



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

FACULTAD AGROPECUARIA Y DE LOS RECURSOS
NATURALES RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA EN MANEJO Y CONSERVACIÓN
DEL MEDIO AMBIENTE

*Evaluación del ajuste del modelo hidrológico
semidistribuido HEC-HMS para la simulación de
caudales de la microcuenca El Carmen del cantón Loja.*

*Tesis de grado previo a obtener el título
de Ingeniería en Manejo y
Conservación del Medio Ambiente.*

AUTOR:

JULIO CESAR TORRES ELIZALDE

TUTOR:

DR. CHRISTIAN FERNANDO LEÓN CELI

LOJA-ECUADOR

2019

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR

En calidad de director de la tesis titulada **Evaluación del ajuste del modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen del cantón Loja**, de autoría del Sr. **Julio Cesar Torres Elizalde**, egresado de la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, certifico que la investigación ha sido culminada dentro del cronograma aprobado y autorizo continuar con los trámites de graduación pertinentes.

Loja, 22 de agosto del 2019

Atentamente



Dr. Christian Fernando León Celi.

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL

En calidad de tribunal calificador de la tesis titulada **Evaluación del ajuste del modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen del cantón Loja**, de autoría del Sr. **Julio Cesar Torres Elizalde**, egresado de la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, certificamos que ha incorporado al trabajo final de tesis todas las sugerencias efectuadas por sus miembros.

Por lo tanto, autorizamos al señor egresado, su publicación y difusión.

Loja, 14 de octubre del 2019

Atentamente:

M.Sc., Aurita Giovanna Gonzaga Figueroa

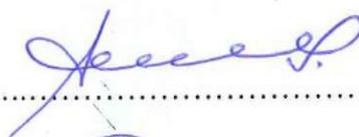
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

M.Sc., Oscar Lenin Juela Sivisaca

VOCAL DEL TRIBUNAL

M.Sc., Natalia Soledad Samaniego Rojas

VOCAL DEL TRIBUNAL



AUTORÍA

Yo, **Julio Cesar Torres Elizalde** declaro ser el autor de la presente tesis titulada **Evaluación del ajuste del modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen del cantón Loja**, y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.



.....
Julio Cesar Torres Elizalde

C.I.: 1106100561

Loja, 15 de octubre del 2019

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR PARA LA
CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO**

Yo, **Julio Cesar Torres Elizalde** declaro ser autor de la tesis titulada **Evaluación del ajuste del modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen del cantón Loja**, como requisito para optar al grado de: Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior con los cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los quince días del mes de octubre del dos mil diecinueve, firma el autor.



Julio Cesar Torres Elizalde

C.I.: 1106100561

Dirección: Loja, Barrio Esteban Godoy

Teléfono celular: 0959254274

Correo electrónico: juliot461@gmail.com

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: Dr. Christian Fernando León Celi

Tribunal de grado: M.Sc., Aurita Giovanna Gonzaga Figueroa

M.Sc., Oscar Lenin Juella Sivisaca

M.Sc., Natalia Soledad Samaniego Rojas

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Nacional de Loja, al Área Agropecuaria de Recursos Naturales Renovables y a la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente por brindarme los conocimientos teóricos y prácticos para mi formación profesional.

De la misma manera agradezco al Dr. Christian León, director de la presente investigación, por todo el tiempo y esfuerzo brindados, por tan valiosos aportes y recomendaciones, pues sin ellas, este trabajo no hubiera sido culminado con éxito.

Al Centro de Investigaciones Tropicales del Ambiente y la Biodiversidad – CITIAB, por facilitar la información necesaria para desarrollar el presente trabajo de investigación. También de manera especial al Ing. Diego Mejía y a la Ing. Natalia Samaniego, que siempre estuvieron predispuestos a guiarme en el desarrollo de este estudio con su amplio conocimiento en el tema.

Finalmente, expreso un infinito y profundo agradecimiento a mis padres, gracias por el apoyo incondicional que desde pequeño me han brindado, por siempre acompañarme en cada paso que he dado en este proceso educativo, por motivarme a cumplir esta meta y a trazarme muchas más, por enseñarme con su ejemplo de lucha, superación y honestidad a ser una persona de bien.

Julio Cesar Torres Elizalde

DEDICATORIA

Quiero dedicar el presente trabajo de investigación y todo el esfuerzo que he puesto en él a mis queridos padres Carmita y Julio, a mis hermanas Lilibeth, Ibeth y Nayeli.

Este logro también es de ustedes.

Julio Cesar Torres Elizalde

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR.....	II
CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL.....	III
AUTORÍA	IV
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
ÍNDICE DE CONTENIDO	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XII
RESUMEN	XIV
SUMARY	XVI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Problemática	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. General.....	4
1.4.2. Específicos.....	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Ciclo hidrológico	5
2.1.1. Evaporación.....	6
2.1.2. Precipitación	6
2.1.2.1. Precipitación media	7
2.1.2.2. Hietograma	9
2.1.3. Infiltración	9
2.1.4. Escorrentía.....	10
2.1.4.1. Hidrograma.....	12
2.2. Cuenca hidrográfica.....	14
2.2.1. Parámetros morfométricos.....	15
2.2.2. Parámetros dimensionales	15

2.2.3. Parámetros de forma.....	16
2.2.4. Parámetros de relieve.....	17
2.2.5. Parámetros de drenaje.....	18
2.3. Modelos hidrológicos	19
2.3.1. Tipos de modelos.....	20
2.3.1.1. Modelos físicos o materiales	21
2.3.1.2. Modelos matemáticos o abstractos	21
2.3.2. Calibración y validación de modelos hidrológicos	23
2.3.2.1. Coeficiente de determinación (R^2)	24
2.3.2.2. Porcentaje de sesgo (PBIAS).....	25
2.3.2.3. Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	25
2.4. Modelo hidrológico HEC-HMS	26
2.4.1. Modelo de cuenca.....	27
2.4.1.1. Módulo de pérdida.....	27
2.4.1.2. Módulo de transformación	29
2.4.1.3. Módulo del flujo base	30
2.4.2. Modelo meteorológico.....	31
2.4.3. Especificaciones de control	31
2.4.4. Datos de series temporales	31
3. METODOLOGÍA.....	32
3.1. Área de estudio	32
3.2. Métodos	34
3.2.1. Recolección de la información	34
3.2.2. Selección de los eventos para la modelación en HEC-HMS.....	37
3.2.3. Metodología para el análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen.....	39
3.2.4. Metodología para aplicar el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS en la microcuenca El Carmen.....	41
3.2.4.1. Construcción del modelo	42
3.2.4.2. Simulación de partida y calibración del modelo	47
3.2.5. Metodología para validar el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para la microcuenca El Carmen.....	48
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1. Análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen.....	49
4.1.1. Parámetros dimensionales y de forma.....	49

4.1.2. Parámetros de relieve.....	50
4.1.3. Parámetros de drenaje.....	52
4.2. Modelamiento hidrológico semidistribuido HEC-HMS en la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen.....	53
4.2.1. Construcción del modelo	54
4.2.2. Simulación de partida	57
4.2.3. Calibración de del modelo.....	59
4.3. Validación del modelo hidrológico HEC-HMS en la microcuenca El Carmen	62
5. CONCLUSIONES.....	65
6. RECOMENDACIONES	66
7. BIBLIOGRAFÍA	67
8. ANEXOS	73
8.1. Anexo 1. Datos de precipitación y caudal registrados por las estaciones pluviométrica y meteorológica en el evento 1.....	73
8.2. Anexo 2. Datos de precipitación y caudal registrados por las estaciones pluviométrica y meteorológica en el evento 2.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores referenciales del coeficiente de determinación (R^2).....	24
Tabla 2. Valores referenciales del porcentaje de sesgo (PBIAS)	25
Tabla 3. Valores referenciales del coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE).....	26
Tabla 4. Tipos de vegetación existentes en la microcuenca El Carmen.	33
Tabla 5. Información base para el trabajo de investigación.	34
Tabla 6. Características las estaciones utilizadas en la medición de las variables hidrometeorológicas en la microcuenca El Carmen.	35
Tabla 7. Ubicación de las estaciones disponibles en la microcuenca El Carmen.....	35
Tabla 8. Métodos y fórmulas para el cálculo del análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen.	40
Tabla 9. Clasificación de los grupos hidrológicos.....	43
Tabla 10. Número de curva según grupo hidrológico y cobertura/uso de suelo.	44
Tabla 11. Resultados del análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen. Parámetros dimensionales y de forma.	49
Tabla 12. Resultados del análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen. Parámetros de relieve.....	50
Tabla 13. Resultados del análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen. Parámetros de drenaje.....	52
Tabla 14. Información de entrada de entrada al componente modelo de cuenca.	54
Tabla 15. Resultados del análisis gráfico de la simulación de partida del evento 1.....	57
Tabla 16. Resultados del análisis estadístico de la simulación de partida del evento 1. 58	
Tabla 17. Información de entrada al componente modelo de cuenca, luego de la calibración.	59
Tabla 18. Resultados del análisis gráfico de la simulación del evento 1 para el periodo de calibración.	60
Tabla 19. Resultados del análisis estadístico de la simulación del evento 1 para el periodo de calibración.....	61
Tabla 20. Resultados del análisis gráfico de la simulación del evento 2 para el periodo de validación.	63
Tabla 21. Resultados del análisis estadístico de la simulación del evento 2 para el periodo de validación.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El Ciclo Hidrológico.	5
Figura 2. Instrumentos de medición de la precipitación.	7
Figura 3. Método de Polígonos de Thiessen	8
Figura. 4. Hietogramas	9
Figura. 5. Relación de la precipitación y el escurrimiento total.	11
Figura. 6. Componentes de un hidrograma de una tormenta aislada.....	13
Figura 7. La cuenca como un sistema hidrológico.	14
Figura 8. Curva hipsométrica.	18
Figura 9. Clasificación de los modelos hidrológicos.	20
Figura. 10. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial	22
Figura. 11. Fases de trabajo del modelo HEC-HMS.	27
Figura. 12. Mapa de ubicación de la microcuenca El Carmen.	32
Figura. 13. Modelo de elevación digital de la microcuenca El Carmen.....	34
Figura. 14. Mapa de cobertura/uso de suelo obertura/uso de suelo y mapa del tipo de suelo de la microcuenca El Carmen	36
Figura. 15. Análisis de correlación de los datos de precipitación registrados en las estaciones pluviométrica y meteorológica de los eventos 1y 2	38
Figura. 16. Hietograma e hidrograma del evento 1 ocurrido en la microcuenca El Carmen.	38
Figura. 17. Hietograma e hidrograma del evento 2 ocurrido en la microcuenca El Carmen.	39
Figura. 18. Flujograma del proceso de análisis morfométrico de la microcuenca.	41
Figura. 19. Flujograma del proceso de aplicación del modelo HEC-HMS.....	42
Figura. 20. Flujograma del proceso de validación del modelo HEC-HMS.....	48
Figura. 21. Mapa altitudinal y mapa de pendientes de la microcuenca El Carmen.	51
Figura. 22. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la microcuenca El Carmen.	51
Figura. 23. Mapa del orden de corrientes de la microcuenca El Carmen.....	53
Figura. 24. Mapa del grupo hidrológico de la microcuenca El Carmen.....	54
Figura. 25. Mapa del número de curva de la microcuenca El Carmen.	56

Figura. 26. Hidrogramas simulado y observado del evento 1 para la simulación de partida.	57
Figura. 27. Volumen de escorrentía acumulado simulado y observado del evento 1 de la simulación de partida.....	58
Figura. 28. Hidrogramas simulado y observado del evento 1 para el periodo de calibración.	60
Figura. 29. Volumen de escorrentía acumulado simulado y observado del evento 1 para el periodo de calibración.....	61
Figura. 30. Hidrogramas simulado y observado del evento 2 para el periodo de validación.	62
Figura. 31. Volumen de escorrentía acumulado simulado y observado del evento 2 para el periodo de calibración.....	63

Evaluación del ajuste del modelo hidrológico
semidistribuido HEC-HMS para la simulación
de caudales de la microcuenca El Carmen del
cantón Loja

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el ajuste del modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para la simulación de caudales en la microcuenca El Carmen, que se encuentra ubicada al Sur-Occidente de la ciudad de Loja. La metodología se desarrolló paralelamente a tres objetivos específicos. El primero de análisis morfométrico de la microcuenca empleando SIG. El segundo de aplicación del modelo HEC-HMS, en el cual se lo construyó, se realizó la simulación de partida y se lo calibró en base al evento 1 (11/4/2016 14:50 – 12/4/2016 11:00). En el tercero de validación del modelo, se utilizó los parámetros calibrados para la simulación de los caudales del evento 2 (26/4/2016 17:00 – 30/4/2016 6:00), para finalmente someter a un análisis gráfico y estadístico los resultados. En el proceso de simulación hidrológica se utilizó los métodos: número de curva del SCS para la separación de la precipitación efectiva, hidrograma unitario del SCS para la transformación de lluvia a escorrentía, y de recesión para el flujo base. Los resultados del análisis gráfico revelan que el modelo simula correctamente la curva de ascenso hasta el pico del hidrograma, mientras que curva de recesión es subestimada al igual que el volumen de escorrentía para ambos eventos. Con respecto a los resultados del análisis estadístico, el coeficiente de eficiencia de Nash (NSE) varía entre 0,74 y 0,79, cuyo rango indica un muy buen desempeño del modelo. El coeficiente de determinación (R^2) entre 0,78 y 0,83, que se considera en el rango de una correlación aceptable y excelente respectivamente entre las variables. El porcentaje de sesgo (PBIAS) obtuvo valores entre 9,18% y 21,6% de sesgo entre caudales simulados y observados que se considera como entre bueno y satisfactorio. Por lo tanto, se puede concluir que HEC-HMS desde el enfoque semidistribuido puede ser utilizado en la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen para implementación de sistemas de alerta temprana, pero no con fines de determinación de la oferta del recurso hídrico.

Palabras Clave: Microcuenca, Precipitación, Caudal, Número de curva, Modelo hidrológico, HEC-HMS.

SUMMARY

The objective of this research was to evaluate the fit of the semi-distributed hydrological model HEC-HMS for the simulation of flows in the El Carmen micro-watershed, which is located south-west of the city of Loja. The methodology was developed parallel to three specific objectives. The first of morphometric analysis of the micro watershed using GIS. The second of application of the HEC-HMS model, in which it was built, the starting simulation was made and it was calibrated based on event 1 (11/4/2016 14:50 - 12/4/2016 11:00). In the third validation of the model, the calibrated parameters were used for the simulation of the flows of event 2 (26/4/2016 17:00 - 30/4/2016 6:00), to finally submit the results to a graphical and statistical analysis. In the hydrological simulation process the following methods were used: SCS curve number for effective precipitation separation, SCS unit hydrogram for transformation from rain to runoff, and recession for baseflow. The results of the graphical analysis reveal that the model correctly simulates the ascent curve to the peak of the hydrograph, while the recession curve is underestimated as is the runoff volume for both events. With respect to the results of the statistical analysis, the Nash efficiency coefficient (NSE) varies between 0.74 and 0.79, the range of which indicates very good model performance. The determination coefficient (R²) between 0.78 and 0.83, which is considered in the range of an acceptable and excellent correlation respectively between the variables. The percentage of bias (PBIAS) obtained values between 9.18% and 21.6% of bias between simulated and observed flows that is considered between good and satisfactory. Therefore, it can be concluded that HEC-HMS from the semi-distributed approach can be used in the simulation of flows of the El Carmen micro-watershed for the implementation of early warning systems, but not for the purpose of determining the supply of water resources.

Keywords: Microwatershed, Precipitation, Flow, Curve number, Hydrological model, HEC-HMS.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En los últimos años, los modelos hidrológicos se han empezado a utilizar cada vez con mayor frecuencia. Para el manejo de grandes cantidades de información, se han desarrollado un sinnúmero de modelos enfocados a mejorar la comprensión de los distintos procesos hidrológicos, adaptándose a las exigencias cada vez más rigurosas de la comunidad científica. De entre estos surge el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS 4.2.1 (Hydrological Engineers Center Hydrologic Modeling System) desarrollado por el centro de ingeniería hidrológica del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos. Este modelo está enfocado específicamente en la simulación de los procesos de precipitación-escorrentía en cuencas hidrográficas.

A nivel nacional existen varios estudios en los que se ha utilizado el modelo hidrológico HEC-HMS, como el de Arteaga (2017). Dicha investigación evalúa el modelo hidrológico para predecir caudales de crecida en la cuenca del río Cañar. Para ello aplicó el modelo en cinco eventos de crecida, obteniendo buenos resultados en 3 de los 5 eventos simulados. De igual manera en el presente estudio se plantea utilizar el modelo hidrológico HEC-HMS, para la simulación de caudales en base a eventos aislados.

Existen otras experiencias de modelamiento hidrológico en ecosistemas de alta montaña como el de Cabrera (2017), en el que se evaluó el modelo hidrológico HEC-HMS para la simulación de caudales en la microcuenca del río Quinuas (Parque Nacional El Cajas). Los resultados de esta investigación muestran que los caudales simulados tienen un buen ajuste con los caudales observados. Este estudio se desarrolla en una microcuenca de páramo, y por lo tanto sirve de referencia en el desarrollo de la presente investigación, ya que comparten un escenario espacial similar.

En Loja se ha utilizado el modelo HEC-HMS para determinar la respuesta hidrológica de la subcuenca alta del río Zamora, Ordoñez (2015) aplica el modelo para eventos de tipo mensuales y eventos de 5 días. Los resultados del estudio indican que los caudales simulados mediante HEC-HMS tienen una correlación aceptable con los caudales observados en campo. Otro estudio realizado es el de Alvarez (2017), quien realizó la simulación de caudales mediante el modelo hidrológico HEC-HMS, para determinar la disponibilidad de agua en la subcuenca Zamora Huayco. Los resultados del modelamiento

indican que el desempeño del modelo es muy bueno y con una excelente correlación entre los datos observados y simulados.

Dado que el modelo hidrológico HEC-HMS es ampliamente usado en la simulación de caudales en cuencas hidrográficas en el contexto nacional y provincial, y a los buenos resultados obtenidos, se plantea su utilización para la simulación de caudales en la microcuenca El Carmen.

1.2. Problemática

En países en vías de desarrollo, la medición de variables hidrometeorológicas como precipitación y caudal es una labor difícil. Esto se debe a que las redes de estaciones hidrometeorológicas son poco densas o incluso inexistentes. El principal inconveniente radica en que la implementación y mantenimiento de las estaciones de medición resulta costoso. Algunas de las variables que influyen son: el precio del equipo, la operación y desarrollo de bases de datos y su gestión (Mendoza, Bocco, Bravo, Siebe, y Ortiz, 2002).

En varios países sudamericanos se realizan grandes esfuerzos por implementar redes de medición para la generación de información hidrometeorológica, sin embargo, la cobertura aún sigue siendo insuficiente, al igual que los recursos humanos para su administración y gestión (Pochat, Donoso, y Saldarriaga, 2018). En Colombia por ejemplo, Amaya, Restrepo, Vélez, Vélez, y Álvarez (2009) mencionan que en gran parte del país existe un déficit de registros de variables hidrometeorológicas (precipitación, caudal, etc), que son fundamentales para la realización de estudios hidrológicos.

En Ecuador, en el año 2010 se contaba con 250 estaciones activas a nivel nacional (INAMHI, 2013). Por ello el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) en ese mismo año planteó un proyecto enfocado a incrementar la densidad de la red de estaciones meteorológicas e hidrológicas del país (INAHMI, 2010; INAMHI, 2019a), pues en el territorio nacional no se cumplían con las recomendaciones de la Organización Mundial de Meteorología (OMM) en cuanto a la densidad de la red de estaciones de monitoreo hidrometeorológico (INAHMI, 2010; OMM, 2011). Un claro ejemplo de este problema es el que encontraron López y Patiño (2017) en la microcuenca Chaquilcay, en donde no existían registros de precipitación y caudal para el modelamiento hidrológico, que tenía como fin determinar la oferta de agua de la unidad hidrográfica. Esto debido a

que no se contaba con estaciones hidrometeorológicas para el monitoreo, a pesar que esta microcuenca es fuente de suministro de agua para las localidades.

En la provincia de Loja y específicamente en la microcuenca El Carmen, este problema persiste. A pesar de que se han logrado avances significativos con la implementación de radares meteorológicos (Bendix *et al.*, 2017) y redes de estaciones meteorológicas e hidrológicas (CITIAB, 2016b; INAMHI, 2014, 2019b) para la generación de información, la falta de recursos económicos y humanos para su adecuada gestión ha provocado que estos instrumentos queden obsoletos, imposibilitando el registro de las variables hidrometeorológicas.

Los vacíos de registros, dificulta una planificación adecuada y por lo tanto una gestión sostenible del recurso hídrico. Frente a esta problemática surge la necesidad de contar con una herramienta que permita reconstruir los registros de las variables hidrometeorológicas en la microcuenca El Carmen. Para ello se plantea el uso del modelo HEC-HMS en la modelación hidrológica semidistribuida. Esta es una herramienta que se puede aplicar para la simulación de caudales, siempre y cuando se compruebe su buen desempeño para la cuenca bajo estudio. En este sentido cabe formularse la siguiente pregunta: ¿Puede el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS simular el caudal de la microcuenca El Carmen de manera eficiente a partir de los datos de precipitación existentes?.

1.3. Justificación

Los estudios de modelación hidrológica se consideran una herramienta muy útil para la evaluación, desarrollo y gestión de los recursos hídricos (López, 2012). Los modelos de precipitación-escorrentía permiten determinar los caudales máximos, mínimos y medios, que son importantes para el dimensionamiento de obras y diseño de operación. Algunos proyectos de aplicación son los sistemas de riego, sistemas de agua potable, etc., para lo cual es necesario conocer la oferta y distribución temporal del agua (Cabrera, 2017).

Como se menciona en el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del municipio de Loja (2014), la microcuenca El Carmen es una de las 33 fuentes abastecedoras de agua para el cantón de Loja. A pesar de ser de carácter estratégico, y de estar debidamente instrumentada, esta pequeña unidad hidrográfica actualmente no está siendo monitoreada. El desconocimiento de la variabilidad temporal del agua en la microcuenca, dificulta una planificación adecuada y por lo tanto la gestión sostenible de este recurso. El cual permite

satisfacer una de las necesidades básicas como lo es el abastecimiento de agua potable para la población de la ciudad de Loja.

Ante el desconocimiento de la variabilidad temporal de agua en la microcuenca el Carmen, es necesario proponer una alternativa que permita simular los caudales generados en el área de estudio. Astorayme (2017); Mendoza *et al.*, (2002); Ocampo y Vélez (2014) mencionan que la modelación hidrológica es una herramienta que se puede aplicar para la simulación de caudales en el caso de cuencas con escasez de datos. La modelación hidrológica tiene gran aceptación en la comunidad científica, no obstante, es necesario evaluar el desempeño de los modelos hidrológicos bajo las condiciones ambientales (climáticas, topográficas, suelos y cobertura vegetal) de la microcuenca en estudio (Cabrera, 2011; Ocampo *et al.*, 2014).

La modelación hidrológica como herramientas para la predicción de caudales es un tema que aún no se han implementado en la zona de estudio. Por lo que, se plantea utilizar el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS 4.2.1 dada su facilidad de manejo y disponibilidad de la información de entrada (Fattorelli y Fernández, 2011). Con el desarrollo de esta investigación, se determinará la eficiencia del modelo hidrológico en la simulación de caudales en la microcuenca El Carmen. El estudio contribuirá a la gestión integral del recurso hídrico en la microcuenca abastecedora de agua El Carmen, con base a la caracterización del sistema hidrológico, validación de la información, reconstrucción de registros, predicciones futuras en distintos escenarios, entre otros aspectos.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Evaluar el ajuste del modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS, en la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen.

1.4.2. Específicos

- ❖ Estimar los parámetros morfométricos de la microcuenca El Carmen.
- ❖ Aplicar el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS en la microcuenca El Carmen.
- ❖ Validar el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS en la microcuenca El Carmen.

2. MARCO TEÓRICO

Dado que el estudio se centra en el modelamiento hidrológico, en este apartado se incorporan los fundamentos teóricos que dan contexto tema de investigación. Entre los aspectos más relevantes se han considerado: a) el ciclo hidrológico y los procesos que intervienen, b) las cuencas hidrográficas y su morfometría, c) los modelos hidrológicos y sus calificaciones, y d) el modelo HEC-HMS y sus principales características.

2.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico estudia el constante movimiento del agua en la naturaleza desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, así como también a los cambios entre sus diferentes estados: líquido, gaseoso y sólido (ver Figura 1) (Ordoñez, 2011b; Villon, 2002).

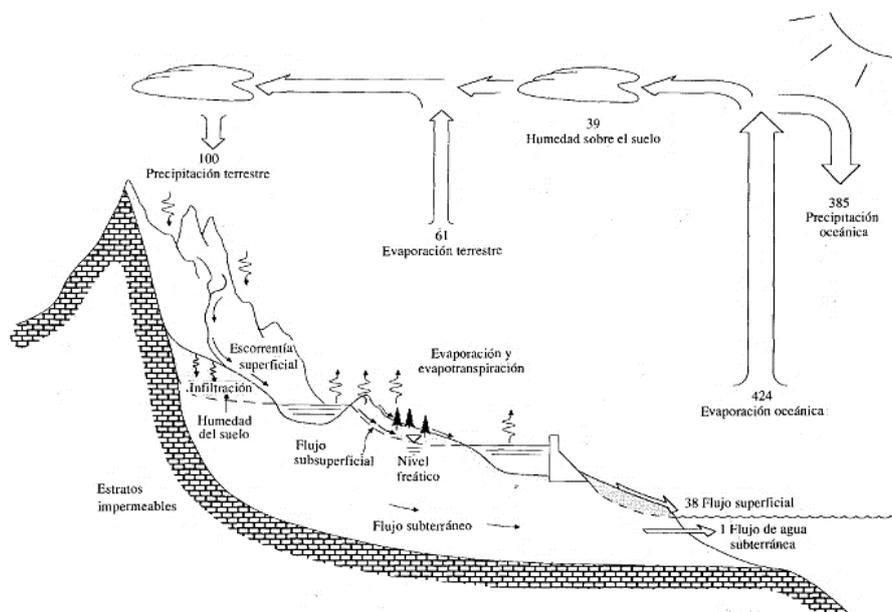


Figura 1. El Ciclo Hidrológico.

Fuente: Tomada de Chow *et al.* (1994).

El agua que se halla sobre la superficie terrestre (ríos, lagos y mares), se evapora por el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua resultante, se eleva hacia la atmósfera y luego en determinadas condiciones de presión y temperatura, el vapor se condensa formando nubes, que son las que ocasionan las precipitaciones que caen a la tierra. Durante su trayecto hacia la superficie terrestre, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas y construcciones. Del agua que no ha sido interceptada, una parte de esta fluye por la superficie hasta las corrientes y la otra parte se infiltra. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte se infiltra y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua como presas y lagos. Mientras que del

agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea (Aparicio, 1989; Villon, 2002).

A continuación, se describen por separado los distintos procesos que intervienen en el ciclo hidrológico. Es importante mencionar que se enfatiza y detalla mayormente los procesos que guardan una estrecha relación con el modelamiento hidrológico, como en el caso de los procesos de precipitación y escorrentía, que son las principales variables con las que se trabaja en el modelo HEC-HMS. Otros procesos como evapotranspiración e infiltración son abordados de una manera más general, dada su menor grado de importancia en la presente investigación.

2.1.1. Evaporación

La evaporación es un proceso permanente del ciclo hidrológico, es un fenómeno físico que se da en todo momento. Se considera como el paso del agua del estado líquido desde la superficie terrestre, hacia el estado gaseoso en la atmósfera. Existen algunos factores que influyen en la evaporación entre los cuales están: la radiación solar, la temperatura del aire, la presión de vapor, el viento y la presión atmosférica. La radiación solar es el factor más determinante, provocando que la evaporación cambie con la hora del día, época del año, condición de nubosidad y latitud (Aparicio, 1989; Villon, 2002).

Cuando la evaporación es provocada por la actividad de las plantas, recibe el nombre de transpiración. En este proceso las plantas expulsan agua en forma de vapor a la atmósfera a través de los estomas que se encuentran en sus hojas. La suma de la evaporación desde la superficie terrestre, y la transpiración de la vegetación da como resultado la evapotranspiración (Aparicio, 1989; Chow *et al.*, 1994; Villon, 2002).

2.1.2. Precipitación

La precipitación es la liberación de agua de la atmósfera que llega hasta la superficie de la tierra. El término precipitación abarca todas las formas de agua que libera la atmósfera, incluida la nieve, el granizo y la lluvia. La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de vapor a la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense y posteriormente se precipite (Chow *et al.*, 1994; Davie, 2008).

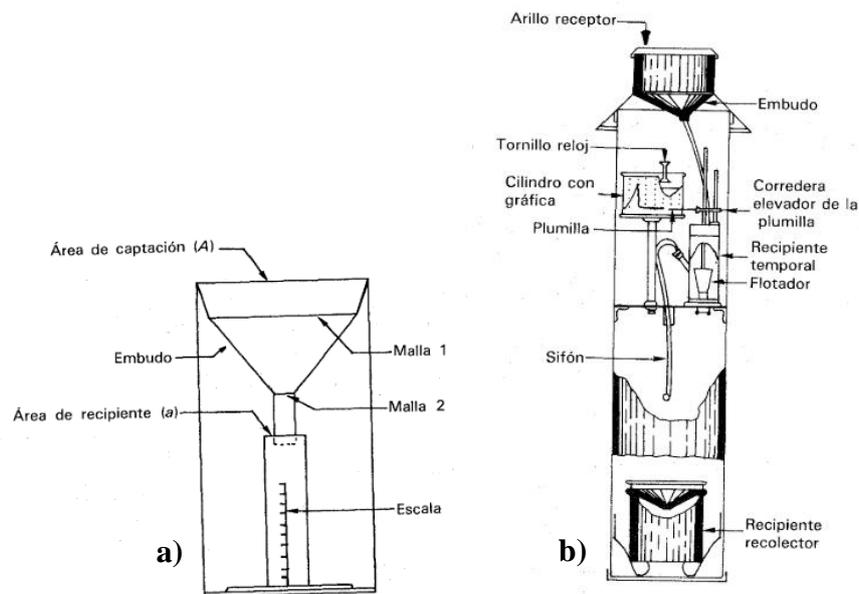


Figura 2. Instrumentos de medición de la precipitación (Pluviómetro (a) y pluviógrafo (b)).
Fuente: Tomada de Aparicio (1989).

La precipitación se mide en términos de altura de agua, y se expresa en milímetros de altura (mm). La altura del agua, es la que se acumularía en una superficie horizontal si la precipitación permaneciera donde cayó. Los instrumentos más comunes para registrar los valores de precipitación son el pluviómetro y el pluviógrafo (ver Figura 2a y 2b respectivamente). A diferencia del pluviómetro, el pluviógrafo tiene un mecanismo para producir un registro continuo de la precipitación, es decir, permite medir la distribución de la precipitación en función del tiempo (Aparicio, 1989; Ordoñez, 2011b).

2.1.2.1. Precipitación media

Para muchos problemas hidrológicos, se requiere conocer la altura de precipitación media de una zona o cuenca como en el caso de diseño hidrológico para la modelación de los procesos de lluvia y escorrentía, tanto en modelos de pronóstico como en diseño (Fattorelli y Fernández, 2011; Villon, 2002). Para calcular la altura de precipitación media de una tormenta, existen tres métodos convencionales que se pueden utilizar: el Aritmético, el de Polígonos de Thiessen, y el de Isoyetas (Villon, 2002). Se detalla el método de Polígonos de Thiessen, el cual fue utilizado en la determinación de la precipitación media de la microcuenca el Carmen, necesaria para el modelamiento hidrológico.

El método de Polígonos de Thiessen a diferencia del método aritmético, si toma en cuenta la distribución de las estaciones en el área de estudio, pero no los factores topográficos

que afectan a la distribución de la lluvia. Este método resulta apropiado desde el punto de vista práctico, en especial en cálculos repetitivos, como cuando se analiza varias tormentas, ya que el área entre los polígonos no cambia, mientras que el área de las isoyetas si lo hace a causa de que cada tormenta tiene un plano de isoyetas diferente (Aparicio, 1989; Villon, 2002).

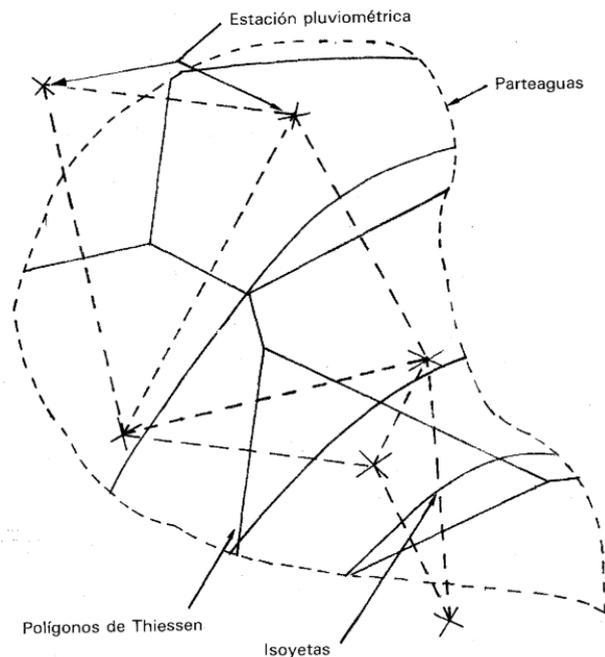


Figura 3. Método de Polígonos de Thiessen
Fuente: Tomada de Aparicio (1989).

La estimación de la precipitación media a través del método de Polígonos de Thiessen, consiste en unir mediante líneas rectas dibujadas en un plano de la cuenca, las estaciones más cercanas entre sí, con ello se forman triángulos (con ángulos menores a 90°) en cuyos vértices se encuentran las estaciones. Luego se trazan líneas rectas que bisecan los lados de los triángulos. Las líneas correspondientes a cada triángulo convergerán en un solo punto. Cada estación pluviométrica quedará rodeada por las líneas rectas trazadas, que forman los llamados Polígonos de Thiessen, y en algunos casos, en parte por la línea divisoria de aguas (ver Figura 3). El área encerrada por los Polígonos de Thiessen y el parteaguas indicará el área de influencia de cada estación (Aparicio, 1989; Villon, 2002).

La precipitación media se calcula como el promedio ponderado de las precipitaciones de cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente para cada estación, para ello se utiliza la ecuación 1 (Aparicio, 1989; Villon, 2002):

$$P_{med} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i P_i \quad (1)$$

Donde:

P_{med} es la precipitación media de la cuenca (mm).

A es el área total de la cuenca (Km²).

A_i es el área de influencia parcial del polígono de Thiessen correspondiente a la estación (Km²).

P_i es la precipitación de la estación (mm).

n es la el número de estaciones tomadas en cuenta.

2.1.2.2. Hietograma

Generalmente los datos de precipitación de una tormenta se suelen representar a través de un hietograma para su interpretación y análisis. Un hietograma es un diagrama de barras que representa la variación de las alturas de precipitación (ver Figura 4a), o bien la variación de la intensidad expresada en mm/h (ver Figura 4b) de la tormenta en función del tiempo correspondiente a la duración de la tormenta (Aparicio, 1989; Fattorelli *et al.*, 2011). Con la ayuda del hietograma se puede identificar valores máximos de intensidad de precipitación para tormentas de distintas duraciones (Villon, 2002).

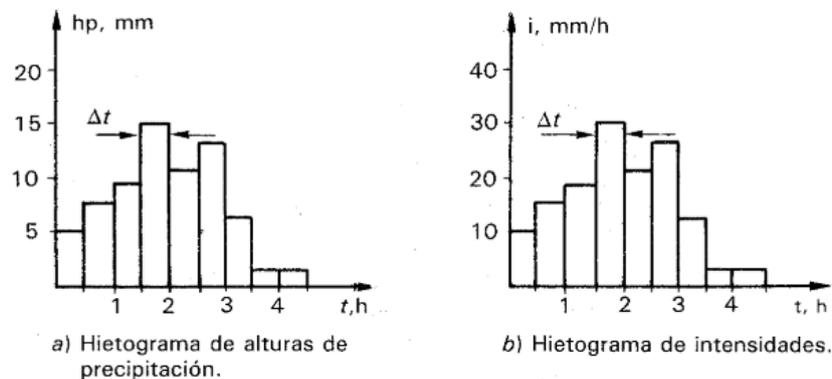


Figura. 4. Hietogramas
Fuente: Tomado de Aparicio (1989)

2.1.3. Infiltración

Se define como el proceso de movimiento del agua, desde la superficie del suelo a través de sus capas superiores y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas de gravedad y las capilares. Muchos factores influyen en la capacidad de infiltración del suelo, incluyendo uso y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo tales como la

porosidad, conductividad hidráulica, textura, estructura y el contenido de humedad inicial (Aparicio, 1989; Chow *et al.*, 1994).

La humedad antecedente influye en la capacidad de infiltración del agua en el suelo. Pues en períodos secos, los poros del suelo se encuentran llenos de aire y libres para llenarse de agua, lo que permite incrementar su capacidad de infiltración, mientras que en periodos húmedos esta capacidad se reduce debido a que el suelo se encuentra saturado, es decir los poros se encuentran cerrados y llenos de agua, impidiendo el paso del agua hacia el interior del suelo, dando inicio a la escorrentía superficial (Fattorelli *et al.*, 2011).

De igual manera existe una relación muy marcada entre la intensidad de la lluvia y la capacidad de infiltración del agua en el suelo. Durante un evento de precipitación la tasa potencial de infiltración empieza con valores elevados y disminuye a medida que pasa el tiempo. En determinado punto la tasa de infiltración es tan pequeña que es fácilmente superada por la intensidad de la lluvia y comienza a generarse la escorrentía superficial (Fattorelli *et al.*, 2011).

2.1.4. Escorrentía

La escorrentía se define como el agua proveniente de la precipitación, que circula a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Esta circulación puede ocurrir sobre o bajo la superficie terrestre y a diferentes velocidades (Davie, 2008; Villon, 2002). Por lo tanto, se puede clasificar al escurrimiento en tres tipos: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo (Quichimbo, 2010).

El *escurrimiento superficial*, ocurre cuando la tasa de precipitación es mayor que la tasa de infiltración del suelo. La precipitación efectiva (en exceso) escurre sobre la superficie del suelo hasta llegar a un cauce (ver Figura 5). El efecto sobre el escurrimiento total es inmediato y existirá durante la tormenta e inmediatamente después de que termine, por lo tanto, es el escurrimiento que llega más rápido hasta la salida de la cuenca. (Aparicio, 1989; Davie, 2008; Villon, 2002).

El *escurrimiento subsuperficial* es aquel que proviene de una parte de la precipitación infiltrada (ver Figura 5). Circula casi paralelamente a la superficie del suelo y su efecto sobre el escurrimiento total puede ser inmediato o retardado. Dependiendo de la permeabilidad de los estratos superiores del suelo, el escurrimiento subsuperficial puede

ser casi tan rápido como el superficial o casi tan lento como el subterráneo, lo que hace que sea difícil distinguirlo de los otros dos (Aparicio, 1989; Villon, 2002).

El *escurrimiento subterráneo* es el que tarda más en llegar a la salida de la cuenca (puede tardar años). Difícilmente se le puede relacionar con una tormenta particular, a menos que la cuenca sea demasiado pequeña y su suelo muy permeable. Debido a que se produce bajo el nivel freático, es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias (escurrimiento base) (ver Figura 5) (Aparicio, 1989; Quichimbo, 2010; Villon, 2002).

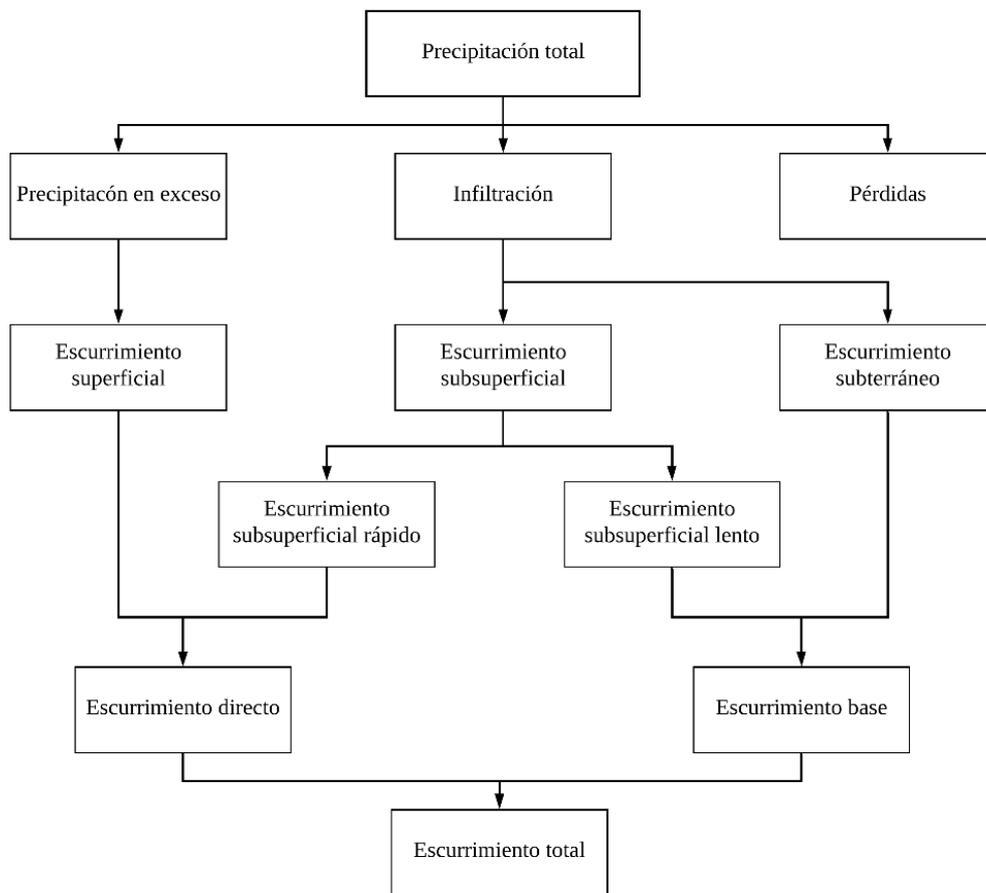


Figura. 5. Relación de la precipitación y el escurrimiento total.

Fuente: Tomado de Villon (2002).

El escurrimiento siempre estará en función de dos factores determinantes: los meteorológicos y los fisiográficos. Entre los meteorológicos están la forma, el tipo, la intensidad, la duración, y distribución de la precipitación. Mientras que en los fisiográficos se consideran la superficie, forma, elevación y pendiente de la cuenca, así como también el tipo, el uso y la humedad del suelo (Villon, 2002). Lo que realmente importa es la rapidez con que una cuenca responde a una tormenta, pues esto es lo que determina la magnitud de las correspondientes crecidas (Oñate, 2006).

La medición de la escorrentía se realiza a través de aforos que consisten en medir el caudal de agua que atraviesa por una sección determinada de la corriente en un determinado tiempo. Entre los métodos más utilizados para medir el caudal de una corriente de agua, entre los más utilizados se encuentran: las secciones de control, relación sección-pendiente y relación sección velocidad (Ordoñez, 2011b; Villon, 2002).

2.1.4.1. Hidrograma

Normalmente los registros de escurrimiento son expresados en forma de caudal (m^3/s) se representan mediante hidrogramas para su interpretación y análisis (Davie, 2008). En este sentido, se define al hidrograma como la curva que indica las variaciones del caudal en función del tiempo, el cual puede variar de algunas horas hasta años (Monsalve, 1999; Villon, 2002). El hidrograma también se considera como una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen la relación entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca (Chow *et al.*, 1994). Partiendo de esta premisa se puede decir que para cada hidrograma (caudal) existe un hietograma (precipitación) asociado que lo ha generado (Monsalve, 1999).

A pesar de que los hidrogramas producidos por una tormenta son diferentes entre una cuenca y otra, al igual que entre una tormenta y otra, es posible distinguir algunas partes comunes que comparten (ver Figura 6), y que se listan a continuación (Aparicio, 1989; Gaspari, Rodríguez, Senisterra, Delgado, y Besteiro, 2013; Monsalve, 1999; Villon, 2002):

- **Punto de levantamiento (A):** en este punto comienza la curva de ascenso del hidrograma, es decir el aumento progresivo del caudal. Indica que el agua de la tormenta empieza a llegar al punto de salida de la cuenca en forma de escorrentía superficial.
- **Pico (B):** es el punto máximo que alcanza el caudal producto de las precipitaciones de la tormenta. En este momento toda la cuenca está contribuyendo a la generación del caudal.
- **Punto de inflexión (C):** este punto de inflexión marca el comienzo de la curva de descenso del hidrograma, es decir la disminución progresiva del caudal. Aproximadamente en este momento es cuando termina la escorrentía sobre el suelo y

a partir de aquí el agua que queda en la cuenca escurre por los cauces y como escurrimiento subsuperficial y subterráneo.

- **Final del escurrimiento directo (D):** es el punto que indica el inicio de la curva de agotamiento. En este momento la esorrentía directa se da por terminada, por lo que los aportes al caudal de la corriente únicamente proceden de las reservas de agua subterránea (escurrimiento base).
- **Curva o rama ascendente:** es el segmento del hidrograma que empieza desde el punto de levantamiento (A) hasta el pico (B).
- **Curva o rama descendente:** es también llamada curva de recesión, es una curva de vaciado de la cuenca, corresponde al segmento entre el pico (B) y el final del escurrimiento directo (D).

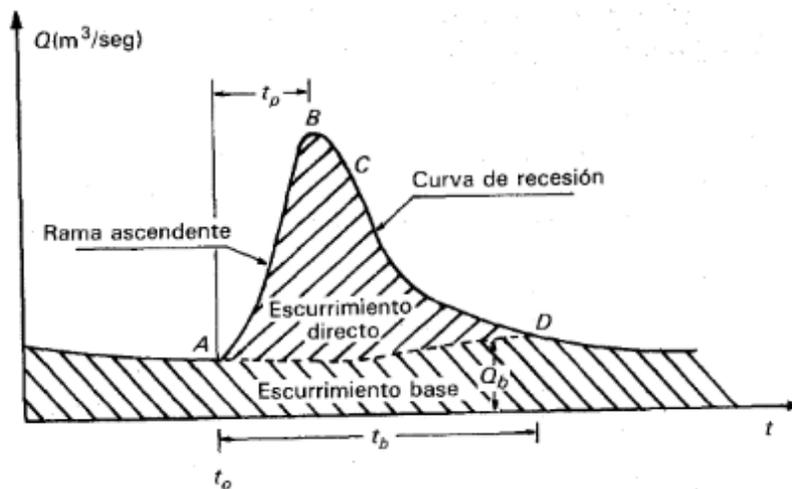


Figura. 6. Componentes de un hidrograma de una tormenta aislada.
Fuente: Tomado de Aparicio, (1989)

En el hidrograma de la Figura 6 también se encuentran representados los diferentes tiempos que resultan relevantes en el análisis de hidrogramas, a continuación se describen.

- **Tiempo pico (T_p):** es el intervalo de tiempo comprendido entre el punto de levantamiento del hidrograma (A) y el pico del mismo (B).
- **Tiempo base (T_b):** equivale al tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento del hidrograma (A) hasta el final del escurrimiento directo (D), es decir desde el inicio hasta el fin del escurrimiento directo.
- **Tiempo de concentración (T_c):** representa el tiempo que transcurre entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial, dicho de otra manera es el tiempo que tarda el agua en atravesar la cuenca desde su punto hidrológicamente

más alejado hasta el punto desembocadura (Aparicio, 1989; Fuentes, 2004). Para el cálculo del tiempo de concentración, existen varios métodos, una de las más utilizadas es la de Kirpich, en base a la ecuación 2 (Villon, 2002):

$$T_c = 0,0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (2)$$

Donde:

T_c es el tiempo de concentración (min)

L es la longitud del cauce principal (m).

H es el rango altitudinal (m).

- **Tiempo de retardo (T_{lag}):** es el espacio de tiempo comprendido entre los instantes que corresponden al centro de gravedad del hietograma de la tormenta y el centro de gravedad del hidrograma. En su defecto equivale al retardo entre los valores máximos de precipitación y caudal siempre y cuando sean sintéticos.

2.2. Cuenca hidrográfica

Así como el ciclo hidrológico es el concepto fundamental de la hidrología, la cuenca hidrográfica es el escenario donde ocurre el ciclo hidrológico. Una cuenca es considerada como una zona de la superficie terrestre delimitada topográficamente, en donde toda el agua que se precipita, tiende a ser drenada por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Aparicio, 1989; Monsalve, 1999; Villon, 2002).

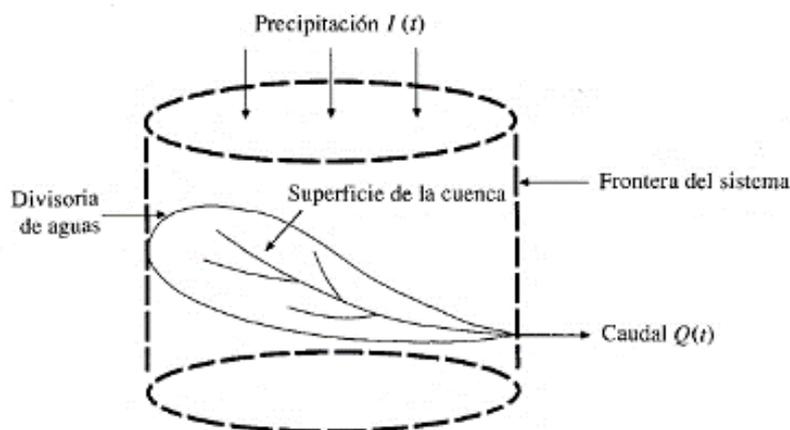


Figura 7. La cuenca como un sistema hidrológico.

Fuente: Tomada de Chow *et al.*, (1994).

La cuenca hidrográfica vista como un sistema (ver Figura 7), tiene como principal entrada la lluvia, y como salidas el caudal, la evapotranspiración, el flujo subsuperficial y la

percolación (Fattorelli *et al.*, 2011). Se considera como parte de una región hidrológica. Las cuencas, como áreas con sistema de drenaje definido, se representan cartográficamente a una escala de 1: 500 000 y 1: 250 000 (Aguirre, 2007).

De acuerdo con Aguirre, (2007); Sánchez, García, y Palma, (2003) las cuencas según su tamaño pueden clasificarse en:

- **Cuenca**, con una superficie mayor a 500 Km².
- **Subcuenca**, cubre una superficie de 50 a 500 Km².
- **Microcuenca**, tiene una superficie menor a 50 Km².

2.2.1. Parámetros morfométricos

El análisis de las características morfométricas es el punto de partida de los estudios de cuencas hidrográficas, y por lo tanto también en la modelación hidrológica. Los parámetros morfométricos resultan de gran importancia ya que proporcionan una descripción física y espacial de una cuenca bajo estudio. Además, brindan una idea preliminar de las condiciones hidrológicas y ambientales de una cuenca, así como también de su respuesta hidrológica frente a un evento de precipitación (proceso precipitación-escorrentía) (Aparicio, 1989; Gaspari *et al.*, 2013).

Los parámetros morfométricos se pueden agrupar en: *a) dimensionales, b) de forma, c) de relieve y d) de drenaje*. A continuación se explican de manera detallada cada uno, además de las ecuaciones para el cálculo de aquellos parámetros que resultan relevantes para la investigación.

2.2.2. Parámetros dimensionales

En los parámetros de dimensión se encuentran: área, perímetro, longitud axial y ancho promedio. Estos permiten tener una idea preliminar sobre el volumen de agua que circula por la unidad hidrográfica (Aparicio, 1989; Fuentes, 2004; Gaspari *et al.*, 2013).

- **Área (A)**: hace referencia a la superficie de la cuenca, en una proyección horizontal que está delimitada por la línea divisoria de aguas (Aparicio, 1989). Para su cálculo se puede utilizar una balanza analítica o un planímetro, pero en la actualidad es más común el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permiten su cálculo automático (Fuentes, 2004; Oñate, 2006).

- **Perímetro (P):** se refiere al borde de la forma de la cuenca proyectada en un plano horizontal, y que coincide con la línea parteaguas (Villon, 2002).
- **Longitud axial (La):** es la distancia que existe entre el punto de desembocadura de la cuenca y su punto más alejado de la misma (Gaspari *et al.*, 2013).
- **Ancho promedio (Ap):** es la relación entre el área de la cuenca y su longitud axial (Gaspari *et al.*, 2013). Se puede calcular con ayuda de la ecuación 3.

$$A_p = \frac{A}{L_a} \quad (3)$$

Donde:

A_p es el Ancho promedio (Km).

A es el área (Km²).

L_a es la longitud axial (Km).

2.2.3. Parámetros de forma

Entre los parámetros de forma están: el factor de forma de Horton, el índice de compacidad de Gravelius y el índice de circularidad. (Gaspari *et al.*, 2013; Villon, 2002). Todos indican la tendencia que tiene la cuenca a tener una forma circular o por el contrario alargada.

- **Factor de forma de Horton (If):** es un factor adimensional, que expresa la relación entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud (Gaspari *et al.*, 2013; Villon, 2002). Para su cálculo se puede utilizar ecuación 4.

$$I_f = \frac{A_p}{L_a} \quad (4)$$

Donde:

I_f es el factor de forma de Horton (Adimensional).

A_p es el ancho promedio (Km).

L_a es la longitud axial (Km).

- **Índice de compacidad de Gravelius (Kc):** es un índice adimensional, que expresa la relación entre el perímetro de la cuenca, y el perímetro equivalente de una circunferencia que tiene la misma área. Se calcula mediante la ecuación 5 (Gaspari *et al.*, 2013; Villon, 2002).

$$Kc = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (5)$$

Donde:

Kc es el coeficiente de compacidad de Gravelius (Adimensional).

P es el perímetro (Km).

A es el área (Km²).

- **Índice de circularidad (Ic):** este índice permite comparar la forma de la cuenca con respecto a la geometría del círculo. Puede ser calculado con la ecuación 6 (Cerignoni y Rodrigues, 2015).

$$Ic = 12,57 \left(\frac{A}{P^2} \right) \quad (6)$$

Donde:

Ic es el índice de circularidad (Ad).

A es el área (Km²).

P es el perímetro (Km).

2.2.4. Parámetros de relieve

En cuanto a los parámetros de relieve se consideran: el rango altitudinal, pendiente media de la cuenca, curva hipsométrica y elevación media.

- **Rango altitudinal (H):** representa el valor de la diferencia entre la cota más alta y la cota más baja a las cual se circunscribe la cuenca, es decir la amplitud altimétrica. (Cerignoni *et al.*, 2015; Fuentes, 2004).
- **Pendiente media de la cuenca:** es un parámetro muy importante, ya que tiene una marcada relación con el escurrimiento superficial, la infiltración, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al caudal del cauce. Además, afecta notoriamente a la relación lluvia-escurrimiento, pues reduce el tiempo de concentración y el periodo de infiltración (Oñate, 2006; Villon, 2002).
- **Curva hipsométrica (CH):** es una gráfica que brinda una información abreviada de la relación entre la altitud y la superficie de la cuenca (Gaspari *et al.*, 2013; Villon, 2002). Dicha curva indica el porcentaje de área o superficie de la cuenca que existe por encima de una cota determinada. (Oñate, 2006; Ordoñez, 2011a).

La curva hipsométrica es de gran importancia, pues es un indicador de del estado de equilibrio dinámico de la cuenca (Gaspari *et al.*, 2013; Oñate, 2006). En la Figura 8 se muestran tres curvas hipsométricas correspondientes a cuencas que tienen potenciales evolutivos distintos. En donde la curva A manifiesta un gran potencial erosivo, la curva B corresponde a una cuenca en equilibrio y la curva C es propia de una cuenca sedimentaria (Oñate, 2006). De igual manera se puede asociar las fases de vida de los ríos, fase de juventud con la curva A, fase de madurez con la curva B y fase de vejes con la curva C (Gaspari *et al.*, 2013).

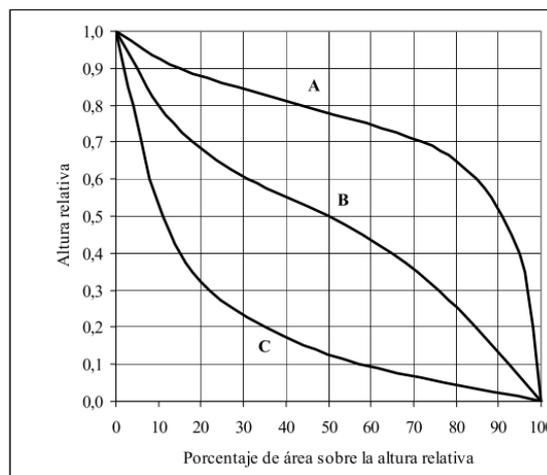


Figura 8. Curva hipsométrica.

Fuente: Tomada de Gaspari *et al.*, (2013).

- **Elevación media (Hi):** este parámetro tiene mucha influencia en el régimen hidrológico de la cuenca, debido a que influye en la temperatura y la precipitación que alimentan al ciclo hidrológico (Oñate, 2006).

2.2.5. Parámetros de drenaje

Con respecto a los parámetros de drenaje se incluyen: densidad de drenaje, longitud del cauce principal, pendiente media del cauce y el orden de corrientes, (Gaspari *et al.*, 2013).

- **Densidad de drenaje (Dd):** se define como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca y su respectiva superficie (Gaspari *et al.*, 2013; Oñate, 2006; Villon, 2002). Es un indicador de la respuesta de la cuenca frente un evento de precipitación, y por lo tanto, condiciona la forma del hidrograma resultante en el desagüe de la cuenca. Cuando existe una mayor densidad de drenaje, más dominante es el flujo en el cauce, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca, y por lo tanto, un menor tiempo al pico del hidrograma (Oñate, 2006). Para su cálculo se puede aplicar la ecuación 7.

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (7)$$

Donde:

Dd es la densidad de drenaje.

L es la longitud total de todas las corrientes (Km).

A es el área (Km²).

- **Longitud del cauce principal (L):** es la longitud lineal del escurrimiento principal de la cuenca, medido desde la parte más alta hasta el punto de desembocadura. Este parámetro influye en el tiempo de concentración y en la mayoría de los índices morfométricos (Fuentes, 2004).
- **Pendiente media del cauce (J):** este parámetro que se expresa en porcentaje y se deduce a partir del desnivel topográfico entre los dos extremos del cauce principal y la longitud (L) del mismo (Villon, 2002). Está relacionado con las características hidráulicas del escurrimiento, en particular con la velocidad de propagación de las ondas de avenida y con la capacidad para el transporte de sedimentos (Aguirre, 2007).
- **Orden de corrientes (W):** es una clasificación que indica el grado de bifurcación, es decir la complejidad de la estructura de la red de drenaje de una cuenca (Fuentes, 2004; Villon, 2002). Una de las tipologías más utilizadas para realizar esta clasificación es el método de Strahler 1952, que de acuerdo con Ordoñez, (2011a) esta categorización se realiza a partir de las siguientes premisas:
 - Los cauces de primer orden son los que no tienen tributarios.
 - Los cauces de segundo orden se forman por la unión de dos cauces de primer orden, y en general, los cauces de orden n se forman cuando dos cauces de orden n-1 se unen.
 - Cuando un cauce se une con un cauce de orden mayor, el canal resultante hacia aguas abajo retiene el mayor de los órdenes.
 - El orden de la cuenca es el mismo del su cauce principal a la salida.

2.3. Modelos hidrológicos

Un modelo hidrológico es una idealización de los fenómenos físicos que relaciona las variables hidrometeorológicas como la escorrentía, precipitación, temperatura, evapotranspiración, entre otras que se desarrollan en el marco de referencia de una

cuenca. Con él se busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca (Astorayme, 2017; Avalos, 2018; Weber, Stehli, Vestena, y Jorquera, 2013). Por lo tanto se presentan como una necesidad y herramienta para conocer mejor el comportamiento de los diferentes componentes del ciclo hidrológico (Cabrera, 2011).

Generalmente, los datos iniciales utilizados por los diferentes modelos son la precipitación, la temperatura, las características del suelo, la topografía, la vegetación, la hidrogeología y otros parámetros físicos (Gayathri, Ganasri, y Dwarakish, 2015). La importancia de estos modelos radica en que una vez calibrados y validados, pueden ser utilizados para simular diversas situaciones o para extender la información existente (Alvarez, 2017; Ricaldi, 2016).

2.3.1. Tipos de modelos

De manera general en el campo de la hidrología los modelos se pueden dividir en dos grandes categorías: los físicos o materiales y los matemáticos o abstractos (ver Figura 9). Los modelos físicos se han utilizado de manera generalizada en hidráulica y en hidrología subterránea, sin embargo, en los últimos años se prefieren los modelos matemáticos ya que son más baratos y flexibles (Chow *et al.*, 1994; Fernández, Vela, y Castaño, 1997; Vargas, Ibáñez, y Arteaga, 2015; Weber *et al.*, 2013).

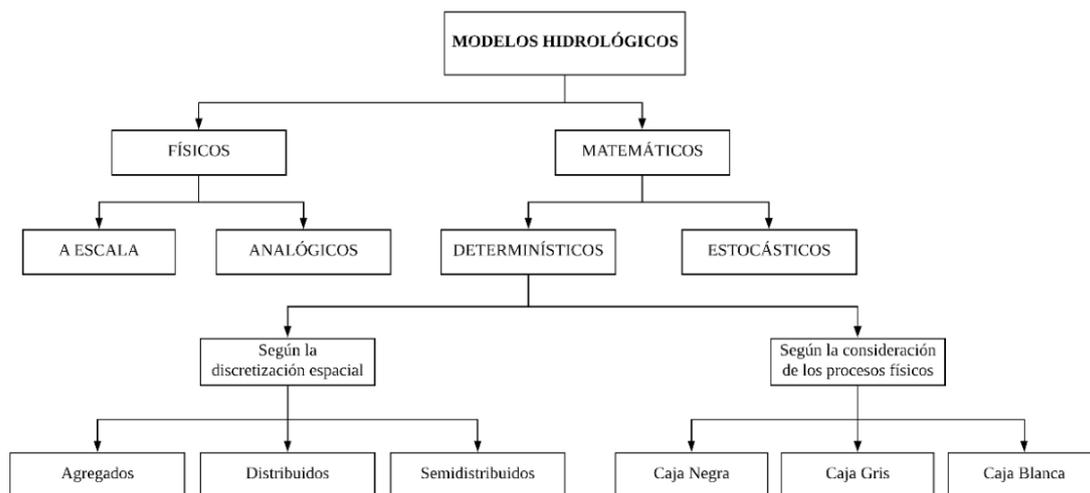


Figura 9. Clasificación de los modelos hidrológicos.

Fuente: Adaptado de Chow *et al.* (1994); Fattorelli *et al.* (2011); Fernández *et al.* (1997).

2.3.1.1. Modelos físicos o materiales

Los modelos hidrológicos de base física tratan de representar los procesos físicos (hidrológicos) observados en el mundo real, utilizando los principios de la mecánica de fluidos, la hidráulica, la ciencia y tecnología y los campos de la física, la meteorología, la hidrología (Chow *et al.*, 1994; Fattorelli *et al.*, 2011; Mendoza *et al.*, 2002).

Los modelos físicos o materiales se pueden clasificar en dos tipos: modelos a escala y modelos análogos (ver Figura 9). Los modelos a *escala* representan en un tamaño reducido el sistema hidrológico, por ejemplo, el modelo hidráulico del vertedero de una presa (prototipo de laboratorio). Los modelos *análogos* utilizan otro sistema físico con características similares a las del prototipo, es decir, se basan en el parecido entre las ecuaciones que rigen dos sistemas distintos (Chow *et al.*, 1994; Fattorelli *et al.*, 2011; Fernández *et al.*, 1997).

2.3.1.2. Modelos matemáticos o abstractos

Los modelos abstractos representan al sistema en forma matemática, se describe la operación del sistema a través de ecuaciones empíricas o conceptuales que relacionan los elementos básicos de un modelo matemático, siendo estas las variables de entrada y de salida. Dichas variables pueden ser funciones del espacio y tiempo, así como también pueden ser variables aleatorias o probabilísticas, que no tienen un valor constante para un punto específico del espacio y tiempo, pero que están descritas a través de distribuciones de probabilidad (Chow *et al.*, 1994; Fattorelli *et al.*, 2011). En su mayoría los modelos matemáticos usan como soporte el ordenador, de allí su reciente desarrollo exponencial (Fernández *et al.*, 1997).

Los modelos matemáticos se pueden clasificar según el tipo de proceso que se quiera desarrollar. De manera general se pueden dividir en dos grupos: los deterministas y los estocásticos (ver Figura 9) (Fernández *et al.*, 1997).

- **Modelos deterministas**

Estos modelos no consideran la aleatoriedad, es decir, una entrada dada producirá siempre una misma salida. Se clasifican según el grado de conocimiento que el modelador tenga de las leyes físicas que rigen el sistema estudiado. Cuando este conocimiento es muy pequeño o incluso nulo reciben el nombre de *modelos empíricos o de caja negra*. Pero si

las leyes que rigen el comportamiento del sistema son perfectamente conocidas por el modelador, se les denomina modelos **deterministas puros o de caja blanca** (Chow *et al.*, 1994; Fernández *et al.*, 1997). En muchos de los casos en la hidrología se conoce con exactitud los componentes del sistema, pero no sus interacciones, en estos casos se denominan modelos de **caja gris** (Fernández *et al.*, 1997).

Los modelos deterministas admiten una segunda clasificación según la variabilidad espacial de las variables (ver Figura 9). Así se tiene entonces:

- **Modelos agregados:** aquel en el que no se considera variabilidad espacial de los procesos hidrológicos, pues el espacio del sistema es promediado o considerado como un punto único sin dimensiones de las variables, con valores medios para toda la cuenca (ver Figura 10a). Las ventajas de estos modelos es que no necesitan de la calibración de demasiados parámetros, pero no dan más que valores medios (Cabrera, 2011; Chow *et al.*, 1994; Fernández *et al.*, 1997).
- **Modelos distribuidos:** Aquel en el que se considera la variabilidad espacial de variables. Para ello se realiza una discretización del medio físico a estudiar, es decir, se divide la cuenca en celdas con diferentes valores para las variables (ver Figura 10b). Este tipo de modelos es más versátil y recoge mejor la heterogeneidad del medio natural. Por el contrario, necesitan un aporte de datos mayor y calibrar un mayor número de parámetros, (Cabrera, 2011; Chow *et al.*, 1994; Fernández *et al.*, 1997).
- **Modelos semidistribuidos:** estos intentan aprovechar las ventajas de los anteriores, evitando sus inconvenientes, pues abordan el problema de la variabilidad espacial de las variables considerando diferentes subcuencas con valores específicos de cada una (ver Figura 10c), dando así un alto nivel de precisión sin necesitar una entrada de datos tan grande (Cabrera, 2011; Fernández *et al.*, 1997).

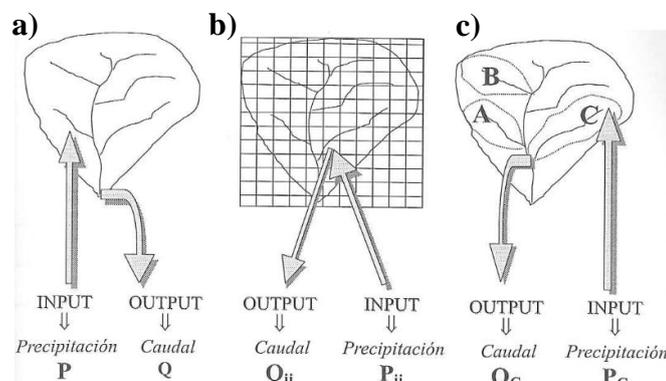


Figura. 10. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a su representación espacial. Modelo agregado (a), modelo distribuido (b) y modelo semidistribuido (c).

Fuente: Tomado de Fernández *et al.* (1997).

- **Modelos estocásticos**

Un modelo estocástico tiene salidas aleatorias, podría decirse que los modelos determinísticos hacen *pronósticos*, mientras que los estocásticos hacen *predicciones*. A pesar de que los fenómenos hidrológicos implican un grado de aleatoriedad, la variabilidad resultante en la salida puede ser pequeña, en tales casos es apropiado un modelo determinístico. Si la variación aleatoria es grande, un modelo estocástico es el más adecuado (Chow *et al.*, 1994).

2.3.2. Calibración y validación de modelos hidrológicos

A pesar de los avances tecnológicos y científicos, en la actualidad no existe un modelo hidrológico que permita simular de manera perfecta los complejos procesos que envuelven a la hidrología. Esto se debe a diversas causas como: errores en la medición de datos en campo, errores en el procesamiento de datos, errores de valores no óptimos de los parámetros y errores debido a la estructura del modelo con el que se está trabajando. Para conseguir de que las simulaciones de un modelo hidrológico se aproximen más a la realidad, es necesario realizar un proceso de calibración (optimización) de los parámetros con los que se está trabajando (Cabrera, 2012).

La calibración es una fase muy importante en la modelación hidrológica, que se la puede realizar de manera automática o manual. La automática consiste en la optimización de los parámetros del modelo utilizando técnicas numéricas. Mientras que la manual se basa en el método de prueba y error a través de un ajuste selectivo de los parámetros iniciales del modelo, de tal manera que permita que los valores simulados se ajusten mejor a los valores registrados en campo (Cabrera, 2017; Pascual y Díaz, 2016). Luego de este proceso, el modelo aun no puede ser utilizado para la simulación de caudales, pues es necesario que pase por un proceso de validación.

La fase de validación tiene como objetivo verificar el adecuado funcionamiento del modelo a través de simulaciones en las que se utiliza los valores de los parámetros establecidos en la calibración con una serie de datos reales y que no han sido utilizados en el proceso de calibración. Si luego del análisis de eficiencia del modelo, los resultados de la simulación se ajustan a los reales, se considera validado el modelo (Fernández *et al.*, 1997; Pascual y Díaz, 2016).

En el caso de los modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía, para determinar la eficiencia del modelo luego de los procesos de calibración y validación se debe realizar un análisis gráfico entre el hidrograma de la simulado y el hidrograma observado, que se complementa con un análisis estadístico (Quichimbo, 2010). El análisis visual consiste en contrastar de manera gráfica el hidrograma simulado con el observado, a través del caudal pico, tiempo pico y volúmenes de escorrentía. Para el análisis estadístico se suelen utilizar algunos índices, los más representativos son: el coeficiente de determinación (R^2), porcentaje de sesgo (PBIAS) y el coeficiente de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe (NSE) (Arteaga, 2017).

2.3.2.1. Coeficiente de determinación (R^2)

El coeficiente de determinación (R^2) describe el grado de colinealidad entre los datos de los caudales observados y los caudales simulados, pues explica la fracción de la varianza total en los datos observados y su rango varía entre 0 y 1 (Moriasi *et al.*, 2007; Waseem, Mani, Andiego, y Usman, 2017). El cálculo de este coeficiente se realiza mediante la ecuación 8, mientras que en la Tabla 1 se presentan los valores para la interpretación del grado de correlación entre las variables (Waseem *et al.*, 2017).

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})(Q_i^{sim} - \bar{Q}^{sim})}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - \bar{Q}^{sim})^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad (8)$$

Donde:

R^2 es el coeficiente de determinación (Adimensional).

n es el número total de observaciones.

Q_i^{obs} son los caudales observados (m^3/s).

\bar{Q}^{obs} es la media de los caudales observados (m^3/s).

Q_i^{sim} son los caudales simulados (m^3/s).

\bar{Q}^{sim} es la media de los caudales simulados (m^3/s).

Tabla 1. Valores referenciales del coeficiente de determinación (R^2).

CORRELACIÓN	No existe	Es mínima	Es regular	Es aceptable	Es excelente
VALOR	0 – 0.09	0.1 – 0.36	0.37 – 0.64	0.65 – 0.81	0.81 – 1

Fuente: Tomado y adaptado de Aveiga (2018).

2.3.2.2. Porcentaje de sesgo (PBIAS)

El porcentaje de sesgo (PBIAS) mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores (desviación) con respecto a los datos observados. Los valores positivos indican un sesgo de subestimación, mientras que los valores negativos un sesgo de sobreestimación (Moriasi *et al.*, 2007; Waseem *et al.*, 2017). PBIAS se calcula mediante la ecuación 9 y los valores referenciales para la interpretación se presentan en la Tabla 2 (Waseem *et al.*, 2017).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \right] * 100 \quad (9)$$

Donde:

PBIAS es el porcentaje de sesgo (Adimensional).

n es el número total de observaciones.

Q_i^{obs} es el caudal observado que se está evaluando (m³/s).

Q_i^{sim} es el caudal simulado que se está evaluando (m³/s).

\bar{Q}_i^{obs} es la media de los caudales observados (m³/s).

Tabla 2. Valores referenciales del porcentaje de sesgo (PBIAS) en la evaluación del desempeño del modelo.

CALIFICACIÓN	Insatisfactorio	Satisfactorio	Bueno	Muy Bueno
VALOR	> ±25	≤ ±25 - ±15	≤ ±15 - ±10	< ±10

Fuente: Tomado de Arteaga (2017).

2.3.2.3. Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual o variabilidad de los datos observados comparada con la varianza de los datos simulados. En la actualidad es la herramienta más utilizada para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos (Waseem *et al.*, 2017). Según Moriasi *et al.* (2007) el rango de NSE varía entre $-\infty$ y 1.0 (incluyendo el 1). Este coeficiente se calcula mediante la ecuación 10, mientras que en la Tabla 3 se muestran los valores para su interpretación (Waseem *et al.*, 2017).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}_i^{obs})^2} \right] \quad (10)$$

Donde:

NSE es coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Adimensional).

n es el número total de observaciones.

Q_i^{obs} es el caudal observado que se está evaluando (m^3/s).

Q_i^{sim} es el caudal simulado que se está evaluando (m^3/s).

\bar{Q}_i^{obs} es la media de los caudales observados (m^3/s).

Tabla 3. Valores referenciales del coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) en la evaluación del desempeño del modelo.

AJUSTE	Insuficiente	Satisfactorio	Bueno	Muy Bueno	Excelente
VALOR	<0.2	0.2 – 0.4	0.4 – 0.6	0.6 – 0.8	>0.8

Fuente: Tomado de Astorayme (2017).

2.4. Modelo hidrológico HEC-HMS

El modelo lluvia-escorrentía HEC-HMS que se utilizó en la presente investigación (matemático semidistribuido), fue desarrollado por el centro de ingeniería hidrológica del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos (U.S. Corps of Engineers) para simular el hidrograma de escorrentía producido por un evento de precipitación en cuencas con drenaje dendrítico. La licencia del software es de acceso libre, por lo que su descarga, se puede realizar directamente desde su página WEB junto con sus manuales de usuario (Feldman, 2000; López, 2012; Pascual *et al.*, 2016).

HEC-HMS fue diseñado para que su aplicación en la simulación de caudales de un amplio rango de regiones geográficas (Bastidas, 2005). El modelo trabaja mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos para tener como respuesta el tránsito de caudales. Esto permite una gran flexibilidad, ya que es posible combinar varios métodos de cálculo para cada parámetro, logrando una mejor aproximación al sistema real (Gaspari *et al.*, 2013; Pascual *et al.*, 2016).

De manera resumida en la Figura 11 se describen las tres fases que lleva a cabo el software HEC-HMS en la simulación de caudales.

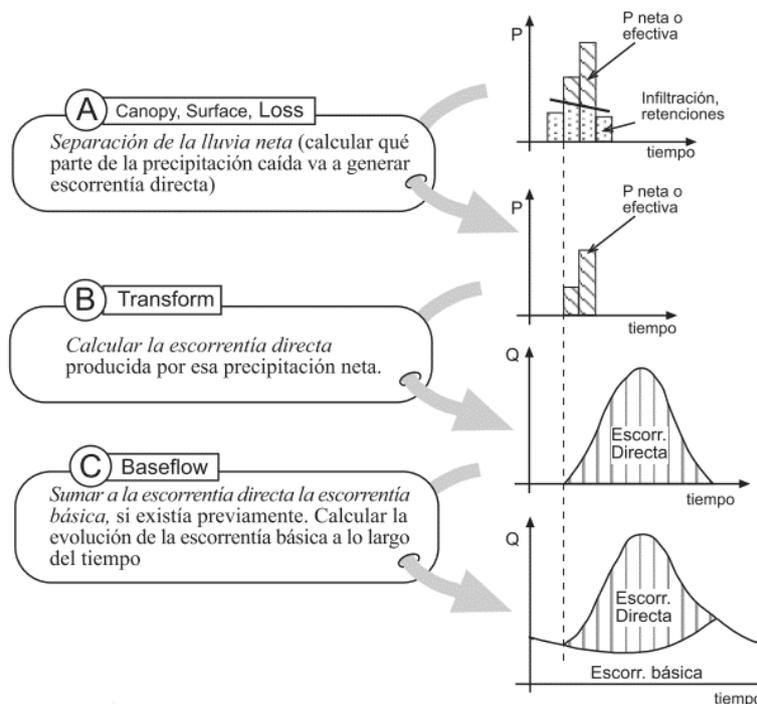


Figura. 11. Fases de trabajo del modelo HEC-HMS.

Fuente: Tomado y adaptado de Sánchez, (2015).

De acuerdo con Arias (2015); Bastidas (2005); Pascual *et al.* (2016); Sánchez (2015) HEC-HMS trabaja a través de cuatro componentes básicos que definen en su conjunto la entrada de datos y la estructura de simulación del proceso precipitación-escorrentía. Estos componentes son: *a) modelo de cuenca, b) modelo meteorológico, c) especificaciones de control, y d) los datos de series temporales.*

2.4.1. Modelo de cuenca

El modelo de cuenca es utilizado para representar la características morfométricas y físicas de la cuenca hidrográfica, así como también la red de corrientes por medio de la cual se conectan los elementos hidrológicos del sistema como: subcuencas, fuentes, tramos, sumideros, uniones y embalses, etc. Este componente a su vez está formado por tres módulos en los que se basa la modelación hidrológica: *a) módulo de pérdidas, b) módulo de transformación, c) módulo para el flujo base.* Cada uno tiene un grupo de métodos para su cálculo y que a su vez requieren distintos datos de entrada (Arteaga, 2017; Bastidas, 2005; López, 2012).

2.4.1.1. Módulo de pérdida

El módulo de pérdida permite calcular la cantidad de lluvia que se infiltra durante un evento de precipitación. Esto a través de la separación de la precipitación efectiva, es

decir el porcentaje de precipitación que genera escorrentía directa. El modelo HEC-HMS cuenta con los siguientes métodos para su cálculo (Arias, 2015; Arteaga, 2017):

- Déficit y tasa constante.
- Inicial y tasa constante.
- Exponencial.
- Número de curva del Servicio de Conservación de Suelos.
- Consideración de la humedad del suelo.
- Déficit y tasa constante por celdas.
- Número de curva del Servicio de Conservación de Suelos por celdas.
- Consideración de la humedad del suelo por celdas.

De los métodos mencionados anteriormente para el cálculo de las pérdidas dentro del modelo HEC-HMS, se detalla el Número de curva del Servicio de Conservación de Suelos, que fue el utilizado en la presente investigación.

- **Número de curva del Servicio de Conservación de Suelos**

Este método fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los EE.UU, actualmente Natural Resources Conservation Service (NRCS) (López, 2012). Permite estimar la precipitación efectiva en función de la precipitación acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y la humedad del antecedente (Feldman, 2000). El modelo se basa en la ecuación 11 para calcular la precipitación efectiva (López, 2012).

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{5080}{NC} + 50.8\right)^2}{P + \frac{20320}{NC} - 203.20} \quad (11)$$

Donde:

P_e es la precipitación efectiva (mm).

P es la precipitación acumulada (mm).

NC es el número de curva.

Entre las variables que requiere el software HEC-HMS para emplear el método NC-SCS se encuentran: *el número de curva (NC), la abstracción inicial (Ia) y la impermeabilidad*. Estos parámetros se detallan a profundidad en el apartado de metodología, junto con las ecuaciones para su cálculo.

2.4.1.2. Módulo de transformación

Este módulo de transformación permiten calcular la escorrentía directa generada por la precipitación efectiva, en el modelo HEC-HMS los métodos disponibles para la transformación son los siguientes (Arias, 2015; Arteaga, 2017):

- Onda cinemática.
- ModClark.
- Hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos.
- Hidrograma unitario Snyder.
- Hidrograma unitario especificado por el usuario.
- Hidrograma en S del usuario.
- Hidrograma unitario de Clark.

De los métodos nombrados anteriormente para el cálculo de la escorrentía directa en del modelo HEC-HMS, se profundiza el hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos, que fue el utilizado en este caso.

- **Hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos**

Es un hidrograma adimensional sintético en el cual relaciona los caudales (Q) en función del caudal pico (Q_p); y los tiempos (t) en función de tiempo pico (t_p) en el hidrograma unitario (Chow *et al.*, 1994; López, 2012). El caudal pico (Q_p) (ver ecuación 12) y el tiempo pico (t_p) (ver ecuación 13) son estimados por el modelo basándose en el hidrograma unitario triangular del SCS (Arteaga, 2017; López, 2012).

$$Q_p = C_p \frac{A}{t_p} \quad (12)$$

Donde:

- Q_p es el caudal pico ($m^3/s \cdot cm$)
- C_p es el Coeficiente al pico igual a 2,08 en unidades S.I
- A : Área de la cuenca (Km^2)
- t_p es el tiempo de ocurrencia del pico (horas).

El t_p está relacionado con la duración del exceso de precipitación y el tiempo de retardo T_{lag} , por lo que se utiliza la ecuación 13 para su cálculo.

$$t_p = \frac{D}{2} + T_{lag} \quad (13)$$

Donde:

D es la duración del exceso de precipitación

T_{lag} es el tiempo de retardo

La única variable requerida por HEC-HMS para emplear el método del hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos es el *tiempo de retardo* (T_{lag}), su cálculo se describe detalladamente el apartado de metodología.

2.4.1.3. Módulo del flujo base

El módulo del flujo base permite determinar y sumar el aporte del caudal base proveniente por flujos subterráneos al caudal. El modelo HEC-HMS dispone de los siguientes métodos para determinar la escorrentía básica o flujo base (Arias, 2015; Arteaga, 2017):

- Recesión restringida.
- Recesión.
- Constante mensual.
- Depósito lineal.

De los métodos expuestos anteriormente para el cálculo del flujo base en HEC-HMS, se profundiza en el método de recesión, que se utiliza en el modelo en función de la disponibilidad de la información.

- **Recesión**

El método de recesión está diseñado para aproximar el comportamiento típico observado cuando el caudal disminuye de manera exponencial después de un evento de precipitación. De manera general este método se utiliza para la simulación de eventos, no obstante, tiene la capacidad de restablecerse automáticamente después de cada evento y consecuentemente puede ser utilizado en simulación continua (Arias, 2015).

Entre las variables que requiere este método en HEC-HMS están: la *descarga inicial* del evento a modelar, y la *constante de recesión*. Estos parámetros se exponen a mayor profundidad en el apartado de metodología.

2.4.2. Modelo meteorológico

El modelo meteorológico procesa los datos de precipitación (hietograma) ingresados por cada una de las subcuencas analizadas. La información de precipitación suministrada puede ser puntual o distribuida. Además, se puede modelar con precipitación líquida o sólida, e incluso se puede incorporar la evaporación. El cálculo de esta última sólo es requerido cuando se modelan respuestas hidrológicas en largos períodos de tiempo, mientras que para eventos cortos se puede despreciar (Arteaga, 2017; Bastidas, 2005; López, 2012).

2.4.3. Especificaciones de control

Las especificaciones de control permiten definir el tiempo de duración de cada simulación (corrida), es decir el tiempo y fecha de inicio y el tiempo y fecha de finalización, así como también el intervalo de tiempo con que se realizaran los cálculos del modelo. Es importante tener en cuenta que las especificaciones de control deben coincidir con los intervalos de tiempo de la precipitación para evitar errores en las simulaciones.

2.4.4. Datos de series temporales

Este componente contiene la información de la precipitación y el caudal que han sido registrados en las en las estaciones automáticas durante los eventos de análisis. Estos datos se introducen como parámetros o condiciones de contorno en el modelo de la cuenca y en el modelo meteorológico (Arteaga, 2017; Bastidas, 2005; López, 2012).

En conclusión, el modelo HEC-HMS es un programa complejo que permite calcular el hidrograma producido por una cuenca si se le proporciona los datos físicos de la misma y datos de precipitación (López, 2012).

3. METODOLOGÍA

El presente capítulo se divide en dos apartados en el primero se describe el área de estudio y el segundo los métodos utilizados en la investigación. Del área de estudio se indican la ubicación espacial y las principales características de suelos, climatología, topografía y cobertura vegetal. Por otra parte, la sección de métodos hace alusión a los distintos procedimientos desarrollados para dar cumplimiento a los objetivos planteados. Además, para cada método se describen los materiales e información que son necesarios para su desarrollo, así como las fuentes de obtención y su procesamiento.

3.1. Área de estudio

El escenario de la presente investigación es la microcuenca El Carmen, que se encuentra ubicada al Sur-Este del cantón Loja en la Zona 17S dentro de las coordenadas UTM W 703864 – W 706668, y S 9553356 – S 9550485 (ver Figura 12). Esta unidad hidrográfica forma parte de la cordillera de los Andes, y se encuentra separando a los valles interandinos de la cuenca del Amazonas (Mejía, 2018). El 90% de su superficie se encuentra dentro del área protegida Parque Nacional Podocarpus (PNP) (Jiménez, 2017; Loayza, 2017) y forma parte del sistema hidrográfico Zamora de la vertiente del Pacífico.

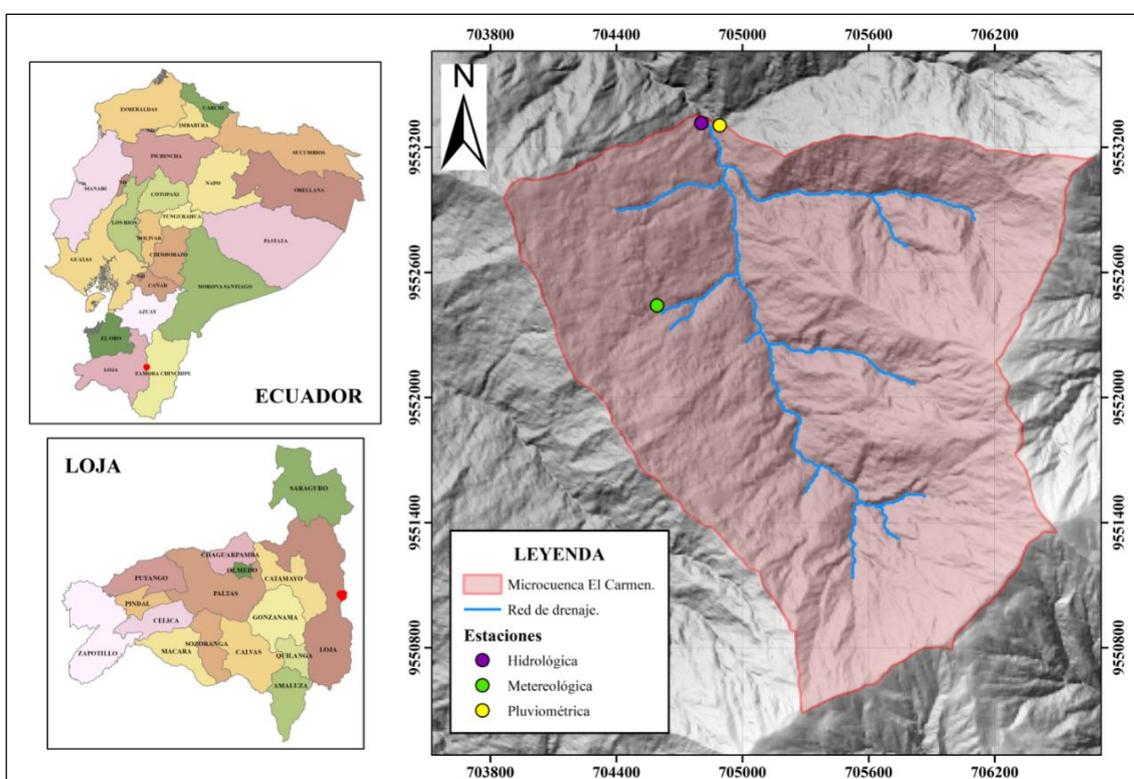


Figura. 12. Mapa de ubicación de la microcuenca El Carmen.

Fuente: Elaboración propia.

Esta unidad hidrográfica cuenta con una superficie aproximada de 4,71 km². Presenta un clima templado ecuatorial sub-húmedo, con temperaturas que fluctúan entre 12 y 14 °C. La precipitación varía entre los 1250 y 2000 mm, y la velocidad promedio anual del viento es de 3 m/s, con dirección Norte, Noreste y Este (Cueva, 2017; Zárata, 2011).

En la microcuenca El Carmen el orden del suelo es Inceptisol y Entisol, esto de acuerdo con la información del MAGAP escala 1:250 000 del año 2002 (Ayora, 2016; Vanegas, 2016). En la parte media y alta se encuentran los Inceptisoles, con altos contenidos de materia orgánica, mientras que en la parte baja los de tipo Entisoles. A pesar de encontrar dos tipos de suelo dentro del área de estudio, ambos comparten la característica de presentar un alto contenido de materiales arcillosos (Ochoa, Fries, Montesinos, Rodríguez, y Boll, 2015). Con lo que respecta la textura del suelo, se identifican cuatro tipos: franco, franco arcillo arenoso, franco arcilloso y franco arenoso (Martínez, 2009).

En cuanto a los tipos de cobertura vegetal existente en la microcuenca (ver Tabla 4), predomina la cobertura de bosque ocupando cerca del 80 % de la superficie de la microcuenca, el otro 20% se encuentra repartido entre las coberturas páramo, matorral, pastizal y área sin vegetación (Cueva, 2017). El grado de intervención en la microcuenca es mínimo, gracias a las estrategias de conservación que lleva a cabo la Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja (UMAPAL) junto con el Fondo Regional del Agua (FORAGUA), dada la importancia de la unidad hidrográfica en el abastecimiento de agua para la ciudad de Loja (Jiménez, 2017; Vanegas, 2016).

Tabla 4. Tipos de vegetación y su respectiva distribución dentro de la microcuenca El Carmen.

TIPO DE COBERTURA VEGETAL	PORCENTAJE (%)
Bosque	79,9
Matorral	5,6
Pastizal en recuperación	3,4
Páramo	10,7
Área sin vegetación	0,4

Fuente: Tomado y adaptado de Cueva (2017).

3.2. Métodos

A continuación se detalla de manera secuencial el procedimiento que se llevó a cabo en el desarrollo de los objetivos específicos. Se incluye la preparación de la información necesaria y los métodos utilizados en la consecución de cada uno de los objetivos.

3.2.1. Recolección de la información

En función del modelo hidrológico semidistribuido que se aplicó en la microcuenca El Carmen, y a los datos de entrada requeridos por el software HEC-HMS, se determinó que la información necesaria para poder cumplir con el cometido de este proyecto, es la que se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Información base para el trabajo de investigación.

INSUMO	FUENTE	AÑO	ESCALA	FORMATO
Modelo de elevación digital	SIG TIERRAS	2017	1:3000	raster
Datos de precipitación y temperatura	CITIAB	2016	-	xlsx
Mapa de cobertura/uso de suelo	CITIAB (2016a)	2016	1:30000	shp
Mapa de tipo de suelo (textura)	Martínez (2009)	2009	1:20000	shp

Fuente: Elaboración propia.

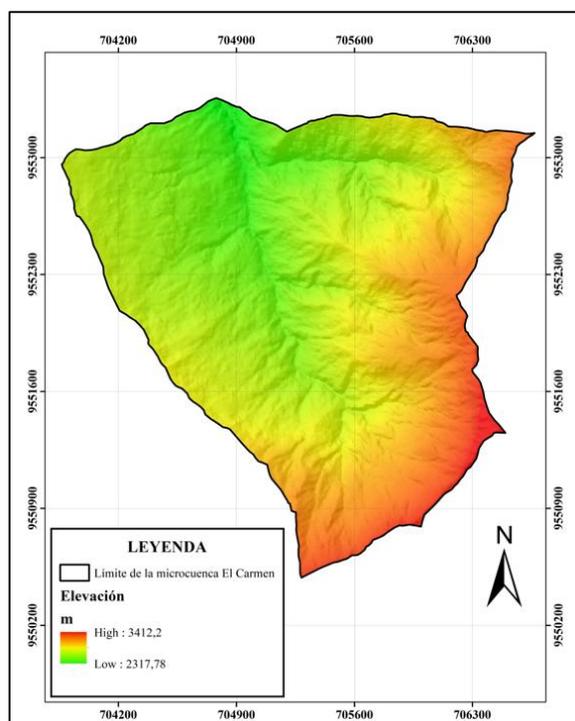


Figura. 13. Modelo de elevación digital de la microcuenca El Carmen.

Fuente: Elaboración propia.

El Modelo de elevación digital (MED) se descargó del geoportal del SIGTIERRAS con una resolución espacial de 3x3 m. Este posteriormente se corrigió y recortó a nivel de la microcuenca El Carmen (ver Figura 13) con la ayuda del Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcMap 10.3.

Tabla 6. Características de las estaciones utilizadas en la medición de las variables hidrometeorológicas en la microcuenca El Carmen.

Equipo	Descripción
Estación pluviométrica 	<ul style="list-style-type: none"> - Pluviómetro (resolución: 0,1 mm), marca: Hydrological Services. - Dataloger: CR200X, marca: Campbell Scientific. - Batería 12 V / UB12180. - Panel Solar. - Sensor de temperatura y humedad relativa: CS-215. - Gabinete para equipos.
Estación meteorológica 	<ul style="list-style-type: none"> - Dataloger: CR800, marca: Campbell Scientific - Batería 12 V / UB12180 - Veleta para dirección del viento - Sensor de temperatura y humedad relativa: CS-215 - Sensor de dirección y velocidad del viento: 034B - Anemómetro para velocidad de viento; resolución: 0.5 grados. - Panel Solar - Pluviómetro (resolución: 0,1 mm). Marca: Hydrological Services - Piranómetro LI 200x - Sistema de Pararrayos - Sistema de puesta a Tierra - Torre de soporte, (altura: 10m) - Gabinete para equipos.
Estación hidrológica 	<ul style="list-style-type: none"> - Dataloger: CR200, marca: Campbell Scientific - Batería 12 V / UB1218 - Panel Solar - Sensor de nivel: presión sumergible (modelo CSS455), marca: Campbell Scientific - Sistema de Pararrayos - Sistema de puesta a Tierra - Torre de soporte, (altura: 2m) - Gabinete para equipos.

Fuente: Tomado y adaptado de Cueva (2017).

Tabla 7. Ubicación de las estaciones disponibles en la microcuenca El Carmen.

Tipo de estación	Coordenadas UTM WGS84		Cota (m.s.n.m.)
	X	Y	
Meteorológica	704594	9552440	2550
Pluviométrica	704892	9553304	2354
Hidrológica	704805	9553315	2350

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de precipitación se obtuvieron de dos estaciones, una meteorológica y una pluviométrica, ambas automáticas (EMA). Por otro lado, los datos de caudal fueron obtenidos de una estación hidrológica automática (EHA). Estos datos fueron proporcionados por el Centro de Investigaciones Tropicales Ambiente y Biodiversidad (CITIAB), que en colaboración con el Fondo Regional del Agua (FORAGUA) administran las estaciones de la microcuenca El Carmen desde octubre de 2015. Todas las estaciones de monitoreo poseen una resolución temporal de captura de información de 5 minutos. Las especificaciones técnicas de las estaciones se detallan en la Tabla 6, mientras que la ubicación de las mismas en la Tabla 7.

Con respecto a los mapas de cobertura/uso y tipo de suelo de la microcuenca el Carmen necesarios para el cálculo del número de curva (NC) que requiere el modelo HEC-HMS, se obtuvieron de varias fuentes. El de cobertura/uso de suelo fue facilitado por el CITIAB, (2016a). Mientras que para el tipo de suelo (textura) se tomó la información generada en el estudio realizado por Martínez, (2009). En la Figura 14 se muestra la distribución espacial de cobertura/uso de suelo (a) y tipo de suelo en la microcuenca El Carmen (b).

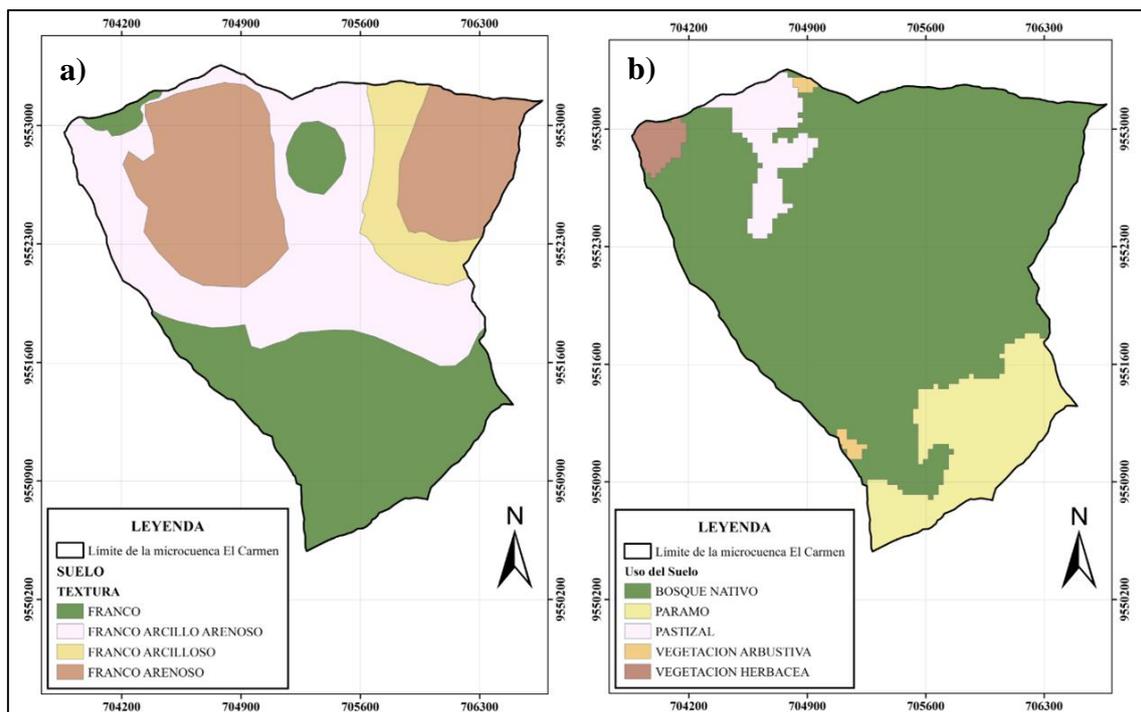


Figura. 14. Mapa de cobertura/uso de suelo (a) y mapa del tipo de suelo (textura) (b) de la microcuenca El Carmen.
Fuente: Elaboración propia, tomado de (CITIAB, 2016a; Martínez, 2009).

3.2.2. Selección de los eventos para la modelación en HEC-HMS

Antes suministrar la información de precipitación y caudal al modelo HEC-HMS se analizó los datos de dichas variables facilitados por el CITIAB. Para ello se estableció un periodo en el que los datos se encuentren completos (enero-junio del 2016), dado que no se cuenta con registros continuos, y es de vital importancia suministrar al modelo con datos que sean los más aproximados a la realidad.

Posteriormente se seleccionó los eventos a modelar considerando la variabilidad de los mismos, con el fin de observar cómo trabaja el modelo HEC-HMS frente a eventos de distinta naturaleza en la microcuenca El Carmen. Para el estudio se seleccionaron dos eventos, el primero que tuvo lugar el 11/4/2016 14:50 hasta el 12/4/2016 11:00 con el que se realizó la calibración del modelo y el segundo que aconteció el 26/4/2016 17:00 hasta el 30/4/2016 6:00, que se utilizó el proceso de validación.

El evento 1 se seleccionó debido a que representa un evento de máxima precipitación dentro del periodo establecido. Los niveles de intensidad son altos, pero de corta duración, pues alcanza niveles de casi 7 mm, que luego caen abruptamente a 0 mm y después vuelve a ascender a 5 mm esto en un espacio de tiempo muy corto (ver Anexo 1a, 1b). Además, existe una diferenciación en cuanto a la distribución espacial de las precipitaciones dentro de la microcuenca como lo muestran los datos recolectados por las dos estaciones (ver Figuras 15a). Este evento está antecedido por un periodo de escasa precipitaciones que es evidente por el bajo caudal estabilizado (ver Anexo 1c). La condición de humedad antecedente para este evento es medida (II) dado que la sumatoria de la altura de precipitación de los 5 días anteriores es de 37,7 mm.

El evento 2 se seleccionó debido a que representa un evento de escasa precipitación dentro del periodo establecido. Los niveles de intensidad son bajos y de la larga duración, pues no alcanzan los 2 mm como lo muestran los registros de las estaciones, sin embargo, se prolonga en el tiempo en comparación al evento 1 (ver Anexo 2a, 2b). Además, no existen diferencias significativas en la distribución espacial de la precipitación dentro de la microcuenca (ver Figuras 15b). Este evento está antecedido por otro evento regular de precipitaciones, como lo muestra el caudal en recesión que antecede a la crecida (ver Anexo 2c). La condición de humedad antecedente para este evento es medida (II), pues la sumatoria de la altura de precipitación de los 5 días anteriores es de 51,2 mm.

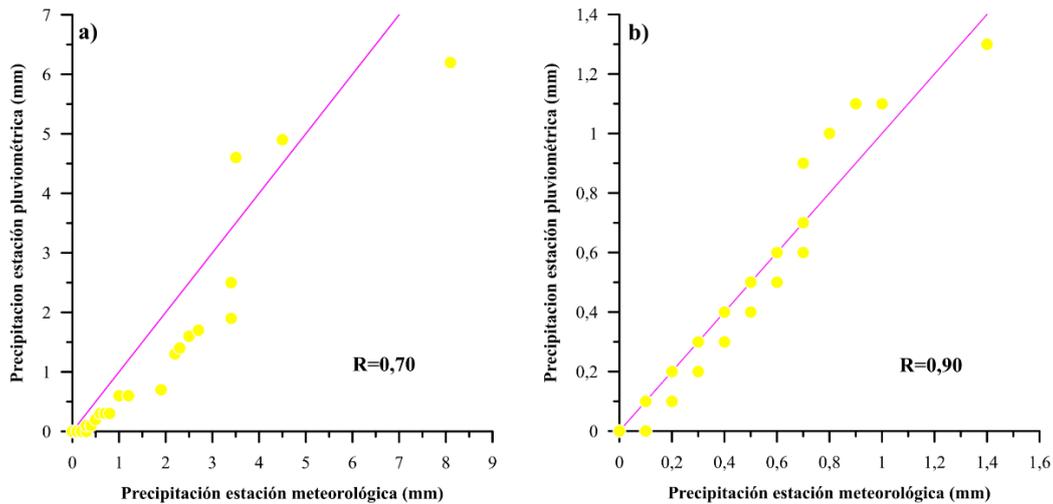


Figura. 15. Análisis de correlación de los datos de precipitación registrados en las estaciones pluviométrica y meteorológica de los eventos 1(a) y 2 (b) seleccionados.

Fuente: Elaboración propia

Dado que los datos de precipitación provienen de dos estaciones y que el modelo hidrológico tiene un enfoque semidistribuido, fue necesario estimar la precipitación media para cada uno de los eventos. Para ello se utilizó el método de Polígonos de Thiessen (ver ecuación 1) tomando como referencia las dos estaciones que se encuentran dentro de la microcuenca y la estación meteorológica del INMHI la Argelia. Esta última estación no tuvo influencia sobre la microcuenca El Carmen. Con respecto a los datos de caudal, estos no requirieron ningún procesamiento. Los datos de precipitación media y de los caudales de los eventos 1 y 2 se muestran en las figuras 16 y 17 respectivamente.

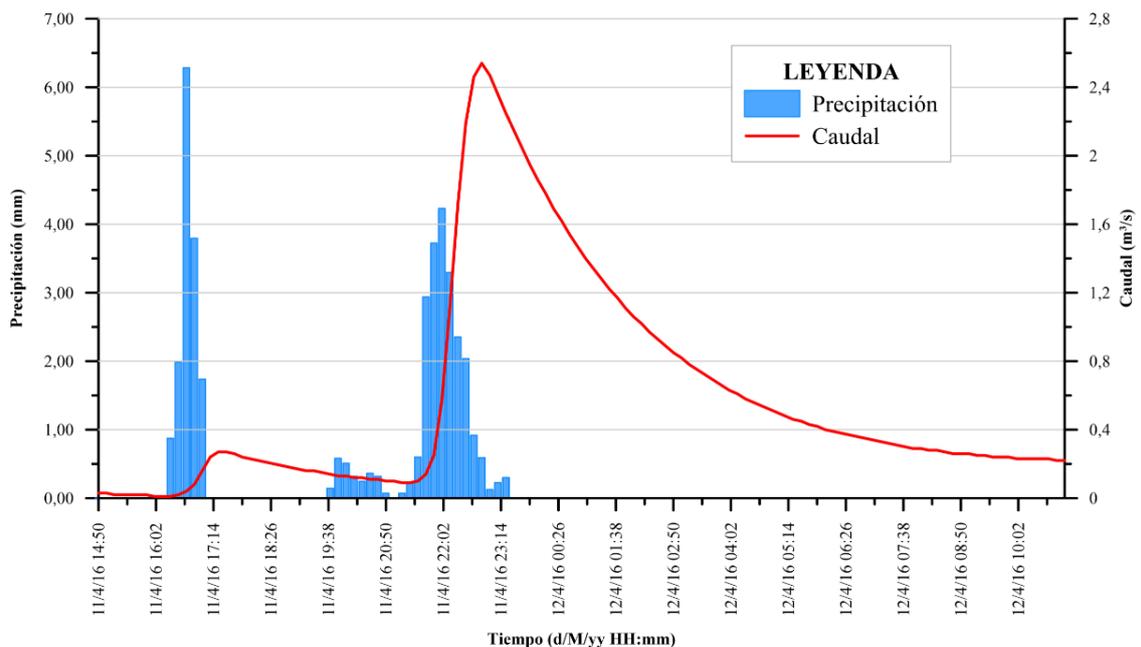


Figura. 16. Hietograma e hidrograma del evento 1 ocurrido en la microcuenca El Carmen.

Fuente: Elaboración propia.

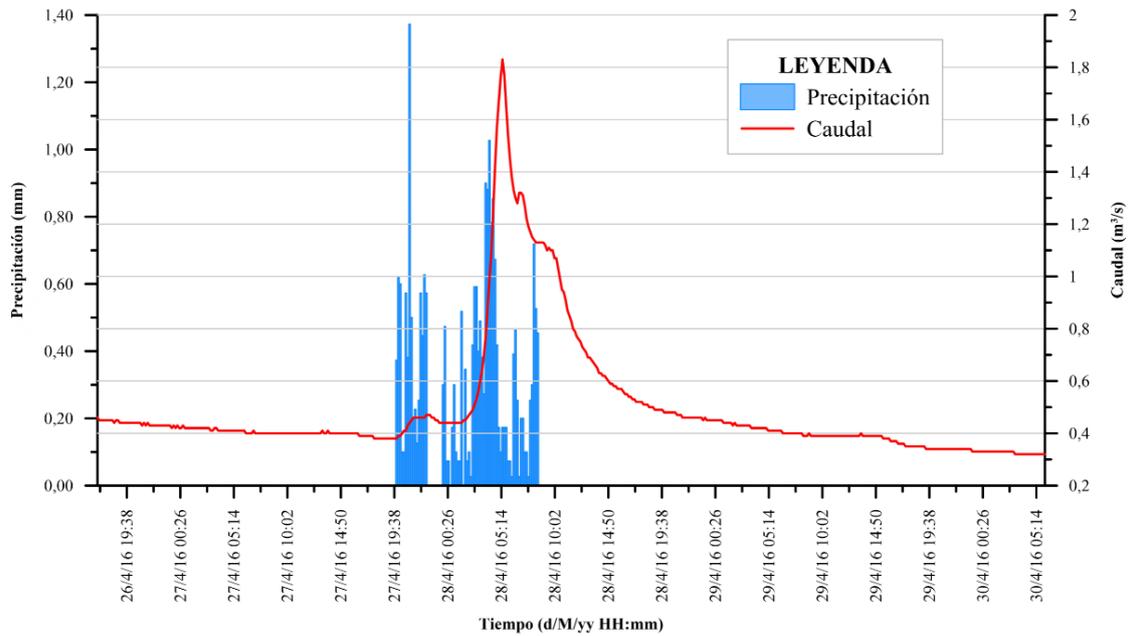


Figura. 17. Hietograma e hidrograma del evento 2 ocurrido en la microcuenca El Carmen.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Metodología para el análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen.

El proceso de la determinación de las características morfométricas empezó por delimitar la microcuenca, cuyo punto de interés coincide con punto en el que se encuentra la estación hidrológica. Para los parámetros dimensionales se partió delimitación automática mediante las herramientas de ArcMap, utilizando el MED de la microcuenca el Carmen como información de entrada al software. Una vez delimitada la microcuenca, se calculó el área y perímetro, estos luego sirvieron para el cálculo parámetros de forma. Para a los parámetros de relieve y drenaje se utilizó las herramientas de geoprocésamiento integradas en ArcMap que utilizan la información contenida en los píxeles del MED. Para finalmente a partir de los parámetros morfométricos determinar la respuesta hidrológica de la microcuenca El Carmen.

El cálculo de los parámetros morfométricos de la microcuenca el Carmen constó de una parte automática y una manual. Para el cálculo automático se utilizó Sistemas de información geográfica, mientras que la parte manual se realizó con la ayuda de hojas de cálculo. Para términos prácticos se dividió al análisis de los parámetros morfométricos de la microcuenca en 4 grupos: dimensionales, de forma, de relieve y de drenaje.

En la tabla 8 se pueden apreciar los métodos de cálculo utilizados para cada uno de los parámetros morfométricos. Mientras que en el esquema de la Figura 18 se ejemplifica

todo el proceso metodológico desarrollado para la determinación de las características morfométricas de la microcuenca El Carmen.

Tabla 8. Métodos y fórmulas para el cálculo del análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen.

PARÁMETROS DIMENSIONALES		
FACTOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN DEL CÁLCULO
Área	Km ²	Mediante sistemas de información geográfica.
Perímetro	Km	Mediante sistemas de información geográfica.
Longitud Axial	Km	Mediante sistemas de información geográfica.
Ancho promedio	Km	$A_p = \frac{A}{L_a}$ Donde A_p es el Ancho promedio (Km), A es el área (Km ²), L_a es la longitud axial (Km).
PARÁMETROS DE FORMA		
FACTOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN DEL CÁLCULO
Factor de forma de Horton	Ad	$IF = \frac{A_p}{L_a}$ Donde IF es el factor de forma, A_p es el ancho promedio (Km), L_a es la longitud axial (Km).
Coefficiente de compacidad de Gravelius	Ad	$K_c = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$ Donde K_c es el coeficiente de Gravelius, P es el perímetro de la microcuenca el Carmen (Km) y A es el área de la microcuenca (Km ²).
Índice de circularidad	Ad	$I_c = 12,57 \left(\frac{A}{P^2} \right)$ Donde I_c es el índice de circularidad, A es el área (Km ²), P es el perímetro (Km).
PARÁMETROS DE RELIEVE		
FACTOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN DEL CÁLCULO
Rango altitudinal	m	Mediante sistemas de información geográfica.
Pendiente media de la cuenca	%	Mediante sistemas de información geográfica.
Curva hipsométrica y Frecuencia de altitudes	Ad	Mediante sistemas de información geográfica y hojas de cálculo.
Elevación media	m.s.n.m.	Mediante sistemas de información geográfica.
PARÁMETROS DE DRENAJE		
FACTOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN DEL CÁLCULO
Orden de corrientes	Ad	Mediante sistemas de información geográfica.
Longitud del cauce principal	Km	Mediante sistemas de información geográfica.
Longitud de tributarios	Km	Mediante sistemas de información geográfica.
Densidad de drenaje	Km/ Km ²	$Dd = \frac{\sum Ls}{A}$ Donde Dd es la densidad de drenaje (Km), $\sum Ls$ es la sumatoria total de la longitud de todas las corrientes y A es el área de la cuenca (Km ²).
Pendiente media del cauce	%	Mediante sistemas de información geográfica.

Fuente: Elaboración propia.

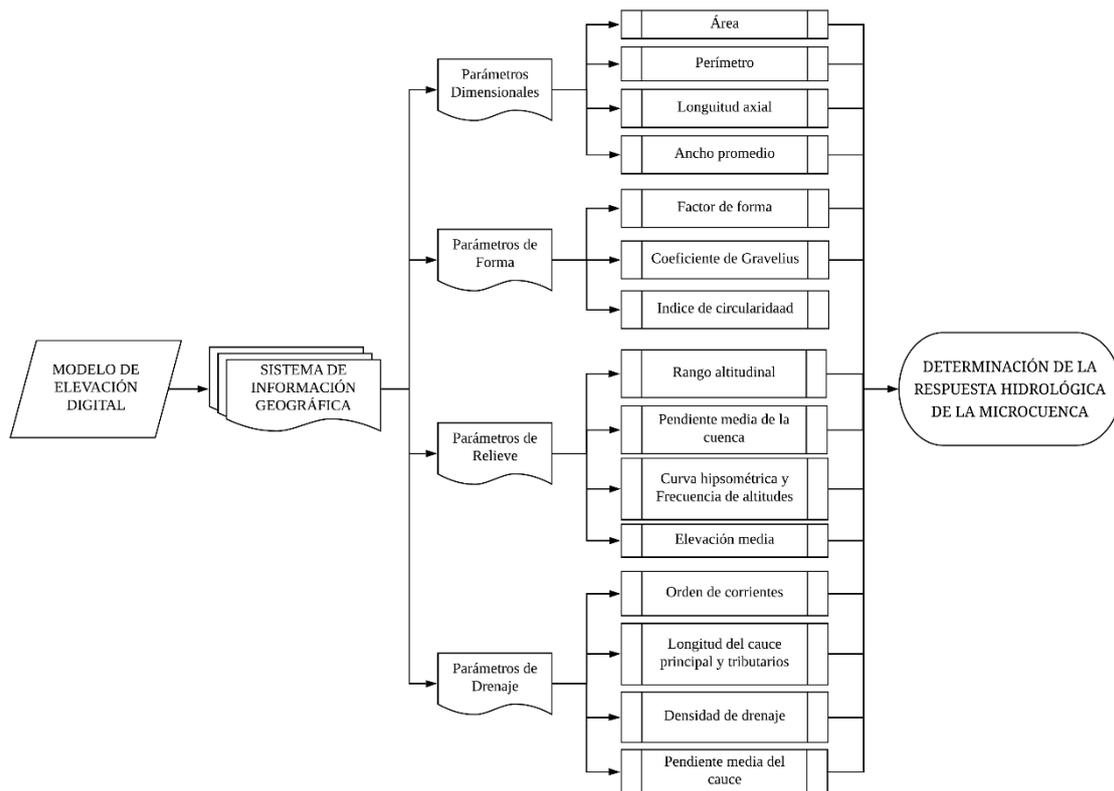


Figura. 18. Flujograma del proceso para el primer objetivo de análisis morfométrico de la microcuenca.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Metodología para aplicar el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS en la microcuenca El Carmen

El desarrollo de este objetivo se llevó a cabo en tres fases. La primera que consistió en la construcción del modelo HEC-HMS para la microcuenca El Carmen, la segunda en la simulación de partida con el evento 1 y la tercera en la calibración del modelo a partir de dicho evento. El flujograma de todo el proceso metodológico de este objetivo para una mejor comprensión se detalla en la Figura 19.

Es importante recalcar que en la modelación hidrológica mediante HEC-HMS en la microcuenca El Carmen, el evento ocurrido el 11 de abril de 2016 a las 14:50 hasta 12 de abril de 2016 a las 11:00 horas se utilizó en el proceso de calibración. Mientras el evento ocurrido el 26 de abril de 2016 a las 17:00 hasta el 30 de abril de 2016 a las 6:00 horas se usó en el proceso de validación.

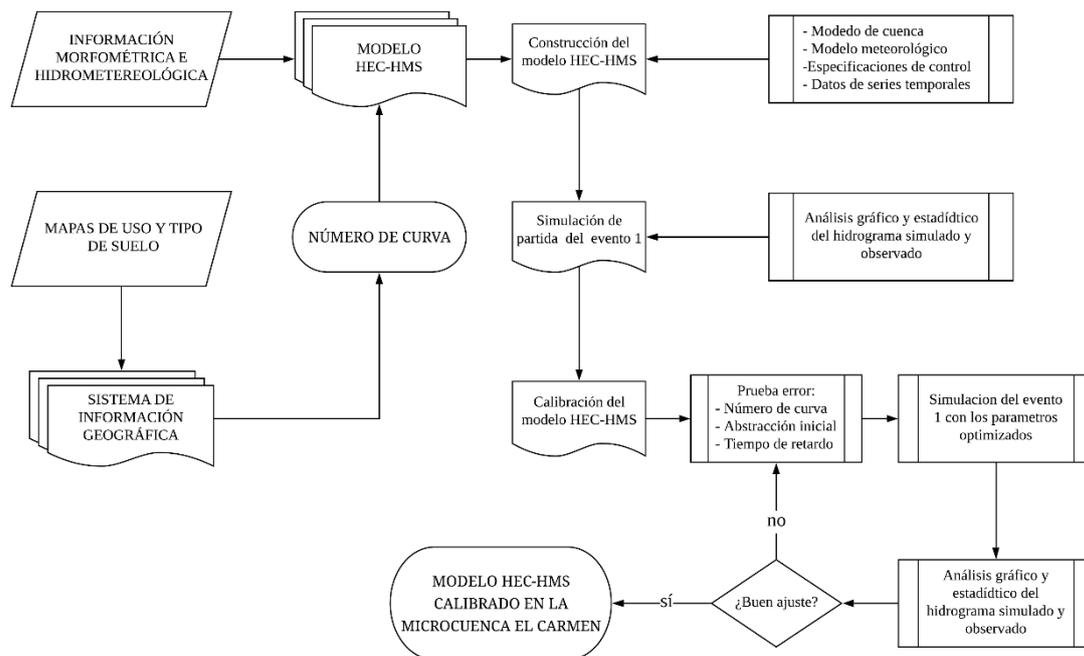


Figura. 19. Flujograma del proceso realizado en el segundo objetivo de aplicación del modelo HEC-HMS.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4.1. Construcción del modelo

Para la construcción del modelo hidrológico HEC-HMS en la microcuenca El Carmen, fue necesario estimar algunos parámetros de entrada para los componentes que conforman el modelo: *a) modelo de cuenca, b) modelo meteorológico, c) especificaciones de control y d) datos de series de tiempo.*

- **Modelo de cuenca**

En este componente se utilizaron algunas de las características morfométricas de la microcuenca El Carmen que se obtuvieron del análisis morfométrico, entre estas se incluye el área, la longitud del cauce principal y la pendiente media de la cuenca. Adicional a esto se calcularon otros parámetros de entrada requeridos por los 3 módulos que conforman el modelo de cuenca: *pérdida, transformación y flujo base.*

Para el módulo de pérdida que permite separar la precipitación efectiva de la acumulada, se utilizó el método de *Número de Curva (NC) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS)*. Este ha sido ampliamente utilizado en modelamientos hidrológicos por su capacidad operativa y aceptables resultados (Fattorelli *et al.*, 2011). Los parámetros

requeridos por el software para aplicar este método fueron: *el número de curva (NC)*, *la abstracción inicial (I_a)*, *e impermeabilidad*.

El *número de curva (NC)* es un índice adimensional de la potencialidad de producir escurrimiento de una cuenca y es inversamente proporcional a la capacidad de retención de la misma. Puede adoptar valores de 0 a 100, donde NC=100 corresponde a superficies totalmente impermeables, mientras que NC=0 a una superficie totalmente permeable e insaturable (Chow *et al.*, 1994; López, 2012).

En la determinación de los valores de NC la microcuenca El Carmen se tuvo en cuenta los siguientes aspectos: *a) grupo hidrológico de suelo*, *b) cobertura/uso de suelo* y *c) condición de humedad antecedente* (Gaspari *et al.*, 2013; NRCS, 1986).

Para la identificación de los grupos hidrológicos de suelo existentes en la microcuenca El Carmen, se realizó una reclasificación hídrica del del shap es tipo de suelo (textura), en base a los cuatro grupos hidrológicos propuestos por la NRCS. Dichos grupos expresan la capacidad de generar escorren tía superficial, y están en función de las características físicas del suelo, especialmente de la textura (Gaspari *et al.*, 2013; NRCS, 2009) tal y como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Clasificación de los Grupos Hidrológicos.

GH	Textura	Granulometría	Permeabilidad
A	Arenosos, Areno-limosos	Gruesa	Permeable
B	Franco-arenosos, Franco, Franco-limosos	Moderadamente gruesa	Permeable
C	Franco-arcillo-arenoso, Franco-arcillo-limoso, Franco-arcilloso	Media	Poco Permeable
D	Arcillo-arenoso; Arcillo-limoso; Arcillosos	Fina	Impermeables

Fuente: Adaptado de Gaspari *et al.* (2013) y NRCS (1986).

El cruce o intersección de los shap es de cobertura/uso de suelo y grupo hidrológico en ArcMap, generó un nuevo shape de polígonos con una combinación única del grupo hidrológico y cobertura/uso de suelo, esta combinación sirvió para asignar un valor de NC a cada polígono en base a los valores tabulados por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (ver Tabla 10) asumiendo que en el suelo existe una

condición de humedad antecedente media (II). Lo que coincidió con el estado de humedad antecedente en el suelo para los dos eventos seleccionados de acuerdo con la categorización propuesta por Chow *et al.*, (1994), pues en ambos, la sumatoria de los cinco días anteriores de precipitación no superaron los 53,34 mm.

Tabla 10. Valor de número de curva según grupo hidrológico y cobertura/uso de suelo.

Cobertura vegetal y uso de suelo	Grupo Hidrológico			
	A	B	C	D
Barbecho	77	86	91	94
Cultivos alineados R P	72	81	88	91
Cultivos alineados R B	67	78	85	89
Cultivos alineados C P	70	79	84	88
Cultivos alineados C B	65	75	82	86
Cultivos alineados C-T P	66	74	80	82
Cultivos alineados C-T B	62	71	78	81
Cultivos no alineados o surcos pequeños R P	65	76	84	88
Cultivos no alineados o surcos pequeños R B	63	75	83	87
Cultivos no alineados o surcos pequeños C P	63	74	82	85
Cultivos no alineados o surcos pequeños C B	61	73	81	84
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T P	61	72	79	82
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T B	59	70	78	81
Cultivos densos leguminosas R P	66	77	84	88
Cultivos densos leguminosas R B	58	72	81	85
Cultivos densos leguminosas C P	64	75	83	85
Cultivos densos leguminosas C B	55	69	78	83
Cultivos densos leguminosas C-T P	63	73	80	83
Cultivos densos leguminosas C-T B	51	67	76	80
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50%	48	67	77	83
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50-75%	35	56	70	77
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta >75%	30	48	65	73
Montes con pastos P	45	66	77	83
Montes con pastos R	36	60	73	79
Montes con pastos B	25	55	70	77
Bosques MP	56	75	86	91
Bosques P	46	68	78	84
Bosques R	36	60	70	76
Bosques B	26	52	63	69
Bosques MB	15	44	54	61
Prados permanentes	30	58	71	78
Pastizal P	68	79	86	89
Pastizal R	49	69	79	84
Pastizal B	39	61	74	80
Pastizal C P	47	67	81	88
Pastizal C R	25	59	75	83
Pastizal C B	6	35	70	79
Residencial baja densidad	54	70	80	85
Residencial alta densidad	77	85	90	92
Superficies impermeables	98	98	98	98
Espejos de agua	0	0	0	0

R: Laboreo sin prácticas de conservación
C: Curvas de nivel
C-T: Curvas de nivel y Terrazas abiertas
MP: Condición de infiltración muy pobre
P: Condición de infiltración pobre
M: Condición de infiltración regular
B: Condición de infiltración buena
MB: Condición de infiltración muy buena

Fuente: Tomado de Gaspari *et al.*, (2013).

Debido a la variabilidad del suelo y de la cobertura vegetal presentada en la microcuenca El Carmen se obtuvieron diferentes NC dentro de la misma. Para asignar un solo valor a toda la microcuenca se calculó el NC medio ponderado con ayuda de la ecuación 14 (Feldman, 2000; Gaspari *et al.*, 2013).

$$NC_p = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i NC_i \quad (14)$$

Donde:

NC_p es el número de curva ponderado (Adimensional).

A es el área de la microcuenca (Km²).

A_i es el área del polígono correspondiente al NC_i (Km²).

NC_i es el número de curva del polígono (Adimensional).

n es el número de polígonos con diferente NC.

Otro parámetro necesario para la aplicación del método NC-SCS fue la *Abstracción inicial* (I_a). Para su cálculo se utilizó la ecuación 15, ya que en recientes investigaciones han demostrado que esta es una relación más apropiada para determinar este parámetro (Woodward, Researcher, y Hawkins, 2003).

$$I_a = 0.05 \times S \quad (15)$$

Donde:

I_a es abstracción inicial (mm).

S es la retención potencial máxima (mm).

Mientras que para el cálculo de la retención potencial máxima requerida en la abstracción inicial se utilizó la ecuación 16 (Gaspari *et al.*, 2013; López *et al.*, 2012).

$$S = 254 \left(\frac{100}{NC - 1} \right) \quad (16)$$

Donde:

S es la retención potencial máxima (mm).

NC es el número de curva ya calculado.

En cuanto al último parámetro de *impermeabilidad*, su porcentaje se calculó en base a la superficie ocupada los espejos de agua existentes y otras superficies impermeables respecto de la superficie total de la microcuenca El Carmen.

Para el módulo de transformación que permite transformar la precipitación efectiva en caudal, se utilizó el *Hidrograma Unitario (HU) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS)* integrado en HEC-HMS, este es uno de los más aceptados dentro del medio profesional hidrológico. Para su cálculo el programa requiere el parámetro *tiempo de retardo* (T_{lag}), el cual se calculó mediante la ecuación 17 (PROMAS, 2012).

$$T_{lag} = \frac{2,587 \times L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN-9}\right)^{0.7}}{(1900 \times H^{0.5})} \quad (17)$$

Donde:

- T_{lag} es el tiempo de retardo (h)
- L es la longitud del cauce principal (m).
- CN es el número de curva (Adimensional).
- H es la pendiente media de la microcuenca (%).

Finalmente, para el módulo de *flujo base* se aplicó el método de *recesión*, para lo cual el modelo demanda del parámetro *constante de recesión*, este parámetro fue tomado del estudio de Mejía (2018). En dicho estudio se calculó a través de WETSPRO (Water Engineering Time Series Processing Tool) a partir de los datos de caudal registrados en la microcuenca El Carmen. Este software aplica un modelo de reservorio lineal, basado en los datos de campo medidos. Permite determinar el flujo base, el flujo del subsuelo y el flujo de la superficie en las cuencas, aplicando la técnica de filtrado numérico de Chapman. La función se fundamenta en la ecuación general del filtro de paso lento y supone una recesión exponencial para los subflujos (Martínez, 2015).

- **Modelo meteorológico**

En este componente se vinculó los hietogramas de los eventos que se encuentran el componente de datos de series de tiempo con las características físicas de la unidad hidrográfica que se encuentran en el componente modelo de cuenca. Para esto se utilizó el método de *Hietograma específico*, este permitió asignar el hietograma de cada uno de los eventos a la microcuenca El Carmen.

- **Especificaciones de control**

Los datos de entrada en este componente correspondieron al espacio temporal de los eventos, es decir a la fecha y hora de inicio y a la fecha y hora final. Para el evento 1 (calibración) la fecha y hora de inicio fue el 11 de abril de 2016 a las 14:50 y la final el 12 de abril de 2016 a las 11:00. Mientras que para el evento 2 (validación) la fecha y hora de inicio fue el 26 de abril de 2016 a las 17:00 y la final el 30 de abril de 2016 a las 6:00. Aquí también se especificó el intervalo de la simulación del caudal, para ambos eventos se seleccionó un intervalo de simulación de caudal de 10 minutos, en concordancia con el intervalo de datos de precipitación suministrados al modelo.

- **Datos de series temporales**

En este componente se ingresaron los datos correspondientes a las variables la precipitación y caudal de los eventos bajo estudio. Los datos ingresados de precipitación media (hietogramas) que se obtuvieron mediante el método polígonos de Thiessen y los datos de caudal (hidrogramas) asociados de los eventos 1 y 2 se pueden visualizar en las Figuras 16 y 17 respectivamente.

3.2.4.2. Simulación de partida y calibración del modelo

Una vez se construyó el modelo con los parámetros preliminares obtenidos de manera teórica, se procedió a realizar la simulación de partida del modelo HEC-HMS en base al evento 1. Luego de esta simulación de partida, y con el objetivo de establecer valores más óptimos para que el modelo HEC-HMS simule de manera más eficiente los caudales de la microcuenca El Carmen, se realizó el proceso de calibración.

Los parámetros que se optimizaron en el proceso de calibración fueron el número de curva, la abstracción inicial y el tiempo de retardo. Ya que estos se consideran los parámetros más sensibles en proceso de simulación del proceso hidrológico precipitación-escorrentía en el modelo HEC-HMS (Aroca, 2014; López, 2012).

Por lo tanto, el proceso de calibración se realizó a través del método de prueba y error, en el que los valores de los parámetros número de curva, abstracción inicial y tiempo de retardo pasaron por un proceso de iteración, hasta que se logró que los caudales simulados tengan un buen ajuste con los caudales medidos en campo, siempre se tuvo en cuenta que los valores deben ser coherentes con las características de la microcuenca El Carmen.

3.2.5. Metodología para validar el modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para la microcuenca El Carmen

La validación del modelo HEC-HMS se realizó a partir de la aplicación del modelo calibrado, es decir la utilizó los valores de los parámetros optimizados (número de curva, abstracción inicial y tiempo de retardo) para la simulación del evento 2. Finalmente, para la evaluación del desempeño del modelo HEC-HMS en la microcuenca El Carmen, se establecieron un conjunto de criterios que comprendieron una combinación de análisis gráfico y estadístico de los resultados obtenidos en las simulaciones.

En el análisis gráfico se consideró el caudal pico, el tiempo al pico y el volumen de escorrentía. Con respecto al análisis estadístico se tomaron en cuenta el coeficiente de determinación (R^2) (ver ecuación 8) para establecer el grado de correlación entre los caudales simulados y observados, el porcentaje de sesgo (PBIAS) (ver ecuación 9) para estimar el error en la simulación de los caudales y el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (ver ecuación 10) para determinar la eficiencia del modelo. El flujograma del proceso metodológico para este objetivo de validación del modelo hidrológico HEC-HMS en la microcuenca El Carmen se puede visualizar en la Figura 20.

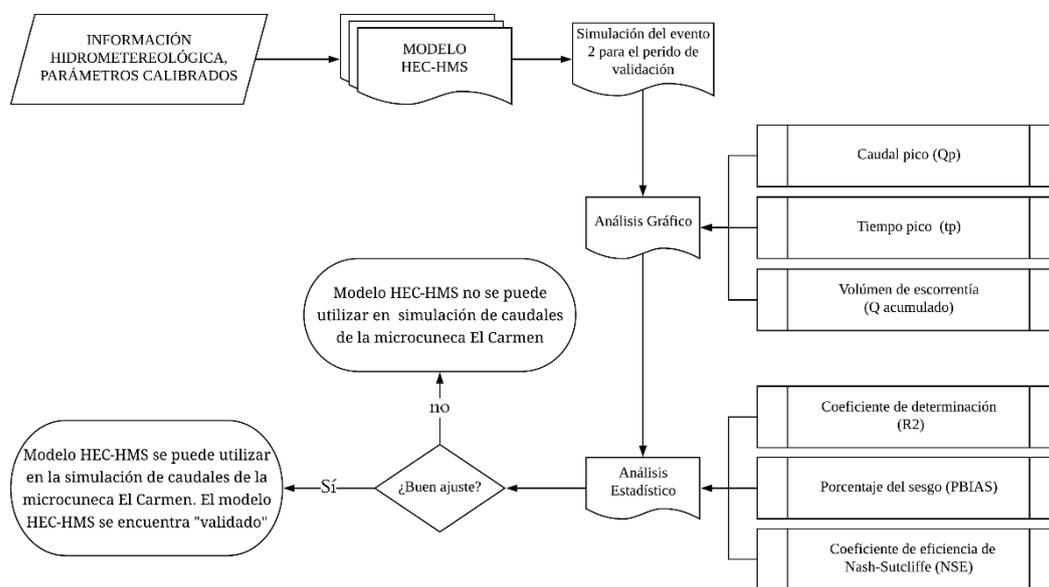


Figura. 20. Flujograma del proceso para el tercer objetivo de validación del modelo HEC-HMS.

Fuente: Elaboración propia.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presentan los resultados obtenidos luego del desarrollo de cada uno de los objetivos específicos planteados en el presente estudio, a la vez que se hacen sus respectivas interpretaciones y comparaciones con estudios de similares características.

4.1. Análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen

A través de los métodos que se expusieron en el acápite de metodología, se obtuvieron los resultados para cada uno de los parámetros morfométricos de la microcuenca El Carmen, a continuación, se detallan en función de su tipología.

4.1.1. Parámetros dimensionales y de forma.

De los parámetros dimensionales obtenidos (ver Tabla 11) a partir de la delimitación de la microcuenca indican que el área de la de esta unidad hidrográfica es de 4,80 Km². De acuerdo con las categorizaciones propuestas por Aguirre (2007); Sánchez Vélez *et al.* (2003) esta superficie corresponde al de una microcuenca, tal y como se determinó en las investigaciones de Ayora (2016); Vanegas (2016) para la misma unidad de estudio.

Tabla 11. Resultados del análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen. Parámetros dimensionales y de forma.

PARÁMETROS DIMENSIONALES		
FACTOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Área	Km ²	4,80
Perímetro	Km	9,72
Longitud Axial	Km	2,99
Ancho promedio	Km	1,60
PARÁMETROS DE FORMA		
FACTOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Factor de forma de Horton	Ad	0,54
Coefficiente de compacidad de Gravelius	Ad	1,25
Índice de circularidad	Ad	0,64

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto los parámetros de forma (ver Tabla 11), como el factor de forma de Horton, coeficiente de compacidad de Gravelius e índice de circularidad, se obtuvieron valores de 0,54, 1,25 y 0,64 respectivamente, todos muestran y concuerdan con que la microcuenca El Carmen tiene tendencia a una forma entre circular y ovalada de acuerdo con la

categorización propuesta por Cerignoni *et al.* (2015). Estos parámetros muestran de manera teórica que la microcuenca tiene susceptibilidad media-alta a las inundaciones, lo que se corrobora con los resultados obtenidos en los estudios de Ayora (2016); Vanegas (2016). Esto indica que ante la presencia de una lluvia intensa en la microcuenca El Carmen, el caudal aumentará rápidamente, pues relativamente desde cualquier punto de la divisoria, al agua le toma el mismo tiempo en llegar hasta cauce principal (Cerignoni *et al.*, 2015; Gaspari *et al.*, 2013).

4.1.2. Parámetros de relieve

Los parámetros de relieve obtenidos (ver Tabla 12) permitieron establecer que las cotas que circunscriben a la microcuenca El Carmen van desde los 2317,78 a los 3412,20 m.s.n.m. (ver Figura 21a), con una elevación media de 2779,27 m.s.n.m. y un rango altitudinal de 1094,42 metros de desnivel. Esta gradiente altitudinal provoca que exista una gran cantidad de pisos altitudinales, con variaciones significativas en las condiciones climáticas, de suelo y por lo tanto también ecológicas (Fuentes, 2004).

Tabla 12. Resultados del análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen. Parámetros de relieve.

PARÁMETROS DE RELIEVE		
FACTOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Cota inferior	m.s.n.m.	2317,78
Cota superior	m.s.n.m.	3412,20
Rango altitudinal	m	1094,42
Pendiente media de la cuenca	%	73,35
Curva hipsométrica y Frecuencia de Altitudes	Ad	Figura 24
Elevación media	m.s.n.m.	2779,27

Fuente: Elaboración propia.

La pendiente media de la microcuenca es de 73,35%, que de acuerdo con la clasificación propuesta por Heras (1976) indica que predominan las pendientes muy escarpadas (ver Figura 21b) que son comunes en cuencas de alta montaña. Este es un parámetro que tiene gran incidencia sobre la respuesta hidrológica de las cuencas, pues el aumento en su valor es directamente proporcional a la velocidad del flujo del agua (escorrentía), y que a su vez está vinculada con un mayor poder de erosivo en la microcuenca (Vanegas, 2016). Por lo tanto, se puede asumir de manera teórica que existe un alto potencial erosivo en la microcuenca, sin embargo, hay que tener en cuenta el efecto regulador de la cobertura

vegetal sobre la respuesta hidrológica, en especial en esta microcuenca en la que la mayoría de su superficie está destinada a la conservación (Jiménez, 2017).

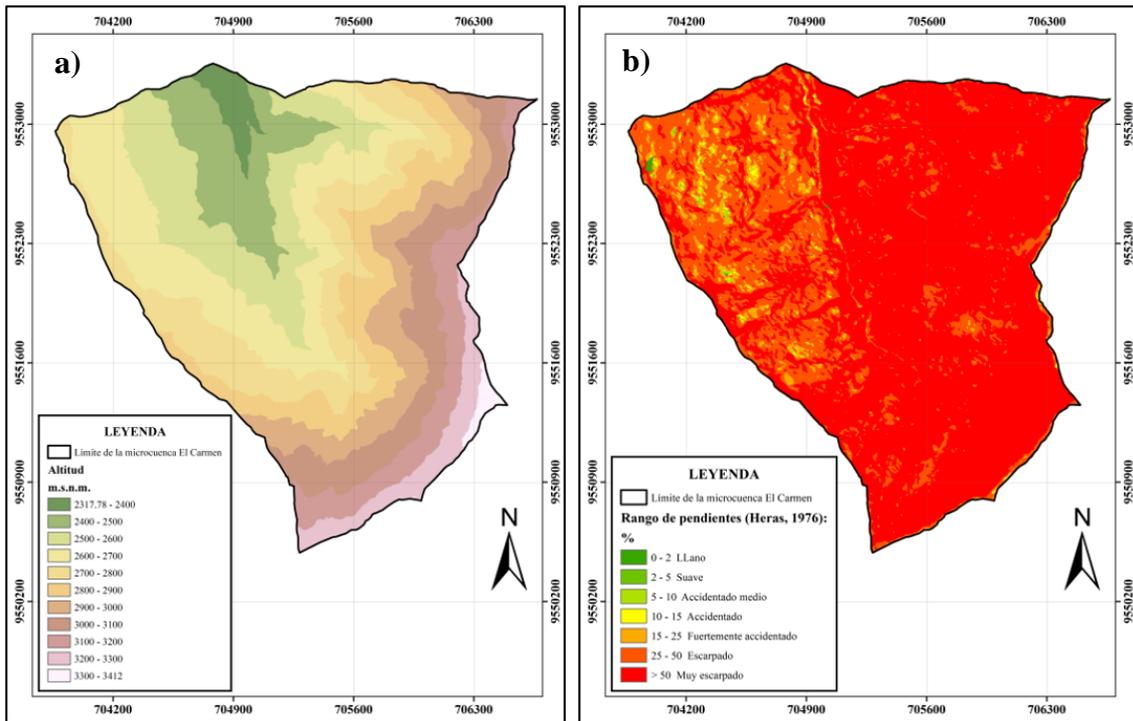


Figura. 21. Mapa altitudinal (a) y mapa de pendientes (b) de la microcuenca El Carmen.

Fuente: Elaboración propia.

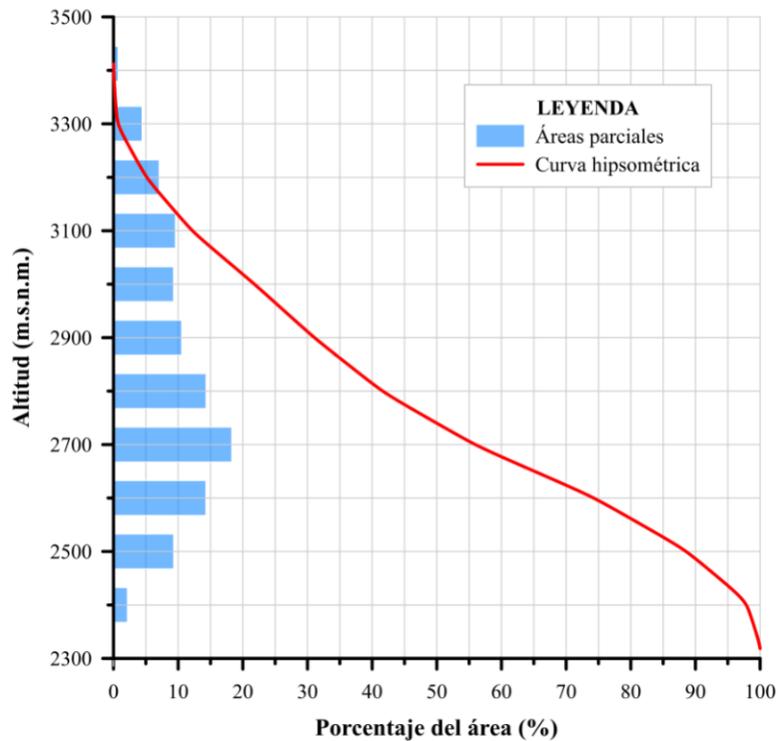


Figura. 22. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la microcuenca El Carmen.

Fuente: Elaboración propia.

De los tres tipos de curva hipsométrica, la microcuenca El Carmen presentó una curva de tipo B (ver Figura 22), esto indica que la microcuenca se encuentra en fase de equilibrio y con un río en estado de madurez (Gaspari *et al.*, 2013), el mismo resultado se obtuvo en los estudios de Ayora (2016); Vanegas (2016). Esto a su vez es corroborado con la investigación realizada por Loayza (2017), quien concluye que la microcuenca El Carmen se encuentra en un buen estado de conservación dada su baja producción de sedimentos. El histograma de la frecuencia de altitudes (ver Figura 22) indica que la altitud más frecuente en la microcuenca es la 2700 m.s.n.m., pues aquí se concentra el 18,3 % de la superficie, concordando con altitudes correspondientes a cuencas de alta montaña donde predomina el transporte de sedimento (grueso) y agua (Ayora, 2016).

4.1.3. Parámetros de drenaje

Finalmente, en los parámetros de drenaje (ver Tabla 13), se determinó una ramificación de orden 3 para la red de corrientes de la microcuenca (ver Figura 23) y una densidad de drenaje media de 1,59 Km/Km². Ambos parámetros están relacionados e indican teóricamente que la microcuenca tiene una tendencia media a la escorrentía (Cerignoni *et al.*, 2015; Fuentes, 2004) en concordancia con los resultados obtenidos por Ayora (2016). Estos resultados son comunes en cuencas con densa cobertura vegetal, pues esta ayuda a que un mayor porcentaje del agua proveniente de la precipitación se infiltre en el suelo y llegue al cauce principal por flujo subsuperficial y no por escorrentía superficial que es que da origen a los cauces (Muñoz, 2007).

Tabla 13. Resultados del análisis morfométrico de la microcuenca El Carmen. Parámetros de drenaje.

PARÁMETROS DE DRENAJE		
FACTOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Orden de corrientes	Ad	Orden 3
Longitud del cauce principal	Km	3,60
Longitud de tributarios	Km	Orden 1: 3,88; Orden 2: 2,77; Total: 6,65
Densidad de drenaje	Km/ Km ²	1,59
Pendiente media del cauce	%	33,04

Fuente: Elaboración propia.

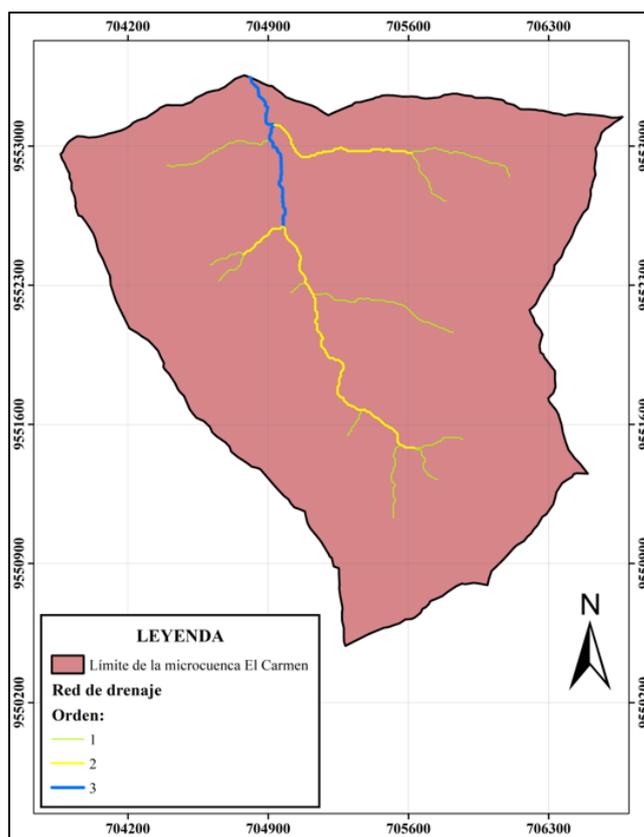


Figura. 23. Mapa del orden de corrientes de la microcuenca El Carmen.
Fuente: Elaboración propia.

El cauce principal de la microcuenca resultó tener una longitud de 3,6 Km, mientras que la suma de todos los tributarios 6,65 Km. El valor de la pendiente media del cauce principal que se obtuvo fue de 33,04 %, que de acuerdo con Fuentes (2004) se considera fuerte. Este último parámetro muestra teóricamente que la velocidad del flujo del agua es considerable en la microcuenca El Carmen (Vanegas, 2016). Pues la pendiente media del cauce es uno de los factores que controla el tiempo de escurrimiento frente a un evento de precipitación. Además, tiene una importancia directa en relación a las crecidas y la velocidad de propagación de las ondas de la avenida (Loayza, 2017).

4.2. Modelamiento hidrológico semidistribuido HEC-HMS en la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen

Los resultados obtenidos en cada una de las tres fases: construcción, simulación de partida y calibración en las que se desarrolló este objetivo de aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS en la microcuenca El Carmen se presentan a continuación.

4.2.1. Construcción del modelo

Los valores estimados para cada uno de los parámetros requeridos en los módulos de pérdida, transformación y flujo base que conforman el componente modelo de cuenca de HEC-HMS se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Información de entrada de entrada al componente modelo de cuenca.

MÓDULOS	PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Pérdida	Abstracción inicial	mm	6,84
	Número de curva	Adimensional	65,00
	Impermeabilidad	%	4,00
Transformación	Tiempo de retardo	min	24,44
Flujo base	Descarga inicial	m ³ /s	0,03
	Constante de recesión	Adimensional	0,90

Fuente: Elaboración propia.

En el proceso de cálculo del número de curva de la microcuenca El Carmen se reclasificaron los suelos en grupos hidrológicos. Se determinó que existen dos grupos hidrológicos de suelos en la microcuenca, B y C (ver Figura 24).

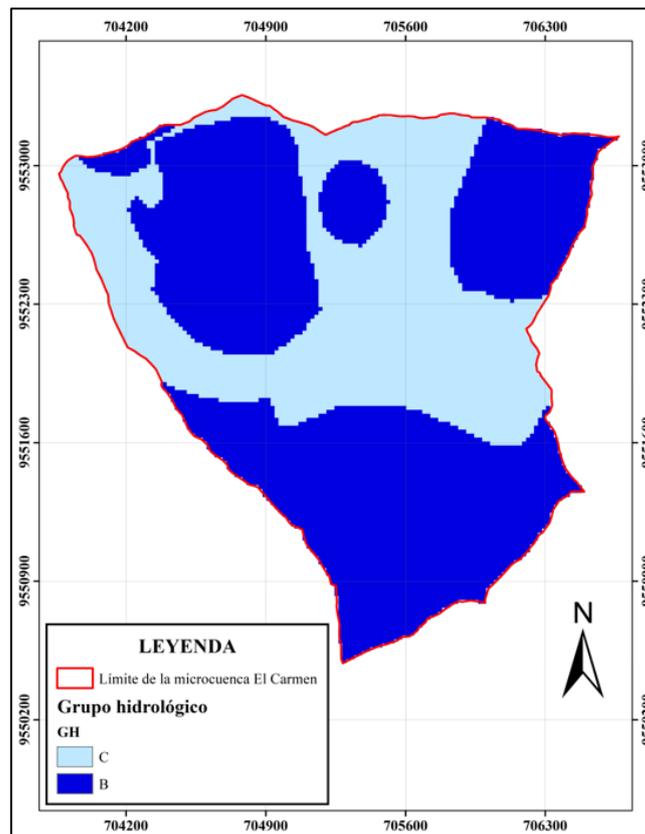


Figura. 24. Mapa del grupo hidrológico de la microcuenca El Carmen.

Fuente: Elaboración propia.

El grupo B cubre el 60,96% de su superficie de la microcuenca y de acuerdo con la NRCS (2009) los suelos de este grupo hidrológico tienen un potencial de escurrimiento

moderadamente bajo, debido a que los suelos presentan las texturas moderadamente gruesa: franca y franca arenosa arcillosa. Por su parte el grupo C ocupa el 39,04% restante de la superficie de la microcuenca. Los suelos que pertenecen al grupo hidrológico C presentan un potencial de escurrimiento moderadamente alto, a causa de sus texturas moderadamente finas: franco arcillo arenosa y franco arcillosa (NRCS, 2009).

En cuanto a la cobertura/uso de suelo predomina la cobertura de bosque con un 78,79%, le sigue la cobertura de páramo con 13,64%, pastizal en recuperación con 5,45%, vegetación herbácea con 1,55% y vegetación arbustiva con 0,57% (ver Figura 13).

Las coberturas de bosque y páramo, se encuentra formadas por plantas leñosas que con sus raíces crean innumerables canales y pequeños compartimentos que aumentan la profundidad hidrológica del suelo y por lo tanto favorece el proceso de infiltración (Crespo *et al.*, 2014; Muñoz, 2007). Los suelos de estas dos coberturas presentan un alto contenido de materia orgánica, lo que tiende a mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, otorgándole una alta capacidad de amortiguamiento y retención de agua que es clave en la regulación hidrológica (Buytaert, Wyseure, De Bièvre, y Deckers, 2005; González, Alvarez, González, y Aguirre, 2016; Muñoz, 2007). Por lo tanto, en la microcuenca El Carmen, la contribución directa a la escorrentía está predominada por los flujos subsuperficiales (efecto de la cobertura vegetal) y los flujos de superficie cuando los suelos están completamente saturados. Esto se traduce en una descarga rápida de la microcuenca ante un evento de precipitación (Crespo *et al.*, 2011; Muñoz, 2007).

Por su parte, la cobertura de pastizales que han sido destinados a la ganadería, se distribuye en la zona baja de la microcuenca. Esta actividad antrópica ha provocado cambios en las propiedades hidrofísicas del suelo, haciendo que los flujos superficiales sean predominantes debido a la compactación del suelo por el sobrepastoreo (Mejía, 2018). Es importante mencionar que estos pastizales actualmente se encuentran en recuperación, por lo que con el pasar del tiempo y con las medidas de restauración implementadas, las características naturales del suelo regresarán a su normalidad.

Los valores obtenidos para el número de curva en la microcuenca El Carmen varían entre 55 y 86 (ver Figura 25). Los valores más altos en el rango de NC=76-86, se encuentra hacia el Norte, en la parte baja de la microcuenca ocupando un 6,29% de la superficie. En esta área, los suelos de textura franca, franco arcillo arenosa y franco arenosa, y a las

actividades de pastoreo que allí se desarrollaban han dado lugar a suelos compactados y de poca profundidad que reducen la capacidad de infiltración, a la vez que incrementa el potencial de escorrentía. Los valores más bajos en el rango de NC=55-65 predominan y se distribuyen al lado Norte y Este, en la parte alta de la microcuenca cubriendo el 55,66% de la superficie. En esta zona los suelos de textura franco arcillosa, franco arcillo arenosa, y la vegetación natural (bosque y páramo) le otorgan una mayor capacidad de infiltración en comparación a otras zonas de la microcuenca. Los valores intermedios NC=67-71, se distribuyen desde la parte media de la microcuenca en dirección al Norte, abarcando una superficie de 38,05%. En esta parte el suelo de textura franco arcillosa y franco arcillosa, y la vegetación natural (bosque) contribuyen a tener una tasa de infiltración intermedia, que se encuentra limitada de cierta manera por el contenido de arcilla presente en el suelo.

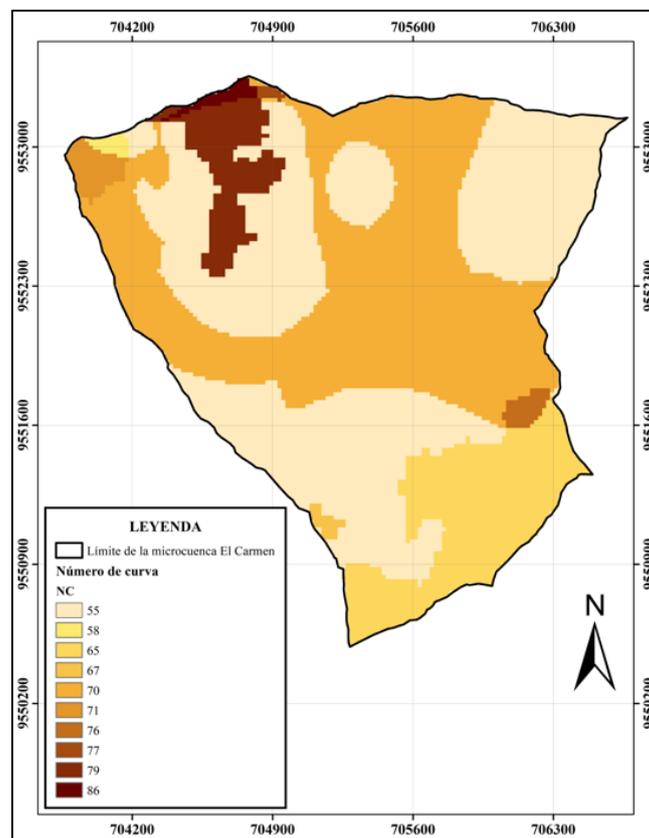


Figura. 25. Mapa del número de curva de la microcuenca El Carmen.
Fuente: Elaboración propia.

El valor ponderado del número de curva ponderado de la microcuenca es NC=65, el cual coincide con determinado por Ordoñez (2015) para la subcuenca Loja a la cual forma parte la microcuenca El Carmen. Este parámetro indica de manera general que el suelo tiene una permeabilidad moderadamente baja y una respuesta rápida a los eventos de precipitación (generación de escorrentía) en la microcuenca El Carmen.

4.2.2. Simulación de partida

En la etapa de simulación de partida, la ejecución del modelo HEC-HMS para el evento 1 en base a los parámetros teóricos (ver Tabla 14) permitió simular el hidrograma que se muestra en la Figura 26. En el análisis gráfico (ver Tabla 15) se puede visualizar que los hidrogramas simulado y observado tienen un comportamiento similar, que a rasgos generales siguen la misma tendencia. Sin embargo, analizando más detenidamente se puede observar cómo el hidrograma simulado sobrestima desde la rama de ascenso hasta punto pico, mientras que la curva de resección es subestimada en comparación al hidrograma registrado.

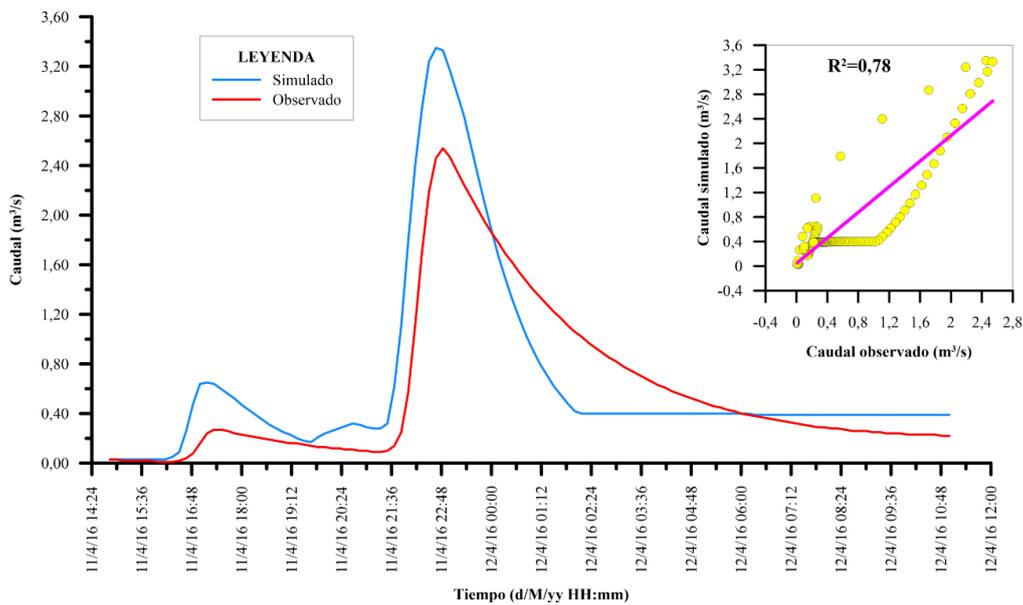


Figura. 26. Hidrogramas simulado y observado del evento 1 para la simulación de partida.

Fuente: Elaboración propia.

El caudal pico simulado sobreestima en un 31,89% de error con respecto al caudal pico registrado. Además, si se compara el momento al que ocurre el caudal pico entre los dos hidrogramas existe un desfase de 10 minutos, lo que repercute en el tiempo de respuesta en el caso de que el modelo se utilice en la implementación de sistemas de alerta temprana para prevención de inundaciones y planes de contingencia para la microcuenca.

Tabla 15. Resultados del análisis gráfico de la simulación de partida del evento 1.

RESULTADOS	SIMULADO	OBSERVADO	DIFERENCIA CAUDAL (m³/s)	DIFERENCIA CAUDAL (%)	DIFERENCIA TIEMPO (min)
Caudal pico (m³/s)	3,35	2,54	0,81	31,89	-
Hora pico (fecha-hora)	11abr2016 22:40	11abr2016 22:50	-	-	-10

Fuente: Elaboración propia.

El volumen de escorrentía simulado (48 090,00 m³) sobreestima en 11,58% el volumen observado (43 098,00 m³) del evento 1 (ver Figura 27). Este no es un buen indicador de eficiencia del modelo, puesto que el hidrograma simulado puede sobreestimar la curva de ascenso del hidrograma y subestimar la curva de recesión del mismo, generando un tipo de compensación en cuanto al volumen de escorrentía, como ocurre en esta simulación. Sin embargo, en el caso de que el fin de la utilización del modelo sea determinar la oferta del recurso hídrico, este indicador se vuelve relevante.

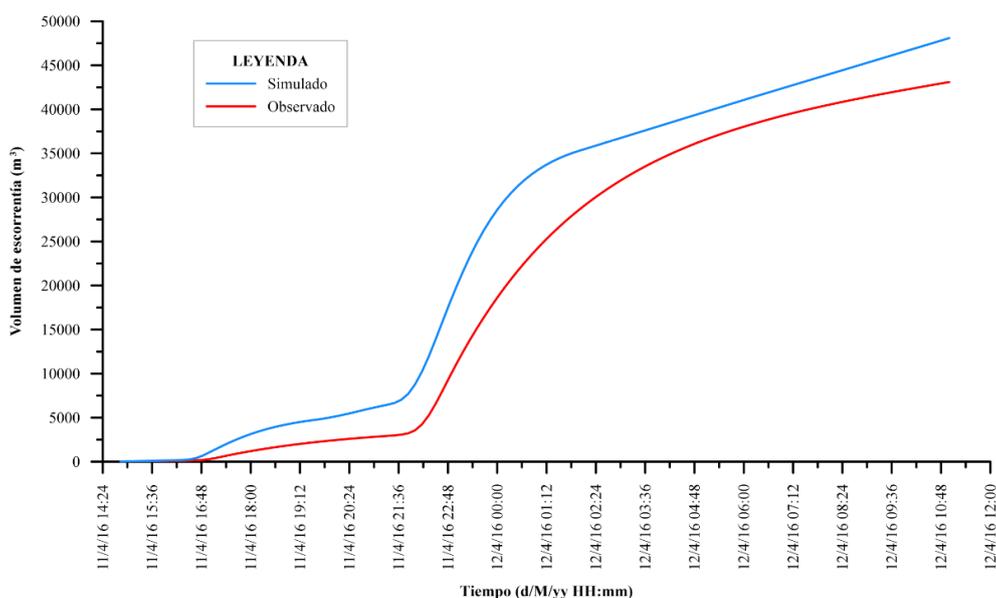


Figura. 27. Volumen de escorrentía acumulado simulado y observado del evento 1 de la simulación de partida.

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al análisis estadístico de los resultados obtenidos en la simulación de partida del evento 1 (ver Tabla 16), se obtuvieron valores $R^2 = 0,78$ (ver Figura 26) que indica una correlación aceptable entre los caudales simulados y los observados, $PBIAS = -11,58\%$ de sesgo entre los datos, lo que supone una sobreestimación de los caudales, mientras que $NSE = 0,67$ indica un buen desempeño del modelo.

Tabla 16. Resultados del análisis estadístico de la simulación de partida del evento 1.

EVENTO	R²	PBIAS	NSE
Evento 1 (11/4/2016 14:50 – 12/4/2016 11:00)	0,78	-11,58 %	0,67
INTERPRETACIÓN	Aceptable	Satisfactorio	Muy bueno

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Calibración de del modelo

En el proceso de calibración se logró identificar los valores óptimos de los parámetros (ver Tabla 17) que permiten al modelo HEC-HMS simula de manera más eficiente los caudales en la microcuenca El Carmen. Entre los parámetros sometidos a optimización están abstracción inicial, número de curva y tiempo de retardo.

Tabla 17. Información de entrada al componente modelo de cuenca, luego de la calibración.

MÉTODO	PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Pérdida	Abstracción inicial	mm	10,00*
	Número de curva	Adimensional	70,00*
	Impermeabilidad	%	4,00
Transformación	Tiempo de retardo	min	21,41*
Flujo base	Descarga inicial	m ³ /s	0,03
	Constante de recesión	Adimensional	0,90

Fuente: Elaboración propia. *Valores optimizados.

La optimización del número de curva $NC=70$, concuerda con los valores obtenidos en el proceso de calibración de los estudios realizados por Alvarez (2017); Mejía (2018) en el área de estudio, el cambio en este parámetro permitió incrementar el volumen de la escorrentía en la simulación. Sin embargo, este volumen se ve contrarrestado por el aumento de la abstracción inicial que adoptó un valor $I_a=10\text{mm}$, el cambio supone un aumento en las pérdidas de agua por infiltración en el sistema de la microcuenca. En cuanto al tiempo de retardo optimizado $T_{lag}=21,41\text{min}$, permitió corregir el desfase y ajustar el tiempo en el que se produce el pico del hidrograma simulado con el tiempo pico registrado en campo.

La abstracción inicial es uno de los parámetros más importantes en el desempeño de los modelos lluvia-escorrentía como menciona Aroca (2014). Este representa la cantidad de agua procedente de la precipitación que no formará parte de la escorrentía directa, es decir son las pérdidas de agua en el sistema, de ahí la importancia de la optimización de dicho parámetro. El valor optimizado del tiempo de retardo coincide con el 60 % del tiempo de concentración optimizado en el trabajo de Mejía, (2018) $T_c=35\text{min}$. Su aumento se realiza tomando en cuenta el efecto regulador que tiene la cobertura vegetal sobre este parámetro y que es muy relevante para esta microcuenca en específico.

La simulación realizada a partir del modelo calibrado con los parámetros optimizados y utilizando los datos de precipitación del evento 1 permitió obtener el hidrograma que se muestra en la Figura 28. El análisis gráfico (ver Tabla 18) muestra una evidente mejora

en el ajuste entre los caudales simulados y los caudales medidos en la estación hidrológica. A diferencia de la simulación de partida, en esta, el hidrograma simulado reproduce de manera casi perfecta la rama de ascenso del hidrograma hasta el punto pico, mientras que la curva de recesión sigue siendo subestimada, al igual que ocurre en el estudio desarrollado por Mejía, (2018).

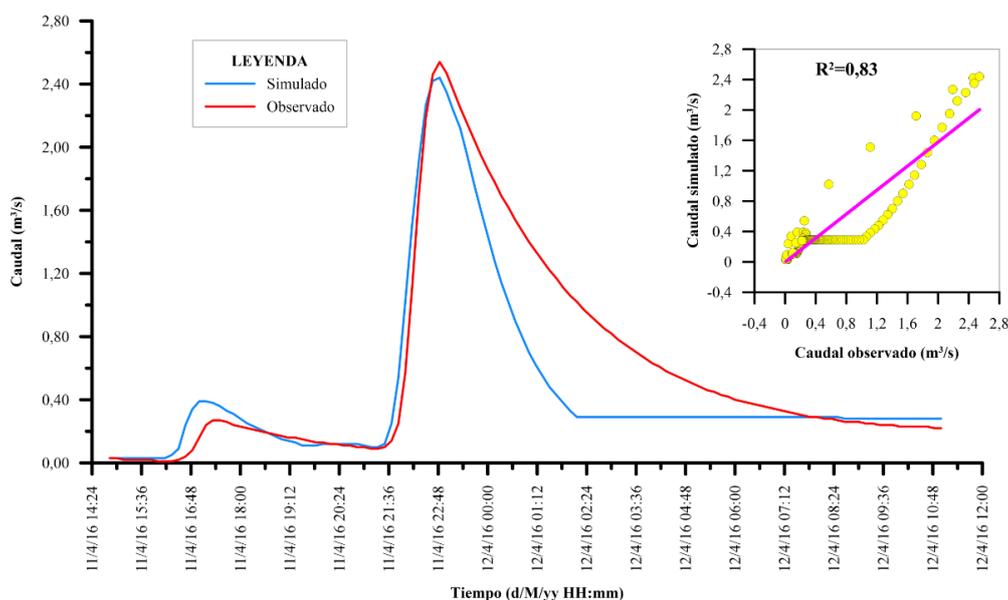


Figura. 28. Hidrogramas simulado y observado del evento 1 para el periodo de calibración.
Fuente: Elaboración propia

La mejora en la estimación del pico del hidrograma en tiempo y magnitud es notoria, pues el porcentaje de error en el caudal pico del evento 1 que se redujo a -3,94 %, lo que supone un paso de sobreestimación a subestimación, mientras que en la hora que se produce el pico coinciden perfectamente ambos hidrogramas. Demostrando que el modelo una vez calibrado puede ser utilizado en sistemas de alerta temprana en la prevención de crecidas de la microcuenca El Carmen.

Tabla 18. Resultados del análisis gráfico de la simulación del evento 1 para el periodo de calibración.

RESULTADOS	SIMULADO	OBSERVADO	DIFERENCIA CAUDAL (m³/s)	DIFERENCIA CAUDAL (%)	DIFERENCIA TIEMPO (min)
Caudal pico (m³/s)	2,44	2,54	-0,10	-3,94	-
Hora pico (fecha-hora)	11abr2016 22:50	11abr2016 22:50	-	-	0

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al volumen de escorrentía simulado en la calibración (33 810,00 m³) este disminuyó, subestimándolo en -21,55% al observado (43 098,00 m³) (ver Figura 29). Quedando claro que en lo que a volumen de escorrentía se refiere, el modelo HEC-HMS

desde el enfoque semidistribuido tiene sus limitaciones. La subestimación se debe a que en el modelo semidistribuido no se considera la heterogeneidad de distribución espacial de la precipitación del evento 1 registrada por las estaciones (ver Figuras 15a, Anexo 1a y 1b), ignorando los datos de las partes donde no se cuentan con estaciones para su registro (zona media-alta de la cuenca). Esto tiene serias implicaciones, pues como menciona Aroca (2014), la distribución espacial de las precipitaciones es determinante en la estimación del volumen de la escorrentía total.

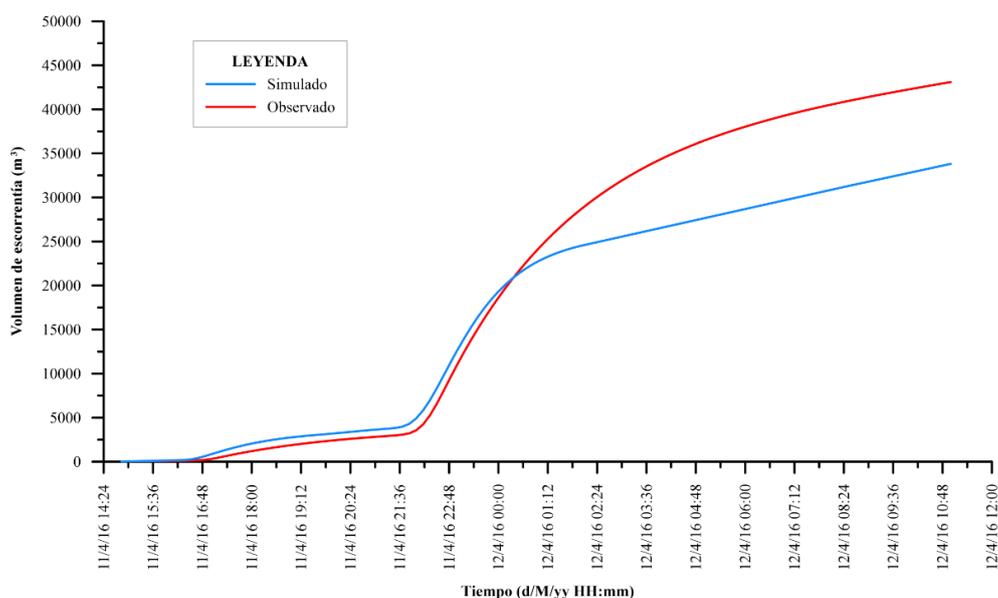


Figura. 29. Volumen de escorrentía acumulado simulado y observado del evento 1 para el periodo de calibración.

Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que los estadísticos no mejoran categóricamente, si existe una mejora considerable numéricamente hablando (ver Tabla 19) en comparación a los obtenidos en la simulación de partida. Por ejemplo, el grado de correlación entre los datos mejora $R^2=0,83$ (ver Figura 28) y de igual manera el desempeño del modelo $NSE=0,79$, mientras que el sesgo en los datos aumenta $PBIAS=21,6\%$, pero aún se considera como satisfactorio.

Tabla 19. Resultados del análisis estadístico de la simulación del evento 1 para el periodo de calibración.

EVENTO	R^2	PBIAS	NSE
Evento 1 (11/4/2016 14:50 – 12/4/2016 11:00)	0,83	21,60%	0,79
INTERPRETACIÓN	Excelente	Satisfactorio	Muy bueno

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Validación del modelo hidrológico HEC-HMS en la microcuenca El Carmen

Para la validación del modelo hidrológico se utilizaron como punto de partida los parámetros que se obtuvieron en el proceso de calibración (ver Tabla 17) conjuntamente con la información del evento 2. La simulación permitió obtener el hidrograma que se muestra en la figura 30. En el análisis gráfico (ver Tabla 20) se observa que el hidrograma simulado en el proceso de validación sigue la tendencia del observado, reproduce de una buena manera la curva de ascenso del hidrograma hasta el caudal pico, pero al igual que en la simulación de partida y la simulación de la calibración, la curva de recesión es subestimada, indicando que este modelo HEC-HMS tiene deficiencias al momento de simular la curva de recesión de los hidrogramas.

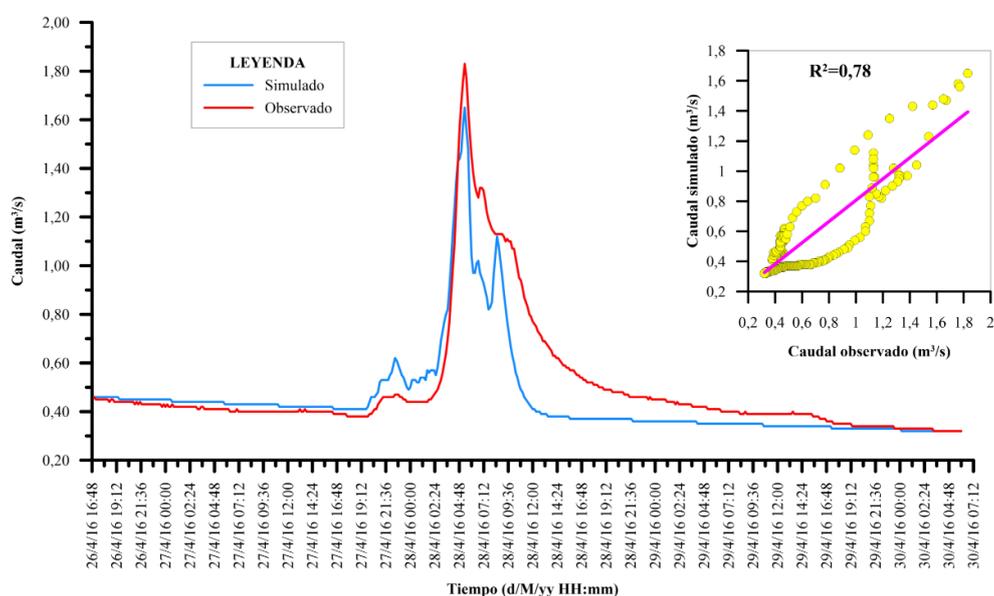


Figura. 30. Hidrogramas simulado y observado del evento 2 para el periodo de validación.

Fuente: Elaboración propia.

De manera general, en todas las simulaciones realizadas, las curvas de ascenso simuladas se aproximan más a las observadas en comparación con las curvas de recesión. Esto se debe a que las curvas de ascenso dependen de los parámetros iniciales introducidos en el modelo y los hidrogramas de precipitación, mientras que en las curvas de recesión ya intervienen los métodos de recesión, que estiman el flujo de base (Aroca, 2014). Otro factor que influye es el aporte del flujo subsuperficial al caudal, que para esta investigación no ha sido considerado. Esto explica la subestimación tanto de la curva de recesión como del volumen de escorrentía total, pues a partir del punto de inflexión en el hidrograma, la escorrentía sobre el suelo termina y el caudal únicamente recibe los aportes de los flujos subsuperficial y subterráneo (Monsalve, 1999).

El porcentaje de error en el caudal pico de -9,84% indica una ligera subestimación, mientras que la hora a la que se produce el pico es la misma que la registrada en el evento 2. El error en el caudal pico se debe a que el modelo no se considera la distribución espacial de la precipitación, y se ignoran los efectos que tiene las precipitaciones en las distintas zonas de la microcuenca sobre el caudal máximo de descarga. Pues como menciona Villon (2002), las precipitaciones que se generan en la parte baja producen caudales pico mayores, mientras que en las partes altas el caudal pico disminuye por el efecto regulador de los bosque y cauces que modifican el tiempo de concentración.

Tabla 20. Resultados del análisis gráfico de la simulación del evento 2 para el periodo de validación.

RESULTADOS	SIMULADO	OBSERVADO	DIFERENCIA CAUDAL (m ³ /s)	DIFERENCIA A CAUDAL (%)	DIFERENCIA TIEMPO (min)
Caudal pico (m³/s)	1,44	1,83	-0,39	-9,84	-
Hora pico (fecha-hora)	28abr2016 05:20	28abr2016 05:20	-	-	0

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al volumen escorrentía simulado (138 312,00 m³) subestima en un -9,18% al registrado (152 298,00 m³) del evento 2 (ver Figura 31). En esta simulación el volumen de escorrentía debido a que la precipitación sobre la microcuenca es más homogénea como lo muestran los registros tomados por las estaciones meteorológica y pluviométrica (ver Figuras 15b, Anexo 2a y 2b), permitiendo proporcionar datos más cercanos a la realidad que mejoran los cálculos del modelo HEC-HMS.

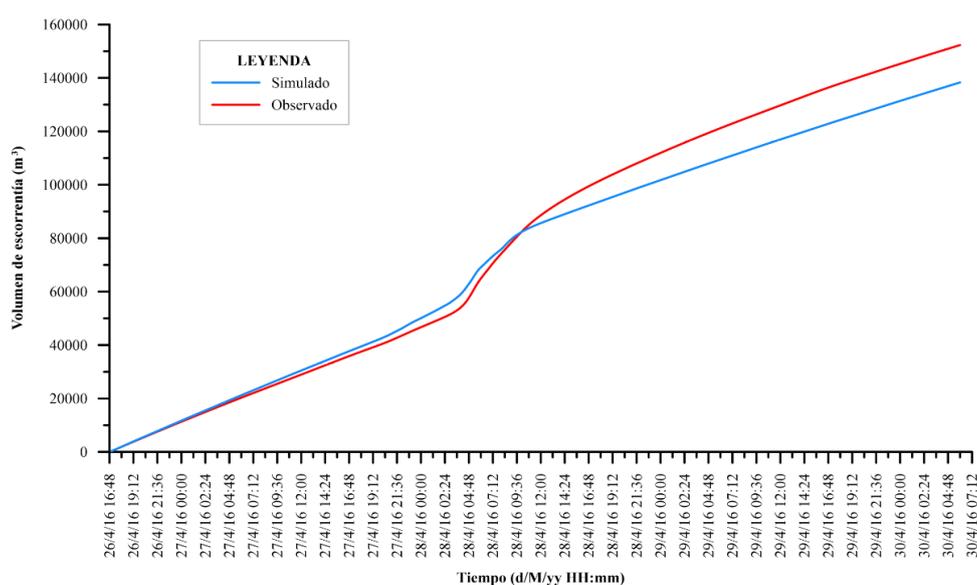


Figura. 31. Volumen de escorrentía acumulado simulado y observado del evento 2 para el periodo de calibración.

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte el análisis estadístico indica resultados dentro del rango de lo eficiente (ver Tabla 21). El grado de correlación entre los caudales simulados y los observados es aceptable $R^2=0,78$ (ver figura 30), el sesgo entre los datos es de $PBIAS=9,18\%$ que se considera como bueno y finalmente $NSE=0,74$ señala un muy buen desempeño del modelo.

Tabla 21. Resultados del análisis estadístico de la simulación del evento 2 para el periodo de validación.

EVENTO	R²	PBIAS	NSE
Evento 2 (26/4/2016 17:00 – 30/4/2016 6:00).	0,78	9,18%	0,74
INTERPRETACIÓN	Aceptable	Bueno	Muy bueno

Fuente: Elaboración propia.

Los buenos resultados obtenidos en el análisis estadístico en el periodo de validación permiten comprobar que el modelo HEC-HS ha sido correctamente validado en la microcuenca El Carmen para la simulación de caudales.

Al igual que en este estudio otros autores han logrado validar correctamente el modelo HEC-HMS en otras unidades hidrográficas gracias a los buenos resultados obtenidos. Tal es el caso del estudio realizado por Cabrera (2017) en una microcuenca de páramo del parque nacional Cajas, pues mostró una eficiencia del modelo excelente ($NSE=0,81$) para el modelo. De igual manera en el estudio realizado en subcuenca alta del río Zamora por Ordoñez (2015), quien lo aplicó a 5 eventos puntuales. Los coeficientes de correlación fueron excelentes entre los caudales simulados en este estudio y los registrados en campo ($R^2=0,99$), afirmando que HEC-HMS es totalmente válido para la simulación de eventos específicos.

Alvarez (2017), quien utilizó el modelo HEC-HMS en la subcuenca de Zamora Huayco a la que forma parte la microcuenca El Carmen, igualmente obtuvo correlaciones muy buenas entre caudales simulados y observados valores ($R^2=0,82$) y un buen criterio de ajuste del modelo ($NSE=0,61$). En cuanto a trabajos de modelación hidrológica con HEC-HMS realizada en la microcuenca El Carmen, se cuenta con el desarrollado por Mejía (2018). En este estudio los resultados del análisis estadístico concuerdan con los obtenidos en esta investigación, pues obtuvo correlaciones entre caudales entre aceptables y excelentes (R^2 entre 0,66 y 0,97), y una del modelo entre regular y excelente (NSE entre 0,57 y 0,96).

5. CONCLUSIONES

- El análisis de las características morfométricas de la microcuenca El Carmen, indica que la respuesta hidrológica es rápida, pues el tiempo de concentración es de 35 minutos. Las particularidades de la microcuenca como su pendiente de cuenca y cauce muy escarpada, y su forma ovalada, hacen que la microcuenca tenga una tendencia media-alta a crecidas e inundaciones. Sin embargo, este efecto se ve contrarrestado por otras características como: la densa cobertura vegetal, la media densidad de drenaje y el orden de corrientes 3, que regulan la respuesta hidrológica de la microcuenca, pues reducen la velocidad del flujo del agua hacia el punto de desembocadura mediante el proceso de infiltración.
- El modelo hidrológico HEC-HMS desde el enfoque semidistribuido tiene la fortaleza de simular de buena manera la rama de ascenso del hidrograma hasta el pico del hidrograma en tiempo y magnitud de los eventos 1 y 2. Mientras que las debilidades presentadas son la subestimación de la curva de recesión del hidrograma simulado y del volumen de escorrentía en ambos eventos. Esto se debe a que en el modelo no se considera ni la variabilidad espacial de la precipitación, ni los aportes del flujo subsuperficial al caudal que son determinantes en la estimación del volumen de escorrentía y en la curva de recesión respectivamente.
- En función de las fortalezas y debilidades presentadas, el modelo HEC-HMS puede ser utilizado en la implementación de sistemas de alerta temprana ya que simula de manera eficiente los caudales pico en tiempo y magnitud, pero no puede utilizarse con el fin de determinar la oferta del recurso hídrico en la unidad hidrográfica, ya que no estima correctamente los volúmenes de escorrentía acumulados.
- A pesar de las limitaciones, el modelo HEC-HMS ha sido correctamente validado para la simulación de los caudales de la microcuenca el Carmen, pues el análisis estadístico de los resultados de las simulaciones lo demuestran. La correlación entre los datos simulados y observados está en el rango de lo aceptable y excelente (R^2 entre 0,78 y 0,83). El porcentaje en el sesgo de los datos le da un desempeño entre satisfactorio y bueno (PBIAS entre 9,18% y -21,60%), el mismo que concuerda con la muy buena eficiencia presentada por el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE entre 0,67 y 0,79).

6. RECOMENDACIONES

- Utilizar otros métodos disponibles en HEC-HMS para la estimación de pérdidas en los que existe una mayor discretización de los procesos que intervienen en infiltración y que son determinantes en la curva de recesión, tales como de Soil Mesure Acounting o Green-Ampt. Para Soil Mesure Acounting es necesario contar con información respecto a la interceptación de la cobertura vegetal, el almacenamiento en depresiones superficiales, el almacenamiento en el suelo, y el almacenamiento de los acuíferos. Mientras que para Green-Ampt se requiere el contenido inicial del agua, contenido saturado de agua (porosidad), succión, conductividad y el porcentaje de la subcuenca que es impermeable. Estos métodos además permiten considerar el aporte al caudal por flujo subsuperficial, que es determinante en la curva de recesión del hidrograma simulado.
- Aplicar modelos hidrológicos con un enfoque espacialmente distribuido en la microcuenca El Carmen, los cuales permitan considerar la variabilidad espacial de las precipitaciones, ya que esto tiene una marcada influencia sobre la determinación de los volúmenes de escorrentía. Para esto se puede utilizar información obtenida mediante sensores remotos.
- Realizar un análisis comparativo del desempeño de los distintos modelos hidrológicos, con el fin de determinar el más eficiente en la simulación de caudales de la microcuenca El Carmen.
- Replicar este tipo de investigaciones en otras microcuencas prioritarias en el abastecimiento de agua de la ciudad de Loja. Pues los modelos hidrológicos son herramientas muy útiles que contribuyen en el manejo integral del recurso hídrico a través de la toma de decisiones.
- Extender los estudios de modelación hidrológica a una mayor escala espacial, enfocados a dar soluciones a la problemática de la gestión integral del recurso hídrico en la cuenca Catamayo-Chira que es de interés binacional.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, N. (2007). *Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas*. Loja, Ecuador: Universidad Nacional de Loja.
- Alvarez, L. (2017). *Disponibilidad y demanda del recurso hídrico superficial. Estudio de caso: Subcuenca Zamora Huayco, Ecuador* (tesis de maestría). Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina.
- Amaya, G., Restrepo, C., Vélez, M., Vélez, J., y Álvarez, O. (2009). Modelación del comportamiento hidrológico de tres cuencas en el Urabá Antioqueño - Colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 25(19), 21–38.
- Aparicio, F. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (Primera Ed). México, DF, México: Limusa.
- Arias, P. (2015). *Guía de Aplicaciones del HEC-HMS en cuencas cubanas. Ejemplos prácticos*. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”.
- Aroca, E. (2014). *Importancia de las abstracciones iniciales para la génesis de avenidas en cuencas de montaña*. Universidad de Cantabria. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2621.0169>
- Arteaga, M. (2017). *Evaluación del modelo hidrológico HEC-HMS para la predicción hidrológica y de crecidas, en la cuenca baja del río Cañar* (tesis de pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Astorayme, M. (2017). *Análisis y evaluación comparativa de modelos hidrológicos agrupados y semidistribuidos aplicados al pronóstico de caudales diarios del río Chillón* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Avalos, R. (2018). Elaborar modelos hidrológicos al alcance de estudiantes universitarios. *Revista Ciencia y Tecnología*, (21), 177–193. <https://doi.org/10.5377/rct.v0i20.5955>
- Aveiga, H., y Caiza, H. (2018). *Análisis comparativo de resultados hidrológicos obtenidos con los modelos HEC-HMS, GR4J, AWBM y TANK MODEL, en la cuenca del río Alambi* (tesis de pregrado). Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Ayora, M. (2016). *Caracterización de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos en arroyos de microcuencas intervenidas y de referencia del cantón Loja* (tesis de pregrado). Universidad Nacional del Loja, Loja, Ecuador.
- Bastidas, C. (2005). *Manual para el uso del modelo hidrológico HEC-HMS*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Bendix, J., Fries, A., Zárate, J., Trachte, K., Rollenbeck, R., Pucha, F., ... Achilles, S. (2017). RadarNet-Sur first weather radar network in tropical high mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(6), 1235–1254. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00178.1>

- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., y Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.5867>
- Cabrera, J. (2011). *Modelos Hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Cabrera, J. (2012). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Cabrera, J. (2017). *Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Cerignoni, F., y Rodrigues, V. (2015). Análisis morfométrico de la microcuenca “C” núcleo Cunha, São Paulo, Brasil. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (41).
- Chow, V. Te, Maidment, D., y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada* (Primera Ed). Illinois, Estados Unidos: McGraw-Hill.
- CITIAB. (2016a). *Información de cobertura vegetal; microcuencas El Carmen 1, Mónica*. Loja, Ecuador.
- CITIAB. (2016b). *Monitoreo hidrometeorológico como instrumento de gestión. Caso piloto: microcuencas Chinchal y El Guano Zona Alta subcuenca Alamor- Catamayo Chira*. Loja, Ecuador.
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., ... De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. *Avances en investigación para la conservación de los páramos Andinos, CONDESAN*.
- Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H., y Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1-4), 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Cueva, C. (2017). *Análisis de eventos máximos de precipitación en microcuencas prioritarias del cantón Loja (Período 2015 - 2016)* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- Davie, T. (2008). *Fundamentals of Hydrology* (Segunda Ed). New York, Estados Unidos: Taylor y Francis Group.
- Fattorelli, S., y Fernández, P. (2011). *Diseño Hidrológico* (Segunda Ed). Zaragoza, España: WASA-GN.
- Feldman, A. (2000). Hydrologic Modeling System Technical: User Manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering. *Security*, 145. <https://doi.org/https://doi.org/CDP-74B>

- Fernández, M., Vela, A., y Castaño, S. (1997). La utilización de modelos en hidrología. *Ensayos: Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, ISSN 0214-4842, ISSN- e 2171-9098, N°. 12, 1997, págs. 305-318, (12), 305–318.
- Fuentes, J. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancítaro. *Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas*, 1–47. <https://doi.org/10.1209/epl/i1997-00260-6>
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Delgado, M., y Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas* (Primera Ed). Buenos Aires, Argentina: Editorial de la Universidad de La Plata.
- Gayathri, K., Ganasri, B., y Dwarakish, G. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- González, A., Alvarez, P., González, M., y Aguirre, Z. (2016). Influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río. *CEDAMAZ*, 6(Diciembre), 50–59.
- INAHMI. (2010). *PROYECTO: K006 K002 INAMHI. “Fortalecimiento de implementación de la red básica de estaciones meteorológicas e hidrológicas de la República del Ecuador”*. Quito, Ecuador.
- INAMHI. (2013). *INAMHI 52 años 1961-2013, publicación conmemorativa*. Quito, Ecuador.
- INAMHI. (2014). *Proceso Desconcentrado de la Cuenca del Río Jubones-Puyango*. Loja, Ecuador.
- INAMHI. (2019a). *Ficha Informativa de Proyecto 2018. PROYECTO: K006 K002 INAMHI. “Fortalecimiento de implementación de la red básica de estaciones meteorológicas e hidrológicas de la República del Ecuador”*. Quito, Ecuador.
- INAMHI. (2019b). *Informe de gestión institucional rendición de cuentas periodo 2018 rendición de cuentas periodo 2018*. Quito, Ecuador.
- Jiménez, C. (2017). *Dinámica espacio temporal de material leñoso en descomposición a nivel de cuencas prioritarias del cantón Loja* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- Loayza, A. (2017). *Variabilidad temporal de la producción de sedimentos en suspensión en microcuenas prioritarias de Loja*. Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- López, I. (2012). *Utilización del modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para simular el proceso lluvia-escorrentamiento ante cambios de cobertura vegetal y uso de suelo, considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huixtla, Chiapas* (tesis de maestría). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, Mexico.

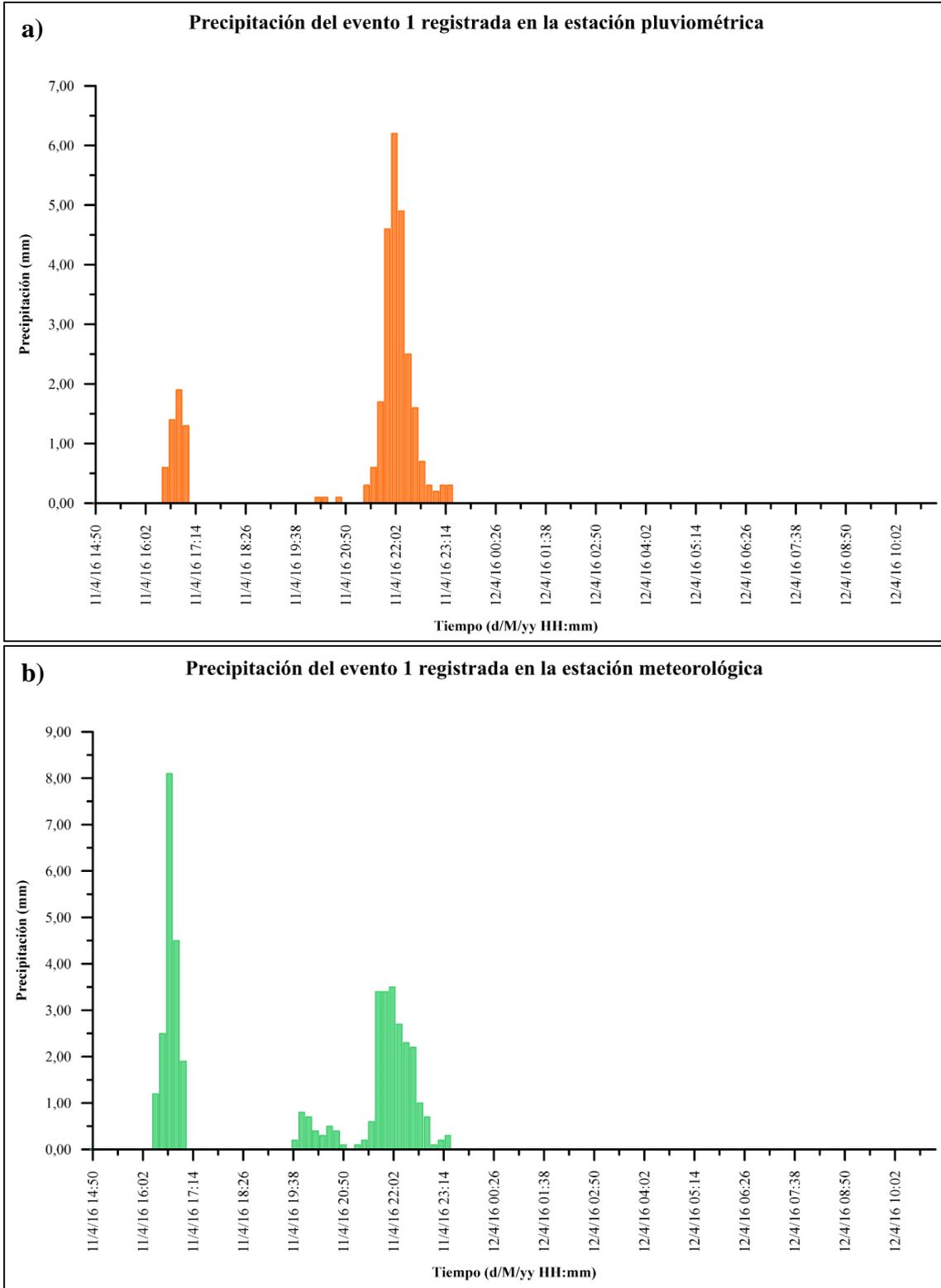
- López, J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J., y Gimena, F. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y proyectos*, (12), 15–30. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132012000200002>
- López, X., y Patiño, D. (2017). *Aplicación de modelos hidrológicos de las microcuencas del Área de Bosque y Vegetación Protector Aguarongo con enfoque al cambio climático* (tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Martínez, E. (2015). *Análisis hidrológico y respuesta lluvia-escorrentía de cuatro microcuencas de alta montaña del sur del Ecuador* (tesis de pregrado). Cuenca, Ecuador.
- Martínez, F. (2009). *Influencia de la textura en la permeabilidad del suelo en la subcuenca Zamora Huayco- Cantón Loja* (tesis de pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.
- Mejía, D. (2018). *Runoff stimation in a small catchment in the high Andes of southern of Ecuador using high resolution radar images* (tesis de maestría). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador. No publicada.
- Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siebe, C., y 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, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 47, 36–58.
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería* (Segunda Ed). Santafé de Bogotá, Colombia: ALFAOMEGA EQUIPO EDITOR. S.A.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., y Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Muñoz, F. (2007). *Manejo de cuenca hidrográficas tropicales*. Loja, Ecuador: Casa de la Cultura Ecuatoriana “Benjamín Carrión”, Núcleo de Loja.
- NRCS. (1986). *Urban Hydrology for Small TR-55. Soil Conservation* (Segunda Ed). Washington, Estados Unidos.
- NRCS. (2009). National Engineering Handbook Chapter 7: Hydrologic Soil Groups. En *Hydrology National Engineering Handbook*. <https://doi.org/10.1042/bj20031082>
- Ocampo, O., y Vélez, J. (2014). 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.
- Ochoa, P., Fries, A., Montesinos, P., Rodríguez, J., y Boll, J. (2015). Spatial Estimation of Soil Erosion Risk By Land-Cover Change in the Andes of Southern Ecuador. *Land Degrad. Develop.*, 26(6), 565–573. <https://doi.org/10.1002/ldr.2219>

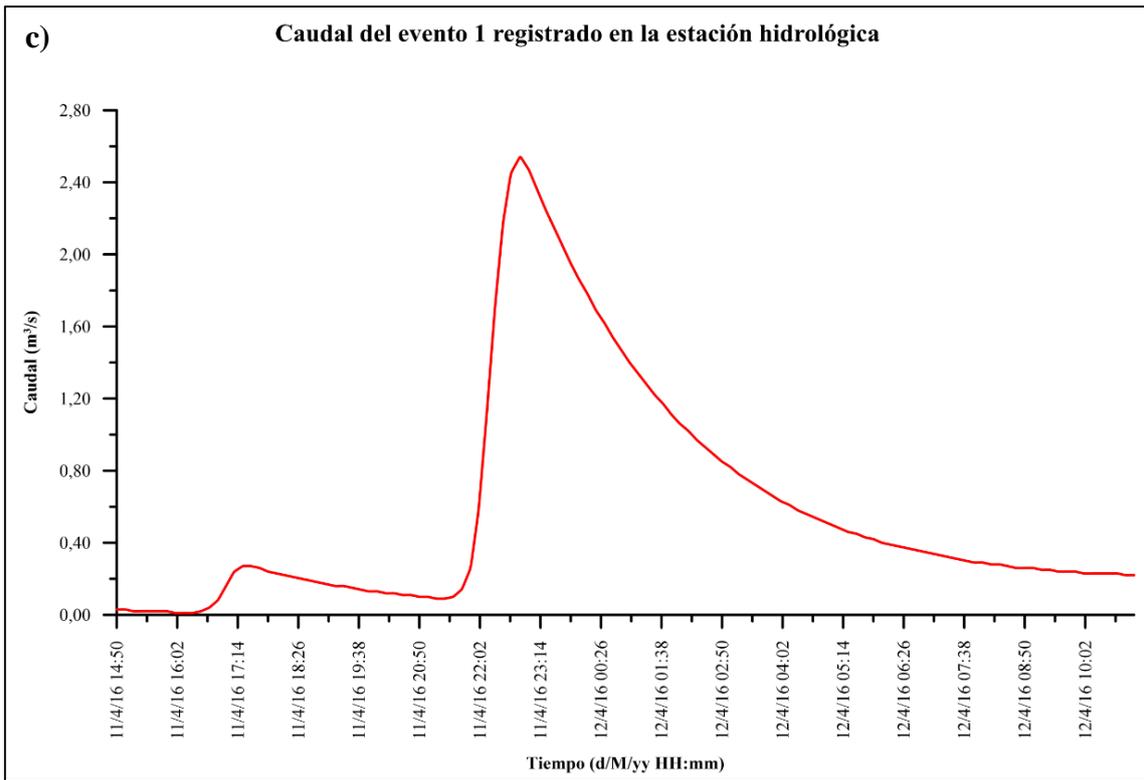
- OMM. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas. Volumen I: Hidrología – De la medición a la información hidrológica*. (Sexta Ed). Ginebra, Suiza.
- Oñate, F. (2006). *Hidrología (Apuntes de clase)*. Universidad Técnica Particular De Loja, Loja, Ecuador.
- Ordoñez, J. (2011a). *Cartilla: ¿Qué es una cuenca hidrológica?* (Primera Ed). Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Ordoñez, J. (2011b). *Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico*. (Sociedad Geográfica de Lima, Ed.) (Primera Ed). Lima, Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Ordoñez, J. (2015). *Determinación de la respuesta hidrológica de la subcuenca alta del río Zamora*. Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- Pascual, J., y Díaz, M. (2016). *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS*. Alcalá, España: Instituto IMDEA Agua.
- PDOT Loja. (2014). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial: Municipio de Loja*. Loja, Ecuador: Actualización 2014-2022.
- Pochat, V., Donoso, M., y Saldarriaga, J. (2018). *Proceso Regional de las Américas: Foro Mundial del Agua 2018: Informe subregional América del Sur: Resumen ejecutivo*.
- PROMAS. (2012). *Estudios de control de inundaciones (reencauzamiento) y protección de las márgenes del río Chuchumbleza, en su tramo final antes de la unión con el río Zamora*. Cuenca, Ecuador.
- Quichimbo, E. (2010). *Estudio comparativo de los modelos NAM Y DBMM aplicado al pronóstico de caudales* (tesis de pregrado). Cuenca, Ecuador.
- Ricaldi, O. (2016). Comparación de modelos hidrológicos para la simulación de caudales medios mensuales en la cuenca del río Tomayapo. *Ciencia Sur*, 2(2), 1–9.
- Sánchez, A., García, R., y Palma, A. (2003). *La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales* (Primera Ed). México, DF, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Sánchez, F. (2015). *HEC-HMS. Manual elemental*. Universidad de Salamanca, Salamanca, España.
- Vanegas, R. (2016). *Disponibilidad de materia orgánica bentónica y su potencial relación con la estructura física de cauces, en microcuencas prioritarias del cantón Loja* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- Vargas, G., Ibáñez, L., y Arteaga, R. (2015). Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling Desarrollo, clasificación y tendencias de la modelación lluvia-escorrentía. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7(1), 5–21. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2015.03.002>
- Villon, M. (2002). *Hidrología* (Primera Ed). Cartago, Costa Rica: Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

- Waseem, M., Mani, N., Andiego, G., y Usman, M. (2017). A Review of Criteria of Fit for Hydrological Models. *International Research Journal of Engineering and Technology*.
- Weber, J., Stehli, P., Vestena, L., y Jorquera, E. (2013). *Modelación hidrológica distribuida de dos cuencas hidrográficas*. Córdoba, Argentina.
- Woodward, D., Researcher, I., y Hawkins, R. (2003). Runoff Curve Number Method : Examination of the Initial Abstraction Ratio. En *World Water and Environmental Resources Congress 2003* (Vol. 40685). [https://doi.org/10.1061/40685\(2003\)308](https://doi.org/10.1061/40685(2003)308)
- Zárate, C. (2011). *Hacia un modelo de ordenación para los territorios de protección natural del área de influencia inmediata a la ciudad de Loja. Microcuenca El Carmen* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.

8. ANEXOS

8.1. Anexo 1. Datos de precipitación y caudal registrados por las estaciones pluviométrica y meteorológica en el evento 1.





8.2. Anexo 2. Datos de precipitación y caudal registrados por las estaciones pluviométrica y meteorológica en el evento 2.

