

GENERACIÓN DE CAUDALES MEDIOS A PARTIR DE REGISTROS DIARIOS DE PRECIPITACIONES UTILIZANDO UN MODELO DE TANQUES: CASO DE ESTUDIO, CUENCAS EN LA ZONA MINERA DEL SUR DEL CESAR

*Generation of mean flows from daily rainfall records using
a tank model: case study, basins in the mining
area of south of Cesar*

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ^a
Y ANDRÉS HUMBERTO OTÁLORA CARMONA^b

Recibido: 17/4/2023 • Aprobado: 4/5/2023

Cómo citar: Rodríguez Díaz, H. A., & Otálora Carmona, A. H. (2023). Generación de caudales medios a partir de registros diarios de precipitaciones utilizando un modelo de tanques: caso de estudio, cuencas en la zona minera del sur del Cesar. *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, 6(1), 33–52. <https://doi.org/10.22206/cyap.2023.v6i1.pp33-52>

Resumen

Este artículo presenta los análisis y resultados de los estudios realizados por el Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería correspondiente a la generación de series de caudales medios diarios en las cuencas que drenan la zona minera en el sur del Cesar, aplicando el modelo de tanques utilizado en el software HEC-HMS. La investigación ha desarrollado una metodología para estimar, para cada subcuenca, series diarias de caudales medios diarios a partir de registros de precipitaciones y series diarias de evapotranspiración potencial. La metodología incluye la determinación de parámetros iniciales del suelo, de la cobertura vegetal y coeficientes de reducción de la evapotranspiración potencial. El modelo describe la calibración del modelo a partir de los registros diarios de caudales de estaciones localizadas en diferentes puntos sobre el cauce principal de la cuenca en estudio. Tomando como punto de partida los valores iniciales del modelo, se ajustaron los parámetros del suelo (velocidad de infiltración, capacidad de campo, coeficiente de cultivo, almacenamiento inicial) y los factores de reducción de la evapotranspiración potencial

^a Profesor, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.
ORCID: 0009-0006-7214-9895, Correo-e: alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co

^b Profesor, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.
ORCID: 0009-0006-7214-9894, Correo-e: andres.otalora@escuelaing.edu.co



hasta conseguir una similitud entre los caudales medios diarios registrados y los caudales medios diarios modelados. El contraste de los resultados se llevó a cabo aplicando diferentes metodologías que permitieron estimar la correlación entre los datos modelados y los datos observados.

Palabras clave: balance hidrológico; caudal; lluvia diaria.

Abstract

This article presents the analysis and results of studies conducted by the Hydraulic Studies Center of the Colombian School of Engineering regarding the generation of daily average flow series in the basins that drain the mining area in the south of Cesar, using the tank model implemented in the HEC-HMS software. The research has developed a methodology to estimate daily average flow series for each sub-basin based on precipitation records and daily potential evapotranspiration series. The methodology includes determining initial soil parameters, vegetation cover, and coefficients for reducing potential evapotranspiration. The model describes the calibration process using daily flow records from stations located at different points along the main channel of the studied basin. Starting from the initial model values, soil parameters (infiltration rate, field capacity, crop coefficient, initial storage) and potential evapotranspiration reduction factors were adjusted to achieve similarity between the recorded daily average flows and the modeled ones. The results were contrasted using different methodologies that allowed estimating the correlation between the modeled and observed data.

Keywords: Hydrological balance; daily flow rate; rainfall.

1. Introducción

Para la elaboración de estudios hidrológicos correspondientes a la estimación de disponibilidad de agua y de caudales ambientes en corrientes naturales que requieran ser intervenidas es necesario contar con registros o series diarios de caudales. Debido a la poca disponibilidad de información de registros diarios hidrológicos en el Departamento del Cesar (Colombia), se ha creado una metodología que estima caudales medios diarios sintéticos a partir de registros diarios de precipitación y evapotranspiración, teniendo en cuenta el tipo y uso del suelo. Esta metodología está soportada por un modelo hidrológico continuo en HEC-HMS, que a su vez es soportado por un modelo de información geográfica (SIG).

Para la estimación del caudal medio disponible en una cuenca hidrográfica se puede elaborar un balance hidrológico de largo plazo, considerando registros anuales de precipitación y de evapotranspiración (Chow, 1994; Carvajal y Roldán, 2006; US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2010). Esta consideración supone que las demás variables hidrológicas no tienen influencia en el balance final (caudal medio), ya que se asume que el volumen que entra debido a otras variables es igual al volumen que sale de estas mismas variables en el intervalo de tiempo considerado (anual, de acuerdo con el ciclo hidrológico).

En el caso del presente trabajo, debido a las exigencias del estudio, se requería estimar series de caudales medios diarios en diferentes puntos sobre un cauce natural que escurre en una zona minera, situación que obliga a considerar todas las variables del ciclo hidrológico. Debido al intervalo de tiempo (un día) que se debe contemplar para calcular este caudal medio, la influencia de otras variables hidrológicas, como la infiltración y el flujo subsuperficial, hace necesario estudiar con más detalle este tipo de variables.

2. Modelo lluvia – escorrentía diaria. Modelo de tanques

La falta de información diaria exige la utilización de un modelo lluvia – escorrentía que permita la estimación de los caudales medios diarios en un punto de estudio. Estos modelos permiten calcular los caudales medios diarios a partir de un balance de masas utilizando los registros de precipitación diaria, la tasa de evapotranspiración potencial y real en la zona de

estudio y diferentes características de la cobertura vegetal y del suelo con los cuales es posible estimar el comportamiento de otras variables. (Carvajal y Roldán, 2006; US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2010)

La revisión detallada de la literatura permite establecer que en general los modelos lluvia – escorrentía mayormente aceptados corresponden a los modelos de tanque. Estos modelos dividen las diferentes etapas de la transformación de la precipitación en escorrentía, tomando como punto de partida la retención superficial y la retención subsuperficial en la zona parcialmente saturada, hasta alcanzar la zona saturada del suelo.

En cada uno de estos procesos señalados en la literatura, los modelos de tanques determinan la fracción de agua retenida, la fracción de agua que continua a la siguiente etapa y la fracción de agua que escurre y que puede contribuir al caudal superficial de la corriente.

3. Modelo de tanques “HEC-HMS”. Calibración y validación

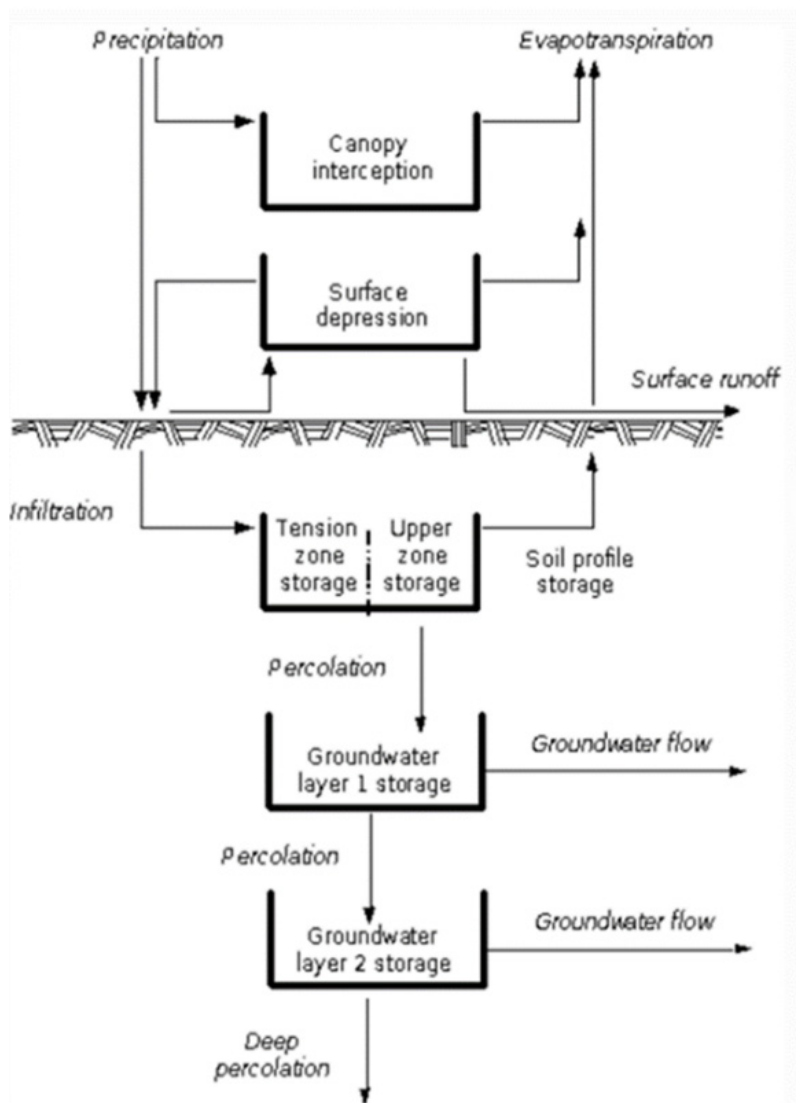
Un modelo de tanques corresponde a una simplificación numérica que permite modelar las diferentes etapas que la lluvia debe realizar para convertirse en escorrentía. Este proceso de transformación de la lluvia en escorrentía considera la retención del agua en las copas de los árboles, la retención en el suelo, la infiltración, los procesos de percolación y la retención temporal en la zona saturada y en la zona no saturada.

El modelo de tanques disponible en el software “HEC-HMS” permite estimar los caudales diarios, tomando como valores de entrada una serie continua de registros de precipitación diaria y valores de evapotranspiración potencial y evapotranspiración real. Este modelo también depende de diferentes parámetros del tipo de cobertura vegetal y del tipo de suelo.

El módulo de tanques del “HEC-HMS” divide el proceso de transformación de lluvia – escorrentía a nivel diario en cinco (5) tanques o etapas. Los dos primeros tanques corresponden a los procesos de retención y de escorrentía en la superficie. Los tres tanques restantes modelan los procesos de retención y escorrentía subsuperficial, considerando los porcentajes que desde el suelo pueden convertirse en escorrentía y los porcentajes que estarán retenidos en el nivel freático. En la Figura 1 se presenta un esquema general que representa las diferentes etapas o tanques que considera este modelo.

Figura 1

Modelo de tanques “HEC-HMS” para la estimación de caudales medios diarios. Esquema general



Nota. Technical Reference Manual. HECHMS, 2023.

La calidad de estos modelos lluvia-escorrentía se basa en el conocimiento y en la certeza de los diferentes parámetros que alimentan el modelo.

4. Modelo lluvia – escorrentía diaria. Modelo de tanques

Tal como se mencionó, la calidad de los resultados obtenidos de los modelos de tanques depende de la calidad de la información de entrada disponible y de la calidad de la información que se utiliza para los procesos de calibración. En el presente estudio, para la calibración de los parámetros del modelo de tanques, se dispone de series de caudales medios diarios de cuatro estaciones ubicadas en diferentes puntos del cauce principal del presente estudio. En la Tabla 1 se resumen las características de las cuatro (4) estaciones.

Tabla 1

Estaciones con información histórica de caudales medios diarios en el Arroyo El Zorro. Características

Estación	X	Y	X*	Y*	Intervalo de registro	Número de días con información	Porcentaje de día con registro con respecto al intervalo total
Caño El Zorro - Abajo finca Santa Elena [LMD11]	1057150	1570250	4938971.487	2635675.462	07/05/2009 – 11/10/2017	2062	67.0
Caño El Zorro - Aguas arriba vertimiento D05 [LMD15]	1066407	1572062	4948226.735	2637456.499	02/01/2017 – 25/08/2021	1628	96.0
Caño El Zorro - Aguas abajo piscina D04 [LMD20]	1063493	1568676	4945304.352	2634082.559	02/01/2018 – 21/07/2021	1295	99.9
Caño El Zorro - Aguas arriba [LMD21]	1076466	1573663	4958282.382	2639024.060	06/04/2017 – 29/06/2021	1325	85.8

*Coordenadas origen nacional.

Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

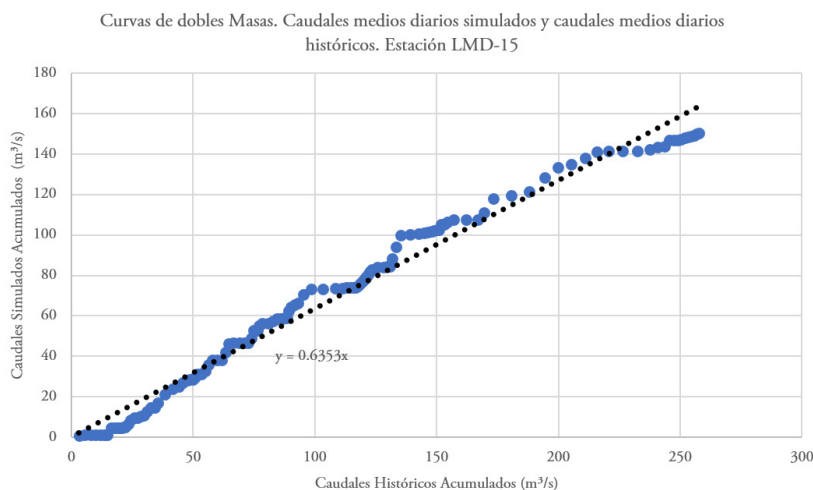
En estos puntos, los caudales de escorrentía corresponden a los caudales aportados por las cuencas alta y media de la cuenca en estudio. Con el propósito de analizar la calidad de los registros históricos de caudales de las cuatro estaciones (antes de utilizarlos para los procesos de calibración), se realizaron análisis de consistencia entre los caudales medios diarios y los registros históricos de precipitación diaria a partir de una curva de dobles masas o de dobles acumulaciones. La curva de dobles masas relaciona los registros acumulados sucesivos de dos series. La correspondencia entre las dos series analizadas se da cuando la curva de dobles masas o curva de doble acumulación presenta una tendencia lineal con una inclinación de 45° .

Al realizar estos primeros análisis se encontró que, en general, los registros de caudales medios diarios de las cuatro estaciones no tienen una buena correspondencia con respecto a los registros de la precipitación media diaria en la cuenca, debido posiblemente a la calidad de los procesos de calibración y ajuste de las estaciones.

A pesar de lo anterior, los análisis también revelaron que algunos meses de registro de caudales si presentan una adecuada consistencia con respecto a la precipitación media diaria registrada en la cuenca. La estación que presenta una mayor consistencia y datos continuos más largo con datos consistentes es la estación LMD15. Esta estación será la utilizada para realizar los posteriores procesos de calibración del modelo (registros diarios continuos desde el 01/08/2018 hasta el 04/02/2019). En la Figura 2 se presenta el análisis de dobles masas de la estación LMD15, en el cual se muestran los datos seleccionados.

Figura 2

Curva de dobles masas. Caudales medios diarios históricos de la estación LMD15 y precipitación media diaria



Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

5. Metodología

Modelo hidrológico de caudales diarios

Tal como se ha mencionado en los anteriores apartados, la estimación de los caudales medios diarios utilizados en el modelo de tanques del software HEC-HMS requiere de información base o información preliminar. Los parámetros más importantes solicitados por el modelo y que serán los parámetros empleados para realizar la calibración son: evapotranspiración mensual, coeficiente de cultivo, almacenamiento inicial en el suelo, almacenamiento máximo del suelo y tasa de infiltración.

Una vez trazada la cuenca principal hasta el punto de control del presente estudio y definidas las subcuencas que la conforman (16 subcuencas), se procedió a caracterizar el tipo de suelo (en cada subcuenca) tomando como referencia la información base del IGAC correspondientes a los “Mapas de Suelos del Territorio Colombiano”, los “Mapas del Tipo de Suelo” y los “Mapas de Clasificación de las Tierras por su Vocación de Uso”.

Utilizando el software de manejo de información geográfica (ArcGis) fue posible realizar operaciones espaciales tipo “álgebra de mapas”, las cuales permitieron obtener contornos para cada uno de los diferentes tipos de suelo y diferentes tipos de coberturas vegetales encontrados en la cuenca en estudio. En la Figura 3 se presenta un esquema de la divisoria topográfica de la cuenca principal, las divisorias topográficas de las subcuencas y el tipo de suelo según la clasificación definida y resumida en la Tabla 2. Por facilidad, se definió un código por cada tipo de suelo.

Figura 3
Caracterización del tipo y uso del suelo en las subcuencas de la cuenca del estudio



Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Tabla 2
Tipos de suelo y clasificación en la zona de estudio

Código	Tipo de suelo
AGSp	Agrosilvícola con cultivos permanentes
ASPp	Agrosilvopastoril con cultivos permanentes
CPic	Cultivos permanentes intensivos de clima cálido
CTic	Cultivos transitorios intensivos de clima cálido
CTSc	Cultivos transitorios semi intensivos de clima cálido
FPP	Protección – producción
FPR	Forestal de protección
PEXc	Pastoreo extensivo de clima cálido
ZU	Zonas urbanas

Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

En la Tabla 3 se presentan los valores de referencia de la tasa de infiltración para los diferentes tipos de suelos encontrados en la cuenca.

Tabla 3

Valores de referencia de la tasa de infiltración media en los diferentes tipos de suelo

Código	Tipo de suelo	Tasa infiltración, mm/h
LWBdp	Rocas sedimentarias (lutitas)	24
MVBf2	Rocas sedimentarias	3
MVFB	Depósitos coluvio aluviales heterogéneos	15
MVFe2	Depósitos coluvio aluviales heterogéneos	15
PWAap	Depósitos coluvio aluviales mezclados	15
PWAbp	Depósitos coluvio aluviales mezclados	15
PWBa	Depósitos aluviales mezclados	24
PWCa	Depósitos clásticos coluvio aluviales	15
PWCa1	Depósitos clásticos coluvio aluviales	15
PWFa1	Depósitos coluviales y arcillas	24
PWHa	Depósitos coluvio aluviales mezclados	15
PWIb2	Depósitos coluvio aluviales, calizas y areniscas	24
RWAa	Depósitos aluviales finos	15
RWCa	Depósitos aluviales mixtos	15
VWAa	Depósitos aluviales medianos	15
ZU	Zonas urbanas	0

Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

En la Tabla 4 se encuentran los valores de referencia de los coeficientes de cultivo para los diferentes tipos de suelo encontrados en la cuenca.

Tabla 4
Valores de referencia de la tasa de infiltración media en los diferentes tipos de suelo

Código	Tipo de suelo	Kc
AGSp	Agrosilvícola con cultivos permanentes	1.10
ASPP	Agrosilvopastoril con cultivos permanentes	0.85
CPIc	Cultivos permanentes intensivos de clima cálido	1.00
CTIc	Cultivos transitorios intensivos de clima cálido	1.20
CTSc	Cultivos transitorios semi intensivos de clima cálido	1.20
FPP	Protección – producción	1.00
FPR	Forestal de protección	1.00
PEXc	Pastoreo extensivo de clima cálido	0.65
ZU	Zonas urbanas	0.35

A partir de los valores de referencia de cada tipo de suelo y del área de influencia de cada suelo en cada subcuenca, se determinaron los parámetros medios en cada una. A manera de ejemplo, en la Tabla 5 se puede ver el procedimiento utilizado para la estimación del coeficiente de cultivo en una de las subcuencas que conforman la cuenca principal (AZ01).

Tabla 5
“Coeficiente de cultivo” de referencia para la subcuenca AZ01

Código	Tipo de suelo	Área polígono km ²	Crop coefficient	Porcentaje	Crop coefficient ponderado
AGSp	Agrosilvícola con cultivos permanentes	43.2844	1.10	17.45%	0.192
ASPP	Agrosilvopastoril con cultivos permanentes	56.1272	0.85	22.62%	0.192
CPIc	Cultivos permanentes intensivos de clima cálido	1.5119	1.00	0.61%	0.006
CTIc	Cultivos transitorios intensivos de clima cálido	75.4871	1.20	30.43%	0.365
FPP	Protección – producción	45.1686	1.00	18.21%	0.182
ZU	Zonas urbanas	2.1397	0.35	0.86%	0.003
FPR	Forestal de protección	11.0952	1.00	4.47%	0.045
PEXc	Pastoreo extensivo de clima cálido	13.2932	0.65	5.36%	0.035
Área, km ²	248.1071		Total	100.00%	1.020

Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

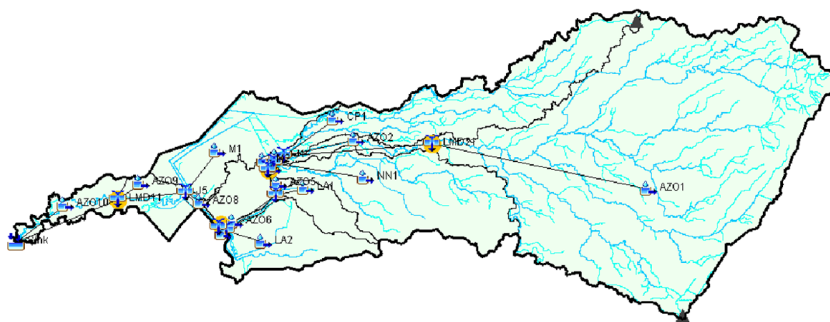
El modelo de tanques del software HEC-HMS también requiere de una serie diaria de precipitación para cada una de las subcuencas que conforma el modelo. La serie característica de lluvia diaria para cada cuenca se estimó a partir de los pesos o porcentajes de influencia de cada estación con respecto al centroide de las subcuencas.

Modelo hidrológico de caudales medios diarios. Modelo en HEC-HMS

Definida la divisoria topográfica de la cuenca principal, los parámetros morfométricos de las subcuencas, la lluvia media diaria en cada subcuenca y los parámetros medios del suelo en cada subcuenca se procedió a elaborar y a alimentar el modelo en HEC-HMS. En la Figura 4 se presenta un esquema general del modelo HEC-HMS elaborado para la cuenca en estudio.

Figura 4

Esquema general del modelo en HEC-HMS para la estimación de caudales medios diarios



Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Modelo hidrológico de caudales medios diarios. Modelo en HEC-HMS

Una vez cargada la información al modelo, se realizaron unas primeras simulaciones que permitieron “calentar” el modelo y analizar de manera preliminar los resultados de los caudales medios diarios obte-

nidos en el punto de control definido para la calibración y que corresponde a la ubicación de la estación LMD-15. Estas primeras simulaciones también permitieron determinar la validez de los parámetros iniciales definidos en el modelo.

A partir de un proceso de ensayo y error se determinaron las variables que generan una mayor influencia en los resultados (las variables más sensibles). Las variables con mayor influencia en los resultados del presente estudio corresponden al coeficiente de reducción de la evapotranspiración potencial y a la tasa de infiltración del suelo.

Utilizando el módulo de “calibración” del software HEC-HMS, el cual, a partir de la comparación de la serie observada de caudales diarios (valores ingresados por el usuario y que corresponden a los datos seleccionados de la estación LMD-15) y la serie de caudales medios diarios generada, modifica los parámetros de entrada definidos por el usuario (en este caso el coeficiente de reducción de la evapotranspiración potencial y la tasa de infiltración del suelo) hasta encontrar el menor error entre ambas series de caudales.

Este procedimiento se realizó con el objetivo de tener una primera aproximación de los parámetros calibrados. Posteriormente, y mediante un proceso de ensayo y error, se determinaron los parámetros del suelo y los coeficientes de reducción de la evapotranspiración potencial definitivos, que generaron el menor error entre los registros de caudales diarios modelados y los registros de caudales medios diarios registrados en la estación LMD-15.

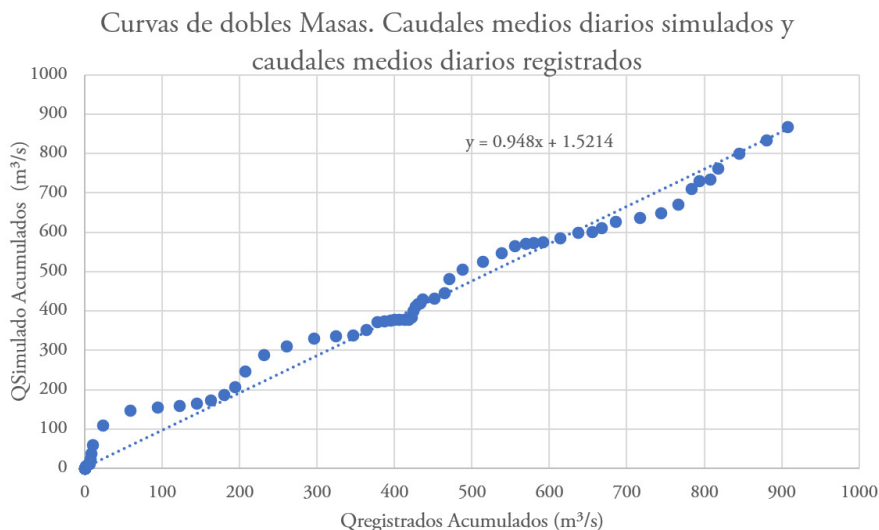
6. Análisis de resultados

Generación de series de caudales medios diarios

Con el objetivo de analizar la calidad de los resultados obtenidos con el modelo HEC-HMS, se realizó un análisis de consistencia entre la serie de caudales medios diarios generados y la serie de caudales medios diarios registrados en la estación. La comparación se realizó utilizando nuevamente el concepto de dobles masas o acumulaciones y comparando uno a uno los datos. En la Figura 5 se presenta la curva de dobles masas para estas dos series.

Figura 5

Comparación entre los caudales generados con el modelo HEC-HMS y los caudales registrados en la estación LMD-15, valores acumulados. Curva de dobles masas



Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Como se puede observar en la figura, la serie de caudales medios diarios simulados tiene correspondencia con la serie de caudales medios diarios simulados, ya que la función de ajuste entre ambas series es una recta con una inclinación muy cercana a 45° , o lo que es lo mismo, a una función $y = 1.0 x$.

De igual modo, al comparar el caudal promedio obtenido con la serie conformada por los caudales medios diarios estimados y el promedio obtenido con la serie conformada por los caudales medios diarios medidos, se encontró que la diferencia porcentual es del 1.6 % (promedio de los caudales medios diarios simulados: $0.85 \text{ m}^3/\text{s}$, promedio de los caudales medios diarios medidos $0.978 \text{ m}^3/\text{s}$).

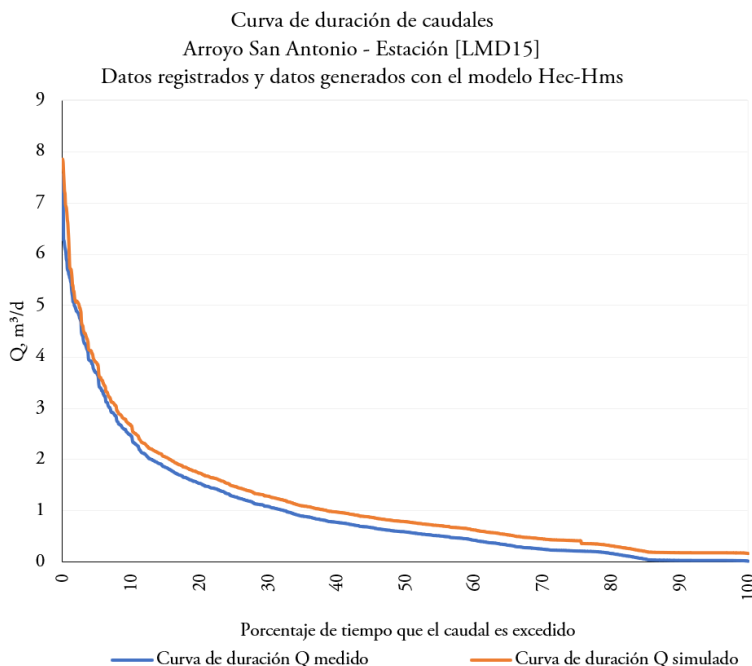
Otra metodología que permite verificar la calidad de los resultados y analizar la cercanía de los datos de caudales medios diarios generados con respecto a los datos de caudales medios diarios observados es a partir de la evaluación de la frecuencia de ocurrencia de los caudales altos, medios

y bajos. Al generar una serie de caudales a nivel diario esta debe mantener la frecuencia de ocurrencia de los caudales en proporciones similares, teniendo en cuenta que la modelación considera el ciclo hidrológico el cual está definido por la variación de la magnitud de las precipitaciones. Estos análisis se pueden realizar al comparar la curva de duración de caudales de la serie generada con la curva de duración de caudales de la serie observada.

En la Figura 6 se presenta la comparación entre la curva de duración de caudales medios diarios generados con el modelo HEC-HMS y la curva de duración de caudales medios diarios tomados en la estación LMD-15. En el caso de esta comparación es importante tener presente que los valores clasificados no necesariamente corresponden a la misma fecha.

Figura 6

Curva de duración de caudales medios diarios. Comparación entre los caudales generados con el modelo HEC-HMS y los caudales registrados en la estación LMD-15



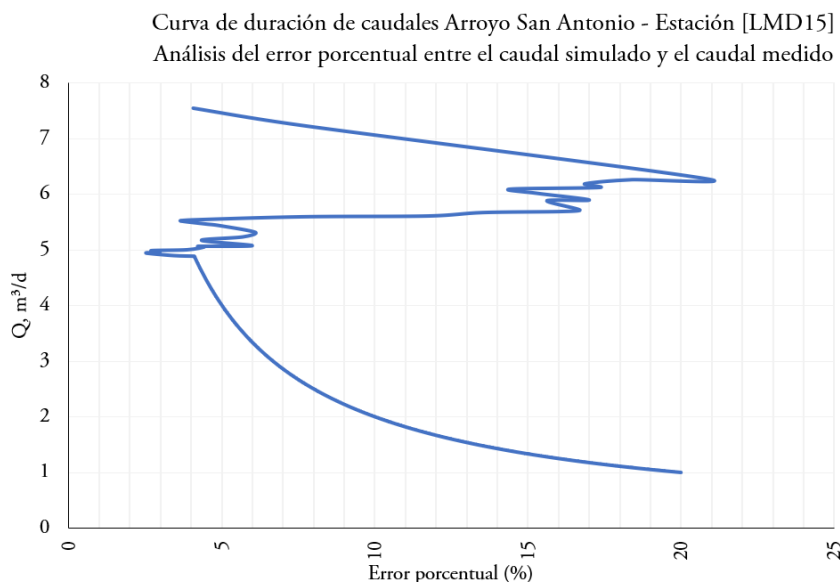
Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Con el propósito de analizar la variación del error o diferencia porcentual entre los caudales medios diarios simulados y los caudales medios registrados en campo, la Figura 7 presenta un análisis de la variación del error (en porcentaje, calculado a partir de los valores diarios de caudales medios registrados y caudales medios generados) con respecto al caudal medio diario registrado en la estación LMD-15. Tal como se puede observar, los errores más altos se presentan en los valores extremos, tanto en los caudales máximos diarios como en los caudales mínimos diarios. En esta gráfica también se puede observar que el error medio entre los valores generados y los valores observados oscilan entre un 10 % y un 15 %, con un error máximo de aproximadamente 30 % para los caudales máximos extremos.

Con el objetivo de analizar la viabilidad y calidad de los resultados del modelo y el modelo mismo, es necesario tener en cuenta que, tal como se menciona al inicio del presente artículo, el modelo de tanques usado en este trabajo de investigación es un modelo hidrológico discreto que permite simular los caudales medios diarios a partir del análisis de los valores medios diarios de precipitación, a partir de las particularidades del tipo y uso del suelo. Por tanto, es de esperarse que los caudales extremos (mínimos y máximos) simulados con esta metodología presenten incertidumbre y diferencias con respecto a los caudales registrados en campo ya que, para obtener adecuadamente los caudales extremos (caudales respuesta a una lluvia intensa), se requiere de otro tipo de modelos, como por ejemplo los basados en hidrogramas unitarios. Estos modelos de caudales máximos solo tienen en cuenta las abstracciones definidas por la infiltración y el encharcamiento potencial, debido a la corta duración de la lluvia intensa que lo genera.

Figura 7

Curva de duración de caudales medios diarios. Análisis de la variación porcentual entre los caudales generados con el modelo HEC-HMS y los caudales registrados en la estación LMD-15



Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

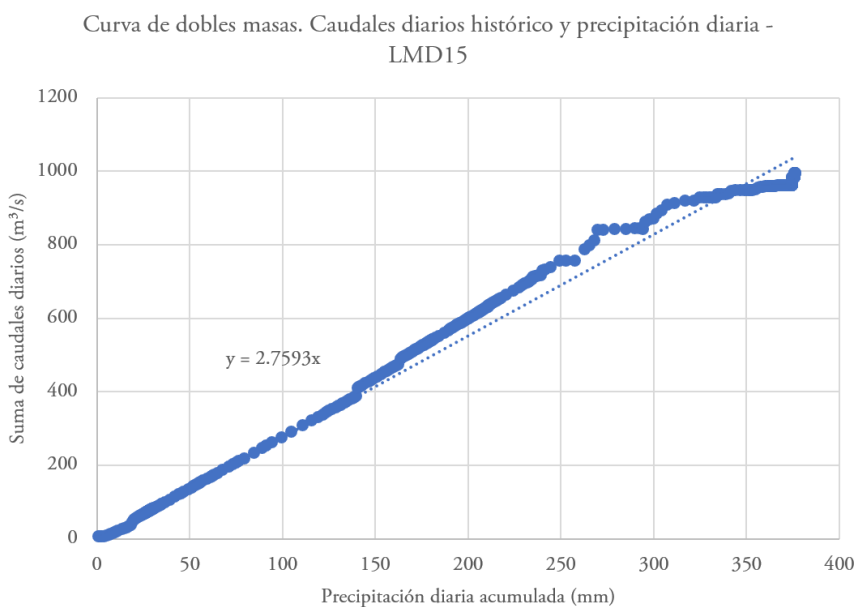
De acuerdo con los análisis anteriores, se puede deducir que los valores de los caudales medios generados con el modelo HEC-HMS son similares a los valores de los caudales medios diarios medidos en la estación LMD-15. Una vez obtenidos los parámetros definitivos del suelo y del coeficiente de reducción de la evapotranspiración potencial en cada subcuenca, se procedió a ejecutar nuevamente el modelo.

Esta nueva ejecución permitió estimar la serie de caudales medios diarios en el punto de control aguas abajo de la cuenca. Con el objetivo de revisar la correspondencia entre la precipitación diaria en la cuenca con el caudal medio diario generado con el modelo de tanques para todos los años de los registros disponibles (período 1963-2020), se realizó un análisis de dobles masas a nivel diario entre la serie utilizada con los registros de precipitación y la serie estimada de caudales medios diarios con el modelo de tanques (Hurtado, 2009).

En la Figura 8 se presentan los resultados de este análisis. Como se puede observar, existe una relación lineal entre ambas series acumuladas, lo que significa que el modelo de tanques explica proporcionalmente los caudales medios diarios generados, a partir de la precipitación media diaria y, por lo tanto, tal como se observa en la cuenca, el efecto del flujo base podría no tenerse en cuenta.

Figura 8

Curva de dobles masas. Comparación entre la precipitación diaria y los caudales generados con el modelo HEC-HMS. Estación LMD-15



Nota. Centro de Estudios Hidráulicos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

7. Conclusiones

Para la transformación de la lluvia diaria en escorrentía a nivel diario es posible utilizar el modelo de tanques incorporado en el software HEC-HMS en Colombia, si se cuenta con información adecuada y suficientemente extensa de valores diarios de precipitación, evapotranspiración y escorrentía.

La calibración del modelo ha sido posible gracias a la información de la escorrentía recopilada en la cuenca de drenaje de la zona minera, cuyo registro es diario.

Se recomienda, antes de realizar cualquier proceso de calibración de un modelo lluvia-escorrentía que implique el uso de información a nivel diario, evaluar la calidad de la información y la correspondencia de los datos.

Con base en los análisis y resultados obtenidos en esta investigación y a partir de las conclusiones descritas a lo largo del presente trabajo y que corresponden a los estudios derivados de la frecuencia de ocurrencia de los caudales y los cálculos de la variación del error porcentual entre los valores observados y los valores generados, se concluye que este modelo es adecuado para la estimación de caudales medios diarios en cuencas con intervención humana, teniendo en cuenta las particularidades del ciclo hidrológico en Colombia.

Finalmente, es necesario tener presente que, debido a la sencillez del modelo de tanques, este no considera de manera explícita las condiciones de flujo derivadas principalmente de los procesos no estacionarios, una vez que el agua se infiltra o percola al suelo. Es decir, se ha utilizado un modelo agregado (puntual) y permanente que podrá ser refinado con más información de campo, en especial de información de aguas subterráneas, estudio que a la fecha no está disponible.

Referencias

- Carvajal, L. F. y Roldán, E. (2006). *Calibración del modelo lluvia – escorrentía agregado GR4J. Aplicación: Cuenca del Río Aburrá*. Universidad Nacional de Colombia.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Editorial Mac Graw Hill.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. (2015-2023). *Estudio Hidrológico Proyecto La Loma, Drummond LTD*. Centro de Estudios Hidráulicos. Bogotá D.C.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. (2012). *Informe de consultoría para la evaluación de estudios hidrológicos e hidráulicos en las cuencas en estado natural que conforman el área minera del centro del Cesar. Caudales máximos y mínimos*. Bogotá D. C.

- Hurtado, M. A. (2009). *Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano*. [Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia].
- Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. INVIAS y Ministerio del Transporte. Bogotá D.C.
- Kennedy, B.A. (1990). *Surface Mining*, (2nd Edition). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Indonesia, 890. Estados Unidos.
- US Army Corps of Engineers. (2010a). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*. Quick Start Guide.
- US Army Corps of Engineers. (2010b). *HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extensión*. User's Manual.