_captacion\\_del\\_agua\\_de\\_Quito](https://www.researchgate.net/publication/337926168_Estructura_de_la_comunidad_de_Macroinvertebrados_del_Rio_Jatunhuayco_EPMAPS_Reserva_Ecologica_Antisana_sistema_de_captacion_del_agua_de_Quito)
- Zeybek, M. (2018). Nash-Sutcliffe Efficiency Approach for Quality Improvement. *Journal of Applied Mathematics and Computation*, 2(11), 495-503. DOI: 10.26855/jamc.2018.11.001
- Zhang, Rong, Moreira, M., & Corte-Real, J. (2016). Multi-objective calibration of the physically based, spatially distributed SHETRAN hydrological model. *Journal of Hydroinformatics*, 18(3), 428–445. <https://doi.org/10.2166/hydro.2015.219>
- Zhang, X., Srinivasan, R., & Van Liew, M. (2010). On the use of multi-algorithm, genetically adaptive multi-objective method for multi-site calibration of the SWAT model. *Hydrological Processes*, 24(8), 955-969. <https://doi.org/10.1002/hyp.7528>

Zúñiga, R., Muñoz, E., & Arumi, J. (2012). Study of the hydrological processes of the Río Diguillín watershed. *Obras y Proyectos*, 11, 69-78.  
[https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-28132012000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=en](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132012000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=en)