



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y
DE LA OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL TOTAL DE LA
MICROCUEENCA DE LA QUEBRADA SANTA ELENA,
ANTIOQUIA, COLOMBIA**

Autora

Mónica Álvarez Valle

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



**Modelación del comportamiento hidrológico y de la oferta hídrica superficial
total de la microcuenca de la Quebrada Santa Elena, Antioquia, Colombia**

Mónica Álvarez Valle

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Asesor:

Álvaro Wills Toro

Ingeniero Civil

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2021

Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado con el apoyo intelectual y emocional de muchas personas, a quienes quiero enaltecer en estos agradecimientos. Sin ellos, el camino recorrido al materializar este trabajo hubiese sido más arduo de seguir.

A mis amigos, quienes hicieron ameno y más placentero el paso por la universidad y me dieron sus ánimos durante este trabajo. A todos los profesores que compartieron su conocimiento y me acompañaron durante toda la carrera, todos ellos hicieron posible este trabajo.

Al profesor Álvaro quien me contagió su entusiasmo por la hidrología y me apoyó en cada momento de la realización de este trabajo.

Y especialmente a toda mi familia, quien siempre me apoyó a pesar de los momentos difíciles. Mis padres Consuelo y Orlando, quienes me apoyan con todos mis objetivos y me enseñaron con su ejemplo la perseverancia. A mi abuela Teresa quien siempre me brinda su amor y cariño. Y a mi hermano Robinson quien siempre me ha ayudado y ha creído en mí.

Resumen

La gestión de los recursos hídricos requiere del entendimiento de los procesos hidrológicos que ocurren en las cuencas hidrográficas y de la cuantificación de su oferta hídrica para el desarrollo efectivo de estrategias de uso sostenible del agua. Los modelos hidrológicos permiten la estimación y análisis de los recursos hídricos de una región. El objetivo principal de este estudio es calibrar un modelo hidrológico que permita representar el balance hídrico de la microcuenca de la quebrada Santa Elena para así caracterizar el comportamiento hidrológico de la cuenca y estimar la oferta hídrica superficial. También se realizó una cuantificación de las extracciones realizadas en la cuenca para el año 2020. Primero, se realizó una revisión de diferentes modelos hidrológicos que podrían cumplir los objetivos del proyecto con la información disponible. Se seleccionó e implementó HEC-HMS 4.7 (Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica) para la simulación de los procesos lluvia-escorrentía en la microcuenca de la quebrada Santa Elena, de $25.5km^2$, ubicada en la zona centrorienta de Medellín, Colombia. La cuenca fue discretizada espacialmente en celdas de 50m para la aplicación del modelo y dividida en 5 subcuencas para el análisis de información. La configuración del modelo incluyó los siguientes submodelos: interceptación discretizada por dosel de cobertura, almacenamiento superficial discretizado, Contenido de Humedad del Suelo (SMA) discretizado para la representación del flujo en el suelo, ModClark como método de transformación de la escorrentía y método de recesión para el caudal base. Para la distribución de lluvia se utilizó el método IDW haciendo uso de 7 estaciones meteorológicas influyentes en el área de estudio, mientras que para la evapotranspiración se calculó una media mensual multianual con la ecuación de Penman Monteith. La calibración y validación del modelo se realizó para el periodo de mayo de 2020 a octubre de 2020 con datos diarios. La estimación de la oferta hídrica se realizó para 2014-2019. Las extracciones se calcularon en base a la población proyectada para 2020 y la dotación bruta definida por el RAS 2000. Se analizaron los componentes: precipitación, percolación profunda, escorrentía superficial, caudal base y caudal. El desempeño del modelo fue de $NSE = 0.62$ para la calibración y $NSE = 0.54$ en la validación, mientras que $PEV = 6.96\%$ y $PEV = 3.60\%$ respectivamente. Los resultados muestran que el 77% del caudal total (33 millones de m^3 por año) corresponde al caudal base (25 millones de m^3) y el 23% restante a la escorrentía superficial. El caudal a la salida de la cuenca es de $1053.97L/s$ y el caudal medio diario demandado estimado para 2020 es de $133.97L/s$, presentando en algunos acueductos un déficit.

Palabras clave: modelación hidrológica, modelo HEC-HMS, modelación continua, calibración, extracciones

Índice general

Resumen	III
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
3. Marco teórico	4
3.1. Criterios de selección del modelo hidrológico	4
3.2. Modelo HEC-HMS	8
3.2.1. Funcionamiento del modelo	9
3.2.2. Modelo de cuenca	11
3.2.3. Interceptación por dosel	11
3.2.4. Pérdidas superficiales	12
3.2.5. Pérdidas por infiltración	12
3.2.6. Transformación de escorrentía	13
3.2.7. Caudal base	16
3.2.8. Modelo meteorológico	16
3.2.9. Calibración	18
3.3. Dotación y demanda hídrica	21
4. Metodología	24
4.1. Fuentes de información	26

4.2. Herramientas utilizadas	27
5. Zona de estudio	28
5.1. Ubicación del área de estudio	28
5.2. Caracterización y Análisis Morfométrico	30
5.2.1. Forma de la cuenca	30
5.2.2. Tiempo de concentración	32
5.2.3. Perfil longitudinal del cauce principal	34
5.3. Topografía	36
5.4. Geología	38
5.5. Suelos	40
5.6. Cobertura del suelo	40
5.7. Usos del suelo	43
5.8. Usos del agua	44
5.9. Información Climática	47
5.9.1. Precipitación	47
5.9.2. Temperatura	49
5.9.3. Hidrología	52
6. Configuración del modelo e información de entrada	54
6.1. Modelo de cuenca y parámetros de entrada	54
6.1.1. Método de interceptación de lluvias por dosel de coberturas vegetal: Gridded Simple Canopy Method	56
6.1.2. Método de almacenamiento superficial del agua: Gridded Simple Surface: . .	57
6.1.3. Método de pérdidas: Gridded Soil Moisture Accounting	58
6.1.4. Método de transformación: ModClark	61
6.1.5. Método de caudal base: Recession Baseflow	62
6.2. Componente meteorológico	63
6.2.1. Modelos meteorológicos: Precipitación y Evapotranspiración y tratamiento de datos	63
6.3. Calibración, evaluación y especificaciones de control	63

7. Resultados y análisis	66
7.1. Calibración y Validación	66
7.2. Simulación 2014-2019	68
7.3. Balance hídrico	71
7.3.1. Precipitación	71
7.3.2. Percolación	72
7.3.3. Escorrentía directa	72
7.4. Estimación de la demanda hídrica actual	72
8. Conclusiones	74
Referencias	82

Índice de figuras

3.1. Diagrama del proceso de escorrentía a escala local. Tomado y modificado de Feldman (2000)	10
3.2. Esquema conceptual del modelo continuo del suelo Contenido de Humedad del Suelo (<i>Soil Moisture Accounting</i>). Tomado de Ouédraogo et al. (2018)	14
3.3. Esquema del proceso de calibración. Tomado de Scharffenberg (2016)	19
4.1. Protocolo de modelación hidrológica. Modificado de Engel et al., 2007.	25
5.1. Área de estudio. Elaboración propia con datos de Alcaldía de Medellín.	29
5.2. Red hídrica del área de estudio. Elaboración propia con datos de la Alcaldía de Medellín.	29
5.3. Perfil longitudinal del cauce principal. Elaboración propia con información recolectada.	35
5.4. Mapa de elevación de la cuenca. Elaboración propia.	36
5.5. Histograma de elevación de la cuenca. Elaboración propia	37
5.6. Curva hipsométrica de la microcuenca Santa Elena. Elaboración propia.	37
5.7. Histograma de pendientes del área de estudio. Elaboración propia.	39
5.8. Mapa de pendientes de la cuenca. Elaboración propia.	39
5.9. Mapa de suelos. Elaboración propia.	41
5.10. Mapa cobertura de la tierra según la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia para el área de estudio del año 2012. Elaboración propia con datos del IDEAM.	42
5.11. Mapa de usos del suelo. Elaboración propia con datos de la Alcaldía de Medellín.	44
5.12. Acueductos ubicados en el área de estudio. Elaboración propia con datos suministrados por Corantioquia y la Concesión Túnel de Oriente.	45
5.13. Mapa de distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas.	47

5.14. Precipitación acumulada mensual multianual para el periodo 1971 a 2019. Elaboración propia con datos del IDEAM.	49
5.15. Serie de precipitación acumulada anual del periodo 1971 - 2019. Elaboración propia con datos del IDEAM.	50
5.16. Distribución de la precipitación acumulada mensual multianual.	50
5.17. Temperatura media anual. Elaboración propia calculada con la ecuación desarrollada por Corantioquia.	51
5.18. Sección transversal de la estación hidrológica 402 8 de Marzo. Elaboración propia con datos del SIATA.	52
6.1. Mapa de subcuencas de la microcuenca Santa Elena.	55
6.2. Uso del software SPAW para la estimación de las propiedades hidráulicas del suelo.	59
7.1. Calibración y validación de los caudales simulados.	67
7.2. Precipitación mensual multianual para la cuenca.	68
7.3. Caudal mensual multianual simulado para el periodo 2014-2019.	69
7.4. Distribución mensual del caudal diario simulado para el periodo 2014-2019.	69
7.5. Caudal medio mensual simulado para el periodo 2014-2019.	70

Índice de tablas

3.1. Modelos hidrológicos de simulación continua seleccionados para la comparación. . . .	6
3.2. Aplicaciones, ventajas y desventajas de algunos modelos hidrológicos.	7
3.3. Módulos disponibles en el modelo de cuenca.	11
3.4. Submodelos de pérdidas por infiltración.	12
3.5. Modelos de transformación de escorrentía.	14
3.6. Asignación del nivel de complejidad del sistema de acueducto. Fuente:	22
3.7. Dotación neta según el nivel de complejidad del sistema.	22
3.8. Dotación neta según el nivel de complejidad del sistema.	22
4.1. Procesos representados por HEC-HMS.	27
4.2. Herramientas utilizadas en este estudio.	27
5.1. Forma de la cuenca según el coeficiente de Gravelius. Elaboración propia con información de Londoño (2001) y FAO, 1985.	31
5.2. Índice de alargamiento (Reyes Trujillo et al., 2010).	32
5.3. Tiempos de concentración para la microcuenca de la quebrada Santa Elena utilizando diferentes ecuaciones.	34
5.4. Parámetros morfométricos del área de estudio.	35
5.5. Clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente media. Fuente: Ortiz (2004)	38
5.6. Cobertura de la tierra para el área de estudio para el año 2012 de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Elaboración propia con datos del IDEAM.	43
5.7. Acueductos al interior de la zona de estudio. Elaborado con información brindada por Corantioquia, con datos de Alcaldía de Medellín (2014) e información de la Concesión Túnel de Oriente (2013).	46

5.8. Estaciones hidrometeorológicas instaladas en la microcuenca Piedras Blancas y sus alrededores.	48
6.1. Subcuencas de la microcuenca Santa Elena usadas en la simulación con HEC-HMS y sus quebradas principales.	55
6.2. Parámetros usados en el modelo y sus rangos por defecto.	56
6.3. Almacenamiento por cobertura vegetal.	57
6.4. Coeficiente por cobertura vegetal.	57
6.5. Almacenamiento superficial. Valores de Bennett (1998)	58
6.6. Cálculo de la conductividad hidráulica del suelo para la microcuenca de la quebrada Santa Elena.	58
6.7. Conductividad hidráulica del suelo para la microcuenca de la quebrada Santa Elena.	59
6.8. Almacenamiento de agua en el suelo para los suelos presentes en área de estudio.	60
6.9. Almacenamiento de agua en la zona de tensión para los suelos presentes en área de estudio.	61
6.10. Conductividad hidráulica de los complejos hidrogeológicos de la zona de estudio.	61
6.11. Tiempos de concentración y coeficientes de almacenamiento estimados para cada subcuenca del caso de estudio.	62
6.12. Calificación de desempeño de los índices utilizados para la validación y calibración.	65
7.1. Valores de los parámetros iniciales y calibrados.	66
7.2. Evaluación de desempeño del modelo HEC-HMS.	67
7.3. Precipitación media acumulada anual de la microcuenca Santa Elena.	70
7.4. Cálculo de dotaciones neta y bruta, y de los caudales medios diarios para una población proyectada al 2020.	73
7.5. Cálculo de déficit por concesión para cada cada acueducto.	73

Capítulo 1

Introducción

El agua es un recurso vital, base para el bienestar y desarrollo social y fundamental para la conservación de los ecosistemas, brinda múltiples beneficios como el suministro de agua para extracción, suministro de agua en la corriente para los ecosistemas fluviales, mitigación de daños por agua y provisión de servicios culturales relacionados con el agua (Lüke & Hack, 2018). La fiabilidad, calidad, cantidad, acceso seguro y equitativo y el aprovisionamiento ambiental de los suministros de agua (Unesco, 2019) pueden estar amenazados por el crecimiento poblacional, que conlleva problemas como el aumento de la demanda de recursos hídricos y cambios de usos del suelo.

En Medellín, Colombia, la población en las zonas rurales de la ciudad aumenta de forma descontrolada (Colombiano, 2018). Tal es el caso del corregimiento de Santa Elena, donde según proyecciones del DANE (2010), entre 2005 y 2015 la población crecería en un 5.3% y entre 2016 y 2020 crecería con una tasa de crecimiento del 3.8% (DANE, 2018). En el corregimiento de Santa Elena se encuentra la microcuenca de la quebrada Santa Elena, fuente abastecedora de los habitantes locales y de un número importante en la zona oriental de Medellín. En periodos secos disminuye el caudal de tal forma que en algunas épocas es incapaz de suministrar agua a la creciente población por lo que se han presentado interrupciones en el servicio de acueducto (Colombiano, 2016; EPM, 2020a,2). Además, el corregimiento de Santa Elena presenta cambios en las dinámicas de uso del suelo debidos a la expansión urbana, cambios que pueden impactar fuertemente la capacidad de regulación hidrológica de la cuenca (Loaiza & Valentijn, 2011). La sumatoria de los caudales extraídos ha llegado a ser exhaustiva, dejando completamente seca la quebrada durante semanas hasta meses. Todo esto afecta, además del bienestar de la población, la integridad del ecosistema acuático y ribereño que es afectada por la reducción de caudales y los periodos extendidos de caudal bajo (Smakhtin, 2001).

Una estrategia para asegurar el mantenimiento del recurso es la gestión del recurso hídrico, en la que se plantea que para garantizar la sostenibilidad del recurso debe entenderse la serie de interrelaciones entre los diferentes componentes naturales y antrópicos (MAVDT, 2010). En consecuencia, uno de los factores que deben ser estudiados es el hidrológico, para tener la capacidad de describir el funcionamiento de los procesos hidrológicos y representar el balance hídrico y la distribución espacial y temporal del agua en la tierra. Tal información es relevante para la evaluación y gestión de los recursos hídricos y los riesgos asociados a ellos OMM (1994). Existen diversas herramientas, como los modelos matemáticos de base mecanicista que tienen la capacidad de representar el com-

portamiento hidrológico de una cuenca determinada y proveer suficiente información para analizar los problemas relacionados con el recurso hídrico y desarrollar estrategias para problemas actuales y futuros para el manejo sostenible de los recursos hídricos y preservar la integridad del ecosistema.

Diferentes estudios de modelación hidrológica se han llevado a cabo para determinar el balance hídrico de una cuenca (Singh & Frevert, 2005). Entre los modelos diseñados para este fin se encuentran WEAP (Yates et al., 2005), MIKE-SHE (Refsgaard & Storm, 1995), SWAT (Arnold et al., 2012), HEC-HMS (Feldman, 2000), TOPMODEL (Ambroise et al., 1996; Beven, 1997), entre otros. En Colombia y los Andes se han aplicado diversos instrumentos para la simulación hidrológica (Buytaert & Beven, 2011; Cabrera-Balarezo et al., 2019; Gil & Tobón, 2016; Jaramillo Uribe et al., sf). HEC-HMS es muy usado en Colombia, sin embargo, se usa principalmente para simular eventos de precipitación y es poco aprovechada su capacidad de simulación continua como lo han realizado en otros lugares (Chu & Steinman, 2009; Corcuencas & Cortolima, 2019; CVC, 2015; Fleming & Neary, 2004; Ouédraogo et al., 2018).

En este estudio se realiza una revisión de algunos modelos hidrológicos y se decide usar HEC-HMS 4.7 para simular el proceso de precipitación-escorrentía en la microcuenca de la quebrada Santa Elena Santa Elena ubicada en Medellín, Colombia. HEC-HMS tiene la capacidad de simular la producción de agua de una cuenca a partir de información climática y física y es usado tanto para la simulación de eventos de precipitación como una simulación continua. Puede usar datos con intervalos de tiempo de un minuto pasando por horarios hasta 1 día. Ofrece diferentes submodelos, que pueden ser agregados o distribuidos, para la representación de cada proceso: interceptación de precipitación por cobertura, pérdidas superficiales, escorrentía superficial, pérdidas por infiltración, flujo base, almacenamiento subterráneo y traslación de la escorrentía. También posee diferentes metodologías para representar la información climática.

La implementación del modelo requiere de información topográfica del área para la delimitación de la cuenca, de datos climáticos que funcionan como datos de entrada y condiciones de frontera, información de características físicas de la zona como cobertura vegetal y tipos de suelo y finalmente de observaciones de caudal para realizar la calibración y validación del modelo. El modelo puede configurarse para discretizar la cuenca hidrográfica y simular los procesos hidrológicos para cada una de las celdas. Los resultados se entregan de forma agregada o semi-distribuida por subcuencas.

La configuración del modelo para su implementación en la microcuenca de la quebrada Santa Elena incluyó el algoritmo de Contenido de Humedad del Suelo (Soil Moisture Accounting Method). Este método de pérdidas por infiltración es usado con el fin de realizar una simulación continua y el método de transformación de escorrentía de ModClark se usa para considerar la variabilidad espacial de la información (precipitación, coberturas, etc.). El objetivo principal de este estudio es calibrar y validar el modelo, con los datos observados disponibles, para determinar el balance hídrico de la microcuenca para así caracterizar el comportamiento hidrológico de la cuenca y estimar y analizar la oferta hídrica superficial.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo general

Calibrar un modelo hidrológico que permita representar el balance hídrico de la microcuenca de la quebrada Santa Elena para así caracterizar el comportamiento hidrológico de la cuenca y estimar y analizar la oferta hídrica superficial.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión de literatura con el fin de seleccionar un modelo hidrológico de escorrentía y adoptar un protocolo de modelación hidrológica para represente el comportamiento hidrológico de la cuenca y corresponda a los requerimientos de datos de entrada disponibles, las características de la cuenca y a la aplicabilidad del modelo.
- Calibrar el modelo seleccionado para la microcuenca de la quebrada Santa Elena.
- Caracterizar el comportamiento hidrológico de la cuenca para periodos anuales y mensuales multianuales.
- Estimar la oferta hídrica superficial total media mensual multianual.
- Evaluar de manera aproximada la cuantía de las extracciones efectivas, tanto formales como informales.
- Identificar y analizar los caudales medios y extremos mínimos mensuales y mensuales multianuales a la salida de la cuenca.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Criterios de selección del modelo hidrológico

La selección de un modelo hidrológico debe ser acorde a las necesidades de cada proyecto para que se cumplan con las expectativas planteadas. Por lo tanto, los criterios para su selección dependen del objetivo y complejidad del problema, de la disponibilidad de datos y el área de estudio (Borden et al., 2016), además de las necesidades o preferencias del modelador (interfaz gráfica, sistema operativo, conocimiento de lenguajes de programación u opción de expansión del modelo). Según Borden et al. (2016) y Cunderlik (2003), los criterios en común y las características del modelo que deben ser tenidos en cuenta al momento de seleccionar un modelo son:

- Salidas del modelo requeridas e importantes para el proyecto de acuerdo con el problema general y objetivos específicos.
- Entradas necesarias según la necesidad del proyecto (por ejemplo, inclusión del uso del suelo si el objetivo es evaluar los efectos sus cambios).
- Procesos hidrológicos incluidos en el modelo que son necesarios para estimar correctamente las salidas requeridas (operación de embalses, derretimiento de nieve, simulación continua o de eventos individuales).
- Requerimiento de datos de entrada, capacidad computacional y disponibilidad de datos de entrada: en general, mientras más compleja es la representación del sistema hidrológico, más datos y mejor capacidad computacional son requeridos.
- Precio.

En este trabajo se analizó el balance hídrico de la microcuenca Santa Elena, se estimó la oferta hídrica superficial y se calcularon sus cambios de acuerdo con las extracciones que se realizan en ella. Por lo tanto, las salidas requeridas en este trabajo y tenidas en cuenta como criterio de selección son:

- Caudales estimados mínimo a escala mensual a la salida de la cuenca y si es posible a la salida de las subcuencas.

- Resultados de los procesos hidrológicos individuales en las subcuencas para el análisis del balance hídrico.

Los procesos hidrológicos necesarios en el modelo que son requeridos para lograr tales salidas son:

- Simulación de proceso continuo de precipitación-escorrentía basada en condiciones iniciales de precipitación (simulación de caudales diarios).
- Simulación de procesos como infiltración, interceptación, almacenaje de superficie y evapotranspiración.
- Inclusión de usos o coberturas del suelo.
- Representación de extracciones.

Otro de los criterios de selección en este estudio fue que el modelo debía ser de licencia libre o de open source code y que fuese semi-distribuido o distribuido para lograr diferenciar las características de la cuenca y consecuentemente el balance hídrico asociado a ellas. Por último, se tuvo en cuenta la documentación y el soporte técnico disponible de cada modelo.

En total se realizó una revisión preliminar de 24 modelos hidrológicos mencionados en el Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica IDEAM (2018b) y en Arnold et al. (2012). Estos últimos presentaron una selección 25 de modelos hidrológicos que funcionan a diferentes escalas espaciales, temporales, tienen diferentes aplicaciones y que cuentan con su respectiva guía de uso, calibración y validación. De los 24 modelos iniciales, se discriminó primero por escala temporal (mínimo diaria), espacial (cuenca) y por los procesos que simulan (continuos, infiltración e interceptación, evapotranspiración). Es decir, se descartaron los modelos que solamente simulan eventos, que tienen una escala espacial menor a la de cuenca, por ejemplo, columna o ladera, y aquellos que su aplicación no sean apropiadas para evaluar la disponibilidad de agua.

Luego, un total de 7 modelos potenciales fueron revisados a mayor profundidad (tabla 3.1) y se revisaron las siguientes características. Se debe tener en cuenta que algunos de estos modelos también pueden simular eventos de precipitación y no sólo simulaciones continuas.

Tipo: agregado, semi-distribuido o distribuido.

Escala temporal: paso de tiempo usado en el modelo (minutos, horaria, diaria, mensual o anual).

Documentación: Documentación disponible sobre el modelo y sobre aplicaciones en Colombia o los Andes (guías de usuario, manuales, páginas web, casos de estudio).

Interfaz gráfica en SIG.

Adicionalmente, en la tabla 3.1 se presentan las principales aplicaciones de cada modelo según la literatura revisada y las principales ventajas y desventajas de cada modelo identificadas para el desarrollo de este estudio.

Tabla 3.1: Modelos hidrológicos de simulación continua seleccionados para la comparación.

Modelo	Tipo	Simulación	Escala temporal	Documentación	Interfaz gráfica en SIG	Referencia
APEX	Semi-distribuido	Continua	Diaria a anual	Media	Sí	X. Wang et al. (2012)
HEC-HMS	Semi-distribuido	Continua y eventos	Minutos a diaria	Buena	Sí	USACE (2018)
PRMS	Distribuido	Continua y eventos	Horaria, diaria	Buena	No	Markstrom et al. (2015)
TETIS	Distribuido	Continua y eventos	Minutos a anual	Buena	Sí	Vélez et al. (2006)
TOPMODEL	Semi-distribuido	Continua y eventos	Horaria a diaria	Poca	No	Ambroise et al. (1996); Beven (1997)
SWAT	Semi-distribuido	Continua	Diaria	Buena	Sí	Arnold et al. (2012)
WEAP	Semi-distribuido	Continua	Diaria a mensual	Buena	Sí	Yates et al. (2005)

Tabla 3.2: Aplicaciones, ventajas y desventajas de algunos modelos hidrológicos.

Modelo	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas para este estudio
APEX	Evaluación de los efectos del cambio climático, de diferentes prácticas de manejo y prácticas de conservación sobre los rendimientos de los cultivos, la escorrentía superficial, erosión, pérdida de nutrientes, la calidad del agua, entre otros (AgriLife, 2020; Gassman et al., 2010).	Tiene una amplia variedad de aplicaciones en la que se incluye la representación completa del ciclo hidrológico y ciclos de nutrientes.	Sus aplicaciones principales encontradas en la literatura son: transporte de nutrientes, carga de sedimentos y evaluación de prácticas de manejo (Gassman et al., 2010), incluyendo los pocos casos de estudio en la zona andina (Bomeisl, 2017).
HEC-HMS	Disponibilidad de agua, diseño de presas, efectos de cambio climático sobre la escorrentía, análisis de frecuencia de inundaciones y de sistemas de planeación para inundaciones.	Cada proceso del ciclo hidrológico cuenta con diferentes metodologías para ser simulado, por lo que el usuario puede escoger el de su preferencia. Puede acoplarse con otros modelos hidrológicos e hidráulicos de HEC.	La mayoría de casos de estudio encontrados para Colombia son de aplicaciones del modelo en eventos de tormenta.
PRMS	Diseñado para evaluar la respuesta hidrológica de varias combinaciones de clima y usos de tierra en la cuenca dando como resultado el balance hídrico en todos sus componentes.	Puede integrarse con otros modelos hidrológicos como MODFLOW. Amplia aplicación enfocada en disponibilidad de agua o escorrentía superficial.	Alta demanda de datos y poca información disponible para la zona de estudio.
TETIS	Resuelve problemas de crecidas (caudal pico y forma del hidrograma). Contiene un submodelo que simula el transporte de sedimentos en ladera en dos dimensiones y en canales en una dimensión. También tiene la capacidad de estimar los recursos hídricos disponibles (forma de hidrograma superficial y evaluación de recarga en los acuíferos) (IIAMA, 2020).	Pueden obtenerse resultados en cualquier punto de la cuenca. Debido a su naturaleza distribuida, representa de mejor forma la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados dentro de los procesos hidrológicos (IIAMA, 2020).	Algunos parámetros requieren información detallada de la zona de estudio.
TOPMODEL	Representa la respuesta hidrológica y la variabilidad espacial de la topografía es considerada. Evalúa efectos de cambio climático y cambios de usos de la tierra (Gil & Tobón, 2016).	Requiere de pocas variables y parámetros. Ha sido usado recientemente en cuencas de páramo y en zonas montañosas (Gil & Tobón, 2016), (Jeziorska & Niedzielski, 2018).	En el momento de la revisión, la documentación asociada al modelo estaba siendo en construcción debido a una pérdida del sitio web donde se encontraba (London, 2020).
SWAT	Usado para simular la calidad y cantidad del recurso hídrico superficial y subterráneo y predecir el impacto ambiental del uso del suelo, prácticas de manejo del suelo y el cambio climático. Es usado para evaluar la prevención y el control de los procesos de erosión, control de la contaminación de fuentes difusas y gestión regional en cuencas hidrográficas (TAMU, 2020).	Es un modelo muy usado alrededor del mundo para la evaluación de escenarios de cambio climático y cambios de usos del suelo, calidad del agua, transporte de nutrientes, entre otros.	Alta demanda de datos para los parámetros y poca información disponible.
WEAP21	Evalúa la planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua con la demanda de agua. También se puede usar para estimar la demanda de agua incluyendo escenarios de crecimiento poblacional. Se dirige también a la gestión del uso de agua e infraestructura en zonas de captación y cuencas (SEI, 2020).	La demanda de agua incluye caudal ambiental, irrigación, usos domésticos (Yaykiran et al., 2019). Puede acoplarse con otros modelos como MODFLOW, QUAL2K, MODPATH, PEST, entre otros (SEI, 2020).	Algunos procesos hidrológicos no son representados.

El modelo APEX es aplicado generalmente para procesos diferentes a los requeridos por este proyecto por lo que la mayoría de literatura disponible está dirigido a estas aplicaciones y no podrían usarse como guía para este estudio. Además, su uso en la zona andina no es usual.

El modelo HEC-HMS es usado alrededor de todo el mundo, incluyendo Colombia, principalmente para simulaciones de eventos de tormenta, sin embargo, también es usado para simulaciones continuas y su ventaja más llamativa es que pueden seleccionarse las metodologías a usar para cada proceso hidrológico dependiendo de la necesidad y de la disponibilidad de datos, algunas metodologías son de tipo distribuidas. Los estudios revisados de HEC-HMS aplicados en simulación continua revelan un ajuste satisfactorio de los datos observados y simulados. El modelo también permite un análisis de resultados parciales para diferentes procesos del ciclo hidrológico como la percolación, el caudal base, la evapotranspiración, entre otros. Por otro lado, los submodelos más complejos de HEC-HMS son exigentes en el requerimiento de los datos por lo que puede ser difícil obtener la información necesaria. Ese es también el caso del modelo PRMS que es un modelo distribuido y tiene una demanda alta de datos. Otra desventaja es que no tiene interfaz gráfica amigable con el usuario y la operabilidad de entrada y salida de datos es compleja lo que dificulta su uso y aumenta el tiempo requerido para el estudio. Su ventaja es que es un modelo usado para determinar la disponibilidad de agua, a pesar de ello, su uso se ha limitado dentro de los Estados Unidos según la literatura revisada. TOPMODEL no cuenta con literatura ni soporte disponible suficiente para ser usado en este estudio debido a lo expresado en la Tabla 3.2.

De manera similar a algunos casos anteriores, la principal desventaja de SWAT y TETIS es la escasez y/o costosa obtención de información. Sin embargo, tienen la facilidad de tener una interfaz gráfica amigable y alta cantidad de documentación realizada en varios lugares del mundo. TETIS representa variabilidad de parámetros dentro de la cuenca incluyendo la ocasionada por la topografía. Por último, el modelo WEAP-21 tiene gran afinidad con los objetivos del estudio al enfocarse en la oferta y demanda hídrica, además cuenta con 5 diferentes opciones para la representación de algunos procesos hidrológicos (Sieber, 2006; Yates et al., 2005; Yaykiran et al., 2019). Pese a ello, su discretización por cuencas podría significar la simplificación de algunos procesos importantes debido a la simplificación de la variabilidad y las características heterogéneas de la cuenca.

En este estudio se seleccionó el modelo HEC-HMS, modelo semi-distribuido, es el único software con posibilidad de escoger entre diferentes métodos para cada uno de los procesos hidrológicos que simula, la mayoría de ellos con la posibilidad de representarlos de manera distribuida. WEAP también posee dicha bondad pero solamente para algunos de sus procesos. Además, HEC-HMS brinda la posibilidad de ingresar los datos meteorológicos en diferentes formatos y así elegir una metodología que esté acorde a las necesidades de la zona de estudio y datos disponibles.

3.2. Modelo HEC-HMS

El Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (HEC-HMS por sus siglas en inglés) es un modelo determinístico semidistribuido de uso libre y está diseñado para simular procesos de precipitación-escorrentía en sistemas de cuencas. Puede ser aplicado en un amplio rango de áreas geográficas. Generalmente es usado para simular eventos, sin embargo, sus aplicaciones incluyen disponibilidad de agua en cuencas grandes, hidrología de crecientes y escorrentía en pequeñas cuencas naturales o urbanas.

Inicialmente, las primeras versiones del modelo ofrecían sólo simulaciones de eventos independientes, pero poco después se introdujeron métodos para la simulación de eventos continuos tales como el método de contabilidad de humedad del suelo. El modelo continúa en procesos de mejora y en las últimas versiones, HEC-HMS ha sido adaptado para integrar procesos de transporte de sedimentos y simulación de la calidad del agua (USACE, 2018).

HEC-HMS representa la cuenca como un sistema interconectado de componentes hidráulicos e hidrológicos para simular la escorrentía de la cuenca ante eventos de precipitación (Fleming & Neary, 2004; Scharffenberg, 2016). Utiliza diferentes metodologías para la representación de esa respuesta y de los diferentes componentes dicho proceso. Una unidad de análisis o cuenca puede ser dividida en subcuencas a las cuales puede asignarse una metodología o submodelos diferentes para la representación de los procesos, esta capacidad convierte al modelo en un modelo de tipo semidistribuido. La selección de las metodologías depende de las necesidades del estudio, de las características de la cuenca o de la disponibilidad de datos. La mayoría de los métodos disponibles en el modelo son agregados para cada subcuenca, sin embargo, se han añadido metodologías que realizan una representación por celda, es decir, de manera distribuida. En las siguientes secciones se describe a profundidad la representación del ciclo hidrológico en HEC-HMS y el funcionamiento de algunos de los métodos disponibles. La mayor parte de la información se extrajo de la página web del modelo (<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>) en donde se encuentra la documentación asociada, tal como el Manual de Usuarios, el cual enseña el uso del programa, el Manual Técnico de Referencia, que describe las ecuaciones matemáticas de los modelos del programa, la Guía de Validación, entre otros (Feldman, 2000; Scharffenberg, 2016; USACE, 2018).

3.2.1. Funcionamiento del modelo

La representación del ciclo hidrológico se representa en la figura 3.1 y comienza con la precipitación, que puede ser lluvia o incluir nieve, ésta cae sobre la vegetación de la cuenca, superficie terrestre y cuerpos de agua como lagos y corrientes. Parte de la precipitación regresa a la atmósfera por medio de la evapotranspiración, la evaporación puede ocurrir en plantas, superficies terrestres y los cuerpos de agua y la transpiración en las plantas. En simulaciones de periodos continuos de tiempo es necesario representar procesos de evapotranspiración debido a que en periodos secos disminuye la humedad relativa y aumenta la temperatura. Además, en ventanas largas de tiempo la evaporación y transpiración son componentes importantes del balance hídrico.

Otra fracción de la precipitación cae entre las hojas o desciende por los tallos, ramas y troncos hacia la superficie terrestre (flujo de tallo), donde se une a la precipitación que cayó directamente sobre la superficie. Seguidamente, dependiendo del tipo de suelo, la cobertura del suelo, la humedad presente en el suelo y otras propiedades, el agua puede estancarse o una porción puede infiltrarse. El agua infiltrada es almacenada temporalmente en las capas superiores del suelo, donde puede ascender nuevamente por acción capilar o moverse horizontalmente y/o verticalmente cuando se satura el suelo. El interflujo o flujo horizontal en una zona saturada encima de una capa impermeable, eventualmente se mueve hacia la corriente. El agua del suelo, por encima de la capacidad de carga, se mueve verticalmente hasta entrar en un acuífero subterráneo en un proceso llamado percolación. El agua de los acuíferos puede regresar nuevamente a los canales como caudal base.

El agua que no se infiltra ni se estanca, se mueve superficialmente por escorrentía. Finalmente, una corriente es la combinación de la escorrentía, la precipitación que cae en los cuerpos de agua, el interflujo y el caudal base. El caudal resultante de estos tres procesos es el caudal en la salida de

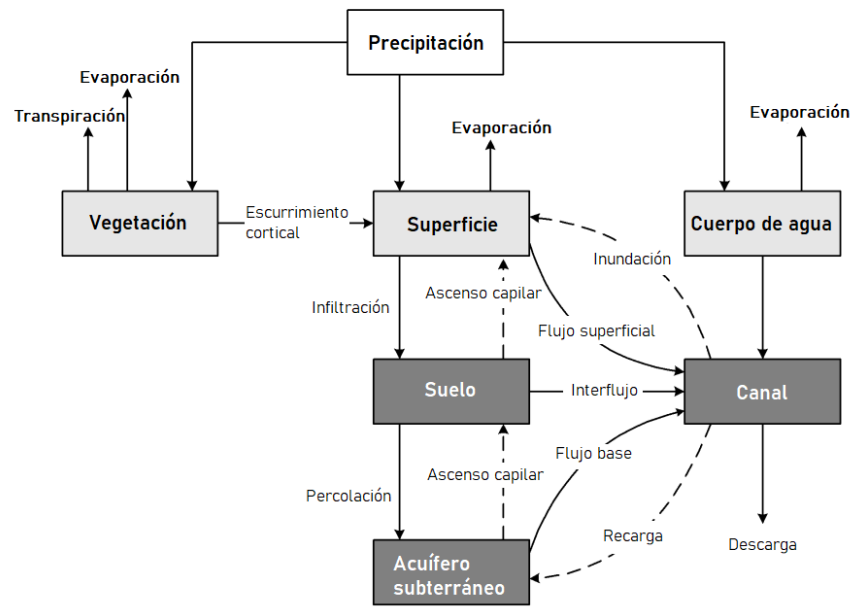


Figura 3.1: Diagrama del proceso de escorrentía a escala local. Tomado y modificado de Feldman (2000)

la cuenca.

El modelo ofrece diferentes metodologías o métodos para la representación de cada componente o módulo del proceso de precipitación-escorrentía: (i) métodos para la precipitación y evapotranspiración potencial, (ii) métodos para la infiltración (iii) métodos que representan la escorrentía directa (escorrentía superficial e interflujo), (iv) métodos para la descripción del caudal base y finalmente (v) métodos para calcular el flujo del canal USACE (2016). Se incluyen métodos o modelos conceptuales y empíricos, y pueden ser usados de forma tanto distribuida como agregada. La selección de los procesos a representar y la aplicabilidad entre una metodología u otra dependen del problema de estudio, las características de la cuenca y de la configuración del modelo.

HEC-HMS contiene 3 componentes para la simulación hidrológica en la cuenca: (1) modelo de cuenca, (2) modelo meteorológico y (3) especificaciones de control (Ouedraogo et al., 2018). Los modelos que representan los componentes del ciclo hidrológico, como la infiltración, y los parámetros físicos necesarios para representar la escorrentía se incluyen en el modelo de la cuenca. El componente meteorológico prepara las condiciones de frontera del sistema, como la precipitación y evapotranspiración. En las especificaciones de control se especifica cuándo comienza y termina la simulación y el intervalo de tiempo en el que se ejecuta. También posee un módulo de optimización del modelo, en el cual se incluyen diferentes funciones objetivo de maximización y minimización

En este ejercicio de modelación, para representar la disponibilidad de agua superficial, se tuvo en cuenta el movimiento y almacenamiento del agua en los siguientes componentes en un periodo largo: la evapotranspiración, almacenamiento por dosel y superficial, infiltración, percolación, flujo base y escorrentía directa. El modelo también puede incluir un método para la acumulación y derretimiento de nieve, sin embargo, en este caso no fue necesario incluirlo debido a las características de la cuenca de estudio. A continuación, se mencionan los componentes del modelo y los métodos existentes para cada proceso del ciclo hidrológico y se describen a profundidad los métodos utilizados en este

Tabla 3.3: Módulos disponibles en el modelo de cuenca.

Módulo	Procesos representados	Uso
Interceptación por dosel (Canopy Method)	interceptación de la lluvia, evapotranspiración	Recomendado para simulación continua
Modelo de superficie (Surface Method)	almacenamiento de agua en depresiones del terreno	Generalmente se usa solo en simulaciones continuas
Pérdidas por infiltración (Loss Method)	cantidad de lluvia que se infiltra	Simulación continua y de eventos
Transformación (Transform Method)	cantidad de precipitación neta que se transforma en escorrentía	Simulación continua y de eventos
Caudal base (Baseflow Method)	escorrentía existente en el cauce antes de un evento de precipitación	Depende del problema de estudio y de la información existente

trabajo.

3.2.2. Modelo de cuenca

En el modelo de cuenca se describen las propiedades físicas de la cuenca o subcuencas y la topología de la red de drenaje. Simula los procesos del ciclo hidrológico como la interceptación de lluvia por el dosel, el almacenamiento en superficie, la infiltración, escorrentía directa y caudal base. Para representar otras entradas, salidas o almacenamientos, puede incluir trasvases, embalses o estaciones de bombeo. Los módulos disponibles en el modelo de cuenca y el proceso que representan son presentados en la tabla 3.3.

En este estudio se tienen en cuenta los procesos de interceptación por dosel, almacenamiento superficial, pérdidas por infiltración, caudal base y transformación de escorrentía.

3.2.3. Interceptación por dosel

Este componente puede representar la presencia de plantas en la cuenca, ya que las plantas interceptan la precipitación, reduciendo la cantidad de agua que llega al suelo, por lo tanto, es usado principalmente en simulaciones continuas. El agua interceptada se evapora entre eventos de tormenta. Además, las plantas toman agua del suelo y la transpiran, por lo que este método debe ser utilizado con un método de evapotranspiración.

HEC-HMS ofrece 3 opciones para representar la interceptación por dosel: interceptación dinámica, interceptación simple e interceptación simple en malla. En este estudio, el submodelo usado es interceptación simple en malla o por celda. Este método representa el agua que no llega al suelo ya que es capturada por las plantas, arbustos o árboles presentes en cada una de las celdas asignadas a la cuenca. Su única entrada es la precipitación y su salida es representada por la evapotranspiración (Figura 3.2 en 3.2.5).

Tabla 3.4: Submodelos de pérdidas por infiltración.

Modelo	Simulación	Tipo
Deficit and Constant Loss	Continua	Empírico y agregado o semi-distribuido
Exponential Loss	Evento	Empírico y agregado o semi-distribuido
Green and Ampt Loss	Evento	Empírico y agregado o semi-distribuido
Layered Green and Ampt Loss	Continua	Empírico y agregado o semi-distribuido
Initial and Constant Loss	Evento	Empírico y agregado o semi-distribuido
SCS Curve Number Loss (CN)	Evento	Empírico y agregado o semi-distribuido
Smith Parlange Loss	Evento	Empírico y agregado o semi-distribuido
Soil Moisture Accounting Loss	Continua	Empírico y agregado o semi-distribuido
Gridded Deficit Constant Loss	Continua	Empírico y distribuido
Gridded Green and Ampt Loss	Evento	Empírico y distribuido
Gridded SCS Curve Number Loss	Evento	Empírico y distribuido
Gridded Soil Moisture Accounting Loss	Continua	Empírico y distribuido

3.2.4. Pérdidas superficiales

Representa el agua que se acumula en una depresión de la superficie del suelo dependiendo de su pendiente o cobertura. Las entradas provienen de la precipitación directa o que no alcanza a interceptar la vegetación y del agua que no se infiltra debido a que la tasa de precipitación supera la tasa de infiltración del suelo, representada en el método de pérdidas. Las salidas se derivan de la infiltración en el suelo y de la evapotranspiración. Al superar la tasa de infiltración del suelo e igualar el almacenamiento superficial, el exceso de agua pasa a contribuir a la escorrentía superficial. También se suelo usar solamente en simulaciones continuas (Figura 3.2 en 3.2.5).

3.2.5. Pérdidas por infiltración

La infiltración es una pérdida en la unidad de análisis para el volumen de escorrentía directa ya que representa el movimiento del agua hacia áreas debajo del suelo. En HEC-HMS los cálculos de estas pérdidas son realizados por uno o más de los doce métodos de pérdidas por infiltración disponibles en el modelo (Tabla 3.4). Pueden ser usados diferentes métodos agregados para cada subcuenca.

En este estudio se utilizó el método Contenido de Humedad en el Suelo (Soil Moisture Account, SMA) en malla ya que es uno de los más usados y recomendados para simulaciones continuas porque cuenta con la capacidad de representar almacenamientos más profundos y, además de la conductividad hidráulica, otras propiedades hidráulicas como la porosidad, la capacidad de campo,

entre otras.

Contenido de Humedad en el Suelo o *Soil Moisture Accounting* (SMA)

Este método es representado por una serie de tanques que simulan el movimiento del agua en la cobertura vegetal (Canopy Method), la superficie del suelo (Surface Method), el perfil del suelo y las capas subterráneas (figura 3.2). Si el modelo es configurado con un Canopy Method y/o con un Surface Method, el SMA hace uso de sus salidas. Es decir, cuando la lluvia atrapada por la vegetación supera la capacidad de almacenamiento, el exceso de precipitación cae en la superficie del suelo y el agua almacenada es removida por evaporación. Posteriormente, la precipitación queda disponible para la infiltración dependiendo de la capacidad de almacenamiento superficial y la capacidad de infiltración. El exceso de agua eventualmente es convertido en escorrentía.

Subsecuentemente, el agua que se infiltra pasa a la llamada almacenamiento del perfil de suelo representada por una zona superior y una zona de tensión. La zona de tensión representa el agua adherida a las partículas del perfil de suelo y sale solamente por evapotranspiración. La zona superior almacena el agua en los poros del suelo, determinada por la porosidad y la profundidad del perfil del suelo y el agua sale por percolación o evapotranspiración (Bennett, 1998).

Luego, las capas de almacenamiento de agua subterránea representan los procesos horizontales de interflujo. Puede incluirse una capa o dos. El agua se mueve según la tasa de percolación. Las pérdidas pueden deberse a al flujo de agua subterránea o a la percolación de una capa a otra. La percolación del perfil del suelo entra en la primera capa. El agua almacenada puede filtrarse desde la capa 1 a la capa 2 de agua subterránea o desde la capa 2 de agua subterránea a la percolación profunda. En este último caso, esta agua se considera perdida del sistema ya que el flujo del acuífero no está modelado en la SMA.

3.2.6. Transformación de escorrentía

Calcula la escorrentía directa a partir del exceso de precipitación o precipitación neta en una subcuenca. HEC-HMS tiene dos posibilidades para la transformación del exceso de lluvia en escorrentía directa: el hidrograma unitario (modelo lineal agregado) y la onda cinemática. En el caso del hidrograma unitario se tiene la posibilidad de trabajar con hidrogramas empíricos obtenidos para la cuenca de interés o con los hidrogramas unitarios sintéticos (Hernandez, 2012). HEC-HMS tiene un total de 8 modelos de transformación, 7 de ellos son hidrogramas unitarios sintéticos y el restante es la onda cinemática (tabla 3.5). Este último es un modelo conceptual que representa los mecanismos físicos que gobiernan el movimiento de la precipitación neta sobre la superficie de la cuenca (Chow et al., 1994). Algunos métodos son más complicados que otros debido a que los parámetros requeridos no están disponibles en cuencas sin datos medidos (Halwatura & Najim, 2013). Generalmente se recurre al uso de hidrogramas unitarios (UH, por sus siglas en inglés) sintéticos, que se generan a partir de las características de la cuenca (Villón, 2004).

En general, uno de los modelos más utilizados es el Hidrograma Unitario del SCS o Soil Conservation Service Unit Hydrograph en consecuencia al extendido uso del modelo de pérdida (Loss Method) Número de Curva del SCS para simulaciones de eventos (Ramírez López et al., 2019; Tassew et al., 2019). Sin embargo, este método de transformación también es usado para simulaciones continuas (Kaffas & Hrissanthou, 2014; Ouédraogo et al., 2018; Verma et al., 2010). Los

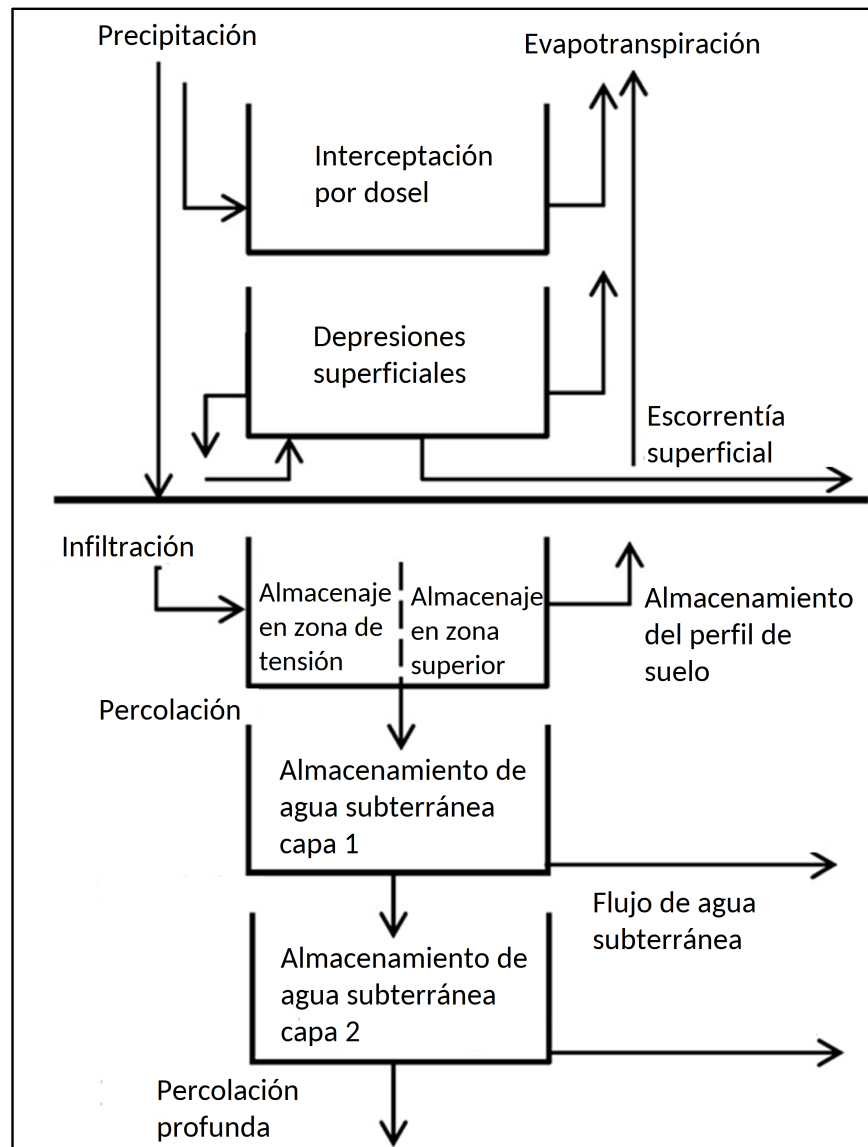


Figura 3.2: Esquema conceptual del modelo continuo del suelo Contenido de Humedad del Suelo (*Soil Moisture Accounting*). Tomado de Ouédraogo et al. (2018)

Tabla 3.5: Modelos de transformación de escorrentía.

Modelo	Categorización
HU especificado por el usuario	Agregado, empírico
HU de Clark	Agregado, empírico
HU de Snyder	Agregado, empírico
HU del SCS	Agregado, empírico
ModClark	Distribuido, empírico
Ondacinématica	Agregado, conceptual

modelos Snyder Unit Hydrograph y Clark Unit Hydrograph han sido aplicados exitosamente en la simulación de caudales tanto para eventos individuales como en periodos largos (Azmat et al., 2015,1; Bagstevold, 2015; Fleming & Neary, 2004; Gebre, 2015; Halwatura & Najim, 2013; Tassew et al., 2019). A pesar de ello, el modelo de Snyder no es recomendado para modelar hidrogramas de escorrentía directa en áreas menores a 150 km^2 ya que el tiempo base estimado es muy grande (Mesa Sánchez et al., sf). (Kaffas & Hrisanthou, 2014; Ouédraogo et al., 2018; Verma et al., 2010)

Ninguno de los diversos métodos para construir hidrogramas sintéticos en una cuenca ha sido desarrollados para las condiciones hidrológicas y topográficas propias de un país tropical como Colombia, por lo tanto, no se pueden esperar buenos resultados con la mayoría de estos modelos (Mesa et al., 1997). A pesar de ello, esta metodología es de uso extendido en el país y los más utilizados son: Snyder, Servicio de Conservación de Suelos (S.C.S), Williams y Hann (Garaya et al., 2019; Otálvaro Barco, 2016; Vargas et al., sf; Vélez et al., 2006)(Garaya et al., 2019; Otálvaro, 2016; Vargas et al., 2013; Vélez et al., 2006). Los más recomendados son el modelo de William y Hann seguido por el del SCS de Estados Unidos (Smith & Rendón, 1997). No obstante, lo anterior no quiere decir que otros modelos como el de Clark, el Método Racional o el geomorfoclimático sean obsoletos, o que no puedan usarse para la estimación de caudales (Tamayo Maya et al., 2011).

Hidrograma Unitario Sintético del SCS

Es un modelo paramétrico basado en el promedio de los hidrogramas unitarios promedio derivado de pluviógrafos y datos de caudales de un extenso número de pequeñas cuencas agrícolas en Estados Unidos (Chow et al., 1994; Cronshey, 1986). Estos estudios encontraron que, en hidrogramas unitarios de diversas cuencas, el tiempo de retraso (T_{lag}), único parámetro de entrada para este método, es aproximadamente igual al 60 % del tiempo de concentración (T_c) de la cuenca (ecuación 3.1) (Feldman, 2000). El tiempo de retraso es el tiempo desde el centro de masa del exceso de lluvia hasta el pico del hidrograma y se calcula para cada cuenca con base en el tiempo de concentración T_c (Bagstevold, 2015).

$$T_{lag} = 0.6T_c \quad (3.1)$$

Donde T_{lag} y T_c están en minutos.

Modelo ModClark

Es una modificación distribuida del hidrograma unitario sintético de Clark (Kull & Feldman, 1998; Peters & Easton, 1996). Tiene en cuenta las variaciones en el tiempo de viaje hasta la salida de la cuenca desde cualquier región de ella. El modelo de hidrograma unitario Clark (Clark, 1945) y ModClark representan explícitamente dos procesos críticos en la transformación del exceso de precipitación a escorrentía: (i) traducción o movimiento del exceso de agua desde su origen a través de la red drenaje a la salida de la cuenca; (ii) atenuación o reducción de la magnitud de la descarga a medida que el exceso se almacena en toda la cuenca.

En ModClark el almacenamiento se contabiliza con el mismo modelo de yacimiento lineal incorporado en el modelo de Clark. La traducción se contabiliza con un modelo de tiempo de viaje basado en cuadrículas. Se superpone una cuadrícula en la cuenca. Para cada celda de la cuadrícula de la cuenca se especifica la distancia a la salida de la cuenca. El área de cada celda es calculada

y el volumen de entrada al depósito lineal para cada intervalo de tiempo, Δt , se calcula como el producto del área y el exceso de precipitación. El exceso es la diferencia de la precipitación aérea media en la celda y las pérdidas en la celda. Las entradas así calculadas se enrutan a través de un depósito lineal que produce un hidrograma de salida para cada celda. El programa combina estos hidrogramas de flujo de salida de celda para determinar el hidrograma de escurrimiento directo de la cuenca.

3.2.7. Caudal base

El caudal base proviene del agua subterránea y varía poco en los periodos sin lluvia. Es un flujo que no se asocia al escurrimiento directo, los cuales son originados por la lluvia. Para un río de flujo permanente o de régimen perenne, la mayor parte del volumen total de flujo proviene del caudal base, es decir, una gran proporción de la lluvia se infiltra en la cuenca y alcanza el río como flujo subsuperficial (Chow et al., 1994). El caudal base es el agua de la tormenta anterior que se almacenó temporalmente en la cuenca más la escorrentía subsuperficial retrasada de la tormenta actual. El único que tiene en cuenta la conservación de la masa dentro de la subcuenca es el caudal base de reservorio lineal o Linear Reservoir Baseflow.

HEC-HMS tiene 5 diferentes modelos los para el procesamiento del caudal base:

- Bounded Recession Baseflow
- Constant Monthly Baseflow
- Linear Reservoir Baseflow
- Nonlinear Boussinesq Baseflow
- Recession Baseflow

En este estudio se abordó el método caudal base de recesión.

Modelo de caudal base de recesión

Aproxima el comportamiento típico observado en cuencas donde el caudal del canal retrocede exponencialmente después de un evento. Tiene la habilidad de reiniciarse después de cada evento de precipitación, por lo tanto, puede usarse en simulaciones continuas. Este modelo no tiene en cuenta la conservación de la masa dentro de la subcuenca.

3.2.8. Modelo meteorológico

Contiene las condiciones de frontera del modelo. Ofrece diferentes aproximaciones para el cálculo y aplicación de la información climática, puede ser calculada con modelos meteorológicos disponibles en HEC-HMS o ingresada como datos observados. Incluye las variables de evapotranspiración, precipitación, derretimiento de la nieve, radiación de onda corta y larga.

Precipitación

Determina la cantidad de agua que cae en la superficie terrestre. Hay disponibles 9 métodos de precipitación.

- Tormenta basada en la periodicidad o *Frequency Storm*.
- Ponderación de estaciones o *Gage Weights*.
- Precipitación grillada o *Gridded Precipitation*.
- Tormenta HMR 52
- Distancia inversa o *Inverse Distance*
- Tormenta hipotética o *Hypothetical Storm*
- Hietograma específico o *Specified Hyetograph*

Evapotranspiración

Evapotranspiración La evapotranspiración debe incluirse cuando se usan los métodos de pérdida por infiltración (*Loss Method*) para simulaciones continuas mencionados en el apartado (Número de apartado). En la evaporación se incluye la evaporación del agua sobre la superficie del suelo y sobre la vegetación, en ambos casos, parte del agua es devuelta a la atmósfera. La transpiración representa el proceso en el cual las plantas remueven agua del suelo por las raíces y lo expulsan a través de los estomas de sus hojas. En la modelación hidrológica se combinan la evaporación y la transpiración y se le llama evapotranspiración ya que es muy difícil medir ambas por separado, además, el componente importante a medir es la cantidad de humedad que es removida del suelo y devuelta a la atmósfera (Allen, 1998). Los métodos o modelos disponibles en HEC-HMS requieren de diferentes datos según la metodología, entre los cuales pueden estar la temperatura, velocidad del viento, radiación solar o incluso ingresar directamente los datos de evapotranspiración. Los métodos para calcular la evapotranspiración son:

- Evapotranspiración anual
- Evapotranspiración mensual
- Hamon
- Hargreaves
- Penman Monteith
- Priestley Taylor
- Hamon en cuadrícula
- Hargreaves en cuadrícula (Gridded)
- Penman Monteith en cuadrícula (Gridded Penman Monteith)

- Priestley Taylor en cuadrícula (Gridded Priestley Taylor)
- Evaporación específica

La ecuación de Penman-Monteith (Método FAO-56) es universalmente aceptada para calcular la evaporación en climas variados (Dinpashoh et al., 2011). Este método tiene bases físicas sólidas e incorpora explícitamente parámetros fisiológicos y aerodinámicos (Allen et al., 1998; Zotarelli et al., 2010).

En un estudio de validación de siete modelos de evapotranspiración para Colombia Gómez Blanco & Cadena (2018) se estableció que en la zona de los municipios de Medellín y Rionegro, los métodos más recomendables son Penman Monteith y Hargreaves.

3.2.9. Calibración

El manual técnico de referencia indica la estimación aproximada de algunos de los parámetros de cada modelo incluido en HEC-HMS. Sin embargo, generalmente existen limitaciones en la estimación de los parámetros ya que no se cuenta con información suficiente o mediciones puntuales para cada uno de ellos ni pueden ser estimados por observación, medidos o estimados a partir las características de la cuenca. Con datos hidrometeorológicos observados es posible realizar una calibración para tener los valores apropiados para los parámetros. Los algoritmos de optimización utilizados en el proceso de calibración usan dichos datos en una búsqueda sistemática de parámetros que mejor ajusten los caudales simulados a los observados. Una calibración confiable es uno de los retos más importantes para disminuir los errores en la modelación conceptual (Zhang et al., 2012). La mayoría de los algoritmos funcionan bien en casos simples, sin embargo, se convierten en soluciones óptimas locales en espacios de soluciones complejos (Darlane et al., 2016b).

En HEC-HMS se incluyen 3 métodos de autocalibración, el de gradiente univariante, el simplex o Nelder-Mead y el método de Monte Carlo basado en cadenas de Markov y una aproximación manual de calibración.

El esquema presentado en el manual técnico de referencia muestra los pasos que se siguen en el proceso de calibración u optimización de los modelos construidos en HEC-HMS (Figura 3.3). Se comienza con una recolección de datos de series de precipitación y caudales. Luego se seleccionan las estimaciones iniciales de los parámetros. El modelo calcula un hidrograma de caudal de la cuenca o subcuenca utilizando los parámetros ingresados y los datos meteorológicos como condiciones de frontera. El programa compara el hidrograma calculado con el hidrograma observado y mide el ajuste del modelo al sistema hidrológico real por medio de alguno de los diferentes métodos de comparación disponibles en HEC-HMS. El programa ajusta automáticamente los parámetros y reitera el proceso hasta que el resultado es satisfactorio.

Índices de bondad y Ajuste

HEC-HMS incluye varios índices de bondad y ajuste para comparar los caudales simulados con los observados y buscar de esa forma el parámetro o conjunto de parámetros que produzcan los mejores valores del índice. Solamente uno de los algoritmos disponibles puede ser usado. Además, existen tres métodos de búsqueda, dos determinísticos y uno estocástico.

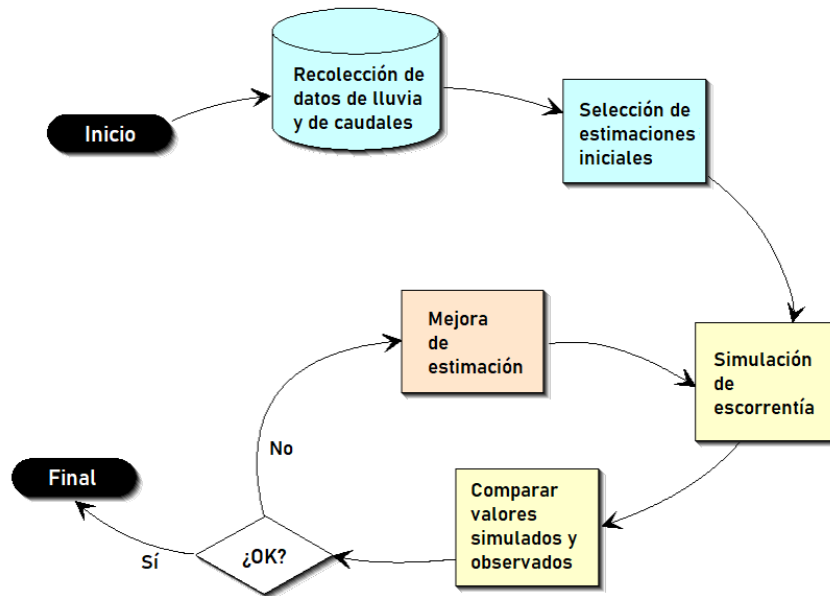


Figura 3.3: Esquema del proceso de calibración. Tomado de Scharffenberg (2016)

Los métodos de búsqueda determinísticos son el univariante y el método Simplex. El método univariante sólo puede ajustar un parámetro durante el proceso de optimización. Mientras que el método Simplex o Nelder-Mead, usa el concepto de un simplex cuesta abajo y evalúa varios parámetros al mismo tiempo. Para ambos métodos determinísticos puede usarse una de las funciones objetivo disponibles, sea de minimización (disminuir el valor de la función) o maximización. Las funciones de minimización, en las cuales su valor disminuye mientras la concordancia entre la serie de datos observados y simulados aumenta, son:

- Autocorrelación de primer orden
- Máximo de los valores absolutos de los residuos
- Máximo de cuadrados de los residuos
- Media de los valores absolutos de los residuos
- Media de cuadrados de los residuos
- Error cuadrático medio de pico ponderado
- Porcentaje de error en volumen de caudal
- Porcentaje de error en el caudal máximo
- Error cuadrático medio
- Suma de los valores absolutos de los residuos
- Suma de cuadrados de los residuos
- Error cuadrático medio ponderado en el tiempo

- Varianza de los valores absolutos de los residuos
- Varianza de los cuadrados de los residuos

Las funciones de maximización pueden usarse para maximizar la propiedad de un elemento (volumen de caudal o caudal pico) o maximizar el valor de la función objetivo mientras incrementa la concordancia entre los valores observados y simulados. Las funciones de maximización disponibles son:

- Coeficiente de determinación
- Volumen de caudal
- Índice de concordancia
- Índice de Nash Sutcliffe
- Caudal máximo
- Elevación máxima (para reservorios)
- Índice de concordancia relativo
- Índice de Nash Sutcliffe relativo

El método estocástico disponible es el método de Monte Carlo basado en cadenas de Markov. La optimización estocástica calcula los valores probables de los parámetros del modelo y lo realiza creando varios conjuntos de parámetros posibles. Es decir, entrega conjuntos diferentes de parámetros optimizados igualmente probables en cada prueba (USACE, 2018).

La optimización estocástica infiere cuáles son los valores probables de los parámetros del modelo a la luz de los datos observados, y solo puede hacerlo mediante la creación de varios conjuntos de parámetros. Este enfoque trata los parámetros con incertidumbre y no devuelve un solo conjunto de parámetros optimizados. Para usar conjuntos de parámetros generados por una optimización estocástica, el usuario debe usar un análisis de incertidumbre y completar tablas de parámetros muestreados. Las optimizaciones estocásticas darán como resultado diferentes conjuntos de parámetros con cada prueba (USACE, 2018).

Los métodos de calibración nativos disponibles en HEC-HMS se desempeñan pobremente (Cunderlik & Simonovic, 2004). Incluso, (Gyawali & Watkins, 2013) encontraron que la calibración manual brinda mejores resultados que los métodos de calibración automática en HEC-HMS, sin embargo esta metodología consume mucho tiempo.

Algunas limitaciones de los algoritmos determinísticos incluidos en HEC-HMS son listadas por (Skahill, 2006). Entre las falencias está que tales métodos pueden quedar atrapados en los mínimos de la función objetivo local, es decir, informa de valores optimizados cuando no ha realizado simulaciones en todo el rango de valores. Este tipo de limitación puede ser disminuida al estimar correctamente las suposiciones iniciales y que están basadas en un razonamiento físico en el que los parámetros ajustables del modelo se derivan de las propiedades de las cuencas. Sin embargo, este puede ser un inconveniente al generalizar muestras puntuales sobre la cuenca completa.

Otra desventaja tiene que ver con los subproductos calculados en el proceso de calibración. Tales subproductos son limitados ya que no ofrece datos sobre la incertidumbre del modelo, sensibilidad de parámetros ni correlación entre los valores simulados y observados (Wagener et al., 2004). Por último, las funciones objetivo sólo consideran las diferencias entre los caudales observados y simulados y no puede aplicarse a variables como la evapotranspiración. Además, no es posible dar diferentes pesos a los parámetros para guiar el esfuerzo de calibración (Moore & Doherty, 2005).

Dariane et al. (2020,1) encontraron que el rendimiento del modelo puede mejorar significativamente usando otros algoritmos de calibración como el algoritmo de Búsqueda Armónica Global o los Algoritmos Genéticos.

3.3. Dotación y demanda hídrica

La dotación es la cantidad de agua asignada a una población o a un habitante para su consumo en cierto tiempo, expresada en términos de litro por habitante por día (L/hab*día) o dimensiones equivalentes. Esto es establecido para realizar el caudal de diseño de los estructuras hidráulicas según el RAS 2000 (de Desarrollo Económico, 2000). Para calcular la demanda total de agua se multiplica la población por la dotación obteniendo los litros por día (L/día) requeridos.

La dotación se denomina usualmente dotación bruta (d_{bruta}) en donde intervienen dos variables: la dotación neta (d_{neta}) y el índice de pérdidas que ocurren en el sistema de acueducto (%P). Donde la dotación neta corresponde a la cantidad mínima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un habitante sin considerar las pérdidas que ocurran en el sistema de acueducto. Las pérdidas pueden deberse a distintos factores: en la aducción antes de llegar a la planta de tratamiento, lavado de la planta de tratamiento, conducción en la red de distribución hasta los usuarios.

Según la Resolución 330 de 2017 (Ministerio de Vivienda, 2017), la dotación neta debe determinarse haciendo uso de información histórica de los consumos de agua potable de los suscriptores, disponible por parte de la persona prestadora del servicio de acueducto o, en su defecto recopilada en el Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), siempre y cuando los datos sean consistentes. Antes de esto el RAS 2000 asignaba la dotación según el nivel de complejidad del sistema de acueducto.

También debe tenerse en cuenta la dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida (tabla 3.8) establecida en Resolución 330 de 2017 (Ministerio de Vivienda, 2017). Dicha resolución también establece que las pérdidas máximas no deben superar el 25%.

El cálculo se realiza de la siguiente forma:

(i) se asigna el nivel de complejidad del sistema según la población en la zona o la capacidad económica de los usuarios (tabla 3.6).

(iii) Se calcula la dotación bruta como:

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{1 - \%P} \quad (3.2)$$

Tabla 3.6: Asignación del nivel de complejidad del sistema de acueducto. Fuente:

Nivel de complejidad	Población en la zona urbana	Capacidad económica
Bajo	<2500	Baja
Medio	2501 - 12500	Baja
Medio alto	12501 - 60000	Media
Alto	60000	Alta

Tabla 3.7: Dotación neta según el nivel de complejidad del sistema.

Nivel de complejidad	Dotación neta máxima
(L/hab*día)	
Bajo	100
Medio	120
Medio alto	130
Alto	150

Tabla 3.8: Dotación neta según el nivel de complejidad del sistema.

Altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida	Dotación neta máxima
(L/hab*día)	
2000 m s. n. m.	120
1000 - 2000 m s. n. m.	130
1000 m s. n. m.	140

Luego, (iv) el **caudal medio diario** se calcula como:

$$Q_{md} = \frac{p * d_{bruta}}{3600 * 24} \quad (3.3)$$

(ii) Dotación neta según el nivel de complejidad del sistema (tabla 3.7) y teniendo en cuenta la dotación neta máxima (tabla 3.8).

Donde Q_{md} está en L/s.

Capítulo 4

Metodología

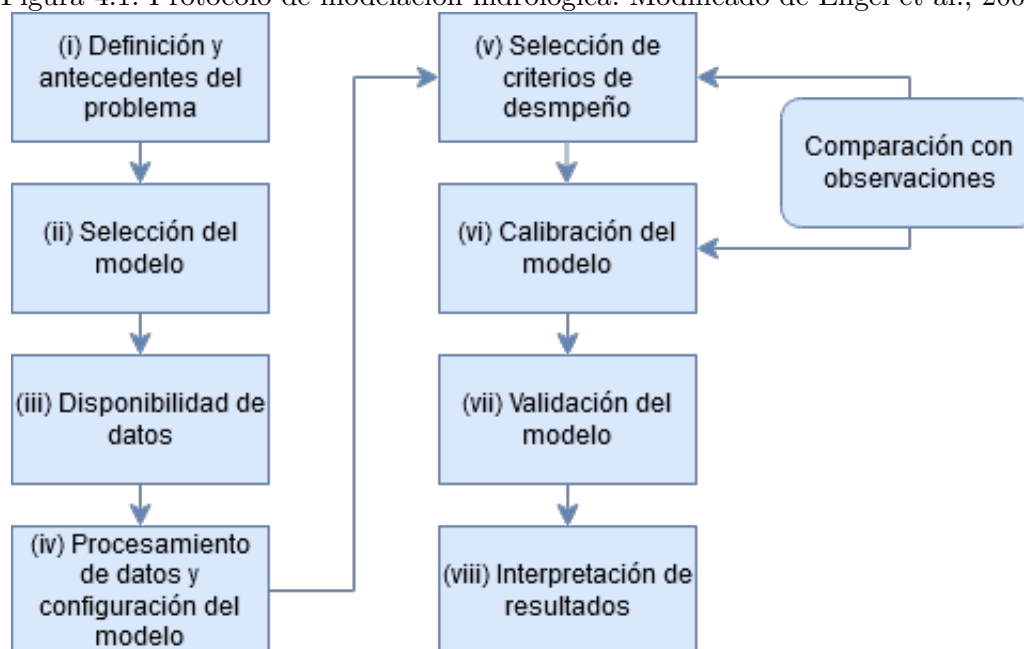
Con el fin de asegurar un buen ejercicio de modelación y obtener buenos resultados, se siguieron las recomendaciones propuestas por Engel et al. (2007) de esbozar y desarrollar un protocolo de modelación hidrológica. El protocolo consiste en plantear una metodología definida y seguirla durante el experimento para reducir el error otorgando la posibilidad de tomar mejores decisiones, proveer una guía a seguir durante la modelación, permitir evaluar y mejorar las decisiones hechas en el sistema de modelación de interés, repetir el estudio y mejorar la aceptación de los resultados. La metodología empleada para seleccionar el modelo y determinar la oferta hídrica superficial de la microcuenca Santa Elena se presenta en la figura 1 y fue elaborada de acuerdo con los pasos planteados por Engel et al. (2007) y por el IDEAM (2018b) en su Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica.

- **Definición del problema y antecedentes:** se abordó la recopilación preliminar de información y descripción de la zona de estudio. En este paso se describieron las características físicas y climatológicas del área de estudio. La climatología incluye variables de temperatura y precipitación, y las características físicas se refiere a la cobertura y usos del terreno, tipos de suelo y geomorfología. También se describe y analiza de manera breve la información obtenida con respecto a la demanda hídrica actual estimada de la quebrada.

Posteriormente, se realizó una revisión de los modelos que podrían resolver el problema de estudio y analizar sus ventajas y desventajas. Además, se hizo una revisión preliminar de estudios previos que podrían ser útiles para el proyecto.

- **Selección del modelo:** se identificaron las salidas del modelo necesarias para satisfacer los objetivos del proyecto. Luego del proceso de selección del modelo, se realizó una descripción del modelo hidrológico escogido, de su funcionamiento, de los submodelos utilizados para la simulación y de los algoritmos de calibración disponibles en él. En base a una revisión de literatura, fueron seleccionados los componentes hidrológicos y submodelos disponibles en el modelo que mejor se ajustan a la región y al problema de estudio.
- **Disponibilidad de datos y datos requeridos por el modelo:** se identificó el tipo y cantidad de datos e información disponibles asociados a la cuenca y se determinó el nivel de representatividad de los datos y la información (escalas y resoluciones). El llenado de datos de temperatura y precipitación se realizó con RClimTool. En este paso también se determinaron los datos requeridos por el modelo seleccionado. No existe una estación hidrométrica que posea

Figura 4.1: Protocolo de modelación hidrológica. Modificado de Engel et al., 2007.



series de suficiente longitud (observaciones continuas de niveles y caudales) que permitan una rigurosa calibración y validación de los modelos adoptados.

- **Procesamiento de datos y configuración del modelo:** Se seleccionaron las especificaciones del modelo, en este caso fueron los submodelos a utilizar para cada componente hidrológico, los periodos de simulación y el formato de entrada de datos meteorológicos.

Los parámetros solicitados por el modelo fueron estimados a partir de la información primaria encontrada en la literatura y las diferentes bases de datos. Con respecto a los datos meteorológicos, éstos pueden ser ingresados en diferentes formatos según la necesidad y preferencia del modelador, en este caso la precipitación se ingresó de forma distribuida (precipitación por celdas), para lograr esto se debió recurrir a una interpolación de precipitación, la cual se realizó con el método de la distancia inversa ponderada.

- **Selección de criterios de desempeño:** Los criterios de desempeño son relaciones que muestran la capacidad del modelo para representar adecuadamente la realidad; se emplearon en la calibración y la validación. Para su selección deben tenerse en cuenta los objetivos del modelo. Las evaluaciones gráficas también son ampliamente empleadas y comprenden, entre otras, inspección de los hidrogramas, curvas de duración de caudales y comparación de las series de datos observados simulados (IDEAM, 2018). Se seleccionaron el coeficiente de Nash-Sutcliffe, porcentaje de error de volumen, Raíz del error cuadrático medio con desviación estándar y el coeficiente de determinación. También se usaron métodos gráficos.
- **Calibración y validación del modelo:** todos los datos climatológicos y los parámetros fueron ingresados al modelo, se especificó la ventana de tiempo y se realizaron corridas de prueba. De igual manera, para la calibración y validación del modelo se realizó una revisión de literatura para seleccionar los parámetros a calibrar. Los periodos de análisis corresponden a una simulación diaria del 19 de mayo de 2020 hasta el 31 de agosto del 2020 para la calibración y del 1 de septiembre hasta el 31 de octubre de 2020 para la validación. Son periodos cortos

debido a la escasa disponibilidad de datos observados de caudales de la cuenca de estudio. Las series de los caudales observados y los simulados son evaluados según los criterios estadísticos seleccionados previamente. Para esto se emplean rutinas programadas en Python.

Para la realización del balance hídrico se tomó en consideración las estaciones climatológicas con datos disponibles desde el año 2014 hasta el año 2019. Finalmente, se realizó la interpretación de los resultados del modelo y se discuten las expectativas que se abren camino a una gestión integral de la oferta hídrica de la cuenca.

- **Estimación aproximada de la demanda de agua y las extracciones:** El cálculo de demanda total de agua se realizó para cada acueducto identificado en la zona de estudio teniendo en cuenta la proyección de población para el año 2020. Para la estimación de la dotación bruta, fueron tomadas como las establecidas en el RAS 2000 la dotación neta y las pérdidas. Se realizó una comparación entre los caudales concesionados y los caudales medios estimados en la demanda.

4.1. Fuentes de información

La información básica proveniente del modelo digital de elevación se obtuvo por medio del portal Alaska Satellite Facility de la NASA en el cual se encuentra información de ALOS PALSAR disponible. Por medio del software utilizado y a partir del modelo digital de elevación, se delineó la cuenca.

Los datos climatológicos fueron suministrados por IDEAM, SIATA y EPM. En concreto, a través del portal del IDEAM se obtuvieron datos diarios de temperatura y precipitación. Datos de temperatura, precipitación, velocidad superficial del agua y velocidad del viento se obtuvieron en el portal del SIATA. EPM suministró información de precipitación diaria. La Concesión del Túnel de Oriente realiza aforos mensuales sobre diferentes puntos de la red hídrica, dicha información fue suministrada por la Concesión. El uso de datos climatológicos satelitales no fue considerado debido que la extensión de la cuenca de estudio es muy pequeña.

Mientras, los datos de geología, suelos y cobertura de suelos fueron obtenidos a través de las bases de datos del IGAC, los usos de suelo se obtuvieron a través del portal de la Alcaldía de Medellín. Finalmente, la información de demanda hídrica se apoyó en documentos suministrados por Corantioquia. La información suministrada por EPM, Corantioquia y la Concesión fue obtenida mediante solicitud a dichas entidades.

Los parámetros para los submodelos fueron estimados a partir de la información recolectada en (descripción de la zona de estudio). Dichos parámetros están relacionados con las propiedades del suelo, de la cubierta vegetal o usos del suelo y con los aspectos geomorfológicos de la zona. Dicha información se procesó en QGIS para su posterior uso en el modelo HEC-HMS. Todas las fuentes de información y sus características son descritas en la tabla 1.

Tabla 4.1: Procesos representados por HEC-HMS.

Tipo de dato	Resolución	Fuente	Fecha
DEM	12.5 m	ALOS-PALSAR ¹	2011
Mapa de cobertura vegetal	1/100000	IDEAM ²	2012
Mapa de suelos	1/100000	IGAC ³	2007
Mapa de usos del suelo rural	1/10000	Alcaldía de Medellín ⁴	2014
Datos de precipitación	5 minutos, diaria y mensual	SIATA ⁵ , IDEAM y EPM ⁶	2012-2020
Datos de temperatura	5 minutos y diaria	SIATA e IDEAM	2012-2020
Datos hidrológicos	Horaria y mensual	SIATA y Concesión Túnel de Oriente	2020

Tabla 4.2: Herramientas utilizadas en este estudio.

Software	Uso
QGIS y PyQGIS	Procesamiento y visualización de la información geoespacial, generación de cartografía
Python	Depuración, procesamiento y visualización de las series temporales, interpolación de los datos climáticos
RClimTool	Llenado de series de precipitación y temperatura
SPAW	Estimación de las características del suelo como capacidad de campo, punto de marchitez y conductividad hidráulica
ArcPy	Conversión de datos de formato rastera ASCII
HEC-DSS y HEC-DSSVue	Formato de entrada a modelos HEC
HEC-HMS	Simulación de los procesos hidrológicos en las cuencas

4.2. Herramientas utilizadas

Las herramientas utilizadas para el desarrollo del estudio se presentan en la tabla 4.2.

¹<https://search.asf.alaska.edu/>

²Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <http://www.siac.gov.co/catalogode-mapas>
<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

³Instituto Geológico Agustín Codazzi: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

⁴<https://www.medellin.gov.co/geomedellin/index.hyg>

⁵Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá: https://siata.gov.co/descarga_siata/index.php/Index2/

⁶Empresas Públicas de Medellín

Capítulo 5

Zona de estudio

5.1. Ubicación del área de estudio

La cuenca de la Quebrada Santa Elena está ubicada en la zona centro oriental de la ciudad de Medellín del departamento de Antioquia. Se encuentra sobre el occidente de la vertiente oriental del Valle de Aburrá. Sus cabeceras principales se encuentran en el corregimiento de Santa Elena y hace parte de la cuenca del Río Aburrá. Alberga, entre otras, las quebradas San Pedro, San Ignacio, El Cedro, La Espadera, La Bocana, El Yarumo, Santa Bárbara y La Borrachera. Al interior de la cuenca se encuentran las veredas El Llano, El Cerro y Santa Elena Sector Central en su parte más alta. En la parte media y baja de la cuenca están las veredas El Placer, El Plan, Media Luna, una porción de Las Palmas y una pequeña parte de la zona urbana de la ciudad de Medellín. La zona de estudio limita con las comunas 8 y 9 de Medellín al oeste, con la vereda Mazo de Medellín al norte, con Guarne y Rionegro al este y con Envigado al sur (figura 5.1).

La Quebrada Santa Elena nace a 2616 m.s.n.m y desemboca en el río Aburrá a una altura de 1483 m.s.n.m, cubriendo un área total de 45.61 km^2 . Sin embargo, para este estudio se ha considerado la subcuenca media y superior, esencialmente rural, tomando la salida de la cuenca a alturas del barrio Juan Pablo II a 1729 m.s.n.m., donde se ubica una estación hidrométrica operada por el SIATA. Esta área de estudio comprende un área de 20.25 km^2 . La oferta hídrica allí generada es ampliamente usada para usos domésticos y agrícolas.

Proporciona agua a la planta de potabilización La Cascada, la cual abastece a 6000 habitantes de los barrios 8 de Marzo (Santa Elena), Juan Pablo II, San Antonio (Santa Elena), Villa Turbay (Santa Elena), Villatina, La Sierra (Santa Elena), Villa Lilliam, Santa Lucía, Las Estancias, Barrios de Jesús, Caidedo y La Cruz al oriente de Medellín (EPM, 2020a). El agua de la quebrada La Espadera es captada para surtir al barrio 8 de Marzo, Juan Pablo II, Barrios de Jesús y La Palma (Concesión Túnel Aburrá-Oriente, 2013). Además, las quebradas San Pedro, Santa Elena, San Roque, Chiqueros y Santa Bárbara surten a los acueductos San Pedro, El Multiveredal Santa Elena, Mazo, Las Flores, Media Luna y La Sierra, los cuales abastecían, para el año 2014, a casi 2800 suscriptores (de Medellín, 2014b).

Las zonas de vida presentes, según Alcaldía de (2011) son:

Bosque muy Húmedo Premontano (bmh-PM): rango de precipitación entre 2000 y 4000 mm/año,

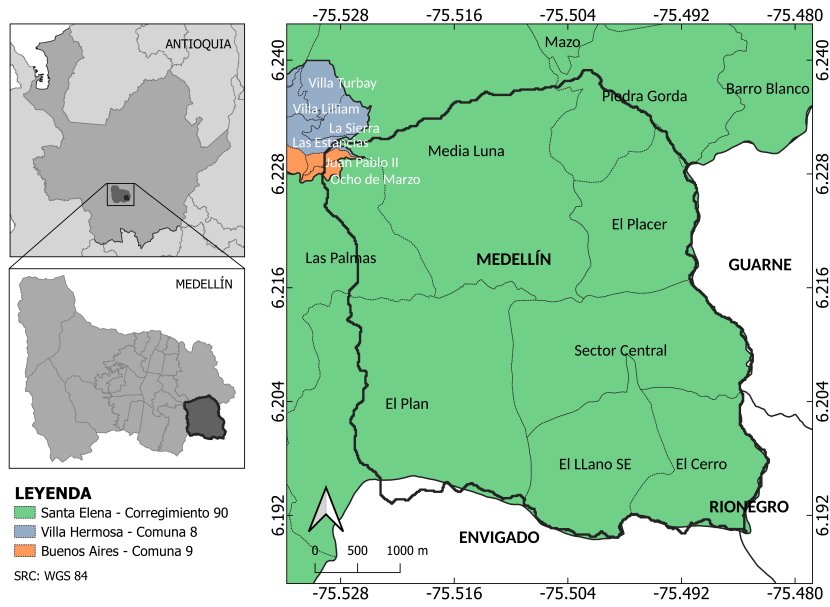


Figura 5.1: Área de estudio. Elaboración propia con datos de Alcaldía de Medellín.

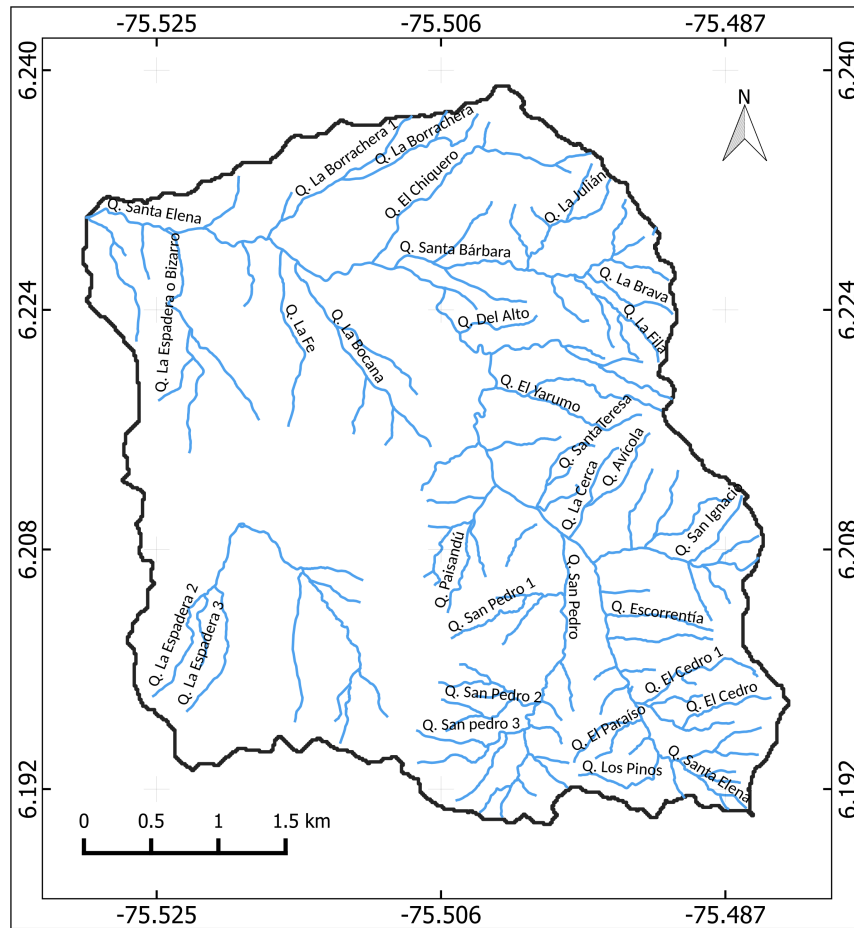


Figura 5.2: Red hídrica del área de estudio. Elaboración propia con datos de la Alcaldía de Medellín.

piso altitudinal entre 1000 y 2000 m.s.n.m. y biotemperatura entre 18 y 24°C.

Bosque muy Húmedo Montano Bajo (bmh-MB): rango de precipitación entre 2000 y 4000 mm/año, piso altitudinal entre 2000 y 3000 m.s.n.m. y biotemperatura entre 12 y 18°C.

En la cuenca baja, desde el barrio 8 de Marzo hasta la desembocadura, la quebrada recibe múltiples descargas de aguas residuales, y discurre canalizada o confinada en toda su longitud. Allí, el ecosistema acuático está severamente perturbado, y la quebrada pierde sus atributos ecológicos, culturales y estéticos, desempeñando la función escueta de evacuar aguas de escorrentía y aguas residuales.

5.2. Caracterización y Análisis Morfométrico

Las características morfométricas permiten caracterizar de manera cuantitativa los rasgos de una cuenca y permiten compararla con otra. Además, son factores que influyen sobre el comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca y de sus corrientes de agua, como son el suministro de agua al cauce principal, la dinámica de crecidas, los procesos erosivos y la estructura y la forma de los ríos (Reyes Trujillo et al., 2010; Suárez Díaz, 2001). Por tanto, es importante realizar un análisis preliminar de características como la longitud del canal y la distribución espacial de pendientes para predecir el comportamiento de la red de drenaje ante eventos climáticos y proyectos de infraestructura a lo largo de éste (Cardona, 2016).

En este trabajo, los parámetros morfométricos de la cuenca Santa Elena parte alta se calcularon de acuerdo con los procedimientos de la Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas (Reyes Trujillo et al., 2010). Los parámetros calculados para toda la cuenca se muestran en la tabla 5.4 y las ecuaciones empleadas se describen a continuación:

5.2.1. Forma de la cuenca

Índice de Compacidad o de Gravelius:

La forma de la cuenca permite deducir su tendencia a concentrar la escorrentía y, por lo tanto, de ella se puede inferir la torrencialidad del caudal (Gómez Elorza, 2016). El índice de compacidad es un indicador de la forma de la cuenca basado en la relación entre el perímetro de la cuenca y el área de un círculo igual a la de la cuenca. La ecuación 5.1 define el índice de compacidad como:

$$K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (5.1)$$

Donde:

K_c : Índice de compacidad o Gravelius (adimensional)

P : Perímetro de la cuenca (km)

A : Área de la cuenca (km^2)

Tabla 5.1: Forma de la cuenca según el coeficiente de Gravelius. Elaboración propia con información de Londoño (2001) y FAO, 1985.

Kc	Forma	Torrencialidad
1-1.25	Redonda a oval redonda	Alta
1.25– 1.5	Oval redonda a oval bolonga	Moderada
1.5 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga	Media

Factor de forma:

Es la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado del máximo recorrido (ecuación 5.2) y denota la forma redondeada o alargada de la cuenca.

$$F = \frac{A}{L_m^2} \quad (5.2)$$

Donde:

F : Factor de forma (adimensional)

A : Área de la cuenca (km^2)

L_m : Longitud del máximo recorrido (km)

Mide la tendencia de la cuenca hacia las crecientes rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas según el rango mostrado a continuación:

$F > 1$: Cuenca achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas.

$F < 1$: Cuenca alargada, baja susceptibilidad a avenidas.

Índice de alargamiento:

Relaciona la longitud del cauce encontrada en la cuenca, medida en el sentido principal y el ancho máximo de ella (ecuación 5.3), mostrando de esa forma el comportamiento respecto a su tendencia de ser de forma alargada. Permite predecir la dinámica del movimiento del agua en los drenajes y su potencia erosiva o de arrastre.

$$I_a = \frac{L_m}{l} \quad (5.3)$$

Donde:

I_a : Índice de alargamiento (adimensional)

L_m : Longitud máxima (km)

l : Ancho máximo (km)

Tabla 5.2: Índice de alargamiento (Reyes Trujillo et al., 2010).

Interpretación	
$l_a > 1$	Cuenca alargada
$l_a \approx 1$	Cuenca achatada

5.2.2. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es definido como el tiempo que toma la partícula, hidráulicamente más lejana, en viajar hasta el punto de interés (Ortiz, 2004). Este parámetro depende entonces de variables morfométricas como el área, la pendiente de la cuenca, longitud del cauce principal, vegetación asociada al cauce (n de Manning). Existe una gran variedad de formas de calcular este parámetro, por lo que la elección de la metodología depende de la disponibilidad de información, las características de la cuenca y el criterio técnico. Los métodos para calcular el tiempo de concentración son: (i) usando una estimación directa basada en los datos de lluvia-escorrentía observados, (ii) estimando velocidades según la cobertura del suelo y la pendiente, (iii) utilizando ecuaciones empíricas a partir de parámetros morfométricos de la cuenca y (iv) usando las características hidráulicas de la cuenca (Chereque Morán, 1989; Grimaldi et al., 2012). Dentro del método empírico hay diversas ecuaciones desarrolladas por diferentes autores y bajo diferentes características morfométricas. En este trabajo, T_c se estimó mediante nueve modelos empíricos, teniendo en cuenta las más usadas y recomendadas para Colombia en la literatura local y las características de la región y de la cuenca (Azizian, 2018; Salimi et al., 2017; Smith & Rendón, 1997; Vélez Upegui & Botero Gutiérrez, 2011). La pendiente del cauce es usada en algunas ecuaciones de tiempo de concentración, en este trabajo se sigue el método de las elevaciones extremas 5.4:

$$S = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} * 100 \quad (5.4)$$

Donde:

S : Pendiente media del cauce (%).

H_{max} : altitud máxima del cauce (m.s.n.m).

H_{min} : altitud mínima del cauce (m.s.n.m).

L : longitud del cauce principal (m).

- California Culvert Practice (of Public Works, 1995):

$$T_c = \left(\frac{0.87075 * L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (5.5)$$

Donde:

T_c : tiempo de concentración (Hr).

L : longitud del cauce principal (km).

H : diferencia de alturas (m).

- Johnstone et al. (1949):

$$T_c = 2.6 * \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.5} \quad (5.6)$$

Donde:

T_c : tiempo de concentración (Hr).

L : longitud del cauce principal (km).

S : pendiente total.

Desarrollada para cuencas con áreas entre 2.6 km^2 y 4206.1 km^2 (Salimi et al., 2017).

- Temez (1978):

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L^{0.76}}{S_0^{0.25}} \right) \quad (5.7)$$

Para cuencas de 1 km^2 hasta 3000 km^2 .

- Pilgrim & McDermott (1981):

$$T_c = 0.76A^{0.38} \quad (5.8)$$

Sugiere el uso de su ecuación para cuencas menores a 250 km^2 (Azizian, 2018; Vélez Upegui & Botero Gutiérrez, 2011).

- Pérez (1985):

$$T_c = \frac{L}{V_R} \quad (5.9)$$

$$V_R = 72 \left(\frac{AE}{L} \right)^{0.6} \quad (5.10)$$

Donde:

L : Longitud del cauce principal (km).

V_R : velocidad de la onda creciente por el cauce principal

AE : diferencia de cotas en km en el cauce principal desde el punto más alto al más bajo.

- Valencia & Zuluaga (1981)

$$T_C = 1.16 \left(\frac{A}{S_0^{0.25}} \right)^{0.362} \quad (5.11)$$

Donde:

T_c : tiempo de concentración (hr).

A : área de la cuenca (km^2).

S_0 : pendiente del cauce (m/m).

Desarrollada para Antioquia con base en registros de cuencas en Estudio preliminar del tiempo de concentración en algunas cuencas de Antioquia.

Tabla 5.3: Tiempos de concentración para la microcuenca de la quebrada Santa Elena utilizando diferentes ecuaciones.

Ecuación	Tc (horas)
CaliforniaCulvert Practice	0.69
Johnston yCross	2.04
Pérez	0.36
Pilgrim yMcDermott	2.60
Smith y Vélez	1.00
Témez	2.33
Zuluaga,Valencia y Saldarriaga	4.47
Desviaciónestándar	1.41
Promedio	1.93

- Smith & Otalvaro (1997)

$$T_C = 1.7694 \frac{A^{0.325}}{L^{0.096} S_0^{0.29}} \quad (5.12)$$

Donde:

T_c : tiempo de concentración en horas

A : área de la cuenca en km²

L : longitud del cauce principal en km

S_0 : % de pendiente del cauce

Ecuación obtenida para toda Antioquia.

Los resultados de la estimación del tiempo de concentración aplicando diferentes ecuaciones son mostrados en 5.3. El valor medio para el tiempo de concentración estimado es de 1.91 horas con una desviación estándar de 1.41. Los valores extremos corresponden a Pérez con el valor mínimo y Valencia y Zuluaga. La ecuación de Valencia y Zuluaga podría estar sobreestimando el tiempo de concentración porque a pesar de que fue desarrollada para Antioquia no especifica rangos de área. Por su parte, Pérez podría subestimar ya que la velocidad de onda de creciente puede diferir mucho entre cuenca y cuenca. Teniendo esto en cuenta, se calcula un valor medio de las ecuaciones exceptuando los dos valores extremos, esto da como resultado un tiempo de concentración $T_c = 1.7horas$ y se escoge entonces el valor más cercano a este tiempo. Por lo tanto, la ecuación seleccionada para estimar el tiempo de concentración es Johnstone et al. (1949) con $T_c = 2.04horas$.

5.2.3. Perfil longitudinal del cauce principal

El perfil longitudinal del cauce principal es un gráfico que representa las distintas elevaciones del río desde su nacimiento hasta la desembocadura. En la figura 5.3 se puede observar que, en el altiplano la pendiente del cauce principal es suave hasta el kilómetro 4.3 con un promedio del orden de 1.5%. Allí donde comienza abruptamente una pendiente escarpada de cerca al 60% que genera un flujo discontinuo, con numerosas cascadas. Se desarrolla aquí un perfil cóncavo hacia arriba, cuya pendiente se modera acercándose al valle, pendiente alcanzando un valor de 7% aproximadamente..

Tabla 5.4: Parámetros morfométricos del área de estudio.

Parámetro	Valor	Unidades
Área	20.25	km^2
Perímetro	25.81	\$km\$
Longitud recta de la cuenca	6.6	km
Ancho máximo	5.2	km
Pendiente media	26.3	%
Elevación mínima	1733	$msnm$
Elevación máxima	2830	$msnm$
Elevación media	2518	$msnm$
Longitud del cauce principal	7.8	km
Pendiente media del cauce principal	14.1	%
Tiempo de concentración	2.04	hr
Coefficiente de compacidad	1.62	
Coefficiente de forma	0.31	
Índice de alargamiento	1.56	

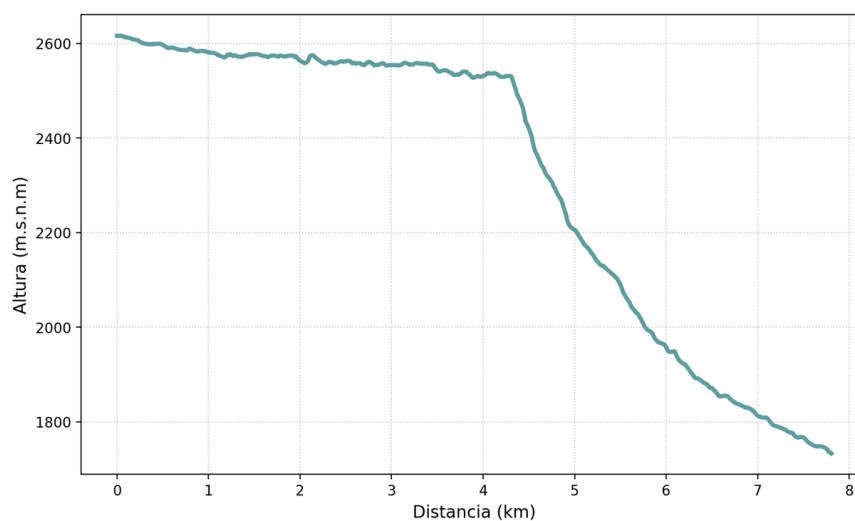


Figura 5.3: Perfil longitudinal del cauce principal. Elaboración propia con información recolectada.

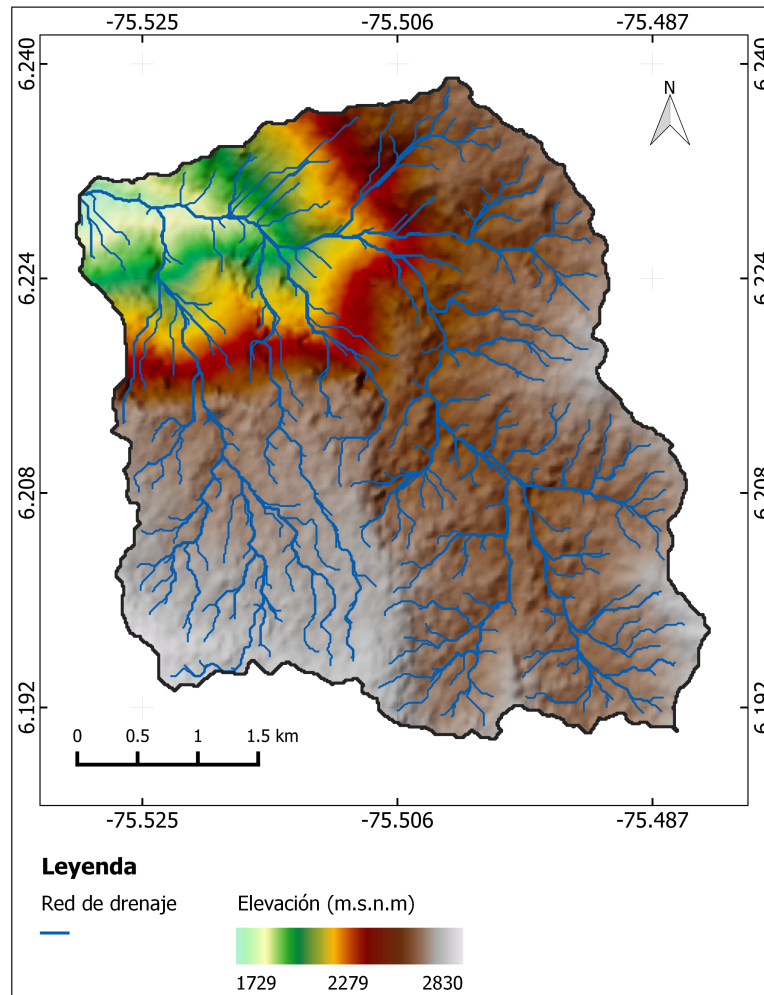


Figura 5.4: Mapa de elevación de la cuenca. Elaboración propia.

5.3. Topografía

La mayor parte de la microcuenca se localiza en el altiplano de Santa Elena, al interior del Valle de Aburrá en el ramal de la Cordillera Central que se origina a partir del nacimiento del Río Aburrá. El altiplano cuenta con un relieve de colinas bajas y redondeadas. Hacia la parte baja de la cuenca, comienza a estrecharse con cañones profundos y a ser una zona de cuchillas puntiagudas (de Medellín & Río, 1993).

El rango de elevación de la microcuenca seleccionada, subcuenca de la quebrada Santa Elena, varía entre los 1733 m.s.n.m al occidente y los 2830 m.s.n.m. al suroriente de la cuenca (figura 5.4). En la figura 5.5 histograma, se observa el histograma de frecuencias para elevación de la cuenca, el 57.7% de la cuenca se encuentra entre los 2473 m.s.n.m. y los 2658 m.s.n.m. correspondiente a la zona donde se encuentran ubicadas las veredas El Cerro, El Llano, El Placer y el Plan. El 19.5% de la cuenca está entre 2659 m.s.n.m. y 2830 m.s.n.m. en la parte media de la cuenca. Las elevaciones entre 1733 m.s.n.m. y 2472 m.s.n.m. comprenden el 22.6% del territorio.

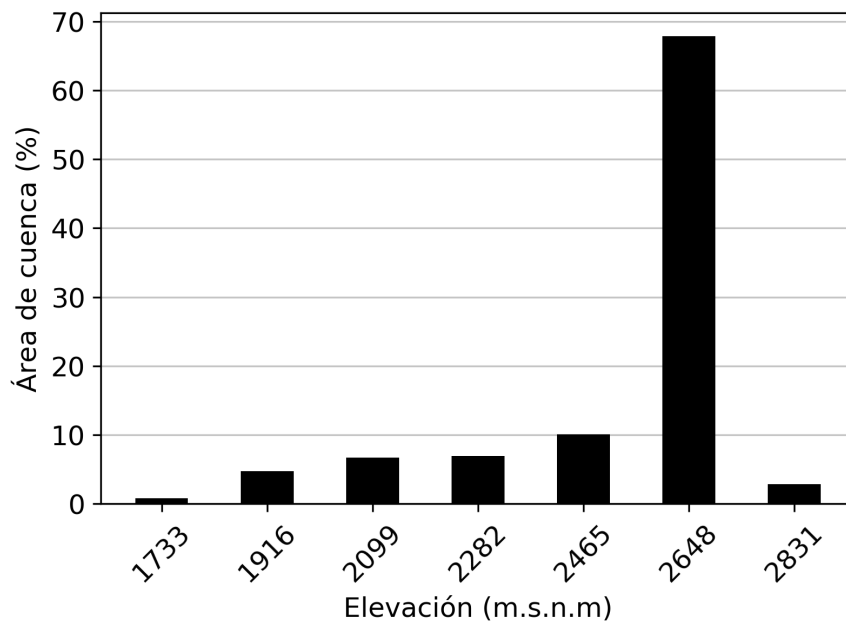


Figura 5.5: Histograma de elevación de la cuenca. Elaboración propia

Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es la representación gráfica de la variación de la elevación de una cuenca, en la cual puede observarse la distribución de las zonas altas, medias y bajas. Representa el área acumulada que es igualado o excedido a una determinada cota (Corantioquia, 2015). Permite comprender el devenir de los caudales, la variación territorial del rendimiento, sedimentos y escurrimiento específicos de las corrientes de agua. (Londoño, 2001).

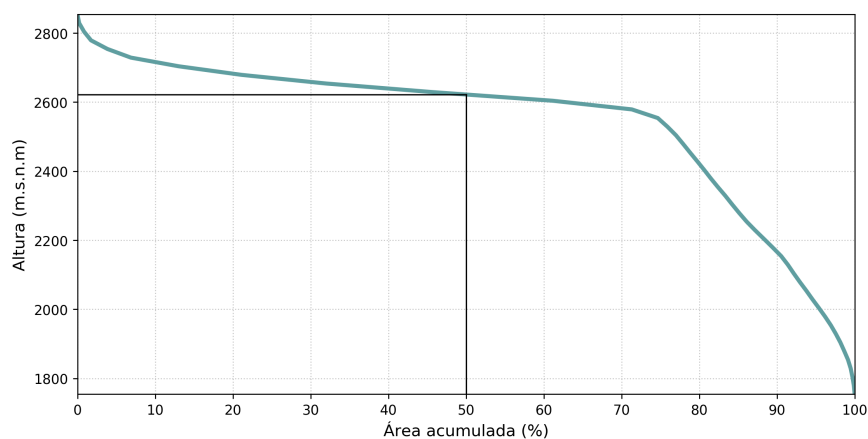


Figura 5.6: Curva hipsométrica de la microcuenca Santa Elena. Elaboración propia.

Tabla 5.5: Clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente media. Fuente: Ortiz (2004)

Pendiente Media (%)	Tipo de relieve
0 - 3	Plano
3 - 7	Suave
7 - 12	Medianamente accidentado
12- 20	Accidentado
20 - 35	Fuertemente accidentado
35- 50	Muy fuertemente accidentado
50 - 75	Escarpado
75	Muyescarpado

Pendiente

La pendiente media de la cuenca es 26.3 %, catalogada como fuertemente accidentada por (Ortiz, 2004) (tabla 5.5). De acuerdo con el histograma de frecuencias de las pendientes de la cuenca, predominan las pendientes entre 12 % y 35 %, es decir el relieve predominante en la microcuenca es accidentado (23.4 %) y fuertemente accidentado (25.6 %) respectivamente. Un 15.1 % es medianamente accidentado, seguido de un 12.2 % del área total que es muy fuertemente accidentado. Un 10.5 % es escarpado, el 7.1 % es suave, el 3.4 % es muy escarpado y finalmente un 1.2 % es plano (figura 5.7). La distribución espacial de las pendientes en la cuenca puede observarse en la figura 5.8.

5.4. Geología

De acuerdo con la Geología de la Plancha 147: Medellín Oriental (Rodríguez et al., 2005), el oriente de Medellín está constituida por unidades litológicas de orígenes, edades e historias geológicas diferentes. Según la literatura revisada, las formaciones geológicas de la zona de estudio corresponden principalmente a intrusivos cretácicos, Batolito Antioqueño, Stock de las Estancias, Stock de Media Luna y Anfibolita de Medellín (Corantioquia, 2005).

Una reducida área ubicada norte de la zona de estudio está conformada por la Anfibolita de Medellín, unidad metamórfica que en toda su extensión, desde el municipio de La Ceja al sur hasta el municipio de Belmira al norte, se observan tanto rocas en estado fresco como en desarrollo de perfiles de meteorización con arcillas caoliníticas y arenas ferromagnesianas predominantes en los niveles superiores (Corantioquia, 2015). En la zona de estudio, afloran algunos cuerpos menores de anfibolita debido a las altas pendientes y a la socavación causada por las corrientes de la microcuenca, por lo que a lo largo de los cauces de las quebradas y en los cortes de las vías, se encuentran rocas relativamente frescas (Rodríguez et al., 2005).

La Dunita de Medellín es una unidad litológica ígnea que cruza el Valle de Aburrá formando sus vertientes oriental y occidental. Se considera de la edad Jurásica y la unidad que aflora en la zona de estudio se extiende desde Envigado hasta la quebrada Santa Elena, reposando en contacto fallado sobre la Anfibolita de Medellín. Generalmente se encuentra altamente meteorizado y en altas pendientes, tal como en la microcuenca de Santa Elena donde los suelos son erodados y las rocas permanecen en un estado fresco.

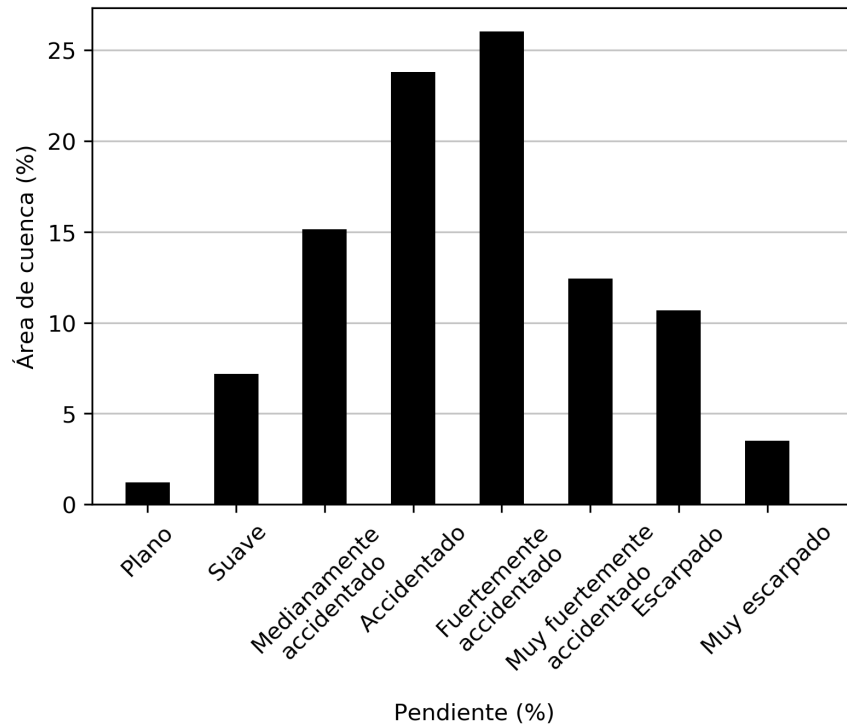


Figura 5.7: Histograma de pendientes del área de estudio. Elaboración propia.

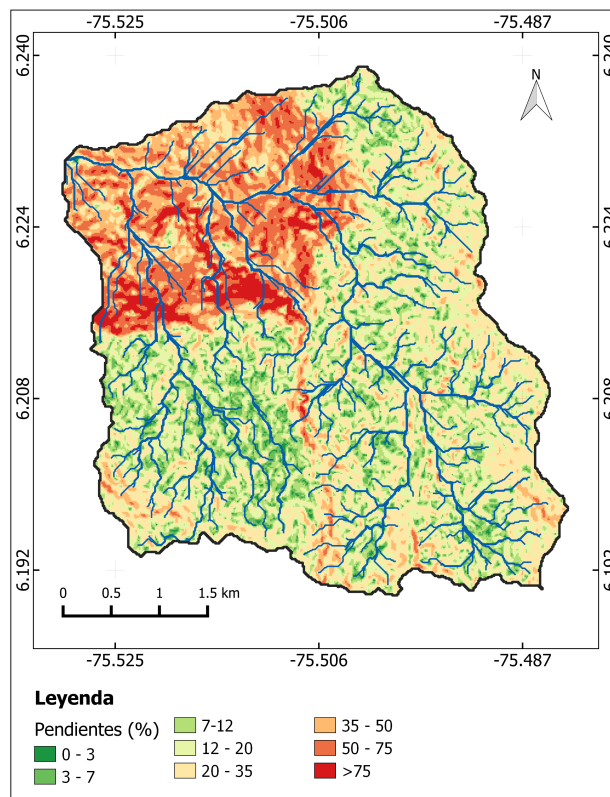


Figura 5.8: Mapa de pendientes de la cuenca. Elaboración propia.

Por su parte, el Stock de las Estancias tiene una extensión total de 360 ha y está separado geográficamente del cuerpo principal del Batolito Antioqueño, sin embargo, ambos presentan características litológicas, mineralógicas y texturales similares, por lo que en algunos textos es considerado parte de éste. Se localiza, en contacto fallado, con la Dunita de Medellín entre sus bloques sur y central y en contacto intrusivo con la Anfibolita de Medellín. En su primer horizonte de meteorización, comprende un suelo limo arenoso con un espesor variable de máximo dos metros (Corantioquia, 2005).

El Stock de Media Luna hace parte de las rocas del Batolito Antioqueño y presenta una composición cuarzodiorítica de textura fanerítica media. Tiene un área aproximada de 329,29 ha y se encuentra en la vereda Media Luna, sobre la vía principal que conduce de Santa Elena a Medellín. En la zona estudiada del estudio de referencia se observa esta unidad solamente en horizonte V del perfil de meteorización.

5.5. Suelos

El mapa de suelos del Instituto Geológico Agustín Codazzi (figura 5.9) presenta la clasificación agrológica de los suelos, en donde puede observarse que la mayor parte de la microcuenca (88 %) está conformada por la Asociación Tequendamita (TE). Esta asociación está compuesta por suelos desarrollados a partir de depósitos de cenizas volcánicas sobre rocas metamórficas; texturas medias, profundos y moderadamente profundos, y con drenaje bueno (ANLA, 2018; Corantioquia, 2017; IGAC, 2007; Osorio Yepes et al., 2018). Las unidades taxonómicas en toda la extensión de la asociación presentan los siguientes conjuntos: Tequendamita (Typic Dystrandept) 5 %, El Cenizo (Typic Plocandept) 20 %, Abejorral (Oxic Dystropept) 15 %, Montebello (Typic Troporthent) 10 %, Boquerón (Placic Dystrandept) 10 % y El Tambo (Andic Dystropept) 10 % (Corantioquia, 2005). Su altura está entre los 2000 y 3000 metros de altitud, el clima es frío húmedo y muy húmedo, corresponde a las Zonas de Vida bosque húmedo Montano Bajo (Bh-MB) y bosque muy húmedo Montano Bajo (bmh-MB). El relieve es desde ligeramente ondulado a moderadamente escarpado; las pendientes oscilan generalmente largas, rectas, convexas que oscilan entre 7 % a 75 % en donde el grado de erosión llega a ser moderado (IGAC, 2007).

La otra asociación presente es la Asociación Niquía (NQ) en donde abarca un área correspondiente a la zona de vida de bosque húmedo premontano (bh-PM), en alturas entre 1200 y 2000 metros sobre el nivel del mar. Son suelos derivados de rocas ígneas (serpentinadas) y depósitos piroclásticos no consolidados de cenizas volcánicas. Tiene un relieve fuertemente quebrado a moderadamente escarpado con pendientes hasta del 75 % (IGAC, 2007). Son suelos profundos, bien drenados y el grado de erosión en algunas unidades es severo. La asociación está formada por los conjuntos Niquía (Oxic Dystropept) 50 %, La Rosa (Tepic Troporthent) 30 % y Las Palmas (Typic Dystrandept) 20 % (Corantioquia, 2005).

5.6. Cobertura del suelo

De acuerdo con la clasificación CORINE Land Cover Adaptada para Colombia (Ardila & García, 2010), en la zona de estudio predominan los mosaicos de pastos y cultivos con un 21.79 % del total del área (tabla 5.6), la cual es una mezcla de parcelas de pastos y cultivos en la que ningún

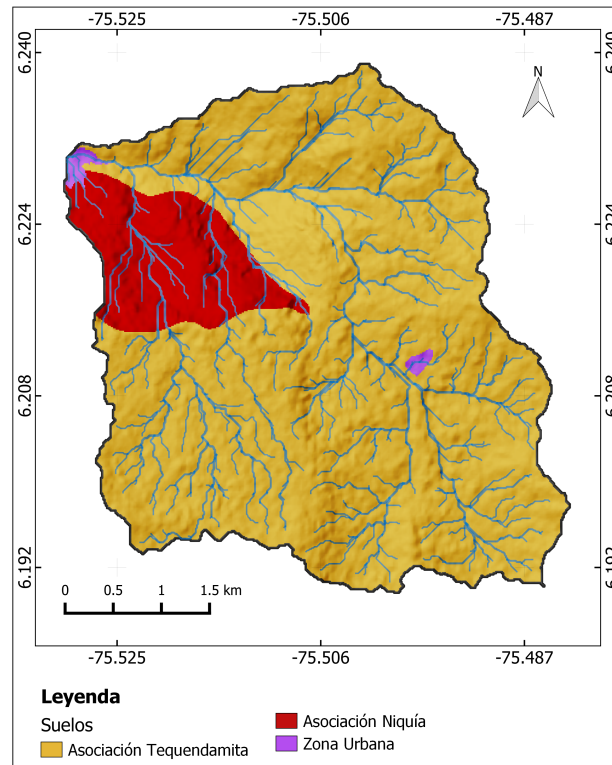


Figura 5.9: Mapa de suelos. Elaboración propia.

cultivo representa más de 70 % del área total del mosaico. Los cultivos agrícolas de Santa Elena son de mora, papa, hortalizas, fríjol, tomate de árbol, fresas entre otros. También se practica la floricultura con cultivos de flores como cartuchos, botón de oro, lirios, agapantos, claveles y demás (de Medellín, 2015; de Medellín & de Planeación, 2008). En segundo lugar se encuentra la cobertura correspondiente a vegetación secundaria y en transición con una ocupación del 19.47 % del área total. Es una cobertura originada por el proceso de sucesión de la vegetación natural y que puede encontrarse en recuperación tendiendo al estado original. El 16.06 % del área de la cuenca está cubierta por tejido urbano discontinuo la cual indica espacios con presencia dispersa de vías, infraestructura y zonas verdes. Los pastos limpios o manejados representan un 13.29 % de la cobertura de la cuenca, la actividad pecuaria que se practica en esta fracción del territorio es la explotación de bovinos para la producción de leche en las veredas El Llano, el Plan y Santa Elena Central (de Medellín & de Planeación, 2006). Las plantaciones forestales representan un 12.75 %. Por su parte, los mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales, las cuales son coberturas conformadas por pastos, cultivos y por áreas no intervenidas o poco transformadas como relictos de bosque natural, arbustales o vegetación secundaria, representan el 6.42 % del área de la cuenca. Finalmente, las coberturas con menor representación son arbustales, mosaicos de pastos con espacios naturales, pastos enmalezados y tejido urbano continuo con un 4.84 %, 2.62 %, 2.52 % y 0.25 % del área de estudio respectivamente.

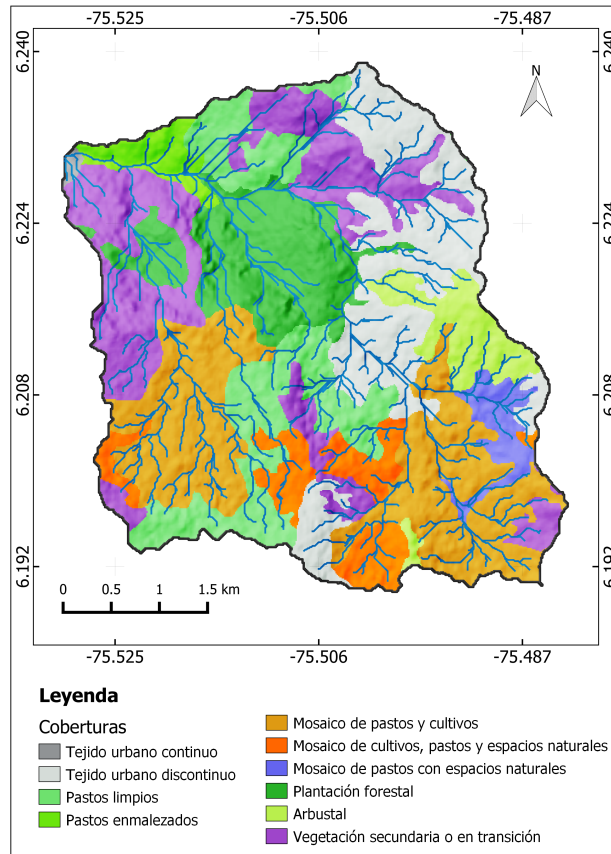


Figura 5.10: Mapa cobertura de la tierra según la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia para el área de estudio del año 2012. Elaboración propia con datos del IDEAM.

Tabla 5.6: Cobertura de la tierra para el área de estudio para el año 2012 de acuerdo con la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Elaboración propia con datos del IDEAM.

COBERTURA			ÁREA (Ha)	% DE ÁREA
1.TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.1.Tejido urbano continuo	5	0.25
		1.1.2.Tejido urbano discontinuo	325	16.06
2.TERRITORIOS AGRÍCOLAS	2.3. Pastos	2.3.1.Pastos limpios	269	13.29
		2.3.3.Pastos enmalezados	51	2.52
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.2.Mosaico de pastos y cultivos	441	21.79
		2.4.3.Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	130	6.42
3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES	3.1. Bosque	3.1.5. Plantación forestal	258	12.75
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y o arborescente	3.2.2.Arbustal	98	4.84
		3.2.3.Vegetación secundaria o en transición	394	19.47
TOTAL			2024.0	100.0

5.7. Usos del suelo

El Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín de 2014 (de Medellín, 2014a) cataloga el territorio del corregimiento de Santa Elena como suelo rural, el cual, según el artículo 15 del Acuerdo 48 de 2014, constituye los terrenos que por su valor de paisaje ecológico, productivo y cultural se reservan para garantizar la base natural, la productividad agrícola, pecuaria y forestal, así como los usos y actividades suburbanos. El mismo Acuerdo, en el artículo 396 sobre la zonificación de los usos generales del suelo rural, se define la zonificación de usos como la identificación de la forma más adecuada de utilizar el territorio de acuerdo con la distribución de recursos, las características de cada espacio y las implicaciones sociales, ambientales, culturales y económicas de cada actividad; constituyendo una acción esencial en el uso racional de los recursos naturales, en la búsqueda de la sostenibilidad del territorio.

En el territorio perteneciente a la zona de estudio están presentes 6 de los 7 usos de suelo (figura 5.11) categorizados en el Acuerdo previamente mencionado, exceptuando el de Áreas Mineras en Transición. El uso Forestal Protector cubre casi un cuarto de la cuenca (24.41 %) y es constituido por bosques protegidos con cobertura boscosa propia del ecosistema en el que se encuentra, con el fin de mantener y conservar la estabilidad de los suelos, la regulación de los cuerpos de agua, la biodiversidad, la composición florística y su fauna asociada. El suelo de uso mixto urbano-rural se encuentra de forma distribuida en un 21.2 % donde el uso principal es el de vivienda y agricultura, es decir, se presenta la mezcla de actividades urbanas de baja intensidad y rurales, con predominio de estas últimas. El área de uso agroforestal también constituye una parte importante de la cuenca con un 19.71 %, donde las actividades agroforestales, silvopastoriles, agrosilvopastoriles, de investigación, educación ambiental y la ganadería de baja intensidad son los usos principales. Su propósito fundamental es diversificar y optimizar la producción respetando el principio de sostenibilidad y

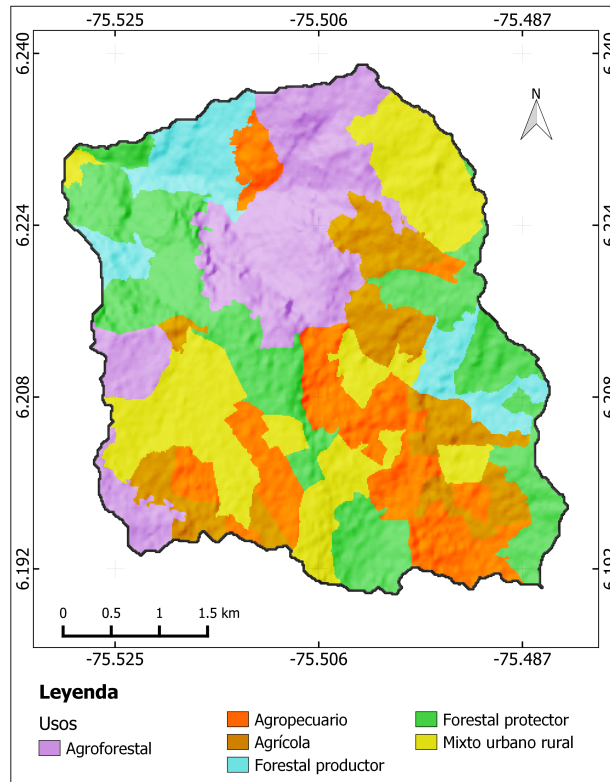


Figura 5.11: Mapa de usos del suelo. Elaboración propia con datos de la Alcaldía de Medellín.

garantizando la biodiversidad. En el uso agropecuario, las actividades agrícolas, pecuarias y pesqueras y los estudios e investigaciones para el mejoramiento de la producción y la conservación de ecosistemas, son las adecuadas para la parte alta de la cuenca principalmente, cubriendo un 14.08 % de ella. Por último, en el 12.06 % y el 8.55 % del área total de la zona de estudio, se consideran adecuados los usos agrícola y forestal productor respectivamente. En el uso agrícola predominan los cultivos mencionados en el apartado 5.6 y el uso forestal productor el cual se refiere a plantaciones forestales productivas.

5.8. Usos del agua

Medellín cuenta con dos trasvases para el abastecimiento de aproximadamente el 95 % del agua consumida en la ciudad, correspondientes al embalse La Fe y Río Grande. El 5 % del agua restante es abastecida por microcuencas pertenecientes al suelo rural de Medellín. Las microcuencas Santa Elena, San Pedro y Santa Bárbara abastecen, casi en su totalidad, el consumo en el suelo rural del corregimiento Santa Elena (Metropolitana, sf). Surte a una planta de potabilización operada por EPM y a acueductos veredales operados generalmente por las corporaciones de acueducto que están legalmente constituidas (tabla 5.8). Para el 2015, de 4818 viviendas pertenecientes al corregimiento de Santa Elena, el 84.47 % contaba con servicio de acueducto legalmente constituido, las demás se abastecen directamente de las quebradas o manantiales (de Medellín, 2015).

El aprovechamiento de agua es principalmente para el uso doméstico y actividades productivas.

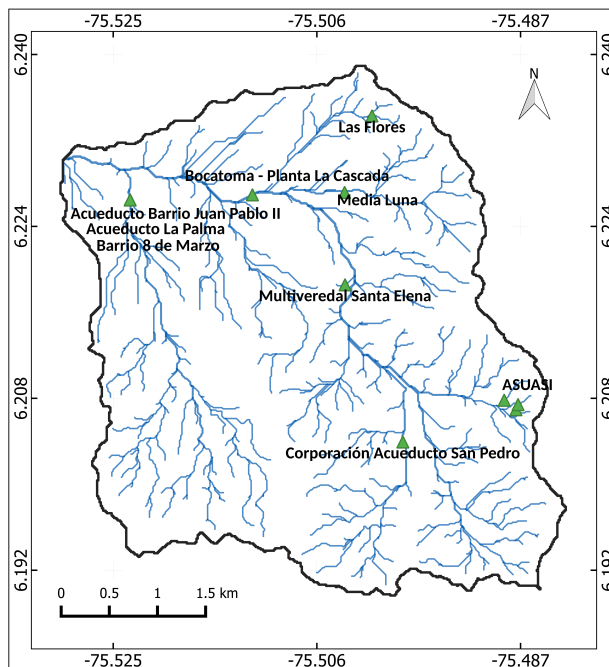


Figura 5.12: Acueductos ubicados en el área de estudio. Elaboración propia con datos suministrados por Corantioquia y la Concesión Túnel de Oriente.

Por ejemplo para uso agrícola, pecuario y acuícola a pequeña escala que se realizan generalmente en el propio predio de vivienda familiar, los cuales se aprovechan para la crianza de animales, huertas, pequeños cultivos, floricultura y actividades de microempresas (Concesión Túnel Aburrá-Oriente, 2013). También se usa el agua para actividades institucionales.

La distribución espacial de los acueductos se muestra en la figura 5.12. En la tabla 5.8 se observan los caudales concesionados por acueducto, sin embargo, es posible que estos datos no concuerden con la sumatoria de todas las extracciones reales ya que en casos como los de las Quebradas Doña María, Aguacatala y La Iguaná, se ha encontrado una correlación de alrededor el 10 % entre las captaciones reales y los datos oficiales de las autoridades ambientales (Corantioquia, 2005; de Medellín, 2014b). Recorridos por los diferentes afluentes permitan identificar innumerables mangueras que extraen agua de manera informal con técnicas rudimentarias pero tradicionales, lo que dificulta la obtención de datos de uso de agua reales y por lo tanto dificulta su gestión eficiente. El caudal concesionado y no estimado no concesionado total es de $199.58L/s$, sin contar las del Acueducto Ocho de Marzo y Juan Pablo II cuyos caudales se desconocen. A pesar de que los usuarios concesionados y no concesionados tienen poblaciones similares, los caudales presentan diferencias significativas, esto es debido a que el uso del agua de los usuarios concesionados es mayoritariamente para uso doméstico, el cual tiene mayor cantidad de dotación neta ($L/hab * dia$).

¹La población abastecida corresponde a la proyección hecha para 2020 a partir de la población abastecida en 2013 y tomando una tasa de crecimiento reportada para el corregimiento de Santa Elena Municipio de Medellín reportada por el DANE según proyecciones al año 2011.

Tabla 5.7: Acueductos al interior de la zona de estudio. Elaborado con información brindada por Corantioquia, con datos de Alcaldía de Medellín (2014) e información de la Concesión Túnel de Oriente (2013).

Acueducto	Población abastecida ¹	Fuente	Caudal concesionado (L/s)	Cobertura
Corporación Acueducto San Pedro	5246	Q. San Pedro	9.04	Veredas El Llano y El Plan de Medellín y Perico y La Meseta de Envigado
Acueducto Multiveredal Santa Elena	5628	Q. Santa Elena	11.14	Veredas El Placer, Barro Blanco, El Cerro, Santa Elena parte central y sector El Rosario
Corporación de Asociados del Acueducto Las Flores	1188	Q. Chiqueros	2.02	Vereda Piedra Gorda
Corporación de Acueducto Media Luna	914	Q. Santa Bárbara	1.03	Veredas Media Luna parte alta, parte central y sector Bocaná
ASUASI	3784	La Mina La Negra 1 La Negra 2	1.91 1.05 1.86	Vereda San Ignacio - Guarne
Acueducto Ocho de Marzo	1950	La Espadera		Barrio Ocho de Marzo
Acueducto Juan Pablo II	2626	La Espadera		Barrio Juan Pablo II
Acueducto La Palma	593	La Espadera	0.73	Vereda La Palma
Acueducto Barrios de Jesús	1035	La Espadera	1.01	Barrios de Jesús
La Cascada (Planta de Potabilización)	21639	Santa Elena	120.00	La Sierra, Las Estancias, Juan Pablo II, Ocho de Marzo, Barrios de Jesús, Villa Turbay y Villa Liliam
Usuarios concesionados ²	647		47.69	
Usuarios no concesionados	627		2.10	

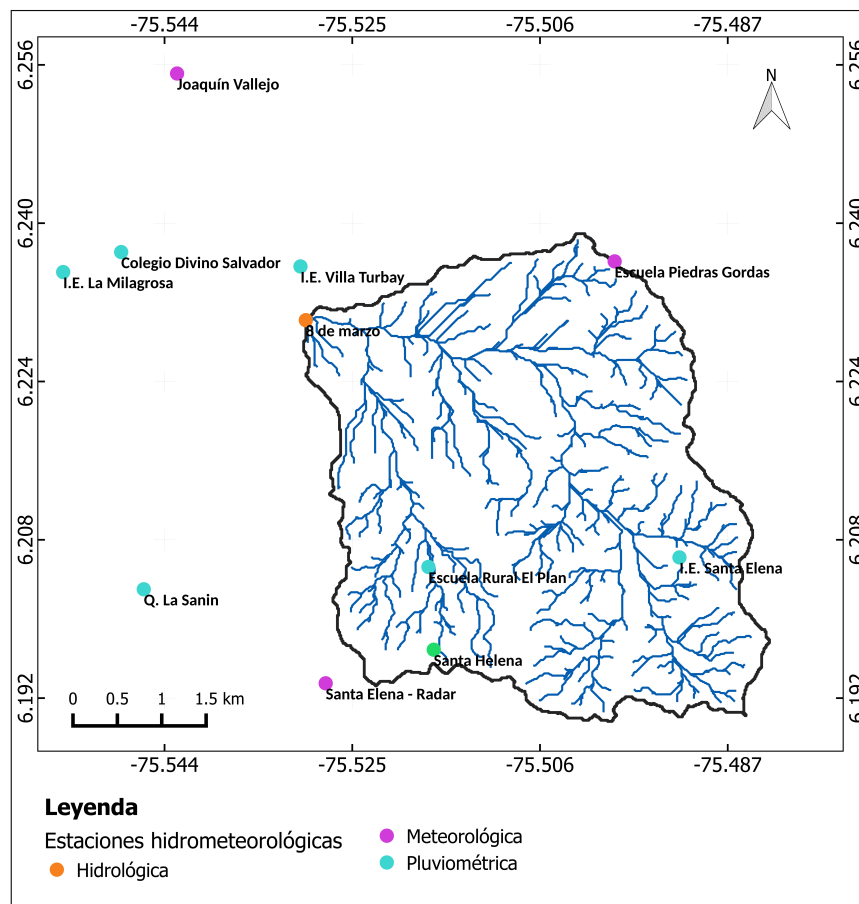


Figura 5.13: Mapa de distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas.

5.9. Información Climática

La información climática del área de estudio fue proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) y Empresas Públicas de Medellín (EPM). El área de estudio y su área de influencia cuenta con 1 estación meteorológica del IDEAM al interior de la cuenca y con 11 estaciones de tipo pluviométrica y meteorológica en cuencas vecinas 5.8 pertenecientes a SIATA y a EPM. Para el análisis climatológico se recomienda adquirir series con información de mínimo 15 años (OMM, 2018), por esta razón, el análisis de precipitación se realiza con una sola estación que cumple con este requisito.

5.9.1. Precipitación

Ciclo Anual Multianual:

En la estación Santa Helena del IDEAM, con datos de 1971 a 2019, la precipitación media mensual multianual es de 225 mm/mes y varía entre 117 mm/mes para enero y 349.3 mm en el mes

Tabla 5.8: Estaciones hidrometeorológicas instaladas en la microcuenca Piedras Blancas y sus alrededores.

Nombre Código	Institución	Norte	Este	Categoría
Santa Helena 27010810	IDEAM	6.196888889	-75.51675	Meteorológica
I.E. Santa Elena 5	SIATA	6.206218921	-75.49188333	Pluviométrica
Escuela Rural El Plan 26	SIATA	6.205255631	-75.51729056	Pluviométrica
Escuela Piedras Gordas 355	SIATA	6.23614	-75.49844	Meteorológica
Santa Elena - Radar 205	SIATA	6.1935	-75.5276	Meteorológica
I.E. Villa Turbay 44	SIATA	6.23563	-75.53024	Pluviométrica
Thies Miraflores 360	SIATA	6.2299724	-75.5491943	Meteorológica
Colegio Divino Salvador 129	SIATA	6.237083	-75.548388	Pluviométrica
I.E. La Milagrosa 46	SIATA	6.23506	-75.55426	Pluviométrica
Joaquín Vallejo 367	SIATA	6.25513	-75.54273	Meteorológica
Q. La Sanin 189	SIATA	6.2030	-75.5461	Pluviométrica
Piranómetro Joaquín Vallejo 6003	SIATA	6.2551	-75.5427	Piranómetro
8 de marzo 402	SIATA	6.2302	-75.5297	Hidrológica
Chorrillos 27010350	EPM	6.3	-75.5	Pluviométrica

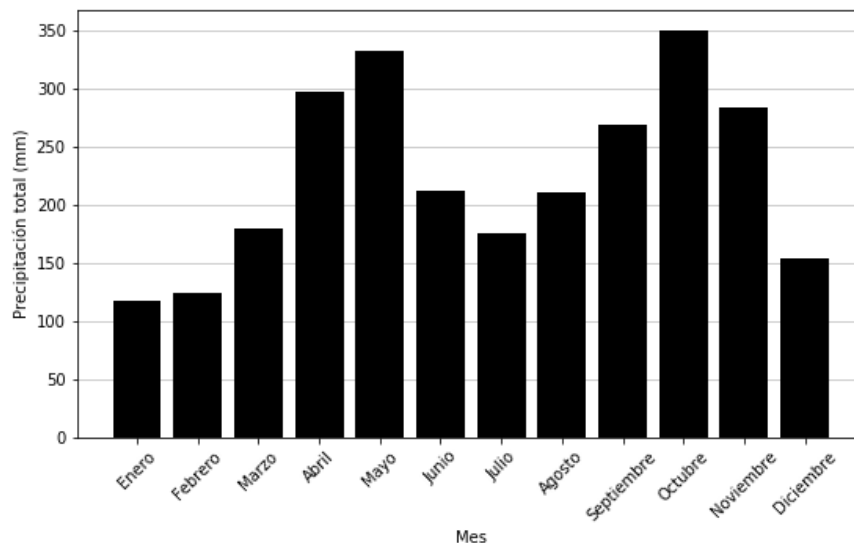


Figura 5.14: Precipitación acumulada mensual multianual para el periodo 1971 a 2019. Elaboración propia con datos del IDEAM.

de octubre. El régimen de lluvias a lo largo del año es de tipo bimodal, con los períodos húmedos entre los meses abril a mayo y los meses enero a diciembre, dejando como temporadas más secas entre los meses enero a abril y junio hasta agosto. En la figura 5.14 se presenta la variación de la precipitación para los diferentes meses del año en el periodo 1971-2019. La precipitación total multianual es de 2704 mm por año.

En la figura 5.15 se observa la serie anual de los últimos 48 años, desde 1971 hasta 2019, donde los años más lluviosos fueron 1999, 2000, 1998 y con 5555 mm de precipitación total para el año 1999. Los 5 años con menor precipitación son 1994, 2015, 1992, 1983 y 1987, estos años estuvieron bajo la influencia del fenómeno “El Niño” del ENSO (IDEAM, 2018a). Los años que estuvieron bajo la influencia de este fenómeno durante el siglo XXI son 2002-2003, 2004-2005, 2006-2007, 2009-2010, 2014-20016, 2016-2017. La precipitación mínima observada es de 1516 mm para el año 1994. En la figura 5.16 se observa el comportamiento bimodal, siendo abril, octubre y noviembre los meses más lluviosos del año. El mes de febrero es notablemente el más seco, seguido de cerca por enero pero con una distribución más amplia. Luego en julio y agosto regresa la temporada seca pero con menor intensidad.

5.9.2. Temperatura

La distribución espacial de la temperatura anual se calculó con el modelo de elevación digital y la ecuación determinada en el POMCA del Río Aburrá (Corantioquia, 2015), en la cual tuvieron en cuenta la relación entre la temperatura y la altura sobre el nivel del mar en 10 estaciones climatológicas con registros superiores a los 15 años dentro la cuenca del Río Aburrá y su área de influencia.

$$T = -0.0085 * (Altura) + 34.287 \quad (5.13)$$

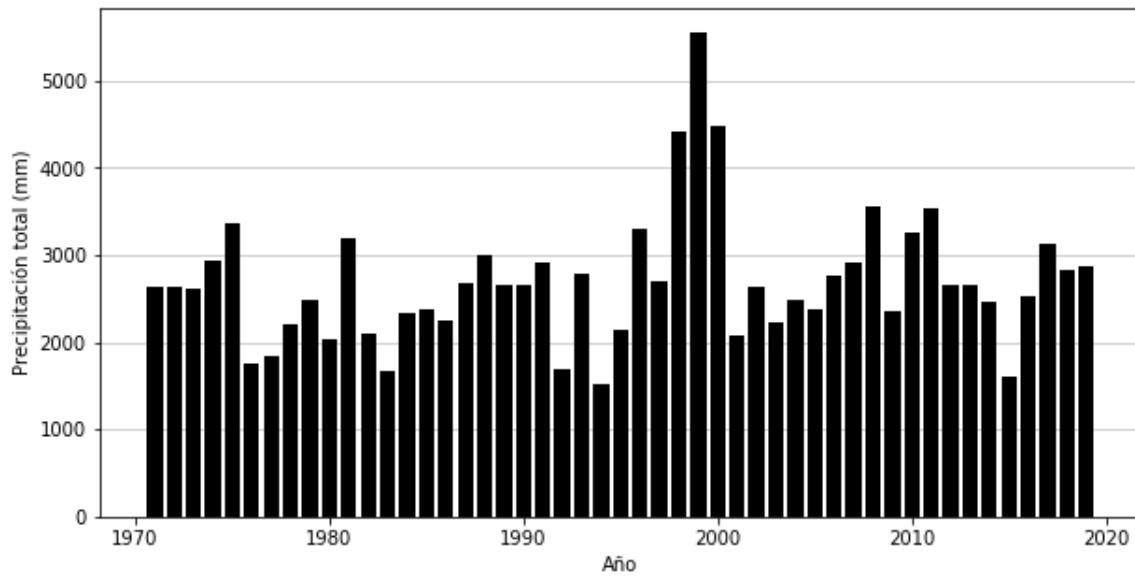


Figura 5.15: Serie de precipitación acumulada anual del periodo 1971 - 2019. Elaboración propia con datos del IDEAM.

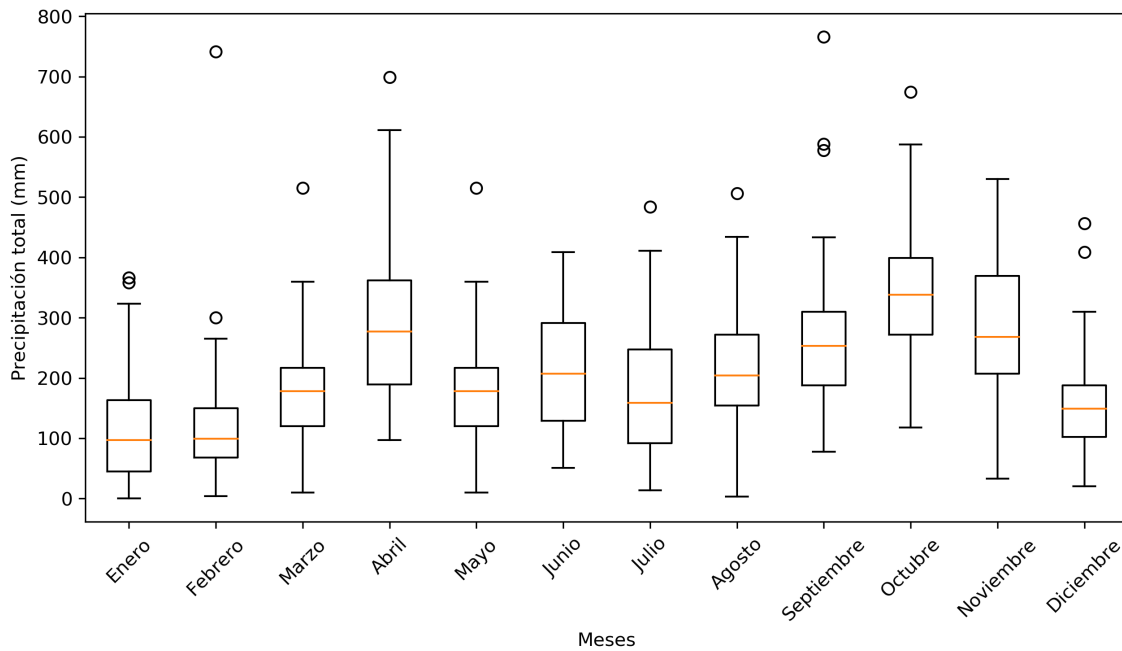


Figura 5.16: Distribución de la precipitación acumulada mensual multianual.

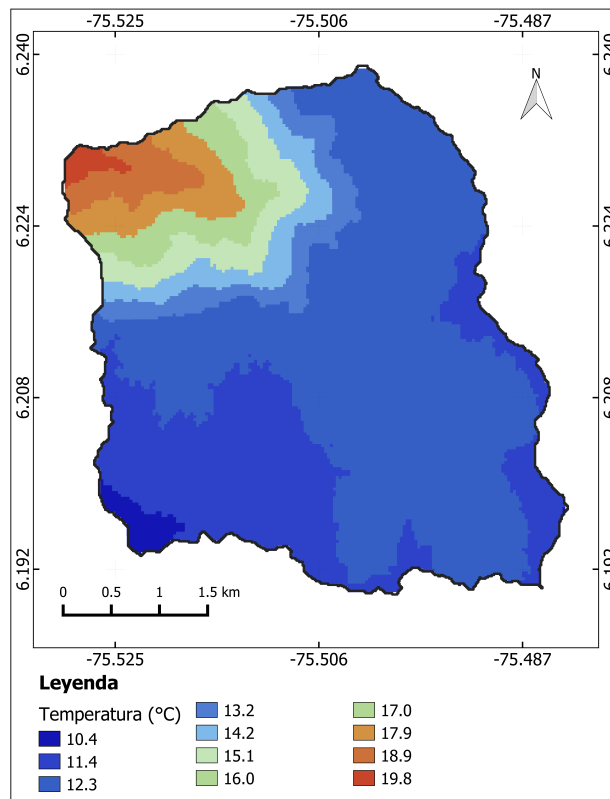


Figura 5.17: Temperatura media anual. Elaboración propia calculada con la ecuación desarrollada por Corantioquia.

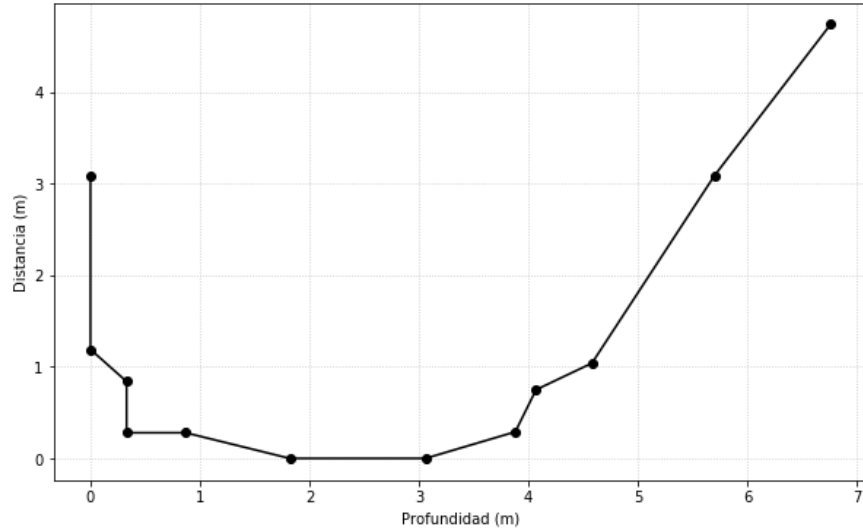


Figura 5.18: Sección transversal de la estación hidrológica 402 8 de Marzo. Elaboración propia con datos del SIATA.

En la figura 5.17 se observa la temperatura media anual en la zona de estudio, donde la temperatura media anual es de 13.4°C . La temperatura media máxima se observa en la salida de la cuenca con 19.8°C , ésta disminuye rápidamente a medida que aumenta la altura en la zona más escarpada de la cuenca, al llegar al altiplano, la temperatura desciende suavemente donde las más bajas se registran al suroccidente de la cuenca en el nacimiento de las quebradas.

5.9.3. Hidrología

Los datos disponibles de la estación 402 - Ocho de Marzo del SIATA son de únicamente nivel y velocidad ya que no cuentan aún con la curva de calibración de la misma. Se tiene también la sección transversal de la cuenca. Debido a que son los únicos datos hidrológicos disponibles, se aplicó el método superficial para calcular la velocidad media, donde aproximadamente $V_{media} = 0.85 * V_{superficial}$. El cálculo del área para cada nivel medido se realizó ajustando una curva a la sección transversal (5.18)

La ecuación resultante es:

$$A = 4.3193y + 0.4596$$

donde:

A : área de la sección (m^2).

y : nivel (m).

Finalmente,

$$Q = V_m * A$$

donde:

Q : caudal (m^3/s).

V_m : velocidad media (m/s).

A : área (m^2).

Capítulo 6

Configuración del modelo e información de entrada

Para la simulación de la microcuenca se utilizó la versión 4.7 del modelo HEC-HMS. Tal y como se presentó en el Capítulo 3 en la sección 3.2, el modelo HEC-HMS requiere de 4 componentes para realizar la simulación: el modelo de cuenca, los datos meteorológicos, los datos de entrada o parámetros y las especificaciones del control (periodos de simulación).

La cuenca y 5 subcuencas fueron delimitadas con la herramienta GIS incorporada en HEC-HMS con un umbral de 1.6 km² (figura 6.1, tabla 6.1). Los datos de entrada para la herramienta GIS son únicamente el DEM y el sistema de referencia de este. En este caso, se utilizó UTM 18N ya que el sistema utiliza UTM para la creación de las mallas cuando se utilizan modelos distribuidos con una resolución de 50m. El software tiene la habilidad de realizar el llenado de vacíos del raster, el cálculo del raster de direcciones, red de drenaje, identificación de corriente principal teniendo en cuenta un umbral y la delineación de subcuencas.

6.1. Modelo de cuenca y parámetros de entrada

En este estudio, los submodelos incluidos en el modelo de cuenca son gridded simple canopy method para la interceptación de lluvias por cobertura vegetal, gridded simple surface para el almacenamiento superficial del agua y el gridded Soil Moisture Accounting, para la representación de las pérdidas por infiltración. Al hacer uso de estos tres modelos distribuidos, es necesario el uso de ModClark, también distribuido, para la representación de la transformación del exceso de agua en escorrentía. Finalmente, el método de caudal base utilizado es el de método de recesión. No se tienen en cuenta submodelos para los tramos del canal como de tránsito de crecientes ni de ganancias o pérdidas. Los parámetros requeridos por cada submodelo se enumeran en la tabla 6.1 y se describen en las secciones subsiguientes al igual que la metodología utilizada para su cálculo.

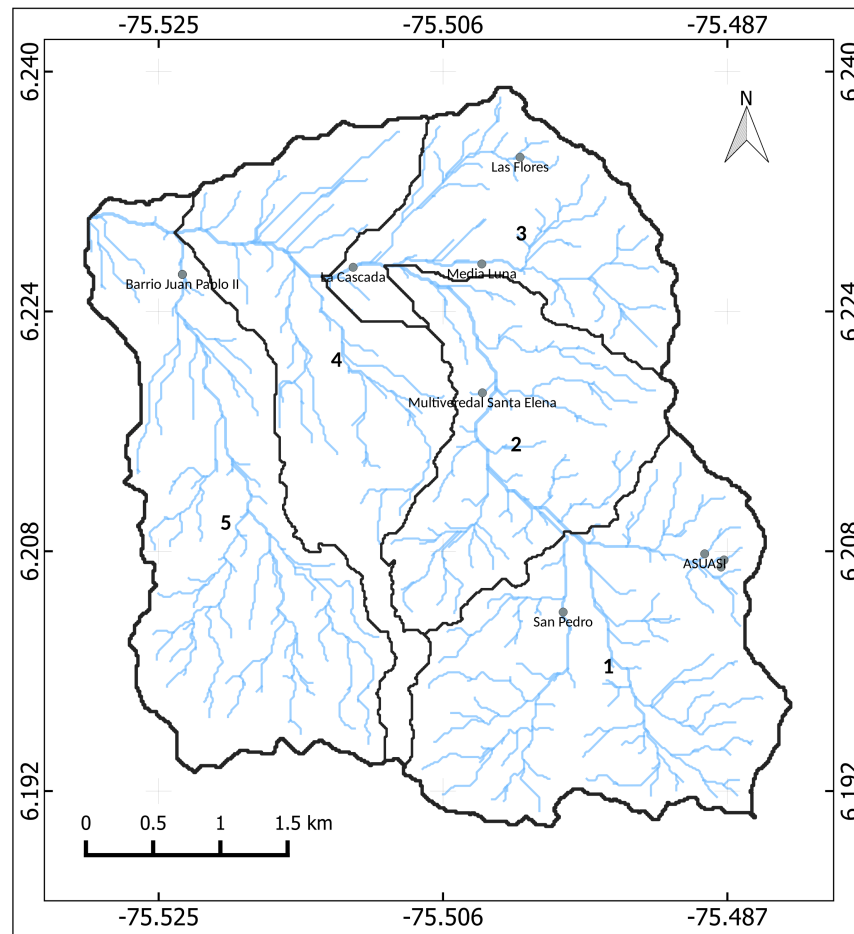


Figura 6.1: Mapa de subcuencas de la microcuenca Santa Elena.

Tabla 6.1: Subcuencas de la microcuenca Santa Elena usadas en la simulación con HEC-HMS y sus quebradas principales.

Subcuenca	Área (km^2)	Quebradas asociadas	Acueducto
1	5.23	Q. San Ignacio, Q. San Pedro, Q. El Cedro	ASUASI y San Pedro
2	3.25	Q. Yarumo, Q. Las Antenas, Q. Santa Teresa	Multiveredal Santa Elena
3	2.73	Q. Santa Bárbara, Q. Chiqueros	Media Luna, La Cascada, Las Flores.
4	3.97	Q. La Bocaná, Q. La Borrachera, Q. La Fe	-
5	5.07	Q. La Espadera o Bizarro	Acueducto Ocho de Marzo Acueducto Juan Pablo II Acueducto La Palma Acueducto Barrios de Jesús
Total	20.25		

Tabla 6.2: Parámetros usados en el modelo y sus rangos por defecto.

Submodelo	Parámetro	Rango	
		Mínimo	Máximo
Interceptación por dosel de la cobertura	Almacenamiento inicial (%)	0	100
	Almacenamiento máximo del dosel (mm)	0.001	1500
	Coefficiente de cultivo (adim.)	0.01	1
Almacenamiento superficial	Almacenamiento inicial (%)	0	100
	Almacenamiento superficial máximo (mm)	0.001	1500
Pérdidas (SMA)	Contenido inicial del suelo (%)	0	100
	Contenido inicial del agua subterránea 1 (%)	0	100
	Tasa de infiltración máxima (mm/hr)	0.01	500
	Almacenaje del suelo (mm)	0.01	1500
	Almacenaje en zona de tensión (mm)	0.01	1500
	Tasa de percolación del suelo (mm/hr)	0.01	500
	Almacenaje en agua subterránea 1 (mm)	0.01	1500
	Percolación en agua subterránea 1 (mm/hr)	0.01	500
	Coefficiente de agua subterránea 1 (hr)	0.01	10000
Transformación de escorrentía (ModClark)	Tiempo de concentración (hr)	0.017	1000
	Coefficiente de almacenamiento (adim.)	0.02	1000
Caudal base (Recesión)	Caudal base inicial (m/s)	0	100000
	Constante de recesión	0.1	1
	Proporción al pico	0	1

6.1.1. Método de interceptación de lluvias por dosel de coberturas vegetal: Gridded Simple Canopy Method

Almacenamiento inicial (%):

es la condición inicial que representa el porcentaje del almacenamiento máximo que está lleno al inicio de la simulación. Se utiliza un valor de 0% después de un corto periodo sin precipitación o cuando se tiene un periodo de calentamiento.

Grid o malla de almacenamiento máximo (mm):

cada celda representa la profundidad máxima de agua que puede ser interceptada según el tipo de vegetación presente en la respectiva celda. Los datos de interceptación utilizados en el modelo HEC-HMS se calcularon a partir del mapa de coberturas vegetales tomando el primer nivel de clasificación de CORINE Land Cover adaptado para Colombia, ya que este cuenta con información en la literatura de la interceptación de lluvia o capacidad de almacenamiento de agua en los doseles o coberturas. En la tabla 6.1.1 se observa la capacidad de almacenamiento máxima por cobertura. El raster de coberturas es usado para crear el raster de almacenamiento máximo, se realiza reemplazando cada tipo de cobertura por los valores de la tabla (Gómez Elorza, 2016).

Tabla 6.3: Almacenamiento por cobertura vegetal.

Cobertura Vegetal	Almacenamiento (mm)
1.1 Zonas urbanizadas	0.16
2.3 Pastos	0.98
2.4 Áreas agrícolas heterogéneas	1.97
3.1 Bosque	2.62
3.2 Área con vegetación herbácea y/o arbustiva	0.70

Tabla 6.4: Coeficiente por cobertura vegetal.

Cobertura Vegetal	Coeficiente
1.1 Zonas urbanizadas	0.05
2.3 Pastos	0.30
2.4 Áreas agrícolas heterogéneas	0.60
3.1 Bosque	0.80
3.2 Área con vegetación herbácea y/o arbustiva	0.75

Grid o malla de coeficiente por cultivo:

El coeficiente adimensional es aplicado a la evapotranspiración potencial y calcula la cantidad de agua que se extrae del suelo. El modelo HEC-HMS funciona con un coeficiente por cobertura, el cual es una relación aplicada a la evapotranspiración potencial. Los datos de coeficiente por cobertura vegetal fueron tomados a partir de Burman & Pochop (1994) (Gómez Elorza, 2016) Los valores pueden observarse en la tabla 6.1.1.

6.1.2. Método de almacenamiento superficial del agua: Gridded Simple Surface:

Almacenamiento inicial (%):

Es la condición inicial que indica el porcentaje de almacenamiento superficial que se encuentra lleno al principio de la simulación. Después de un corto periodo de tiempo sin precipitación o cuando se tiene en cuenta un periodo de calentamiento, este valor puede ser 0%, como en este caso Ahbari et al. (2018)

Grid de almacenamiento máximo:

Representa la cantidad máxima de agua que puede almacenar la superficie antes de que ocurra la escorrentía. La cantidad de almacenamiento se especifica como una profundidad efectiva en mm (USACE, 2016). La información para el almacenamiento superficial fue calculada a partir del mapa de pendientes según los valores propuestos por Bennett (1998). En la figura 6.1.2 se muestran los valores asignados de almacenamiento superficial para el caso de estudio.

Tabla 6.5: Almacenamiento superficial. Valores de Bennett (1998)

Descripción	Pendiente (%)	Almacenamiento superficial (mm)
Áreas pavimentadas impermeables	NA	3.2 - 6.4
Pendientes pronunciadas	>30	1.0
Pendientes moderadas a suaves	5-30	12.7 - 6.4
Planas, terrenos surcados	0-5	50.8

Tabla 6.6: Cálculo de la conductividad hidráulica del suelo para la microcuenca de la quebrada Santa Elena.

Asociación	Código	Granulometría (%)			Textura	Profundidad del horizonte (m)	Ks del horizonte (mm/h)
		Arenas	Gravas	Arcillas			
Tequendamita	Ap	54	35	11	FA	0.15	38.92
	Bw1	74	20	6	FA	0.65	81.14
	Bw2	64	30	6	FA	0.70	69.16
Niquía	Ap	42	35	26	Ar	0.10	9.41
	C1	35	35	30	FAr	0.15	6.51
	C2	38	46	16	Ar	1.05	20.47

6.1.3. Método de pérdidas: Gridded Soil Moisture Accounting

Con el fin de aprovechar la bondad del modelo de permitir una simulación distribuida de las pérdidas, para el cálculo de pérdidas se empleó el método Soil Moisture Accounting en malla con una resolución de 50m. El SMA fue combinado con los métodos de almacenamiento por dosel y almacenamiento superficial. Las entradas requeridas por el SMA se presentan en la Tabla 16 y se determinaron a partir de las características de los perfiles de suelo levantados en campo (IGAC, 2007) y de su distribución espacial. En este caso sólo se tomó una capa subterránea por lo que no se ingresaron datos de los parámetros para la segunda capa de agua subterránea.

Contenido inicial del suelo (%), contenido inicial del agua subterránea 1 (%):

Se definen como 0% al asumir que después de un periodo sin precipitación este valor es cero o definiendo un periodo de calentamiento para que el contenido de humedad estabilice.

Tasa de infiltración máxima (mm/hr):

La tasa de infiltración máxima es definida como el límite superior de la tasa de entrada del agua desde el almacenamiento superficial hacia el suelo (USACE, 2016). Es calculada como la conductividad hidráulica saturada total del perfil del suelo (Ouedraogo et al., 2018) de acuerdo con las relaciones propuestas por Saxton & Rawls (2006) a partir de la textura del suelo y con apoyo del software SPAW (Saxton & Willey, 2005) en la figura 6.2. Sin embargo, la tasa acá calculada es muy alta y no habría almacenamientos superficiales, por lo tanto se toma la infiltración de capa superior del suelo de una cuenca vecina (Chorrillos) como 20 mm/día o lo que es igual, 0.83 mm/hr (Jaramillo Uribe et al., sf)

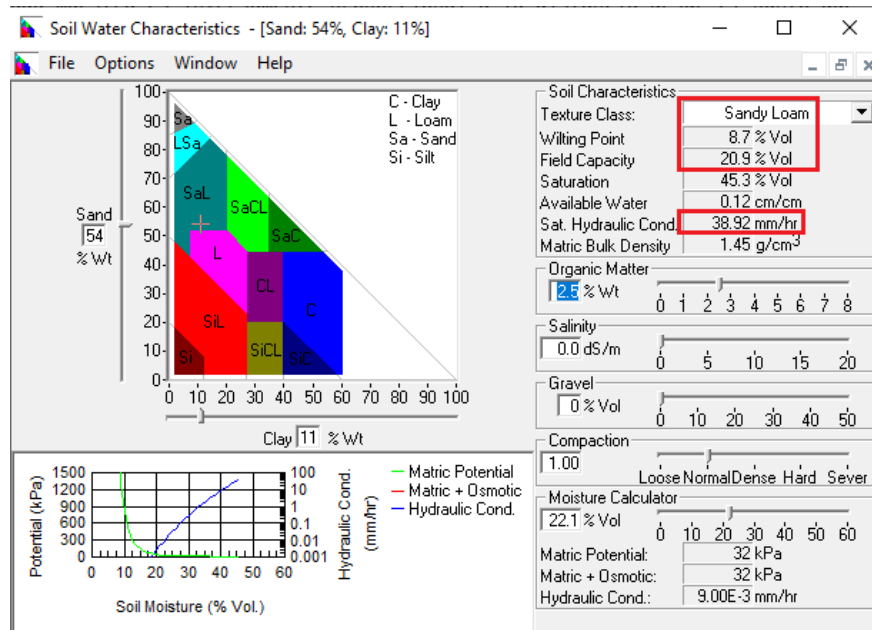


Figura 6.2: Uso del software SPAW para la estimación de las propiedades hidráulicas del suelo.

Tabla 6.7: Conductividad hidráulica del suelo para la microcuenca de la quebrada Santa Elena.

Asociación	Profundidad total del horizonte (m)	Ks en el perfil de suelo (mm/h)
Tequendamita	1.5	71.33
Niquía	1.3	18.01

Tabla 6.8: Almacenamiento de agua en el suelo para los suelos presentes en área de estudio.

Asociación	Textura	Profundidad del horizonte (m)	Porosidad	Almacenamiento en el suelo (mm)
Tequendamita	FA	0.15	0.435	652
	FA	0.65	0.435	
	FA	0.7	0.435	
Niquía	Ar	0.1	0.451	635
	FAr	0.15	0.776	
	Ar	1.05	0.451	

Almacenamiento de agua en el suelo (mm):

El almacenamiento de agua en el suelo es definido como el espacio disponible que puede ocupar el agua en el perfil de suelo, por lo que se calcula como la porosidad (Saxton et al., 1986) multiplicada por la profundidad del suelo 6.1. Los valores asignados para el caso de estudio se muestran en la tabla 20.

$$\text{Almacenamiento en el suelo (mm)} : \text{porosidad} * \text{profundidad del suelo} \quad (6.1)$$

En la tabla 6.1.3, se presentan los resultados obtenidos para el almacenamiento de agua en el suelo para el área de estudio.

Almacenamiento en la zona del agua en la zona de tensión (mm):

La zona de tensión especifica la cantidad de agua que no es drenada por efecto de gravedad y se obtiene a partir de la multiplicación de la profundidad del perfil de suelo por la capacidad de campo (ecuación 6.2) estimada a partir de las propiedades texturales del horizonte de suelo y sus relaciones con las características hidráulicas establecidas en el software SPAW (Saxton & Willey, 2005).

$$\text{Almacenamiento en zona de tension (mm)} : \sum P_i * FC * 1000 \quad (6.2)$$

Donde:

P_i : profundidad del horizonte i (m). FC : capacidad de campo.

En la tabla 6.1.3, se presentan los resultados obtenidos para el almacenamiento de agua en el suelo para el área de estudio.

Tasa de percolación del suelo y de las capas subterráneas (mm/hr):

La tasa de percolación del perfil de suelo corresponde a la conductividad hidráulica promedio de todas las subcuencas determinados en SPAW según la textura del suelo (Ouedraogo et al., 2018). Las tasas de percolación de las capas sub-superficiales del suelo corresponden a la conductividad

Tabla 6.9: Almacenamiento de agua en la zona de tensión para los suelos presentes en área de estudio.

Asociación	Textura	Profundidad del horizonte (m)	Capacidad de campo	Almacenamiento en la zona de tensión (mm)
Tequendamita	FA	0.15	0.209	235
	FA	0.65	0.139	
	FA	0.70	0.162	
Niquía	Ar	0.10	0.302	360
	FAr	0.15	0.331	
	Ar	1.05	0.267	

Tabla 6.10: Conductividad hidráulica de los complejos hidrogeológicos de la zona de estudio.

Asociación	Textura	Ks (mm/h)
Tequendamita	Franco Arenosa	1.80
Niquía	Arcillosa	0.36

hidráulica saturada de los complejos hidrogeológicos presentes en la zona de estudio. Tales valores fueron obtenidos a partir de la información hidrogeológica descrita anteriormente por Dematteis & Silva (2014) (6.10).

6.1.4. Método de transformación: ModClark

El método usado para la transformación del exceso de precipitación en escorrentía directa fue ModClark, modificación distribuida del método del Hidrograma Unitario de Clark.

Tiempo de concentración (hr):

Son necesarios los tiempos de concentración por subcuenca (tabla 6.11) calculados a partir del procesamiento de la información topográfica y de la ecuación (Johnstone et al., 1949) seleccionada en el Capítulo 5, sección 5.2.2.

Coefficiente de almacenamiento:

S. et al. (1979) encontraron que $R = c \cdot T_c$, donde R es el coeficiente de almacenamiento y que el valor c varía entre 1.5 a 2.8. Según Domínguez et al. (2008), para fines prácticos el coeficiente K se puede estimar como la sexta parte de T_c (Magaña-Hernández et al., 2013). El Cuerpo de Ingenieros del ejército de EE. UU. (HEC, 1967) sugiere la ecuación 6.3 para el cálculo del coeficiente de almacenamiento. En este estudio, el coeficiente es calculado con esta última ecuación.

$$R = 0.8T_c \quad (6.3)$$

Donde:

Tabla 6.11: Tiempos de concentración y coeficientes de almacenamiento estimados para cada subcuena del caso de estudio.

Subcuena	Longitud del cauce más largo (km)	Pendiente del cauce más largo	Tiempo de concentración (hr)	Coefficiente de almacenamiento (hr)
1	3.1	0.07	1.48	1.19
2	4.1	0.13	1.43	1.15
3	3.1	0.22	1.11	0.89
4	5.4	0.17	1.53	1.23
5	6.0	0.18	1.60	1.28

R : coeficiente de almacenamiento.

T_c : tiempo de concentración (hr).

6.1.5. Método de caudal base: Recession Baseflow

Para la modelación de la microcuena se ha seleccionado el modelo de recesión de caudal base, se requieren los parámetros: descarga inicial (m^3/s), constante de recesión y la relación al pico, el cual es un parámetro umbral del caudal mínimo.

Caudal base inicial (m^3/s):

caudal base al inicio de la simulación. Este valor se ajusta en la calibración y/o el periodo de calentamiento. Se deja un periodo de calentamiento extenso de tal forma que el caudal se ajuste a lo largo de la simulación.

Constante de recesión:

Describe la tasa a la cual el caudal base retrocede entre eventos de tormenta. Define la pendiente de la curva en retroceso del hidrograma del flujo base. Puede ir desde 0.01 hasta 1. Para la constante de recesión utilizó una aproximación del valor (0.5) y en la calibración se ajustó.

Tipo de umbral (Proporción al pico o umbral de caudal):

Indica el reinicio del caudal base cuando el caudal ha disminuido cierto porcentaje o cierto valor en volumen por unidad de tiempo.

6.2. Componente meteorológico

6.2.1. Modelos meteorológicos: Precipitación y Evapotranspiración y tratamiento de datos

El componente meteorológico contiene datos de precipitación diarios y de evapotranspiración media mensual multianual. La evaporación fue calculada con el método de Penman-Monteith con datos mensuales multianuales de temperatura, viento y radiación, y se usaron los mismos valores para toda la extensión de la cuenca. Para la precipitación se realizó una interpolación espacial con el método de la distancia inversa ponderada (IDW) con 7 estaciones meteorológicas en las cuales se contaba con datos diarios desde el 2014 o antes. La interpolación se realizó con el software HEC-DSS el cual es una distribución de HEC para el ordenamiento y visualización de datos. Las estaciones usadas fueron Santa Helena del IDEAM, El Radar, Chorrillos, Escuela El Plan, Institución Educativa Santa Elena, Institución Educativa La Milagrosa y Villa Turbay. Los datos faltantes fueron rellenados con RClimTool.

El método IDW interpola los datos según la influencia de un punto en relación con otros, dándole mayor peso a los valores que se ubican más cerca y menos a los lejanos. El peso de cada muestra es inversamente proporcional a la distancia desde el punto que se está tomando la muestra Rodríguez Santos (2014).

El método de interpolación IDW también tiene algunas desventajas: La calidad del resultado de interpolación puede disminuir si la distribución de los puntos de datos de la muestra es desigual. Además, los valores máximos y mínimos en la superficie interpolada pueden ocurrir únicamente en los puntos de datos de la muestra (QGIS, 2020).

6.3. Calibración, evaluación y especificaciones de control

El periodo seleccionado para la calibración fue desde el 19 de mayo de 2020 hasta el 31 de agosto de 2020. Este periodo se seleccionó de acuerdo con la disponibilidad de series de nivel y velocidad diarias de la estación 8 de marzo (404) del SIATA, a la salida de la cuenca. En o no fue posible tomar una serie que comprendiera años secos, promedio y húmedos, tal y como lo recomienda Moriasi et al. (2007). El periodo de calentamiento utilizado en la calibración fue de 1 año y 139 días, desde el 1 de enero de 2019 hasta el 18 de mayo de 2020. La validación se realizó para los dos meses siguientes, desde el 1 de septiembre hasta el 31 de octubre de 2019.

La calibración puede realizarse de manera manual o automática. Primero, se realizó una calibración manual de la forma prueba y error hasta lograr un ajuste mediante una comparación visual con el hidrograma observado. Posteriormente, la calibración se realizó de forma automática con el módulo de HEC-HMS llamado “optimization trial”. El método Nelder-Mead o Simplex fue utilizado como método de búsqueda. La función objetivo seleccionada para la estimación automática de los parámetros del modelo fue el modelo de eficiencia de Nash Sutcliffe (ecuación 6.4), comúnmente usada para la calibración de modelos hidrológicos y usada en casos de estudio realizados por Cabrera-Balarezo et al. (2019) Verma et al. (2010) y Huaman Aguirre (2018). Este coeficiente muestra el nivel de ajuste entre los caudales observados y los caudales simulados al determinar la magnitud relativa de la varianza residual. En la tabla 6.12 pueden observarse las métricas de

referencia para este coeficiente.

En Ouédraogo et al. (2018) se realizó un análisis de sensibilidad en el cual se determinó que los parámetros relacionados con el SMA son los más sensibles y correspondientes a las capas sub-superficiales (almacenamiento del acuífero 1, percolación del acuífero 1, coeficiente del acuífero 1) y el porcentaje de área impermeable, son los más sensibles. Según Barbosa Cadena et al. (2018) los parámetros más sensibles son la máxima infiltración, la percolación del suelo, el almacenamiento del acuífero 1, el coeficiente del acuífero 1 y el almacenamiento del acuífero 2.

Por consiguiente, la calibración manual inicial incluyó Almacenaje en agua subterránea 1 y Coeficiente de agua subterránea 1; que determinan la cantidad de agua entrante para el agua subterránea. La percolación en agua subterránea 1 no se incluye en la calibración inicial ya que es un parámetro que fue determinado por observación. También, se calibraron los dos parámetros asociados al caudal base: constante de recesión y la proporción al pico. Debido a que se utilizó una aproximación distribuida del suelo, no es posible realizar una calibración de los almacenamientos máximos del suelo. Finalmente, se realizan 500 simulaciones para calibrar de manera automática con el método Simplex y con los valores establecidos en las primeras calibraciones, aplicando un rango máximo de -10 % y 10 % para obtener una mejor aproximación.

Con respecto a la evaluación, Legates & McCabe Jr (1999) y Moriasi et al. (2007) recomiendan el uso de métricas gráficas y estadísticas. Desde la parte cuantitativa son recomendadas tres métricas pertenecientes a tres categorías principales diferentes: regresión estándar, adimensional e índice de error absoluto. Las técnicas de regresión estándar determinan el grado de relación lineal entre los datos simulados y observados, las técnicas adimensionales proveen una evaluación relativa del modelo, mientras que los índices de error cuantifican la desviación en las unidades de los datos de interés. También pueden ser usadas técnicas gráficas, aquellas proveen una comparación visual y una visión preliminar de los resultados (ASCE & Division, 1993). Legates & McCabe Jr (1999) las considera esenciales.

Por tanto, en este estudio el desempeño del modelo fue evaluado con las siguientes métricas, las cuales son mencionadas por Moriasi et al. (2007) y usadas para la evaluación de los modelos Ouédraogo et al. (2018), Chu & Steinman (2009) y De Silva et al. (2014).

1. Método de eficiencia de Nash (técnica adimensional):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6.4)$$

Donde:

O_i : valor observado en el i -ésimo término.

S_i : valor simulado en el i -ésimo término.

\bar{O} : valor medio de los datos observados

n : Número de observaciones.

Los valores de este coeficiente varían desde $-\infty$ hasta 1, cuando NSE está entre 0 y 1 indica que el desempeño del modelo está en un nivel aceptable y cuando $NSE < 0$ nos indica que los valores simulados son peores que el valor medio observado por lo que no es posible aceptar el rendimiento del modelo (Bennett, 1998; Cabrera-Balarezo et al., 2019; Nash & Sutcliffe, 1970).

Tabla 6.12: Calificación de desempeño de los índices utilizados para la validación y calibración.

Calificación de desempeño	<i>NSE</i>	<i>RSR</i>	R^2	<i>PEV (%)</i>
Muy buena	0.75 - 1.00	0.00 - 0.50	0.75 - 1	<±10
Buena	0.65 - 0.75	0.50 - 0.60	0.65 - 0.75	±10 - ±15
Satisfactoria	0.50 - 0.65	0.60 - 0.70	0.50 - 0.65	±15 - ±25
Insatisfactoria	<0.50	>0.70	<0.50	>±25

2. Raíz del error cuadrático medio con desviación estándar (índice de error absoluto):

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (6.5)$$

Los rangos de RSR de 0 a 0.5 significa un muy buen desempeño del modelo.

3. Porcentaje de error de volumen (PEV por sus siglas en inglés):

$$PEV(\%) = \left| \frac{Vol_o - Vol_s}{Vol_o} \right| * 100 \quad (6.6)$$

Donde:

Vol_o : volumen observado.

Vol_s : volumen simulado.

4. Coeficiente de determinación R^2 (Regresión estándar):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \right]^2 \quad (6.7)$$

R^2 es una regresión estándar que solamente evalúa la las relaciones lineales entre las variables simuladas y observadas.

Capítulo 7

Resultados y análisis

7.1. Calibración y Validación

La calibración y validación se realizó con los datos hidro-meteorológicos diarios. La calibración de los parámetros se realizó con los caudales estimados en la salida de la cuenca versus los observados en la estación 402, ubicada en la salida de la cuenca. La calibración comenzó a realizarse con los valores de los parámetros asignados en el Capítulo 6 para el período del 18 de marzo de 2020 hasta el 31 de septiembre de 2020 con un periodo de calentamiento desde el 1 de enero de 2019 (1 año y 139 días). La función objetivo definida es la minimización del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe mediante una calibración de la forma “prueba-error”.

Inicialmente, los parámetros fueron modificados manualmente de -20 % a 20 % con variaciones del 5 %, hasta que una buena aproximación gráfica entre los valores simulados y los observados fueron obtenidos. Posteriormente, los parámetros encontrados en la calibración manual se sometieron a una calibración automática con el módulo de optimización de HEC-HMS. Se utilizaron rangos cercanos a los valores encontrados en la calibración manual para obtener caudales simulados más cercanos a los observados. Se realizaron 500 simulaciones para la calibración del modelo. La tabla 7.1 contiene los valores finales optimizados para cada subcuenca en el área de estudio.

Debido a que no se tienen observaciones en diferentes tramos de la cuenca no es posible calibrar los parámetros en cada una de ellas, por lo tanto el modelo aproxima los valores de las diferentes subcuencas a un solo valor. Es decir, cada subcuenca tiene el mismo valor calibrado de la tabla 7.1

¹El coeficiente de almacenamiento fue calculado para cada subcuenca. En esta tabla se presenta el valor promedio.

Tabla 7.1: Valores de los parámetros iniciales y calibrados.

Submodelo	Parámetro	Valor inicial	Valor calibrado
SMA	Almacenaje en agua subterránea 1 (mm)	500	55
	Coefficiente de agua subterránea 1 (hr)	1000	500
Caudal base	Constante de recesión	0.5	0.965
	Proporción al pico	0.5	0.4
Modclark	Coefficiente de almacenamiento ¹ (hr)	1.15	1.01

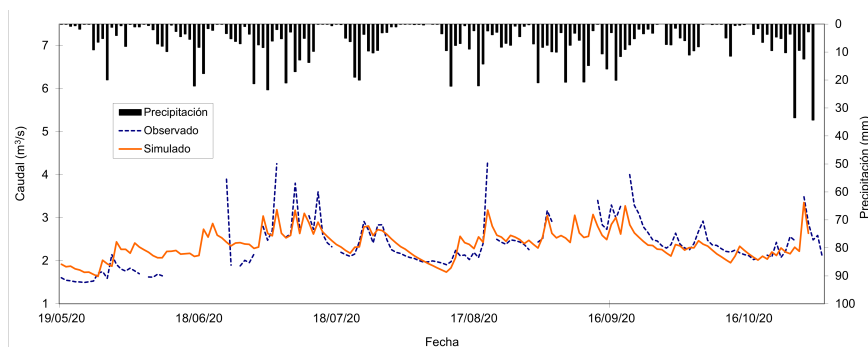


Figura 7.1: Calibración y validación de los caudales simulados.

Tabla 7.2: Evaluación de desempeño del modelo HEC-HMS.

Índice	Calibración	Validación
NSE	0.62	0.54
RSR	0.68	0.76
R^2	0.55	0.43
PEV (%)	-6.96	-3.60

a excepción del modelo de transformación de escorrentía al cual se le ingresaron valores diferentes para cada unidad hidrográfica (tabla 6.11). Por lo tanto, aunque exista variabilidad espacial entre los parámetros, no es posible identificarlos y el modelo homogeniza dichos valores.

La comparación lograda (figura 7.1) muestra un ajuste visualmente cercano entre los valores simulados y los observados, a excepción de los primeros 30 días donde a pesar de la falta de datos se aprecia una sobreestimación de los caudales. En el periodo restante se observa la subestimación de algunos caudales pico.

La validación del modelo se realizó con los parámetros finales encontrados y los valores observados de la estación 402 del SIATA fueron. La validación se realizó para el periodo del 1 de septiembre al 31 de octubre de 2020 para evaluar la capacidad del modelo de predecir la escorrentía en las estaciones mencionadas. La gráfica para el periodo de calibración y validación de caudales observados y caudales simulados se muestra en la figura 7.1. La comparación muestra un ajuste aceptable entre los valores simulados y observados.

En la tabla se muestran las métricas usadas y sus resultados correspondientes para los periodos de calibración y validación. En la calibración el modelo predice de forma satisfactoria según el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de correlación (R^2) y el índice RSR . En la validación el NSE indica una aproximación satisfactoria del modelo, sin embargo, el R^2 y RSR muestra un rendimiento insatisfactorio ya que es menor a 0.5 y mayor a 0.7 respectivamente. Por su parte, tanto para la validación como para la calibración el porcentaje de error en el volumen, califica el modelo con un desempeño muy bueno. El signo negativo indica que el volumen final de escorrentía es sobreestimado en ambos periodos de simulación.

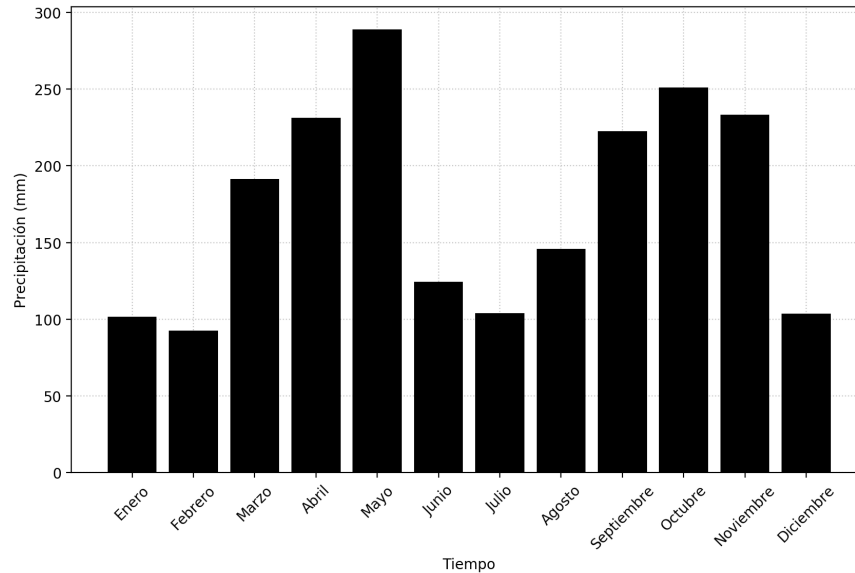


Figura 7.2: Precipitación mensual multianual para la cuenca.

7.2. Simulación 2014-2019

Entre las salidas del modelo se tienen datos de precipitación media para toda la cuenca resultado de la interpolación, lo cual permite compararla con las pérdidas calculadas. La precipitación acumulada promedio mensual multianual para el periodo simulado se muestra en la figura 7.2 en donde se observa el comportamiento bimodal característico de la zona de la precipitación. Las temporadas húmedas, según estos resultados, se registran entre marzo y mayo y septiembre y noviembre siendo el mes más lluvioso mayo con $289\text{mm}/\text{mes}$ seguido de octubre con $251\text{mm}/\text{mes}$. Por el contrario, los meses secos son de diciembre a febrero y desde junio hasta agosto. La temporada más seca tiene precipitaciones de 93 , 102 , y $104\text{mm}/\text{mes}$ en los meses de febrero, enero y diciembre respectivamente. A mitad del año el mes más seco es julio con $104\text{mm}/\text{mes}$ seguido de junio ($125\text{mm}/\text{mes}$) y agosto ($146\text{mm}/\text{mes}$).

Con respecto a los caudales, el promedio mensual multianual es $1.05\text{m}^3/\text{s}$ en la gráfica de promedio mensual multianual (figura 7.3) se observa el comportamiento bimodal de la precipitación reflejado en los caudales, sin embargo, aunque en los meses de junio y diciembre disminuye el caudal medio con respecto al anterior, se observa un valor de caudal más alto a comparación de los demás meses secos debido a la recarga en los acuíferos de la zona. Siendo febrero el mes más seco con $0.60\text{m}^3/\text{s}$ de la primera temporada seca seguido de febrero y marzo. En la segunda temporada seca el mes con menos caudal es agosto con $0.92\text{m}^3/\text{s}$, luego, se encuentran julio y septiembre. El mes de mayo tiene el valor máximo de caudal de todos los meses con un $1.40\text{m}^3/\text{s}$ seguido de cerca por el mes de noviembre con $1.34\text{m}^3/\text{s}$.

De igual manera, en la figura 7.4 también se puede observar el comportamiento bimodal mencionado anteriormente. Algo destacable es que los caudales mínimos para los meses de febrero, marzo, abril, julio, agosto y septiembre son similares oscilando entre $0.2\text{m}^3/\text{s}$ en la segunda temporada seca del año y $0.3\text{m}^3/\text{s}$ en los primeros meses, esto es debido al caudal base. Según la distribución, los caudales mínimos en todo el periodo simulado se concentran en enero, febrero y marzo. No

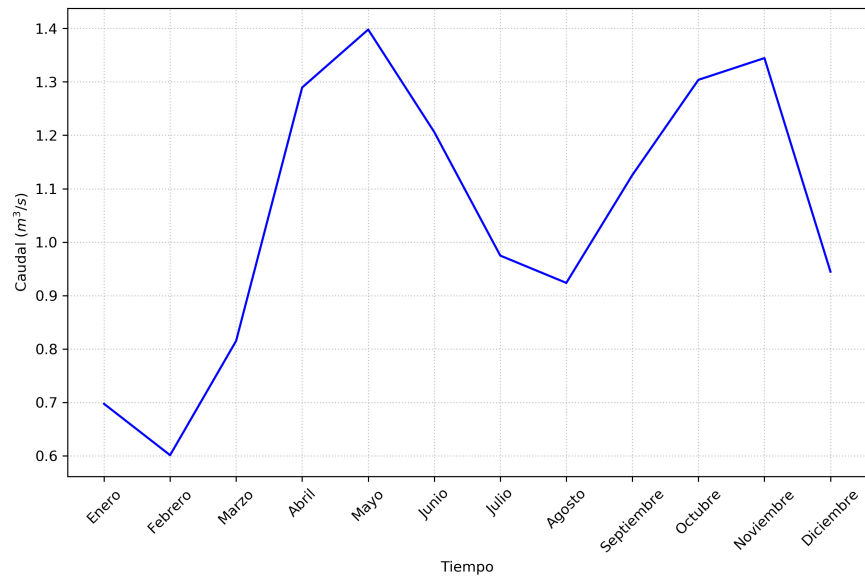


Figura 7.3: Caudal mensual multianual simulado para el periodo 2014-2019.

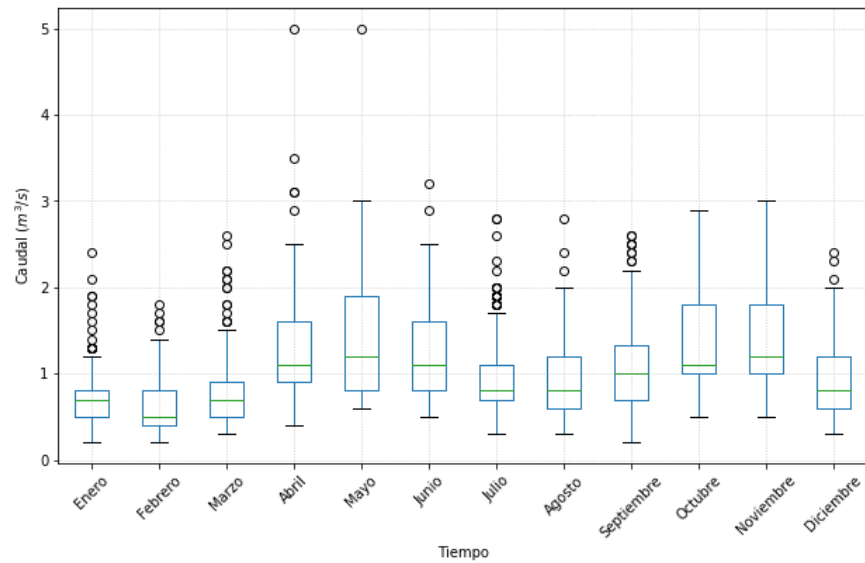


Figura 7.4: Distribución mensual del caudal diario simulado para el periodo 2014-2019.

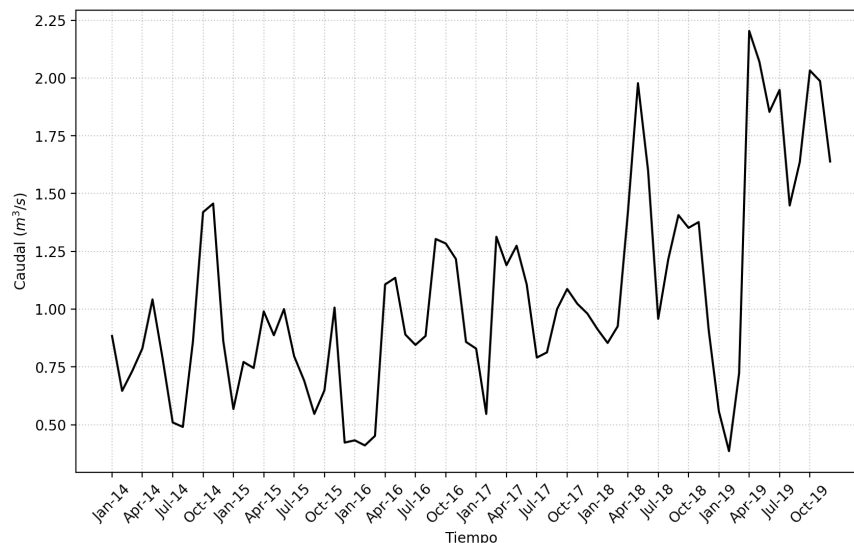


Figura 7.5: Caudal medio mensual simulado para el periodo 2014-2019.

Tabla 7.3: Precipitación media acumulada anual de la microcuenca Santa Elena.

Año	Precipitación (mm)
2014	2081
2015	1388
2016	2197
2017	2424
2018	2440
2019	2017

obstante, en enero y marzo se observan algunos datos atípicamente altos. En el mes de abril y mayo se presenta una distribución muy amplia de los datos, se observa que los datos comprendidos entre el cuartil superior y el máximo (25 %) presenta un rango desde $2.5m^3/s$ hasta $5.0m^3/s$ y $3.02m^3/s$ hasta $5m^3/s$ respectivamente. El mes de febrero, el más seco, presenta en todo el periodo simulado caudales entre $0.2m^3/s$ hasta $1.8m^3/s$.

La serie de tiempo mensual de caudales (figura 7.5) tiene picos en el mes de abril de 2019 y el mes de mayo de 2018 con $2.2m^3/s$ y $2.0m^3/s$. Con respecto a los meses de caudales mínimos se identificaron los meses de enero, febrero, marzo, julio y agosto como los meses en los cuales se observan mayor recurrencia de caudales bajos, tal y como se evidencia en la distribución de la figura 7.4. La precipitación anual acumulada indica que los años de menor a mayor lluvia se distribuyen de la siguiente manera: 2015, 2019, 2014, 2016, 2017 y 2018 (tabla 7.3).

El 2015 presenta caudales medios mensuales de 0.42 , 0.55 y $0.65m^3/s$ en los meses de diciembre, septiembre y octubre respectivamente, en la segunda temporada seca, con precipitaciones acumuladas de 30.5 , 79 y 157 mm. Mientras en la primera, de enero a marzo va de 0.57 a $0.74m^3/s$. El promedio mensual indica un caudal mínimo de $0.38m^3/s$ para el mes de febrero de 2019, este mes tuvo $73.2mm$ de precipitación. Según la simulación para este mismo año (2019), se presentaron caudales medios mensuales de $0.56m^3/s$ en el mes de enero. También, el caudal se mantuvo entre $0.56m^3/s$ y $0.72m^3/s$ en enero, febrero y marzo.

Subcuenca	Área (km)	Precipitación (mm)	Percolación (mm)	Escurrentía directa (mm)
1 (San Pedro, San Ignacio)	5.2	2242.5	842.7	323.2
2 (Yarumo, Santa Teresa)	3.3	2294.3	328.9	847.8
3 (Santa Bárbara)	2.7	1951.7	175.2	812.8
4 (La Bocaná)	4.0	1954.1	596.7	410.3
5 (La Espadera)	5.1	2107.1	638.5	451.8
Promedio		2110.0	516	569.2

De manera similar, para el año 2014, los caudales mensuales más bajos se produjeron en la segunda época seca del año, en los meses de agosto y julio con precipitación acumulada de 145 y 51 mm y caudales de 0.50 y $0.51m^3/s$. Finalmente, los caudales mínimos mensuales del año 2016 fueron de entre $0.41m^3/s$ y $0.45m^3/s$ para los meses de enero y febrero marzo, respectivamente, con precipitaciones de 68, 72y96mm.

Por otro lado, los años con mayor precipitación en el periodo simulado son 2017 y 2018. Siendo el mes de febrero el mes con menos caudal de 2018 con $0.85m^3/s$ seguido de diciembre y enero con $0.91m^3/s$ y $0.92m^3/s$. El mes de febrero de 2018 llovió 75mm. En el año 2017 los caudales mínimos que se presentaron son $0.55m^3/s$ y $0.79m^3/s$ en los meses de febrero y julio. El $Q_{95} = 0.36m^3/s$, $Q_{90} = 0.45m^3/s$, y $Q_{85} = 0.62m^3/s$.

7.3. Balance hídrico

El modelo HEC-HMS permite realizar un análisis de diferentes variables del comportamiento hidrológico de la cuenca por separado, incluyendo las variables separadas por cada subcuenca. En este caso, se seleccionaron los siguientes componentes básicos: precipitación, percolación y escurrentía superficial. En la tabla 7.3 se puede observar el promedio anual multianual del periodo 2014-2019 para cada una de las variables mencionadas en unidades de mm. La evaporación potencial es de 1735 mm para cada año y la real es el 51 % de la precipitación (1146 mm).

7.3.1. Precipitación

En la simulación de 2014-2019, se obtuvo que la precipitación promedio anual multianual para la microcuenca Santa Elena es de 2248 mm y de 187 mm por mes, con un régimen bimodal. Se observó que los años 2017 y 2018, son los que presentan niveles de lluvia más altos en el periodo analizado mientras que los años 2014 y 2015 son los menos lluviosos.

Se observó que los niveles de lluvia por subcuenca presentan un patrón similar, con una desviación estándar de 171.8 mm. Se observan los menores niveles de precipitación en las cuencas 3 y 4 (Santa Bárbara y la Bocaná), cuencas en las cuales se cuenta con menos estaciones climáticas cercanas. En la cuenca llueve aproximadamente $109mm/k^2$.

7.3.2. Percolación

El agua que percola en la capa de agua subterránea puede moverse lateralmente para entrar a ser parte flujo base o dejar la superficie como recarga de acuíferos. La percolación profunda se relaciona con la cantidad de agua infiltrada en las capas superiores del suelo y sus procesos anteriores, sin embargo, para este proceso, en toda la cuenca no se tiene en cuenta ninguna variabilidad espacial en los parámetros relacionados con este proceso.

La subunidad 2 presenta una percolación por unidad de área de 101.1km^2 aproximadamente igual a la 3 de 100.8km^2 . Seguida de la 5 con $125.9\text{mm}/\text{km}^2$. La subcuenca 1 y 4 presentan una percolación de $161.1\text{mm}/\text{km}^2$ y $150.3\text{mm}/\text{km}^2$ respectivamente.

7.3.3. Escorrentía directa

En la relación de la precipitación total para toda la cuenca se encontró que el 25 % de ella es escorrentía superficial. Las subcuencas 2 y 3 son las unidades de análisis que presenta mayor nivel de escorrentía directa media multianual a pesar de no ser las subcuencas de mayor área, tienen como cobertura principal tejido urbano que genera un nivel de escorrentía directa mayor al de las coberturas menos transformadas. El menor rendimiento de escorrentía directa lo tiene la subcuenca 1 con $0.37\text{L}/\text{s} * \text{km}^2$ seguido de la 5 con $0.55\text{L}/\text{s} * \text{km}^2$. En ambas cuencas predomina el mosaico de pastos, mientras que en la 5 también se tienen plantaciones forestales. Finalmente, el rendimiento superficial de la cuenca 3 es de $3.4\text{L}/\text{s} * \text{km}^2$ donde la mayor parte de la cobertura es tejido urbano y vegetación secundaria o en transición.

7.4. Estimación de la demanda hídrica actual

Los sistemas de acueducto mencionados en el capítulo 5 en la sección 5.8 cuentan con un registro de usuarios y población abastecida obtenido por Concesión Túnel Aburrá-Oriente (2013) para el año 2013. El cálculo de la dotación bruta se realizó para cada acueducto teniendo en cuenta la proyección de población abastecida para el año 2020. Se tomaron las proyecciones para el corregimiento de Santa Elena del Municipio de Medellín según el DANE al año 2033, con una tasa de crecimiento anual de 1.01 %. La dotación neta y las pérdidas fueron tomadas como las establecidas en el RAS 2000. De la misma forma, se toman los coeficientes de consumo máximo diario y consumo máximo horario establecidos para finalmente calcular el caudal medio diario, caudal máximo diario y caudal máximo horario. Estas estimaciones son realizadas sin considerar usuarios informales no documentados.

El caudal concesionado y estimado no concesionado total es de $199.58\text{L}/\text{s}$ mientras que el caudal de uso medio diario según la población y dotación $133.97\text{L}/\text{s}$ en toda la extensión de la cuenca hasta la salida tomada en este estudio en el Barrio Ocho de Marzo. La demanda de uso de agua no es uniforme en todas las horas del día ni durante todas las épocas del año, por lo tanto los caudales máximos diarios y caudales máximos horarios fueron calculados con un total de $169.83\text{L}/\text{s}$ como caudal máximo diario y $266.51\text{L}/\text{s}$ como caudal máximo horario. El caudal medio de la cuenca es $1.053\text{m}^3/\text{s}$ o lo que es $1053.97\text{L}/\text{s}$. El caudal mínimo simulado en el periodo de 2014-2019 fue de $203.5\text{L}/\text{s}$ y el $Q_{95} = 357.75\text{L}/\text{s}$. Es decir, algunas veces, en la totalidad de la cuenca se supera la oferta hídrica con respecto a la demanda.

Tabla 7.4: Cálculo de dotaciones neta y bruta, y de los caudales medios diarios para una población proyectada al 2020.

Acueducto	Población abastecida	Nivel de complejidad	Dotación neta (L/hab*día)	Dotación bruta (L/hab*día)	Caudal medio diario (L/s)
Corporación Acueducto San Pedro	5246	Medio	120	160	9.715
Acueducto Multiveredal Santa Elena	5628	Medio	120	160	10.422
Corporación de Asociados del Acueducto las Flores	1188	Bajo	100	133	1.833
Corporación de acueducto Media Luna	914	Bajo	100	133	1.410
ASUASI	3784	Medio	120	160	7.007
Acueducto Ochode Marzo	1950	Bajo	100	133	3.009
Acueducto JuanPablo II	2626	Medio	120	160	4.863
Acueducto LaPalma	593	Bajo	100	133	0.915
AcueductoBarrios de Jesús	1035	Bajo	100	133	1.597
La Cascada (Planta de Potabilización)	21639	Medio alto	130	173	43.412
Usuarios concesionados y no concesionados	1274	Bajo	100	133	49.790

Tabla 7.5: Cálculo de déficit por concesión para cada cada acueducto.

Subcuenca	Acueducto	Caudal concesionado (L/s)	Caudal medio diario (L/s)	Déficit (L/s)
1	Corporación Acueducto San Pedro	9.04	9.71	-0.67
	ASUASI	4.82	7.01	-2.19
	Acueducto Multiveredal Santa Elena	11.14	10.42	0.00
3	Corporación de acueducto Media Luna	1.03	1.41	-0.38
	La Cascada (Planta de Potabilización)	120	43.41	0.00
	Corporación de Asociados del Acueducto las Flores	2.02	1.83	0.00
5	Acueducto Ocho de Marzo		3.01	-
	Acueducto Juan Pablo II		4.86	-
	Acueducto La Palma	0.73	0.92	-0.19
	Acueducto Barrios de Jesús	1.01	1.60	-0.59

Capítulo 8

Conclusiones

El modelo HEC-HMS permite usar datos meteorológicos y características físicas de la cuenca de estudio disponibles para la simulación continua y estimación de los caudales de importancia para la estimación de la oferta hídrica de la cuenca Santa Elena, la cual presenta problemas de abastecimiento en las temporadas más secas, principalmente la primera temporada del año en los meses de febrero y marzo. También es posible realizar un análisis de los componentes hidrológicos por separado teniendo en cuenta los submodelos que se utilizaron para su representación. Además, se puede acoplar con HEC-RAS, modelo muy utilizado en Colombia para la modelación hidráulica.

Se encontró que diferentes modelos son usados comúnmente en experimentos de modelación hidrológica alrededor del mundo, los Andes y Colombia. Los modelos como PMRS, TETIS, SWAT o WEAP son capaces de estimar la oferta hídrica y representar el comportamiento hidrológico de las diferentes cuencas en las cuales son usados. No se encontró un modelo desarrollado específicamente para la región de Colombia, por lo tanto, se hacen necesarias revisiones, simulaciones y comparación con diferentes modelos para determinar cuál presenta mayor afinidad con la cuenca de estudio.

El rendimiento del modelo HEC-HMS en la cuenca Santa Elena fue evaluado usando índices recomendados en la literatura para la calificación de la calibración y validación, considerando los objetivos del estudio. El resultado fue satisfactorio según la calificación de la mayoría de los índices usados. Sin embargo, la validación determinó un desempeño insatisfactorio según dos de los índices usados. El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe fue de 0.61 y 0.50 para los periodos de calibración y validación respectivamente, lo que indica un desempeño satisfactorio. El porcentaje de error en el volumen para la calibración y validación son de 6.96 % y 3.90 %, respectivamente, indicando muy buen ajuste del modelo. Los índices que no revelan un buen rendimiento del modelo son el coeficiente de correlación (R^2) y el RSR. Dichos índices son satisfactorios en la calibración con $R^2=0.55$ y $RSR=0.68$ y son insatisfactorios en la validación con $R^2=0.43$ y $RSR=0.76$. Los resultados obtenidos pueden deberse a la falta de datos hidrológicos en un periodo de tiempo mayor, ya que se recomienda que la calibración aborde periodos tanto normales como secos y húmedos. Para este estudio es importante la oferta hídrica por lo que la concordancia con los volúmenes simulados totales, son relevantes y por lo tanto los resultados del modelo son aceptables de acuerdo con los objetivos del modelo.

El desempeño del modelo podría ser mejorado usando una mejor refinación de los datos, lo que incluye diferentes técnicas de interpolación de la precipitación que tengan en cuenta la topografía y una estimación completa de los datos de evapotranspiración. También, se encontró que cuando no se

cuenta con caudales observados es posible aplicar técnicas para la predicción en este tipo de cuencas, como por ejemplo la regionalización de modelos hidrológicos. El software presenta limitaciones en la calibración con el método Contenido de Humedad del suelo Grillado, ya que no es posible calibrar la mayoría de parámetros del suelo. Esto requiere de información de alta confiabilidad. Además, es importante tener en cuenta que no se tienen mediciones directas de caudal, en cambio, se realizó una estimación con datos de nivel, velocidad y la sección transversal del sitio de medida.

Con respecto al periodo de simulación de 2014 hasta 2019, el comportamiento bimodal de la precipitación es representado. El caudal medio de la cuenca es de $1.053m^3/s$ con un $Q_{95} = 0.357m^3/s$ y $Q_{90} = 0.448m^3/s$. El 77% del caudal total (33 millones de m^3 por año) corresponde al caudal base (25 millones de m^3) y el 23% restante a la escorrentía superficial.

Las extracciones estimadas para el 2020, con una proyección de población aproximada (tasa de crecimiento desde 2013 de 1.01%), son de $0.134m^3/s$. El caudal concesionado por los acueductos y usuarios es de $0.2m^3/s$ teniendo en cuenta que no se tiene información del Acueducto Ocho de Marzo y Juan Pablo II. La cuenca 5 (Quebrada La Espadera) presenta un déficit de concesión de aguas en todos los acueductos instalados con los que se cuenta información. Es de suma importancia considerar que estas extracciones no suponen usuarios informales no documentados.

Los resultados de encontrados en el balance hídrico corresponden a lo esperado según las coberturas y las características del suelo. Las subcuencas con mayor potencial hídrico de acuerdo con el balance hídrico realizado, corresponden a las cuencas 1, 4 y 5 correspondientes a las quebradas Santa Elena parte alta (Q. San Pedro, Q. San Ignacio), Quebrada La Bocaná y la Quebrada La Espadera o Bizarro, respectivamente. Dichas cuencas tienen el mayor potencial de infiltración debido a sus características. Con respecto al caudal base, se requieren realizar ajustes al submodelo que representa el caudal base para analizar las estimaciones distribuidas.

La presente simulación se realizó con datos no actualizados de cobertura y suelos. Teniendo en cuenta esto y que el corregimiento de Santa Elena presenta dinámicas de urbanización a un ritmo acelerado, puede significar cambios en cobertura y las características del suelo, esto puede generar cambios fisicoquímicos y por lo tanto cambiar la respuesta hidrológica de dichas unidades. Por tal motivo es importante realizar una actualización y mejora tanto de la información de suelo como la información de coberturas.

Se considera que el modelo HEC-HMS permite evaluar de forma detallada diferentes variables dentro del comportamiento hidrológico de la cuenca. Aporta diferentes metodologías que pueden ser útiles en zonas heterogéneas y de poco desarrollo en términos de softwares de modelación hidrológica. También presenta estimaciones de los parámetros alcanzables con información disponible públicamente.

Finalmente, se considera de relevante importancia establecer una buena red hidrométrica en distintas porciones de la cuenca para y tener un inventario de usuarios actualizado. También es importante seguir evaluando la demanda hídrica y adoptar políticas que garanticen el abastecimiento a la población y el equilibrio ecológico.

Referencias

- AgriLife, T. A. (2020). Epic and apex models. <https://epicapex.tamu.edu/>.
- Ahbari, A., Stour, L., Agoumi, A., & Serhir, N. (2018). Estimation of initial values of the hms model parameters: application to the basin of bin el ouidane (azilal, morocco). *J Mater Environ Sci*, 9(1), 305–317.
- Alcaldía de, M. (2011). *Segundo Levantamiento Integrado de Subcuencas Hidrográficas del Municipio de Medellín*.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., et al. (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Ambrose, B., Beven, K., & Freer, J. (1996). Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity.
- ANLA (2018). Resolución 02033 de 2018.
- Ardila, N. J. M. & García, U. G. M. (2010). *Leyenda nacional de coberturas de la tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia: Escala 1: 100.000*. IDEAM.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*.
- ASCE, Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee, I. & Division, D. (1993). Criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(3), 429–442.
- Azizian, A. (2018). Uncertainty analysis of time of concentration equations based on first-order-analysis (foa) method. *Am J Eng Appl Sci Orig Res Pap*. [https://doi.org/10.3844/ajeassp, 341](https://doi.org/10.3844/ajeassp.341).
- Azmat, M., Laio, F., & Poggi, D. (2015). Estimation of water resources availability and mini-hydro productivity in high-altitude scarcely-gauged watershed. *Water Resources Management*.
- Azmat, M., Qamar, M. U., Ahmed, S., Hussain, E., & Umair, M. (2017). Application of HEC-HMS for the event and continuous simulation in high- altitude scarcely-gauged catchment under changing climate. *European Water*.
- Bagstevold, L. Ø. (2015). Hydrological modelling of the ilabekken catchment, and flood simulations of ilabekken using hec-hms and hec-ras. Master's thesis, NTNU.
- Barbosa Cadena, C. D., Pérez Martínez, J. C., et al. (2018). Aplicación del modelo de simulación hidrológica e hidráulica hec-hms y hec-ras para la estimación de manchas de inundación a una escala 1: 25.000 en la cuenca del río chicú.
- Bennett, T. H. (1998). *Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. University of California, Davis.
- Beven, K. (1997). TOPMODEL: a critique. *Hydrological Processes*.

- Bomeisl, L. (2017). Nutrient transport conditions in the ecuadorian andes.
- Borden, C., Gaur, A., & Singh, C. R. (2016). Water Resource Software: Applicaiton overview and Review.
- Burman, R. & Pochop, L. O. (1994). Evaporation, evapotranspiration and climatic data. *Developments in atmospheric science*, 22.
- Buytaert, W. & Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25(11), 1784–1799.
- Cabrera-Balarezo, J. J., Timbe-Castro, L. M., & Crespo-Sánchez, P. J. (2019). Evaluation of the HEC-HMS model for the hydrological simulation of a paramo basin. *DYNA (Colombia)*.
- Cardona, B. L. (2016). Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas.
- Chereque Morán, W. (1989). Hidrología: para estudiantes de ingeniería civil.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). Hidrología aplicada.
- Chu, X. & Steinman, A. (2009). Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
- Clark, C. (1945). Storage and the unit hydrograph. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, volume 69 (pp. 1333–1360).: ASCE.
- Colombiano, E. (2016). Otro sector en medellín tendrá racionamiento de agua este lunes y martes.
- Colombiano, E. (2018). Barrio el raicero de florencia. población de la zona rural aumenta sin control.
- Concesión Túnel Aburrá-Oriente, S. (2013). Estudio de impacto ambiental actualizado conexión vial aburrá oriente.
- Corantioquia (2005). Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río aburrá.
- Corantioquia (2015). Actualización del plan de ordenación y manejo de la cuenca del río aburrá.
- Corantioquia (2017). Plan de manejo del área protegida reserva forestal protectora regional alto de san miguel".
- Corcuencas & Cortolima (2019). Actualización del plan de ordenación y manejo integrado de la cuenca del río recio y venadillo capítulo 9.
- Cronshey, R. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical report, US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division.
- Cunderlik, J. (2003). *Hydrologic model selection for the CFCAS project: assessment of water resources risk and vulnerability to changing climatic conditions*. Technical report.
- Cunderlik, J. & Simonovic, S. P. (2004). *Calibration, Verification and Sensitivity Analysis of the HEC-HMS Hydrologic Model CFCAS Project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions*. Technical report.
- CVC (2015). Plan de ordenación y manejo integrado de la cuenca del río la vieja capítulo 9.
- DANE (2010). Perfil sociodemográfico 2005-2015 corregimiento 90 santa elena.
- DANE (2018). Perfil demográfico 2016-2020 corregimiento 90 santa elena.
- Dariane, A. B., Bagheri, R., Karami, F., & Javadianzadeh, M. M. (2020). Developing heuristic multi-criteria auto calibration method for continuous hec-hms in snow-affected catchment. *International Journal of River Basin Management*, 18(1), 69–80.
- Dariane, A. B., Javadianzadeh, M., & James, L. D. (2016a). Developing an efficient auto-calibration algorithm for hec-hms program. *Water resources management*, 30(6), 1923–1937.
- Dariane, A. B., Javadianzadeh, M. M., & James, L. D. (2016b). Developing an Efficient Auto-Calibration Algorithm for HEC-HMS Program. *Water Resources Management*.
- de Desarrollo Económico, M. (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico.
- de Medellín, A. (2014a). *Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín*. Departamento Administrativo de Planeación.

- de Medellín, A. (2014b). *Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín. Documento Técnico de Soporte – Tomo 3c*. Departamento Administrativo de Planeación.
- de Medellín, A. (2015). Plan de desarrollo local corregimiento de santa elena.
- de Medellín, A. & de Planeación, D. A. (2006). Usos del suelo rural documento técnico de soporte pot 2006.
- de Medellín, A. & de Planeación, D. A. (2008). Proceso participativo para la gestión estratégica del corregimiento de santa elena.
- de Medellín, M. & Río, I. M. (1993). *Levantamiento Integrado de Subcuencas Hidrográficas del Municipio de Medellín*.
- De Silva, M., Weerakoon, S., & Herath, S. (2014). Modeling of event and continuous flow hydrographs with hec-hms: case study in the kelani river basin, sri lanka. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(4), 800–806.
- Dematteis, A. & Silva, J. (2014). Actualización y complementación del componente hidrogeológico de los túneles seminario y santa elena de la conexión vial aburrá oriente.
- Dinpashoh, Y., Jhajharia, D., Fakheri-Fard, A., Singh, V. P., & Kahya, E. (2011). Trends in reference crop evapotranspiration over iran. *Journal of Hydrology*, 399(3-4), 422–433.
- Domínguez, M., Esquivel, G., Méndez, A., Mendoza, R., Arganis, J., & Carrizosa, E. (2008). Manual del modelo para pronóstico de escurrimiento. *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico City, Mexico*.
- Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., & Arabi, M. (2007). A hydrologic/water quality model application protocol.
- EPM (2020a). Interrupciones de acueducto en circuitos la cascada y asomadera. <https://www.epm.com.co/site/interrupciones-de-acueducto-en-circuitos-la-cascada-y-asomadera>.
- EPM (2020b). Por disminución de caudal fue necesario interrumpir el servicio de acueducto en los sectores de los barrios el caicedo, la sierra y la cruz. <https://www.epm.com.co/site/home/sala-de-prensa/noticias-y-novedades/por-disminucion-de-caudal-fue-necesario-interrumpir-el-servicio-de-acueducto-10-02-2020>.
- Feldman, A. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*.
- Fleming, M. & Neary, V. (2004). Continuous Hydrologic Modeling Study with the Hydrologic Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering*.
- Garaya, L. V., Goyeneche, O. D. T., & Carrillo, G. A. (2019). Evaluación del modelo de hidrograma unitario scs en la determinación de caudales máximos en cuencas de norte de santander. *Respuestas*, 24(1), 6–13.
- Gassman, P. W., Williams, J. R., Wang, X., Saleh, A., Osei, E., Hauck, L. M., Izaurralde, R. C., & Flowers, J. D. (2010). The Agricultural Policy/Environmental eXtender (APEX) model: An emerging tool for landscape and watershed environmental analyses.
- Gebre, S. L. (2015). Application of the HEC-HMS Model for Runoff Simulation of Upper Blue Nile River Basin. *Journal of Waste Water Treatment & Analysis*.
- Gil, E. G. & Tobón, C. (2016). Hydrological modelling with topmodel of chingaza páramo, colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69(2), 7919–7933.
- Gómez Blanco, J. A. & Cadena, M. C. (2018). Validación d elas fórmulas de evapotranspiración de referencia (eto) para colombia. *IDEAM*.
- Gómez Elorza, Á. J. (2016). Herramientas de modelación y monitoreo para la hidrología de alta montaña colombiana-cuenca de la quebrada calostros-pnn chingaza. *Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola*.
- Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., & Porfiri, M. (2012). Time of concentration: a paradox in modern hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2), 217–228.

- Gyawali, R. & Watkins, D. W. (2013). Continuous hydrologic modeling of snow-affected watersheds in the great lakes basin using hec-hms. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(1), 29–39.
- Halwatura, D. & Najim, M. (2013). Application of the hec-hms model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental modelling & software*, 46, 155–162.
- HEC (1967). Generalized standard project rain flood criteria southern california coastal streams, sacramento. *Soil science society of America Journal*.
- Hernandez, B. A. B. (2012). Manual de hidrología para obras viales basado en el uso de sistemas de información geográfica.
- Huaman Aguirre, R. E. (2018). Respuesta hidrológica distribuida mediante precipitación por satélite trmm en la cuenca del río mantaro.
- IDEAM (2018a). *Estudio Nacional del Agua*.
- IDEAM (2018b). *Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGAC (2007). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras*. Departamento de Antioquia. Instituto Geológico Agustín Codazzi.
- IIAMA (2020). Tetis.
- Jaramillo Uribe, M., Vélez Upegui, J. I., & Vélez Otálvaro, M. V. (s.f.). Estimación de caudales mínimos usando un modelo distribuido de tanques. *Escuela de Geociencias y Medio Ambiente*.
- Jeziorska, J. & Niedzielski, T. (2018). Applicability of TOPMODEL in the mountainous catchments in the upper Nysa Kłodzka river basin (SW Poland). *Acta Geophysica*.
- Johnstone, D., Cross, W. P., et al. (1949). Elements of applied hydrology.
- Kaffas, K. & Hrissanthou, V. (2014). Application of a continuous rainfall-runoff model to the basin of kosynthos river using the hydrologic software HEC-HMS. *Global Nest Journal*.
- Kull, D. W. & Feldman, A. D. (1998). Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*.
- Legates, D. R. & McCabe Jr, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, 35(1), 233–241.
- Loaiza, J. C. & Valentijn, R. (2011). Desarrollo de modelos hidrológicos y modelación de procesos superficiales. caso de estudio para vertientes de alta montaña. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 23–31.
- London, I. C. (2020). Topmodel. <https://paramo.cc.ic.ac.uk/node/7>.
- Londoño, C. (2001). Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales-caracterización-planificación-administración. *Ibagué: Universidad del Tolima*, (pp.40).
- Lüke, A. & Hack, J. (2018). Comparing the applicability of commonly used hydrological ecosystem services models for integrated decision-support. *Sustainability*, 10(2), 346.
- Magaña-Hernández, F., Bâ, K. M., & Guerra-Cobián, V. H. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia*.
- Markstrom, S. L., Regan, R. S., Hay, L. E., Viger, R. J., Webb, R. M. T., Payn, R. A., & LaFontaine, J. H. (2015). PRMS-IV, the Precipitation-Runoff Modeling System, Version 4. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6: Modeling Techniques*.
- MAVDT (2010). Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico.
- Mesa Sánchez, Ó. J., Botero Hernández, B., et al. (s.f.). Errores detectados al estimar escorrentía directa, mediante algunos métodos de hidrogramas unitarios sintéticos. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (8), 27–38.
- Metropolitana, Á. (s.f.). Programa para el mejoramiento integral de la microcuenca santa elena.
- Ministerio de Vivienda, C. y. T. (2017). Resolución 330 de 2017.
- Moore, C. & Doherty, J. (2005). Role of the calibration process in reducing model predictive error. *Water Resources Research*, 41(5).

- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Nash, J. & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part i — a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282 – 290.
- of Public Works, D. (1995). California culvert practice, second.
- OMM (1994). Guía de prácticas hidrológicas, adquisición y proceso de datos, análisis, medición y otras aplicaciones.
- OMM (2018). *Guía de prácticas climatológicas*. Organización, Meteorológica Mundial.
- Ortiz, O. (2004). Evaluación hidrológica. *HIDRORED–Red Latinoamericana de Micro energía. Editorial ITDG, Perú*.
- Osorio Yepes, S. et al. (2018). *Simulación de sedimentos mediante un modelo hidrológico distribuido utilizando información indirecta. Caso de estudio: Cuenca del Río Grande, Antioquia*. PhD thesis, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Otálvaro Barco, M. (2016). *Consideraciones generales para realizar el diseño hidrológico e hidráulico de obras de drenaje para vías de bajos volúmenes de tránsito. Caso de estudio pista de prueba Urrao-Antioquia*. PhD thesis.
- Ouédraogo, W. A. A., Raude, J. M., & Gathenya, J. M. (2018). Continuous modeling of the Mkurumudzi River catchment in Kenya using the HEC-HMS conceptual model: Calibration, validation, model performance evaluation and sensitivity analysis. *Hydrology*.
- Pérez, O. (1985). Determinación del tiempo de concentración para estimar la avenida de diseño. *Ingeniería civil (La Habana), Cuba*, (pp. V36).
- Peters, J. C. & Easton, D. J. (1996). Runoff simulation using radar rainfall data. *Water Resources Bulletin*.
- Pilgrim, D. & McDermott, G. (1981). Design floods for small rural catchments in eastern new south wales. In *First National Local Government Engineering Conference 1981: Reprints of Papers* (pp. 138).: Institution of Engineers, Australia.
- QGIS (2020). Análisis espacial (interpolación).
- Ramírez López, P. A., Velasco Mateus, K. D., et al. (2019). Modelación hidrológica a la cuenca el ható (cundinamarca) comparando los diferentes resultados de pérdidas por infiltración utilizando la herramienta computacional hec-hms.
- Refsgaard, J. & Storm, B. (1995). Mike she (chapter 23).
- Reyes Trujillo, A., Barroso, F. U., & Carvajal Escobar, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfológica de cuencas hidrográficas*. Programa Editorial UNIVALLE.
- Rodríguez, G., González, H., Zapata, G., & Cossio, U. (2005). Geología de la plancha 147 medellín oriental. *Ingeominas, Bogotá*.
- Rodríguez Santos, J. M. (2014). Application of interpolation methods for the calculation of precipitation through modeling and spatial analysis geostatistical for department cundinamarca.
- S., R., Kenning, B., & Sunnell, G. (1979). Estimating design flows for urban drainage.
- Salimi, E. T., Nohegar, A., Malekian, A., Hoseini, M., & Holisaz, A. (2017). Estimating time of concentration in large watersheds. *Paddy and Water Environment*, 15(1), 123–132.
- Saxton, K., Rawls, W., Romberger, J. S., & Papendick, R. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil science society of America Journal*, 50(4), 1031–1036.
- Saxton, K. E. & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569–1578.
- Saxton, K. E. & Willey, P. H. (2005). The spaw model for agricultural field and pond hydrologic simulation.
- Scharffenberg, W. (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS User’s Manual. *U.S. Army*

- Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center.*
- SEI (2020). Water evaluation and planning. <https://swat.tamu.edu/>.
- Sieber, J. (2006). Weap water evaluation and planning system.
- Singh, V. P. & Frevert, D. K. (2005). *Watershed models*. CRC Press.
- Skahill, B. E. (2006). *Potential improvements for HEC-HMS automated parameter estimation*. Technical report, ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER VICKSBURG MS COASTAL AND HYDRAULICS LAB.
- Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of hydrology*, 240(3-4), 147–186.
- Smith, R. & Otalvaro, M. V. V. (1997). *Hidrología de Antioquia*. Secretaria de obras publicas departamentales.
- Smith, R. A. & Rendón, L. D. (1997). Análisis comparativo de los métodos de estimación del hidrograma unitario.pdf. *Avances en Recursos Hidráulicos*.
- Suárez Díaz, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Number 551.302 Su773c Ej. 1. Universidad Industrial de Santander.
- Tamayo Maya, L. Á. et al. (2011). Análisis de sensibilidad de parámetros geomorfológicos y climatológicos en modelos lluvia escorrentía. B.S. thesis, Universidad EAFIT.
- TAMU (2020). Swat. <https://swat.tamu.edu/>.
- Tassew, B. G., Belete, M. A., & Miegel, K. (2019). Application of HEC-HMS model for flow simulation in the lake Tana Basin: The case of Gilgel Abay Catchment, upper blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrology*.
- Temez, J. (1978). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Dirección General de Carreteras.
- Unesco (2019). Water security and the sustainable development goals.
- USACE (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual. *U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center*.
- USACE (2018). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual. Version 4.3*.
- Valencia, C. & Zuluaga, O. (1981). Estudio preliminar del tiempo de concentración en algunas cuencas de antioquia.
- Vargas, D. E., Puentes, Á. P., Sánchez, J. L., & Estévez, J. E. (s.f). Descripción de las condiciones ecohidrológicas actuales de los humedales de la zona norte del municipio de la dorada-caldas.
- Vélez, M. V., Quintero, W., & Delgado, J. P. (2006). Implementación del modelo MG para Antioquia y el Eje Cafetero. *Avances en Recursos Hidráulicos*.
- Vélez Upegui, J. & Botero Gutiérrez, A. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada san luis, manizales (estimation of the time of concentration and the lag time at san luis creek basin, manizales). *Dyna*, 165, 59.
- Verma, A. K., Jha, M. K., & Mahana, R. K. (2010). Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. *Paddy and Water Environment*.
- Villón, M. (2004). Introducción a la Hidrología. In *Hidrología*.
- Wagener, T., Wheeler, H., & Gupta, H. V. (2004). *Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments*. World Scientific.
- X. Wang, J. R. Williams, P. W. Gassman, C. Baffaut, R. C. Izaurralde, J. Jeong, & J. R. Kiniry (2012). EPIC and APEX: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*.
- Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A., & Galbraith, H. (2005). Weap21: A demand, priority, and preference-driven water planning model: 2. aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water Int*, 30, 501–512.
- Yaykiran, S., Cuceloglu, G., & Ekdal, A. (2019). Estimation of water budget components of the

- Sakarya River basin by using the WEAP-PGM model. *Water (Switzerland)*.
- Zhang, X., Hörmann, G., Fohrer, N., & Gao, J. (2012). Parameter calibration and uncertainty estimation of a simple rainfall-runoff model in two case studies. *Journal of Hydroinformatics*, 14(4), 1061–1074.
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W., & Morgan, K. T. (2010). Step by step calculation of the penman-monteith evapotranspiration (fao-56 method). *Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida*.