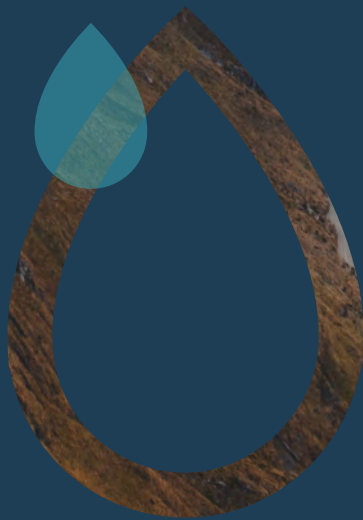


# **CUBHIC 2.0:** DOCUMENTO METODOLÓGICO: **CALIBRACIÓN**

---



## **Infraestructura Natural**

para la Seguridad Hídrica





#### **Autoría:**

José Cuadros-Adriazola<sup>1</sup>

Boris F. Ochoa-Tocachi<sup>2,3</sup>

Vivien Bonnesoeur<sup>1</sup>

---

**Producción y cuidado de edición:** Gabriel Rojas Guillén<sup>1</sup>

**Corrección de estilo:** Luis Rodríguez Pastor

**Diseño y diagramación:** Diana La Rosa

**Imagen de portada:** David Carlos Bonifacio Orizano

---

**Editado por:** Forest Trends Association

RUC: 20606691204

Av. Ricardo Palma 698, Miraflores

Lima, Peru

Ira edición, agosto 2022

---

#### **Afiliaciones:**

1. CONDESAN; Lima, Perú

2. Forest Trends; Washington D. C., Estados Unidos

3. ATUK Consultoría Estratégica; Cuenca, Ecuador

---

*Esta publicación es posible gracias al generoso apoyo del pueblo de los Estados Unidos de América a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá. Los contenidos son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente las opiniones de USAID, ni del gobierno de los Estados Unidos de América ni del Gobierno de Canadá.*

## Acerca de CUBHIC 2.0



La metodología CUBHIC (Cuantificación de Beneficios Hidrológicos de Intervenciones en Cuencas) es una innovación del Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica que ofrece una metodología práctica para producir estimaciones cuantitativas de los beneficios hidrológicos de proyectos de infraestructura natural. La versión original de CUBHIC fue desarrollada en colaboración con la firma Kieser & Associates y publicada en 2019<sup>1</sup>, considerando las seis intervenciones sobre la infraestructura natural más comunes en el contexto peruano. Esta versión 2.0 de CUBHIC construye sobre el original, presentando varias actualizaciones, cambios y mejoras que hemos encontrado útiles en su aplicación práctica, incluyendo mejoras en los cálculos, en las Calculadoras de Beneficios y en la presentación<sup>2</sup>.

Este documento presenta una metodología para la calibración de CUBHIC 2.0, la cual ha sido implementada en las seis Calculadoras de Beneficios<sup>3</sup> compatibles con Microsoft Excel o similares. Las calculadoras CUBHIC 2.0 acompañan por separado a este documento para aplicaciones de usuario con casos de prueba específicos. Las calculadoras

están implementadas con interfaces sencillas<sup>4</sup> que permiten a las y los usuarios ingresar fácilmente datos de campo locales para simular instantáneamente los impactos de sus intervenciones. Las calculadoras incluyen parámetros predeterminados que se pueden calibrar o modificar utilizando información de monitoreo en el sitio del proyecto. De manera recíproca, la aplicación de la metodología CUBHIC 2.0 permite informar cuáles podrían ser los datos más críticos para diseñar sistemas de monitoreo relevantes en el sitio del proyecto.

Las ecuaciones utilizadas en este documento buscan ofrecer un resultado confiable, al tiempo que se busca minimizar la cantidad de datos de entrada requeridos. Si bien existen métodos de modelación hidrológica más complejos para simular los procesos hidrológicos y el transporte de sedimentos, por lo general estos requieren mediciones de campo, una calibración intensiva del modelo y una extensa experiencia del equipo modelador. CUBHIC 2.0 ofrece una versión simplificada pero robusta de modelación para el uso de un público interesado amplio.

---

<sup>1</sup> Foster, M. E., Chen, D., Kieser, M. S., & McLaughlin, D. B. (2019). CUBHIC: Metodologías de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas. Forest Trends, Lima, Perú.

<sup>2</sup> Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., Bonnesoeur, V., Román, F., & Gammie, G. (2022). CUBHIC 2.0: Presentación de metodología. Forest Trends, Lima, Perú.

<sup>3</sup> Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., & Bonnesoeur, V. (2022). CUBHIC 2.0: Calculadoras de Beneficios. Forest Trends, Lima, Perú.

<sup>4</sup> Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., & Bonnesoeur, V. (2022). CUBHIC 2.0: Manual de uso. Forest Trends, Lima, Perú.

# Calibración del modelo

La calibración es un proceso de ensayo y error donde se prueba una configuración de parámetros del modelo y se contrastan los resultados frente a una lista de datos observados y considerados como reales<sup>5</sup>. Este proceso se lleva a cabo en tres pasos principales: 1) definir los parámetros de entrada, 2) correr el modelo utilizando dichos

parámetros para generar resultados de simulación y 3) analizar el desempeño del modelo<sup>6</sup>. Los pasos 1 y 2 han sido abordados en el capítulo anterior. A continuación, abordaremos el tercer paso, siguiendo las recomendaciones dadas en la *Guía de Modelación Hidrológica para la Infraestructura Natural*, publicada por el proyecto INSH<sup>5</sup>.

## Ecuación de balance hídrico

En CUBHIC 2.0 se puede realizar una calibración del escenario base utilizando los datos hidroclimáticos observados. La herramienta de calibración en las Calculadoras de Beneficios se encuentra en la pestaña **Entradas** (Figura 1).

**Figura 1.** Ejemplo de interfaz de calibración en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

Calibración			
Indicadores de desempeño	Indicador	Umbral	Aceptabilidad
Periodo de calentamiento (días)		60	
NSE	0.83	0.5	SI
RMSE (mm)	0.36	0.4	SI
RSR	0.42	0.7	SI
PBIAS (%)	-1%	25%	SI
KGE	0.66	0.5	SI
OF	0.68	1.10	SI

Fuente: Elaboración propia.

<sup>5</sup> Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., Arapa Guzmán, E., Aste Cannock, N., Ochoa-Tocachi, E., & Bonnesoeur, V. (2022). Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural. Forest Trends, Lima, Perú.

<sup>6</sup> Pianosi, F., Sarrazin, F., & Wagener, T. (2015), A Matlab Toolbox for Global Sensitivity Analysis. Environmental Modelling & Software, 70: 80-85.

El conjunto de resultados simulados se analiza para medir su desempeño frente a un conjunto de datos observados ingresados en la pestaña **Observaciones** (Figura 2). Idealmente, se cuenta con un dato observado por cada dato simulado para la comparación. Esta comparación es cuantificada mediante indicadores de desempeño. Existen varios indicadores que pueden servir para medir el desempeño de las simulaciones (Figura 1). Los indicadores usados aquí son funciones objetivo ampliamente utilizadas en la modelación hidrológica<sup>7</sup>.

**Figura 2.** Ejemplo de interfaz de ingreso de datos climáticos en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

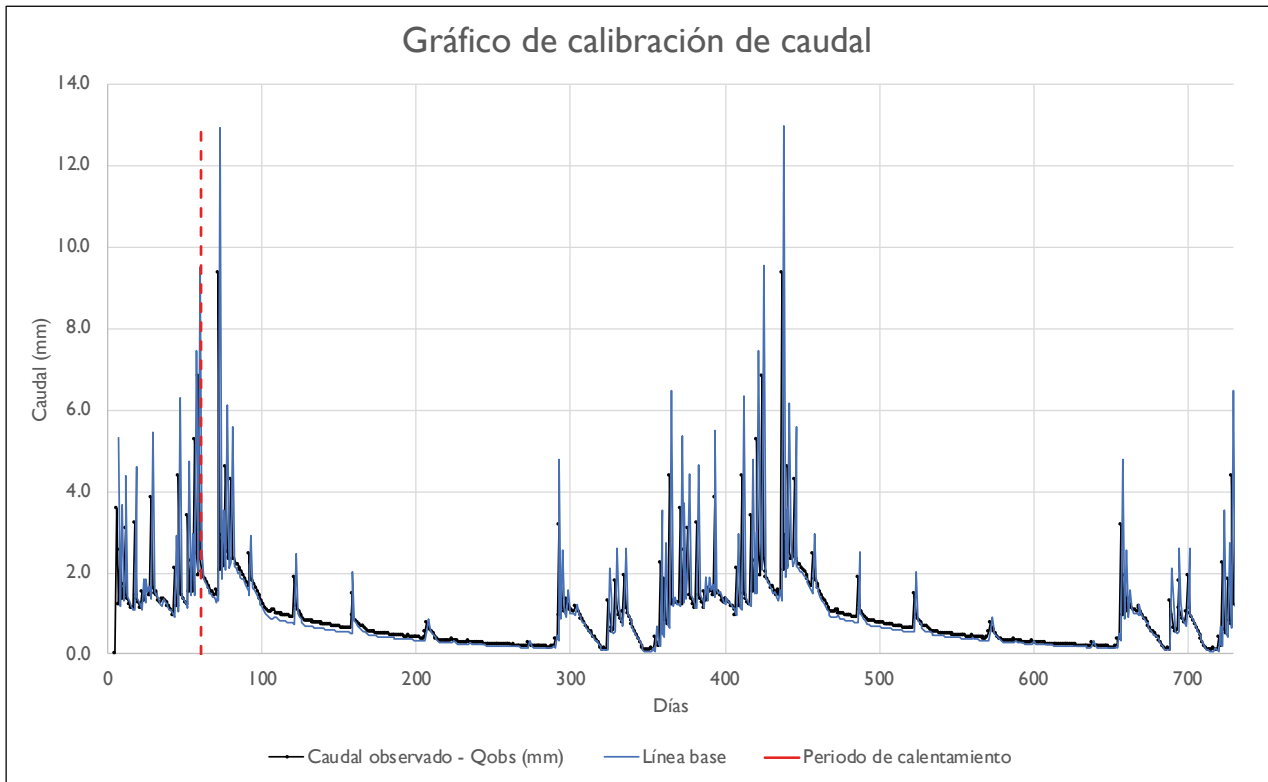
Observaciones					
Día	Temperatura máxima - $T_{max}$ (°C)	Temperatura mínima - $T_{min}$ (°C)	Precipitación - $P$ (mm)	Evapotranspiración - $ET$ (mm)	Caudal observado - $Q_{obs}$ (mm)
1	19.8	8.0	20.1	2.6	4.6
2	20.0	7.5	0.8	2.6	1.0
3	21.0	8.1	15.5	2.6	3.1
4	19.5	8.9	2.3	2.6	1.1
5	20.6	6.9	9.6	2.6	1.7
6	18.5	8.4	17.1	2.6	3.7
7	19.2	8.4	0.7	2.6	1.2
8	19.0	9.4	0.0	2.6	1.2
9	20.4	7.8	0.0	2.6	1.1
10	20.5	7.8	0.1	2.6	1.1
11	19.5	7.0	2.9	2.5	1.1
12	15.5	9.2	17.7	2.5	4.0
13	21.2	6.5	0.4	2.6	1.2
14	18.0	9.5	0.4	2.6	1.2
15	18.2	9.2	0.5	2.6	1.2

Fuente: Elaboración propia.

Cuando existen varios criterios de evaluación de desempeño, el ejercicio se convierte en un “análisis de optimización múltiple”. Si este desempeño no es satisfactorio, el proceso se repite cambiando el valor de uno o varios de los parámetros y evaluando el desempeño del modelo en la pestaña **Entradas**. Un ejemplo de esta comparación presentada en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0 puede ser visualizada en la Figura 2.

<sup>7</sup>Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3): 885-900.

**Figura 3.** Gráfico de calibración de caudal en CUBHIC 2.0.



Fuente: Elaboración propia.

La **eficiencia de Nash-Sutcliffe**<sup>8</sup> es una comparación entre la serie de tiempo de datos observados  $Q_{obs}$  y los datos simulados  $Q_{sim}$ :

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs(t)} - Q_{sim(t)})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs(t)} - \mu_{obs})^2} \right]$$

**Donde:**

- NSE: Eficiencia de Nash-Sutcliffe (adimensional).
- $Q_{obs(t)}$ : Caudal observado en el paso de tiempo  $t$  (mm).
- $Q_{sim(t)}$ : Caudal simulado en el paso de tiempo  $t$  (mm).
- $\mu_{obs}$ : Promedio del caudal observado (mm).
- $t$ : Paso de tiempo (p. ej., día).
- $n$ : Número de datos observados.

<sup>8</sup> Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 27: 282-290.

El valor óptimo de NSE es uno (1) y el peor valor tiende a los números negativos ( $-\infty$ ). Es decir, un valor de NSE de 1 implica un ajuste perfecto entre los datos observados y los datos simulados. El valor de cero (0) sirve como indicador de que las simulaciones son comparables con el promedio de los datos observados ( $\mu_{obs}$ ). Es decir, un valor de NSE de 0 implica que las simulaciones no son mejores que si simplemente se hubiese tomado el promedio de los datos observados. Un modelo hidrológico se considera satisfactorio si  $NSE \geq 0.50$ .

La **raíz del error cuadrático medio**<sup>9</sup> estima el error entre la serie de tiempo de datos observados  $Q_{obs}$  y los datos simulados  $Q_{sim}$ :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs(t)} - Q_{sim(t)})^2}{n}}$$

**Donde:**

RMSE: Raíz del error cuadrático medio (mm).

El valor óptimo de RMSE es cero (0) y el peor valor tiende a los números positivos ( $+\infty$ ). Es decir, un valor de RMSE de 0 implica un ajuste perfecto entre los datos observados y los datos simulados. No existe un valor umbral estándar, pero en general un modelo hidrológico se considera satisfactorio mientras más pequeño sea RMSE.

La **relación entre RMSE y la desviación estándar**<sup>14</sup> combina el RMSE con la desviación estándar de los datos observados ( $\sigma_{obs}$ ). Esto permite normalizar el indicador y otorgar rangos relativos que se pueden considerar satisfactorios:

$$RSR = \frac{RMSE}{\sigma_{obs}} = \frac{\left[ \sum_{t=1}^n (Q_{obs(t)} - Q_{sim(t)})^2 \right]}{\left[ \sum_{t=1}^n (Q_{obs(t)} - \mu_{obs})^2 \right]}$$

**Donde:**

RSR: Relación entre RMSE y la desviación estándar (adimensional).

$\sigma_{obs}$ : Desviación estándar del caudal observado (mm).

<sup>9</sup>Singh, J., Knapp, H.V., Arnold, J., & Demissie, M. (2004). Hydrologic modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 41: 343-360.



El valor óptimo de RSR es cero (0) y el peor valor tiende a los números positivos (+inf). Es decir, un valor de RSR de 0 implica un ajuste perfecto entre los datos observados y los datos simulados. Un modelo hidrológico se considera satisfactorio si  $RSR \leq 0.70$ .

El **sesgo porcentual**<sup>10</sup> mide la tendencia promedio de los datos simulados  $Q_{sim}$  de ser relativamente mayores o menores que los datos observados  $Q_{obs}$  respectivos:

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs(t)} - Q_{sim(t)})}{\sum_{t=1}^P (Q_{obs(t)})} \right] \cdot 100$$

#### Donde:

PBIAS: Sesgo porcentual (%).

El valor óptimo de PBIAS es cero (0) y los peores valores tienden a ambas direcciones (-inf y +inf). Es decir, un valor de PBIAS de 0 implica un ajuste perfecto entre los datos observados y los datos simulados. Valores positivos de PBIAS indican sesgo de subestimación del modelo. Valores negativos de PBIAS indican sesgo de sobreestimación del modelo.

Un modelo hidrológico se considera satisfactorio si  $PBIAS \leq \pm 25\%$  para simulación de caudal o  $PBIAS \leq \pm 55\%$  para simulación de sedimentos.

La **eficiencia de Kling-Gupta**<sup>11</sup> fue conceptualizada como una mejora de NSE al deconstruir sus elementos estadísticos inherentes:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r_{sim|obs} - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}$$

#### Donde:

KGE: Eficiencia de Kling-Gupta (adimensional).

$r_{sim|obs}$ : Coeficiente de correlación de Pearson entre simulaciones y observaciones (adimensional).

$\sigma_{sim}$ : Desviación estándar del caudal simulado (mm).

$\mu_{sim}$ : Promedio del caudal simulado (mm).

El valor óptimo de KGE es uno (1) y el peor valor tiende a los números negativos (-inf). Es decir, un valor de KGE de 1 implica un ajuste perfecto entre los datos observados y los datos simulados. El valor de cero (0) sirve como indicador que las simulaciones son comparables con el promedio de los datos observados ( $\mu_{obs}$ ). Es decir, un valor de KGE de 0 implica que las simulaciones no son mejores

que si simplemente se hubiese tomado el promedio de los datos observados. Un modelo hidrológico se considera satisfactorio si  $KGE \geq 0.50$ .

**La combinación de varios indicadores**<sup>12</sup> facilita elegir cuál es la mejor simulación entre varias opciones que tienen desempeños aceptables para los diferentes indicadores. En ocasiones, una simulación

<sup>12</sup> Ochoa-Tocachi, B. F., Alemie, T. C., Guzman, C. D., Tilahun, S. A., Zimale, F. A., Buytaert, W., & Steenhuis, T. S. (2019). Sensitivity Analysis of the Parameter-Efficient Distributed (PED) Model for Discharge and Sediment Concentration Estimation in Degraded Humid Landscapes. *Land Degradation and Development*, 30: 151-165.



desempeña muy bien para un indicador, mientras que puede desempeñar mal para otro indicador.

En ese caso se puede combinar el resultado de los diferentes indicadores en uno solo:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r_{sim|obs} - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2}$$

#### Donde:

OF: Combinación de indicadores (adimensional).

Ind<sub>i</sub>: Indicador de desempeño i con óptimo posicionado en cero.

Para combinar los indicadores, la metodología CUBHIC 2.0 posiciona sus valores óptimos en cero. Para el caso de *NSE* y de *KGE*, cuyos óptimos están en uno (1), se utiliza (1-*NSE*) y (1-*KGE*). Para *PBIAS*, que puede ser positivo o negativo, se utiliza el valor absoluto abs (*PBIAS*). Para los indicadores que tienen óptimos en cero (*RMSE*, *RSR*), se utiliza el indicador directamente. El valor óptimo de la combinación OF es cero (0) y el peor valor tiende a los números positivos (+inf). Es decir, un valor de OF de 0 implica que un mismo set de parámetros es el mejor para todos los indicadores de desempeño. La mejor simulación es aquella que presenta el menor OF.

Las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0 realizan todos los cálculos necesarios para determinar los indicadores de desempeño presentados en este documento y el usuario puede reconocer qué valores son aceptables (o no) para su ejercicio de modelación (por ejemplo, siguiendo las recomendaciones de la *Guía de Modelación Hidrológica para la Infraestructura Natural*<sup>5</sup>). Estos cálculos se presentan en la pestaña **Evaluación** de las calculadoras (**Figura 4**). Al inicio de la ejecución del modelo, se establece un periodo de calentamiento (“warm up”, **Figura 3**). Durante este periodo, las variables de salida del modelo se vuelven independientes o atenúan el efecto causado por las condiciones iniciales asumidas<sup>13</sup>.

**Figura 4.** Ejemplo de interfaz de evaluación de desempeño en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

Evaluación de desempeño									
Día	Caudal observado - Q <sub>obs</sub> (mm)	Caudal simulado - Q <sub>sim</sub> (mm)	Q <sub>obs</sub> - Q <sub>sim</sub> (mm)	Q <sub>obs</sub> - μ <sub>obs</sub> (mm)	(Q <sub>obs</sub> - Q <sub>sim</sub> ) <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	(Q <sub>obs</sub> - μ <sub>obs</sub> ) <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Q <sub>sim</sub> - μ <sub>sim</sub> (mm)	(Q <sub>sim</sub> - μ <sub>sim</sub> ) <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	(Q <sub>obs</sub> - μ <sub>obs</sub> )(Q <sub>sim</sub> - μ <sub>sim</sub> ) (mm <sup>2</sup> )
61	1.6563	1.4988	0.1575	0.7502	0.0248	0.5628	0.5811	0.3377	0.4359
62	1.5546	1.3924	0.1622	0.6485	0.0263	0.4205	0.4747	0.2253	0.3078
63	1.5437	1.3825	0.1611	0.6376	0.0260	0.4065	0.4648	0.2161	0.2964
64	1.4458	1.2857	0.1600	0.5397	0.0256	0.2912	0.3680	0.1354	0.1986
65	1.5680	1.5347	0.0333	0.6619	0.0011	0.4381	0.6170	0.3806	0.4083
66	1.4531	1.2910	0.1621	0.5470	0.0263	0.2992	0.3733	0.1393	0.2042
67	9.3468	12.9368	-3.5900	8.4407	12.8880	71.2457	12.0191	144.4583	101.4496
68	2.0566	1.8674	0.1892	1.1505	0.0358	1.3236	0.9496	0.9018	1.0925
69	2.9019	3.5359	-0.6340	1.9958	0.4020	3.9830	2.6181	6.8547	5.2252
70	2.1735	2.0819	0.0916	1.2674	0.0084	1.6062	1.1642	1.3553	1.4754
71	4.6054	6.1327	-1.5273	3.6993	2.3325	13.6852	5.2150	27.1961	19.2920
72	2.5096	2.6451	-0.1355	1.6035	0.0184	2.5713	1.7274	2.9839	2.7699
73	2.3329	2.1288	0.2040	1.4268	0.0416	2.0357	1.2111	1.4668	1.7280
74	2.3594	2.2668	0.0926	1.4533	0.0086	2.1120	1.3490	1.8199	1.9605
75	4.3024	5.5703	-1.2680	3.3963	1.6078	11.5345	4.6526	21.6468	15.8015

Fuente: Elaboración propia.

<sup>13</sup> Mazzilli, N., Guinot, V., & Jourde, H. (2012). Sensitivity analysis of conceptual model calibration to initialization bias. Application to karst spring discharge models. *advances in water resources*, 42: 1-16.



Foto: Denis Justo Mayhua Coaquira

La *Guía de Modelación Hidrológica para la Infraestructura Natural*<sup>14</sup> insiste en la importancia y necesidad de calibrar y validar los modelos hidrológicos durante las aplicaciones de diseño y evaluación de proyectos de infraestructura natural. Si los modelos no están calibrados, es posible que los resultados obtenidos no sean realistas y, más bien, la información producida genere confusiones y malas recomendaciones en el proceso de toma de decisiones. Es común encontrarse con situaciones en las que no existen datos suficientes o de buena calidad para proceder con un ejercicio de calibración. Sin embargo, aun con datos escasos, puntuales o débiles, es posible mejorar de forma sustancial las simulaciones obtenidas con los modelos hidrológicos<sup>14</sup>. Incluso en aquellas situaciones en las que no existen datos por completo, se puede calibrar un modelo hidrológico en otra zona geográfica, idealmente cercana, que

presente condiciones lo más parecidas posible al lugar que se desea modelar. Esta opción deberá ser tomada en cuenta para aquellas situaciones más desafiantes<sup>5</sup>. Para ecosistemas andinos, es posible utilizar CUBHIC con el juego de datos de las cuencas iMHEA<sup>15</sup> (Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos).

Es preciso considerar, además, que los escenarios de modelación son escenarios hipotéticos. Es decir, la calibración y validación solo puede realizarse sobre el escenario de línea base, el cual refleja las condiciones históricas y es la contraparte real de los datos observados<sup>10</sup>. No se debe confundir la simulación de escenarios hipotéticos con el ejercicio de calibración, para evitar sesgos y errores en el proceso de modelación hidrológica.

<sup>14</sup> Winsemius, H. C., Schaefli, B., Montanari, A., & Savenije, H. H. G. (2009). On the calibration of hydrological models in ungauged basins: A framework for integrating hard and soft hydrological information. *Water resources research*, 45: W12422.

<sup>15</sup> Ochoa-Tocachi, B., Buytaert, W., Antipora, J., Acosta, L., Bardales, J. D., Céleri, R., Crespo, P., Fuentes, P., Gil-Ríos, J., Gualpa, M., Llerena, C., Olaya, D., Pardo, P., Rojas, G., Villacís, M., Villazón, M., Viñas, P., & De Bièvre, B. (2018). High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes. *Scientific data*, 5: 180080.

## Complemento Solver

Microsoft Excel tiene un complemento de análisis llamado Solver. Este complemento es comúnmente utilizado para optimizar modelos de programación lineal en negocios; sin embargo, ha incorporado recientemente un algoritmo de optimización evolutivo. Este tipo de algoritmo permite optimizar funciones no convexas como la función de pérdida de un estadístico de ajuste de un modelo hidrológico<sup>16,17</sup>. El algoritmo de optimización evolutivo ha sido incluido en versiones de Microsoft Excel 2010 en adelante<sup>18</sup>.

Las ventajas de un complemento de este tipo es que se pueden realizar numerosas simulaciones utilizando rangos de parámetros a calibrar de manera automática, sin necesidad de utilizar lenguajes de programación. Esto permite encontrar un mejor desempeño de calibración, a comparación de un proceso manual. La calibración automática permite disminuir el riesgo de una calibración pobre causada por poco entrenamiento de la persona que utilice la metodología CUBHIC 2.0.

## Algoritmos evolutivos en calibración automática

Los algoritmos evolutivos son métodos de optimización estocástica, inspirados en los principios de evolución biológica, incluyendo reproducción, mutación, recombinación y selección. Debido a que estos métodos no utilizan gradientes o derivadas,

no pueden determinar si una solución es óptima. Solamente pueden identificar cuando una solución candidata es mejor a otras soluciones encontradas anteriormente. Los algoritmos de este tipo tienen algunas etapas que se muestran en la **Figura 5**.

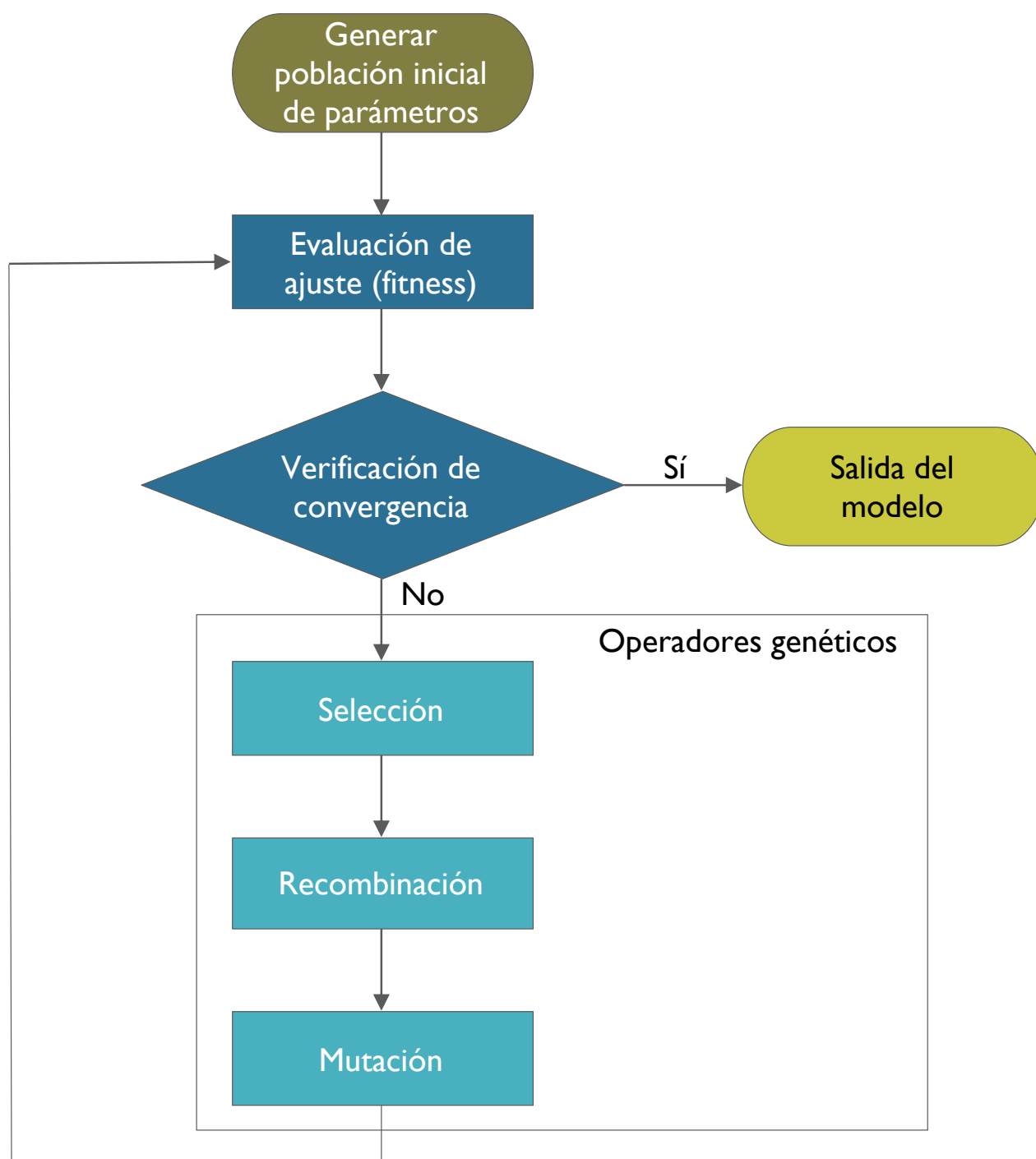
---

<sup>16</sup> Arsenault, R., Poulin, A., Côté, P., & Brissette, F. (2014) Comparison of Stochastic Optimization Algorithms in Hydrological Model Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19: 1374-1384.

<sup>17</sup> Tang, Y., Reed, P., & Wagener, T. (2006). How Effective and Efficient are Multiobjective Evolutionary Algorithms at Hydrologic Model Calibration? *Hydrology and Earth System Sciences*, 10: 289-307.

<sup>18</sup> Trautmann, N., & Gnägi, M. (2015). On an Application of Microsoft Excel's Evolutionary Solver to the Resource-Constrained Project Scheduling Problem RCPSP. 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 646-650.

**Figura 5.** Diagrama de flujo genérico de un algoritmo evolutivo.



Fuente: Scrucca, 2013.

En general, los algoritmos evolutivos son producto de un proceso iterativo de selección de los mejores conjuntos de parámetros candidatos; recombinación, el cual es un proceso que combina individuos (conjuntos de parámetros) seleccionados; y

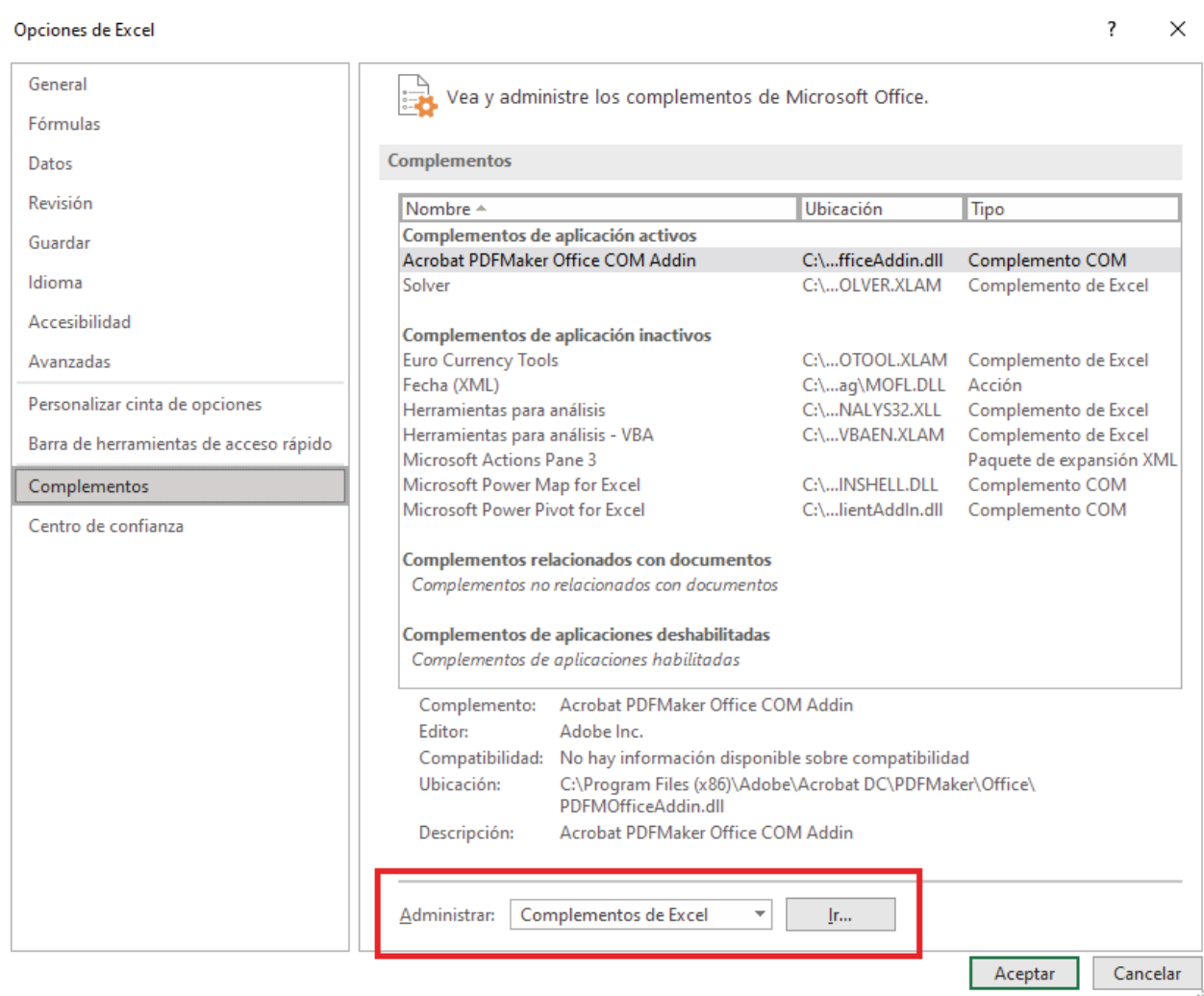
mutación, el cual es una variación aleatoria sobre los individuos recombinados. A través de este proceso se van refinando las soluciones hasta llegar a un criterio de convergencia como un tiempo máximo sin mejora de bondad de ajuste.

## Ejemplo de aplicación de calibración automática

Para poder implementar el algoritmo evolutivo de calibración automática con CUBHIC 2.0, se debe, primero, activar el complemento Solver de Microsoft Excel (**Figura 6**). Este complemento se puede activar yendo al Menú Archivo > Opciones > Complementos. En la ventana emergente que aparezca, deberá ubicar el recuadro Administrar y

seleccionar Complementos de Excel. Aparecerá una nueva ventana emergente de Complementos y deberá marcar el complemento Solver. Una vez cargado el complemento Solver, el comando Solver estará disponible en el grupo Análisis de la pestaña **Observaciones**.

**Figura 6.** Activación del Complemento Solver en Microsoft Excel.



Fuente: Elaboración propia.

<sup>19</sup> Scrucca, L. (2013). GA: A Package for Genetic Algorithms in R. Journal of Statistical Software, 53 (4).



Posteriormente, es necesario definir algunas variables del problema de optimización. Estas incluyen:

- Función objetivo, la cual es una celda que representa la función a optimizar y, en el caso de CUBHIC 2.0, corresponde a uno de los indicadores de desempeño del modelo hidrológico.
- Variables y restricciones, lo cual define el espacio dimensional de las variables en el que se evalúa la función objetivo.
- Parámetros de algoritmo:
  - Convergencia: Este parámetro es un criterio de finalización del algoritmo. El proceso de optimización finaliza cuando los valores objetivo de dos iteraciones difieren en menos de una proporción entre ellos.
  - Tasa de mutación: Define la frecuencia relativa en que una mutación (cambio aleatorio) es aplicado a un miembro de la población. Un mayor valor incrementa la diversidad de la población y la probabilidad de encontrar una mejor solución, pero a su vez incrementa el tiempo de solución.
  - Tamaño de población: Es el número de soluciones que se computan para cada iteración. Comenzando con una población

inicial, el algoritmo evolutivo genera iterativamente nuevas poblaciones utilizando cambios aleatorios (mutaciones) y selección de acuerdo a mejor desempeño.

- Valor de inicialización aleatorio: El procedimiento para generar una población inicial y estrategias de mutación se basan en un muestreo aleatorio. El valor 0 para este parámetro indica que en cada corrida del algoritmo se utilizarán diferentes números pseudoaleatorios. Cualquier valor diferente de 0 implica que se utiliza un punto de partida para el generador de números pseudoaleatorios.
- Tiempo máximo sin mejora: Este también es un criterio de finalización del algoritmo. Cuando no se encuentra un valor de la función objetivo mayor a la ya existente por un tiempo determinado, termina el proceso de optimización.

A continuación, se realiza un ejemplo de aplicación utilizando el CUBHIC 2.0 Protección de Bosques y Restauración Forestal, con datos de la microcuenca iMHEA CHA\_01, ubicada en Chachapoyas<sup>15</sup> y que tiene una mezcla de coberturas vegetales de pastizal (20%) y bosque (80%).

## Establecimiento de función objetivo

Debido a la gran variedad de indicadores de desempeño en hidrología, es conveniente utilizar una función objetivo que agregue varios indicadores de desempeño. En el caso de CUBHIC 2.0, esta función se llama OF y se encuentra en la pestaña **Entradas**. Es muy probable que el valor de este indicador de desempeño se encuentre en el rango de No Aceptable, considerando que el modelo no ha pasado por un proceso de calibración.

Para poder establecer la función OF como objetivo de problema de optimización, es necesario abrir

el complemento Solver. Para ello es necesario ir a la pestaña **Entradas** y luego dar clic a Solver en la sección de Análisis. Aparecerá una ventana emergente, como se muestra en la **Figura 7**. En la sección Establecer objetivo, se deberá seleccionar la celda que contiene la función a optimizar. En nuestro caso, será la celda D40, que contiene la función OF. Al ser una función que representa un error del modelo, el proceso de calibración intentará minimizarlo, por lo que deberá seleccionar Mín, que representa minimización de la función objetivo.

**Figura 7.** Establecimiento de la función objetivo.

Parámetros de Solver

Establecer objetivo:

1

SD\$40

↑

2 Para:

☐ Máx

☒ Mín

☐ Valor de:

0

Cambiando las celdas de variables:

↑

Sujeto a las restricciones:

^

↓

Agregar

Cambiar

Eliminar

Restablecer todo

Cargar/Guardar

☒ Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:

GRG Nonlinear

↓

Opciones

Método de resolución

Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

Ayuda

Resolver

Cerrar

Fuente: Elaboración propia.





Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

## Definición de variables y restricciones

El problema de optimización requiere modificar valores de variables en un espacio definido. Para incluir estas condiciones en Solver, es necesario declarar las variables a modificar y las restricciones respectivas para cada una de ellas. En este ejemplo, cambiaremos las variables de características de suelo y coeficientes de modelo de la pestaña **Entradas**. Se debe aclarar que no siempre es necesario modificar todas las variables. Dependiendo del proyecto y de la información disponible, es posible que se tenga certeza sobre alguna o más variables y no sea necesario calibrarlas. De igual forma, el rango de variación puede variar si es que se conocen algunas propiedades del sistema hidrológico a modelar.

Para continuar con el proceso de calibración, hay que definir las variables a modificar en la ventana de configuración de Solver (**Figura 8**). En nuestro ejemplo, las celdas a modificar se encuentran en las celdas D20 a D25 y D28 a D29. Posteriormente,

hay que definir las restricciones para cada una de las variables. Estas restricciones son los rangos en los que las variables a modificar pueden variar. Estos rangos corresponden a intervalos razonables en los cuales pueden variar los diferentes parámetros dentro del problema de optimización. De esta manera, pueden tener un significado físico, como en el caso de propiedades hidrofísicas, o estimaciones aceptables del modelador, como los tiempos de residencia.

Para todas las variables de este ejemplo, se tienen límites inferiores y superiores. Para cada uno de los límites (sea superior o inferior) es necesario agregar una restricción. De esta manera, todas las variables de este ejemplo tienen, al menos, dos restricciones. Por ejemplo, la celda D20, que representa la profundidad de suelo, puede variar entre 75 y 1000 mm. De igual manera, las otras variables pueden variar en un rango relativamente amplio.

Figura 8. Definición de variables y restricciones en el proceso de calibración automática.

Establecer objetivo:

SD\$40

Para:

☐ Máx

☒ Mín

☐ Valor de:

0

3

Cambiando las celdas de variables:

SD\$20:SD\$25;SD\$28:SD\$29

4

Sujeto a las restricciones:

SD\$20 <= 1000  
SD\$20 >= 75  
SD\$21 <= 1  
SD\$21 >= 0  
SD\$22 <= 1  
SD\$22 >= 0  
SD\$23 <= 0.5  
SD\$23 >= 0.1  
SD\$24 <= 50  
SD\$24 >= 1  
SD\$25 <= 100  
SD\$25 >= 20  
SD\$28 <= 0.8

Agregar

Cambiar

Eliminar

Restablecer todo

Cargar/Guardar

5

☒ Convertir variables sin restricciones en no negativas

Método de resolución:

GRG Nonlinear

Opciones

Método de resolución

Seleccione el motor GRG Nonlinear para problemas de Solver no lineales suavizados. Seleccione el motor LP Simplex para problemas de Solver lineales, y seleccione el motor Evolutionary para problemas de Solver no suavizados.

Ayuda

Resolver

Cerrar

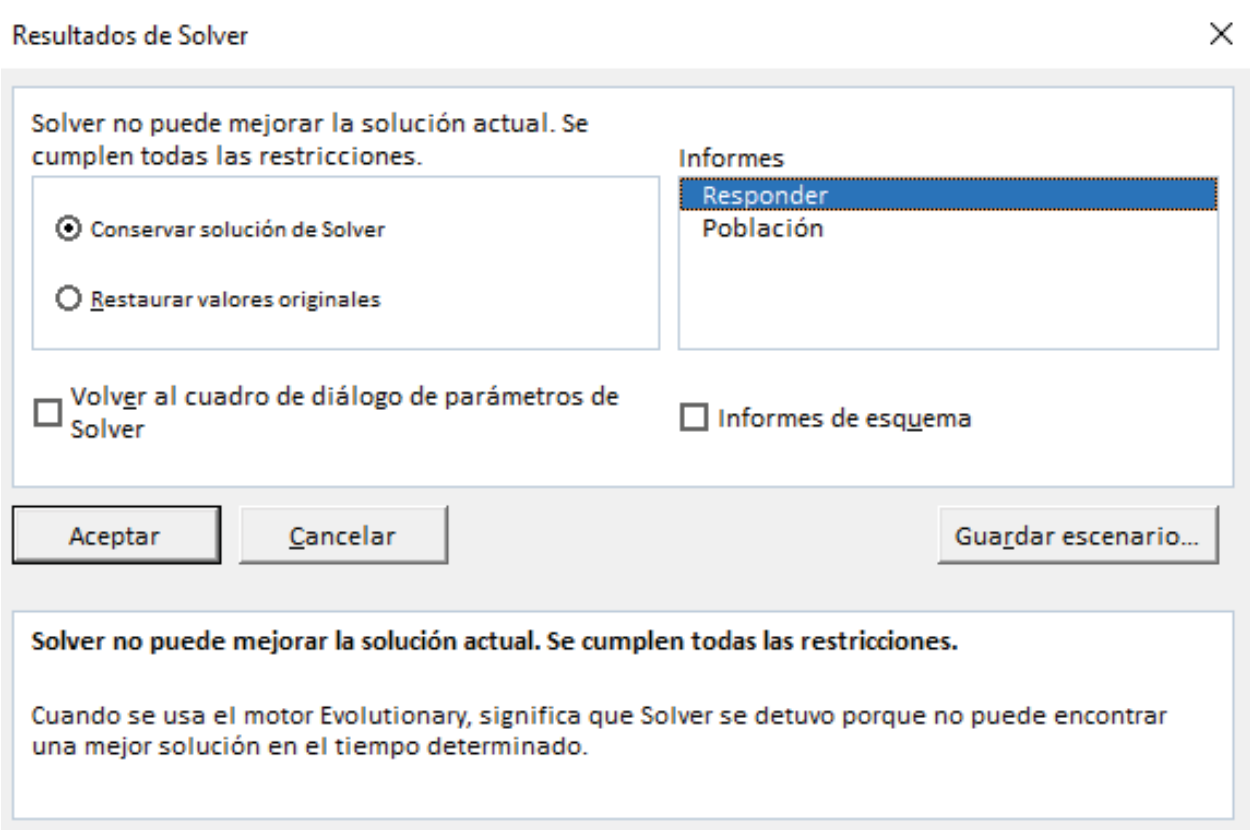
Fuente: Elaboración propia.

# Configuración del método de resolución y calibración de modelo

Luego de configurar las variables y restricciones, procedemos a correr el problema de optimización. Para ello, seleccionamos el método de resolución Evolutionary de la lista desplegable. Existen diferentes opciones dentro del método evolutivo; sin embargo, se recomienda dejar las opciones por defecto. Es posible correr hasta en tres oportunidades el método evolutivo, con el fin de asegurar una convergencia a una solución aceptable.

Luego de seleccionar el método evolutivo, se procede a resolver el problema de optimización. Microsoft Excel comenzará a realizar diferentes iteraciones para llegar a una solución aceptable. Cuando el algoritmo evolutivo no puede encontrar mejor solución en un número determinado de iteraciones, se detiene automáticamente. Saldrá un mensaje, como se muestra en la **Figura 9**. Con este mensaje, finalizamos la calibración automática.

**Figura 9.** Mensaje de fin de iteraciones del método evolutivo en Solver.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 10 muestra los parámetros finales calibrados del ejemplo de aplicación. Se observa que todos los indicadores de desempeño, a excepción de RMSE (mm), se encuentran en un rango de aceptabilidad. Considerando que la función OF es una combinación de varios indicadores de desempeño, es normal que pueda haber uno o más indicadores que no estén en el rango de aceptabilidad, mientras que la función OF

si se encuentre en un rango aceptable. También es posible que la función OF no encuentre un conjunto de parámetros con desempeño satisfactorio. En este último caso, es posible que el modelo hidrológico esté obviando uno o más procesos importantes, sin embargo, estos casos se encuentran fuera del alcance de la presente guía.

Figura 10. Parámetros calibrados mediante método evolutivo.

Entradas			
Coberturas de suelo			
Pastos	Bosq. nativo	Plant. forest.	
Número de curva CN (sin unidades)	47	51	49
Índice de área foliar LAI (m2/m2)	3	3.5	1.5
Factor C de USLE (adimensional)	0.006	0.008	0.008
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.15	0.11	0.11
Costos			
Pastos	Bosq. nativo	Plant. forest.	
Costos de implementación (USD/ha)	0	125	100
Características del sitio			
Altitud (m snm)	3112	(+ ) Norte	(- ) Sur
Latitud (grados)	-6.33		
Pendiente s (m/m)	0.17657		
Características del suelo		Rango	Referencia
Profundidad del suelo (mm)	418.0477	75 – 1000	150
Capacidad de campo $f_c$ (mm/mm)	0.6657	0 – 1	0.5
Punto de marchitez $w_p$ (mm/mm)	0.1078	0 – 1	0.05
Factor K de USLE (adimensional)	0.2028	0.1 – 0.5	0.3
Tiempo de residencia del interflujo $\tau_i$ (día)	1.7439	1 – 50	20
Tiempo de residencia del caudal base $\tau_b$ (día)	59.1644	20 – 100	70
Coeficientes del modelo		Rango	Referencia
Coeficiente de nubosidad c	0.3591	0.1 – 0.8	0.5
Ajuste factor USLE K	6.4907	1 – 10	6.87
Calibración			
Indicadores de desempeño	Indicador	Umbral	Aceptabilidad
Periodo de calentamiento (días)		60	
NSE	0.77	0.5	SI
RMSE (mm)	0.53	0.4	NO
RSR	0.48	0.7	SI
PBIAS (%)	8%	25%	SI
KGE	0.86	0.5	SI
OF	0.77	1.10	SI

Fuente: Elaboración propia.





Foto: Midagri

**[www.infraestructuranatural.pe](http://www.infraestructuranatural.pe)**

El proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica promueve la conservación, restauración y recuperación de los ecosistemas a nivel nacional, formando alianzas con organizaciones públicas y privadas para reducir los riesgos hídricos como sequías, inundaciones y contaminación del agua.

El proyecto es promovido y financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá y ejecutado por Forest Trends, CONDESAN, la Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA), EcoDecisión e investigadores del Imperial College London.

#### ¿Cómo citar este documento?

Cuadros-Adriazola, J., Ochoa-Tocachi, B. F., Bonnesoeur, V., & Gammie, G. (2022). CUBHIC 2.0: Metodología de calibración. Forest Trends, Lima, Perú.

