



**EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DEL CAMBIO DE COBERTURA Y SU INCIDENCIA EN LOS
CAUDALES MENSUALES DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO JAMUNDÍ**

**PRESENTADO POR:
DANIEL ALEJANDRO ESCOBAR ESCOBAR**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO
DE INGENIERO AGRICOLA**

**PROGRAMA DE INGENIERIA AGRICOLA
ESCUELA EIDENAR
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL VALLE**

**CALI, COLOMBIA
2019**



**EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DEL CAMBIO DE COBERTURA Y SU INCIDENCIA EN LOS
CAUDALES MENSUALES DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO JAMUNDÍ**

**PRESENTADO POR:
DANIEL ALEJANDRO ESCOBAR ESCOBAR**

**DIRECTOR:
ANDRÉS FERNANDO ECHEVERRÍ**

Ingeniero Agrícola, MSc. PhD

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO
DE INGENIERO AGRÍCOLA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA EIDENAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DEL VALLE**

**CALI, COLOMBIA
2019**

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo General	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	MARCO TEÓRICO	12
3.1	Ciclo Hidrológico.....	12
3.2	Balance Hidrológico.....	12
3.3	Cuenca Hidrográfica	12
3.4	Modelo Hidrológico.....	13
3.5	Modelo SWAT.....	14
3.6	Parámetros de Entrada al Modelo	14
3.6.1	Cobertura vegetal.....	15
3.6.2	Propiedades del suelo	15
3.6.3	Modelo digital de elevación (DEM)	16
3.7	Unidad de respuesta hidrológica (HRU)	16
3.8	Métodos de Evaluación de Modelos.....	16
3.8.1	Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	16
3.8.2	Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS)	17
3.8.3	Coeficiente PBIAS	17
4	ESTADO DEL ARTE	18
5	METODOLOGÍA.....	19
5.1	Descripción de la zona de estudio.....	19
5.2	Caracterización de la Cuenca	20
5.2.1	Delimitación de la cuenca	20
5.2.1.1	Caracterización morfológica.....	20
5.2.2	Información hidrológica	21
5.2.2.1	Selección de estaciones hidrográficas.....	21
5.2.2.2	Análisis Exploratorio de Datos (AED).....	22
5.2.3	Caracterización de Suelos	22
5.2.3.1	Asignación Grupo Hidrológico.....	23
5.2.4	Uso de Suelo.....	24
5.3	Modelación Hidrológica	24
5.3.1	Modelación Línea Base (LB)	24
5.3.2	Análisis de Sensibilidad, Calibración y Validación	28
5.4	Modelación Escenarios	29

5.4.1	Planteamiento de Escenarios	29
5.4.2	Simulación de Escenarios	29
5.5	Flujograma de la Metodología	29
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
6.1	Línea Base.....	30
6.1.1	Análisis de Sensibilidad y Calibración	30
6.1.2	Validación	33
6.1.3	Producción Hídrica por HRU.....	34
6.2	Modelación de Escenarios.....	35
7	CONCLUSIONES	40
8	RECOMENDACIONES	41
9	BIBLIOGRAFÍA	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de la información utilizada para desarrollar el presente estudio.....	15
Tabla 2. Investigaciones anteriores relacionadas al presente estudio.	18
Tabla 3. Parámetros Morfométricos	21
Tabla 4. Listado de estaciones presentes en la cuenca del río Jamundí.....	21
Tabla 5. Interpretación de los coeficientes estadísticos para la calibración y validación.....	29
Tabla 6. Parámetros obtenidos del análisis de sensibilidad.....	30
Tabla 7. Resultados calibración de la cuenca.....	31
Tabla 8. Resultados de la Calibración de la estación Puente-Carretera, Río Jamundí.....	32
Tabla 9. Resultados de la Validación de la estación Puente-Carretera, Río Jamundí.	34
Tabla 10. Características generales de la cuenca.....	34
Tabla 11. Comparación entre los escenarios propuestos y los resultados obtenidos del modelo en la línea base.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de cuenca hidrográfica.	13
Figura 2. Ubicación geográfica Cuenca Hidrográfica del Río Jamundí.	19
Figura 3. DEM cuenca hidrográfica del río Jamundí.....	20
Figura 4. Distribución geográfica de las estaciones hidrológicas utilizadas.....	22
Figura 5. Clasificación de suelos en la cuenca hidrográfica del río Jamundí.....	23
Figura 6. Cobertura vegetal o uso de suelo más representativos de la cuenca del río Jamundí.....	24
Figura 7. Tabla de relación entre códigos y clasificación de suelos y coberturas, respectivamente.	25
Figura 8. Esquema de cuenca y subcuencas determinadas por ArcSWAT.....	25
Figura 9. Mapa de HRU's en la cuenca hidrográfica.	26
Figura 10. Formato entrada de datos de precipitación.	27
Figura 11. Formato entrada de datos de temperatura.....	27
Figura 12. Formato de información para ubicación de estaciones pluviométricas.	28
Figura 13. Formato de información de ubicación de estaciones meteorológicas.	28
Figura 14. Flujograma de la metodología.....	30
Figura 15. Calibración-Promedio mensual del Caudal medido vs simulado, en la cuenca del Río Jamundí para los años 2000 a 2010. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 16. Validación- Promedio mensual del caudal medido vs simulado, en la cuenca del río Jamundí para los años 2011 a 2014. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 17. Promedio mensual de producción hídrica por HRU para el año 2012 de la cuenca del Río Jamundí.	35
Figura 18. Comparación entre los valores obtenidos de la modelación de la línea base, el escenario positivo y el escenario negativo. Fuente: Elaboración propia.....	36
Figura 19. Producción hídrica, expresada en mm, por subcuenca de la cuenca del río Jamundí para el año 2012 en la línea base. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 20. Producción hídrica, expresada en mm, por subcuenca de la cuenca del río Jamundí para el año 2012 en el escenario positivo. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 21. Producción hídrica, expresada en mm, por subcuenca de la cuenca del río Jamundí para el año 2012 en el escenario negativo. Fuente: Elaboración propia.....	38

DEDICATORIA

A mis padres Beatriz y Alejandro quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y dedicación, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Valle por su compromiso en la formación y desarrollo estudiantil; me brindó los espacios y excelentes profesores para mi crecimiento profesional.

Especial agradecimiento a mi Director de tesis Andrés Fernando Echeverry por hacer posible este proyecto, por su tiempo, confianza, y constante apoyo.

A la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca por su buena gestión de la información sobre nuestro territorio.

Al Profesor Norberto Urrutia y los integrantes del Grupo REGAR por acogerme y brindarme el espacio para realizar mi investigación.

A Julián Solís y Juliana Lozano por compartirme su tiempo y experiencia en el manejo del software.

A Mayra Alejandra Mejía por su constante apoyo, su atención en los detalles, compañía, y oportuna voz de aliento; Su luz.

A mis Padres Beatriz Escobar y Alejandro Escobar, por ser los principales promotores de mis sueños; que con su esfuerzo y buen ejemplo me enseñaron el valor de la educación, y con dedicación hicieron posible este momento.

A mis amigos Juliana Arias y Rodrigo Jiménez por su apoyo, y por compartir conmigo el valor de la amistad.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación evaluó la incidencia del cambio de coberturas en los caudales generados por la cuenca del río Jamundí en inmediaciones de la estación limnigráfica Puente-carretera al cierre de la cuenca, estableciendo un escenario positivo y negativo desde la conservación, utilizando información de suelos, coberturas, precipitación y temperatura, brindada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC); Utilizando el software de modelación hidrológica SWAT.

Metodológicamente se caracterizó la cuenca del río Jamundí en su línea base utilizando un registro de temperatura, caudales y precipitación desde el año 1996 al 2014, el estudio de suelos semidetallado para cuencas priorizadas en el Valle del Cauca, y el uso de suelos de la cuenca; variando posteriormente la proporción de coberturas boscosas y pastoriles, con especial presencia en la rivera de los ríos y la zona montañosa de la cuenca.

El modelo en su línea base obtuvo resultados satisfactorios en función del coeficiente de PBIAS, RMSE y Nash-Sutcliffe, con valores para la etapa de calibración de 0.46, 2.78, y 5.80 respectivamente, y 0.58, 2.74 y 3.57 para la etapa de validación, ajustándose satisfactoriamente a los caudales mensuales generados por la cuenca. Los resultados obtenidos en los escenarios propuestos fueron aceptables puesto que, aunque no se aprecia una diferencia significativa en los caudales producidos mensualmente en la cuenca, si hay diferencias considerables en la producción hídrica por subcuencas.

1 INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica se presenta de diversas maneras, como modelos físicos, construcciones a escala ajustadas a la realidad; modelos análogos, que equiparan el flujo de agua con el flujo eléctrico, usados en el análisis del flujo sub-superficial; y los modelos matemáticos, definidos a través de ecuaciones generalmente computarizadas donde se interrelacionan los distintos procesos del movimiento del agua en el ciclo hidrológico. En la mayoría de los casos se obtiene como resultado las características del escurrimiento (Díaz, Coral, & Carvajal, 2015).

La simulación hidrológica por computador se ha utilizado ampliamente para el manejo de cuencas hidrográficas en Colombia; en la estimación de caudales en cuencas poco instrumentadas en el Golfo de México, en Sao Pablo-Brasil evaluando la aplicabilidad del modelo SWAT; y evaluando la influencia del cambio de cobertura vegetal en el ciclo hidrológico en España y Ecuador.

En este sentido, la variación de la cobertura vegetal presente en una cuenca hidrográfica causada por la alta presión sobre el recurso, modifica el comportamiento de su respuesta hidrológica durante las precipitaciones, alterando el régimen de caudales, ocasionando la formación de fuertes crecidas en lapsos muy cortos de tiempo, sin contar con el aumento en la descarga de sedimentos (Chavez Jimenez & Gonzalez Zeas, 2015); poniendo en riesgo el sistema socioeconómico, los ecosistemas y la sostenibilidad del recurso mismo (Vásquez, 2015).

En el marco hidrológico Colombia es uno de los países con mayor oferta hídrica, sin embargo cerca del 50 % del recurso es de mala calidad y el acceso es inequitativo con cerca del 70 % de la población concentrada en la cuenca Cauca-Magdalena, la cual genera solo el 11 % del recurso hídrico mientras aporta el 85 % del PIB (Beleño, 2011); Con relación a esto, el departamento del Valle del Cauca presenta conflictos en el uso de suelo con una reducción de las áreas de protección forestal del 84.4% al 45% (IGAC, 2016); lo que ahonda los problemas de disponibilidad del recurso.

A nivel municipal se presenta el caso de Jamundí con una población mayor a 127 mil habitantes, 68 % residentes de la cabecera municipal (DANE, 2005); que comprende en su zona urbana y de expansión un área de 6700 ha, de las cuales, según Martínez, Castrillon, & Ramírez (2014) el 26.5 % se encuentra amenazada y bajo el inherente riesgo de inundaciones causadas por el desbordamiento del río Jamundí y sus tributarios.

Pese al gran porcentaje de área bajo riesgo de inundación, se espera que el municipio tenga para el 2020 una población de 200 mil habitantes dados los continuos proyectos urbanísticos (Diario de Occidente, 2017), agravando la situación ambiental, ya que la CVC en 1997 registraba un déficit de 17801 ha de bosque, cerca de 7586 ha con erosión severa y muy severa, y un crecimiento urbano no acorde (El Tiempo, 1997) como lo evidencia Martínez, Castrillon, & Ramírez (2014); a lo cual se suma el hecho de que Jamundí es considerado un municipio con alto riesgo de incendios forestales (IGAC, 2015).

Los factores y condiciones mencionados anteriormente evidencian las dificultades que enfrenta la cuenca: la falta de control y herramientas para la toma de decisiones por parte de las

autoridades ambientales y territoriales sobre el uso del suelo, la promoción y conservación de caudales, y la prevención ante eventos extremos; con relación al recurso hídrico (Vásquez, 2015).

Por consiguiente evaluar las implicaciones del cambio de cobertura vegetal en la cuenca Jamundí consolida una aproximación a los riesgos potenciales, permitiendo realizar una gestión más integral del recurso hídrico en la planificación y el desarrollo territorial; para así identificar e implementar medidas que mitiguen la vulnerabilidad de los sistemas socio-económicos, considerando los fuertes eventos climáticos que caracterizan la región de América Latina y el Caribe (Corporación Autónoma Regional del Cauca, 2017).

Con esta investigación se estudió la aplicabilidad del modelo hidrológico SWAT en su interfaz gráfica ArcGIS a la cuenca del río Jamundí, y la variación en el régimen de caudales producidos por la cuenca hidrográfica al introducir diferentes configuraciones de cobertura vegetal, con tendencias amigables y agresivas con el ambiente, en términos de generación de recurso hídrico; respondiendo a la pregunta ¿Cómo afecta el cambio de cobertura el régimen de caudales mensuales generados en la cuenca hidrográfica Jamundí?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar hidrológicamente el cambio de cobertura y su incidencia en los caudales mensuales de la cuenca hidrográfica del río Jamundí.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas de suelo y la cobertura vegetal en la cuenca, para los parámetros de entrada en el modelo hidrológico del software ArcSwat.
- Modelar hidrológicamente la cuenca Jamundí a través del software ArcSwat calibrando el modelo con base en los registros hidrológicos de las estaciones en la cuenca.
- Evaluar distintos escenarios en función de la variabilidad de la cobertura vegetal de la cuenca Jamundí, para determinar la incidencia de estos cambios sobre el régimen de caudales.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 Ciclo Hidrológico

Es el proceso continuo de la circulación del agua a través de sus diversos estados dentro de la esfera terrestre, debido a la influencia de la radiación solar, la gravedad, la dinámica de la atmósfera, litosfera, y la biosfera; siendo este el marco de referencia para el estudio del comportamiento del sistema hídrico atmosférico (IDEAM, 2001).

El agua se evapora desde el océano y el continente, hacia la atmósfera donde es transportado por las corrientes de viento en forma de vapor, hasta encontrar condiciones propicias para la condensación; una vez ocurrida la condensación el agua retorna al mar, ya sea en forma de precipitación, escorrentía superficial o subterránea, reiniciándose así el ciclo hidrológico (IDEAM, 2001).

Una vez que el agua se precipita, cae a la superficie terrestre en forma líquida o sólida, parte de la cual es interceptada por la vegetación o evaporada antes de alcanzar la superficie; del agua que efectivamente alcanza la superficie una fracción es nuevamente evaporada hacia la atmósfera, en tanto que la fracción restante es infiltrada o escurrida en el suelo siguiendo la dirección de las mayores pendientes del terreno (IDEAM, 2001).

3.2 Balance Hidrológico

Es la herramienta matemática utilizada para determinar de forma cuantitativa todos los procesos físicos que contribuyen a la formación y variación espacio-temporal del recurso hídrico en una zona determinada, teniendo en cuenta la interrelación y distribución espacial del agua en sus diferentes fases en un lapso de tiempo determinado; basado en la ley física universal de conservación de masas (IDEAM, 2001).

Esta formulación (*ecuación 1*) expresa la igualdad existente entre los aportes de agua que por un lado entran hacia una unidad hidrográfica determinada, y la cantidad de agua que por el contrario es evacuada de la unidad, considerando además las variaciones internas en el almacenamiento de humedad ocurridas durante un periodo de tiempo determinado; permitiendo así, determinar la disponibilidad hídrica natural de las áreas en consideración y conocer el comportamiento de la oferta de agua superficial y subterránea (IDEAM, 2001).

Ecuación 1 Ecuación general del balance hídrico.

$$Q + E = P$$

Donde “Q” hace referencia al Escurrimiento, “E” a la evapotranspiración y “P” a la precipitación.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define el balance hidrológico como el cálculo numérico basado en el principio de que el flujo de salida de una cuenca hidrográfica o masa de agua determinadas debe ser equivalente al flujo de entrada más o menos la variación en el almacenamiento en un periodo de tiempo determinado.

3.3 Cuenca Hidrográfica

La OMM y el organismo de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y Cultura (UNESCO) definen el concepto general de cuenca como “Área que tiene una salida única para su escorrentía superficial” (OMM, 2012). En un sentido más holístico, una cuenca es una unidad de

territorio donde las aguas fluyen mediante un sistema natural interconectado, en el cual interactúan elementos biofísicos-socioeconómicos y culturales (IDEAM, 2013).

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012) define la cuenca hidrográfica como “el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor, que a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente al mar” (Ver Figura 1).

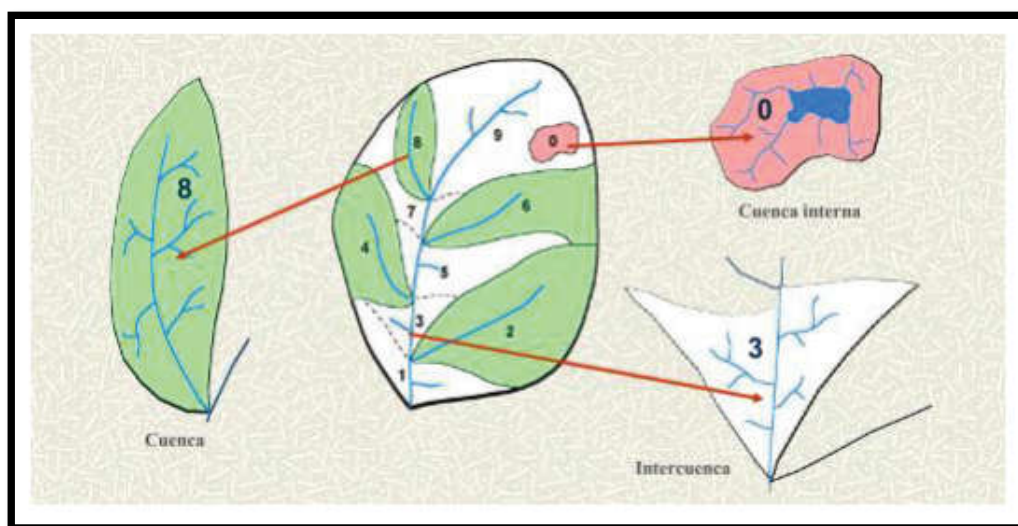


Figura 1. Esquema de cuenca hidrográfica.
Fuente: (IRENA, 2005) Citado por (IDEAM, 2015).

3.4 Modelo Hidrológico

Se entiende como un sistema físico real, donde se analiza la cuenca hidrográfica junto con cada uno de los componentes del ciclo hidrológico, representando este complejo sistema de forma física o matemática, este último como una expresión analítica. Las salidas de un modelo varían en función del objetivo planteado, según se quiera predecir totales diarios, mensuales de escorrentía, o eventos individuales; el resultado en común es el hidrograma de escurrimiento (IDEAM, 2014).

Con el uso de estos modelos se realiza el análisis y prevención de las inundaciones, además es posible introducir hipótesis realistas que ayudan en la toma de decisiones en cuanto al ordenamiento territorial, el diseño de estructuras capaces de soportar situaciones de emergencia; e incluso establecer protocolos de seguridad para la protección civil (IDEAM, 2014).

Actualmente se cuenta con una gran variedad de software especializado para la modelación hidrológica, entre ellos: HEC-HMS, SWAT, PRMS; Donde la elección de un modelo depende del propósito de la investigación, la capacidad de representar el balance hídrico, la resolución espacio-temporal, la información requerida por el modelo, la especialización del investigador en el manejo del software, la aplicabilidad, y los recursos disponibles para la adquisición del modelo. Entre los softwares disponibles, el SWAT califica sobresaliente en los ámbitos antes señalados, especialmente en su resolución espacial; pero limitado por la cantidad de información que exige y experticia en su funcionamiento (Díaz, Coral, & Carvajal, 2015).

3.5 Modelo SWAT

Desarrollado por USDA-ARD (Agricultural Research Service de Estados Unidos), se utiliza ampliamente en la modelación de procesos hidrológicos con heterogeneidad espacial y temporal, permitiendo evaluar la oferta y la demanda hídrica para generar políticas de conservación y manejo de cuencas hidrográficas; relaciona la topografía, con la cobertura, el suelo, y la información hidrometeorológica agrupando esta información por Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) y así abarcar la amplia variedad de condiciones del suelo (Cardona, 2015).

En español “Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua”, es un modelo de base física, de tiempo continuo, que incorpora ecuaciones de regresión para establecer la relación entre las variables de entrada y salida (Alvarado, 2017). Fue desarrollado para predecir el impacto antropogénico en la generación de agua, sedimentos y movimiento de sustancias químicas agrícolas; de forma diaria y en cuencas grandes, con una alta variación de los parámetros antes mencionados y en rangos de tiempo prolongados (Uribe, 2010).

SWAT, como modelo distribuido, tiene una integración con el sistema de información geográfica (GIS) ArcGIS, donde se mezclan las instrucciones del software SWAT para la modelación, con la interfaz gráfica del GIS, generando así un modelo hidrológico que puede llevar consigo cálculos de transporte de sedimentos, y movimiento de sustancias químicas en el suelo; presentando los resultados gráficamente. Esta integración de software recibe el nombre de “ArcSWAT”.

Este Software tiene buena capacidad para reproducir el balance hídrico (Ecuación 2), tiene buena resolución espacial; pero tiene como desventaja la gran cantidad de información que requiere para la simulación (Díaz, Coral, & Carvajal, 2015). Entre la información requerida se encuentran los datos específicos de clima y tiempo, propiedades de los suelos, topografía, vegetación, y prácticas de manejo de suelo en la cuenca, como parámetros de entrada. Los procesos físicos asociados al movimiento del agua y de sedimentos, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, entre otros, son modelados directamente por SWAT (Uribe, 2010).

Ecuación 2. Ecuación general de balance hídrico utilizada por SWAT.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde, SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm), SW_0 el contenido de agua inicial en el día i (mm), t igual a tiempo en días, R_{day} la cantidad de precipitación en el día i (mm), E_a la evapotranspiración en el día i (mm), Q_{surf} es la escorrentía superficial o exceso de lluvia en el día i , W_{seep} el agua acumulada en zona no saturada del perfil del suelo en día i (mm), y Q_{gw} cantidad de flujo de retorno en el día i (mm). (Arnold, 1998).

3.6 Parámetros de Entrada al Modelo

Como parámetros básicos de entrada y de acuerdo con los objetivos de este proyecto de investigación, fue necesario: el modelo digital de elevación (DEM) de la cuenca, información georreferenciada sobre la cobertura vegetal o uso de suelo, características físicas del suelo en la cuenca hidrográfica, información hidrológica sobre precipitaciones, temperatura máxima y mínima, y caudales; estos últimos de forma diaria. Estos parámetros de entrada fueron abonados por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y el Centro de

Investigación para la Caña de Azúcar (Cenicaña). En la siguiente tabla, se describe la información utilizada.

Tabla 1. Descripción de la información utilizada para desarrollar el presente estudio.

Nombre	Formato	Descripción
DEM (Modelo Digital de Elevación)	RASTER	Resolución 2.5 m
Mapa de cobertura y Uso del Suelo	Shape (.shp)	Adaptado por CVC (uso del suelo), 1:25.000.
Mapa de suelos	Shape (.shp)	- Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca, Escalas 1:25.000 (Cuencas priorizadas por la CVC) 2014. - Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Cauca, Escala 1:50.000, IGAC, 2004.
Cartografía base	Shape (.shp)	Centros poblados, municipios, drenaje sencillo; adaptado por IGAC.
Información hidroclimatológica	Texto (.Txt)	Registro diario de estaciones hidrometeorológicas (Precipitación, Temperatura máxima y mínima y aforos de caudal), suministrada por IDEAM y Cenicaña.

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1 Cobertura vegetal

Se definida como “la capa de vegetación que cubre el suelo, y que comprende una amplia gama de biomásas que van desde pastizales hasta las áreas cubiertas por bosques naturales. También se incluyen las coberturas vegetales inducidas que son el resultado de la acción humana, tales como las áreas de cultivos y los territorios artificializados.” (Alvarado, 2017)

La cobertura vegetal cumple un papel fundamental sobre la hidrología de la cuenca, ya que favorece la infiltración, y retiene el transito del agua desde la cobertura hasta el suelo; esto en comparación con el suelo donde hubo remoción de cobertura, donde se favorece la pérdida de suelo, y la escorrentía (Alvarado, 2017).

3.6.2 Propiedades del suelo

El suelo es un componente fundamental del ambiente, constituido por minerales, aire, agua, materia orgánica, y organismos que desempeñan procesos permanentemente; cumpliendo con funciones básicas para la sociedad y el planeta. Cubre la mayor parte de la superficie terrestre, y su composición varia gradualmente con la profundidad, acumulándose en la superficie materiales finos mientras que a mayores profundidades preponderan materiales más gruesos (MINAMBIENTE, 2016).

Entre las propiedades más importantes se encuentra la estructura, profundidad, agua almacenada, textura, color, consistencia, porosidad, densidad, movimiento del agua en el suelo, pH, carbón orgánico, entre otras. La estructura del suelo corresponde a la asociación de limos, arcillas, y arenas, en agregados y posteriormente en peds; esta organización afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular, y la resistencia a la erosión (FAO, 2018).

Por su parte, la textura del suelo se refiere a la proporción de limos, arcillas y arenas presentes; es una propiedad importante, relacionada con la capacidad de retener agua, la aireación, el drenaje, contenido de materia orgánica. Estrechamente relacionado con la textura, encontramos la porosidad del suelo, se define como el porcentaje del volumen de suelo no

ocupado por sólidos, distinguiéndose macroporos y microporos, por donde el agua, el aire y las raíces se desplazan (FAO, 2018).

El suelo es indispensable y determinante para la estructura y funcionamiento del ciclo hidrológico, del aire, y de los nutrientes; por lo cual alberga procesos biogeoquímicos que se hacen indispensables para la vida. Dado su lento proceso de formación se considera un recurso no renovable, puesto que para formarse 1 cm de suelo se puede necesitar desde cientos a miles de años según las condiciones, mientras que el proceso de deterioro se puede lograr en términos de días, afectando ecosistemas, organismos, y comunidades (MINAMBIENTE, 2016).

3.6.3 Modelo digital de elevación (DEM)

El relieve, por su influencia en la evolución y conformación de los suelos es un aspecto fundamental para el mapeo; e influencia los procesos de erosión, lixiviación, hidromorfismo, la profundidad, el contenido de materia orgánica, la humedad y fertilidad del suelo. La caracterización del relieve se puede realizar de forma cualitativa por medio de imágenes y la interpretación visual; o de forma cuantitativa, utilizando superficies asociadas a la elevación, lo que es fundamental en el proceso de la modelación (Munar Vivas, 2010).

Las superficies son fenómenos geográficos en todos los puntos de su extensión, siendo la elevación el ejemplo más común, aunque también pueden representarse de esta forma la temperatura, y concentraciones químicas, entre otras. Estas se suelen modelar con datasets ráster, una matriz de celdas o píxeles organizados en cuadrilla que cubren una región del mundo, donde cada celda representa una unidad de área cuadrada y está asociada a la elevación de la unidad que representa (Esri, 2017).

Cuando se ve un DEM, se observa esta matriz de celdas como una capa con una rampa de color, donde a cada tono se le asocia un valor de elevación y así puede identificarse la elevación de forma cualitativa y cuantitativa, de esta forma un DEM es una representación estadística simple de la superficie continua en el terreno por un gran número de puntos con coordenadas X, Y, y Z conocidas, con un alto potencial para caracterizar el relieve a bajo costo (Esri, 2017).

3.7 Unidad de respuesta hidrológica (HRU)

“Las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) son áreas dentro de la subcuenca que corresponden a todas las únicas posibles combinaciones de cobertura o uso de suelo, propiedades del suelo, y pendiente, en la cuenca.” (Uribe, 2010)

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos, prediciendo de forma específica escorrentías para cada HRU, generando así una sumatoria de escorrentías para toda la cuenca; aumentando la certeza del modelo (Uribe, 2010).

3.8 Métodos de Evaluación de Modelos

3.8.1 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

La raíz del error cuadrático medio permite determinar la magnitud de la desviación de los valores simulados con respecto a los valores observados, comparando punto a punto los valores simulados con los valores observados; el rango de valores puede ir desde 0 hasta el infinito positivo, siendo 0 el valor correspondiente al ajuste perfecto (Cabrera, 2011).

Ecuación 3. Ecuación RMSE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^n (X_m - X_p)^2}{n}}$$

Donde, RMSE es el error cuadrático medio, X_m el valor medido del punto de control, X_p el valor predicho por el modelo, y n el número de datos de control; Los valores de referencia fueron tomados de Ritter, Muñoz-Carpena, & Regalado (2011) $RMSE \leq 3$ representa un muy buen ajuste, $3 < RMSE \leq 4$ bueno, $4 < RMSE \leq 5$ satisfactorio, $RMSE > 5$ no satisfactorio.

3.8.2 Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS)

De los criterios más usados en hidrología para determinar la exactitud, este mide cuanto de la variabilidad de los datos observados es explicado por la simulación, tomándose $E=1$ como una simulación perfecta, se define como:

Ecuación 4. Eficiencia de Nash-Sutcliffe.

$$NS = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim-i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \right)$$

Donde, NS es la eficiencia de Nash-Sutcliffe, Q_{sim} el caudal simulado i-esimo, Q_i el caudal observado i-esimo, y $\bar{Q}$ el caudal medio observado; Como valores de referencia se tiene que $NS=0$ representa un ajuste insuficiente donde la media de los valores modelamos es equivalente a los valores observados, $0.4 < NS < 0.5$ aceptable, $0.5 < NS < 0.65$ satisfactorio, $0.65 < NS < 0.75$ bueno, y $1 > NS > 0.8$ muy bueno (CVC, Secretaria de Ambiente Agricultura y Pesca, & CIAT, 2018).

3.8.3 Coeficiente PBIAS

El coeficiente de PBIAS mide la tendencia de los datos simulados a ser mayores o menores que los valores observados, siendo 0 el valor de ajuste optimo, valores positivos indican subestimación del modelo, valores negativos indican sobrestimación (Esquivel, y otros, 2013).

Ecuación 5 Coeficiente de desviación de PBIAS.

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{sim-i})}{\sum_{i=1}^n (Q_i)} \right) * 100$$

Donde, PBIAS es el coeficiente de PBIAS [%], Q_{sim-i} el caudal simulado i-esimo, y Q_i el caudal observado i-esimo; Para el coeficiente de PBIAS se tiene que valores $< \pm 10$ representa un muy buen ajuste, $\pm 10 < PBIAS < \pm 15$ bueno, $\pm 15 < PBIAS < \pm 25$ satisfactorio (CVC, Secretaria de Ambiente Agricultura y Pesca, & CIAT, 2018).

4 ESTADO DEL ARTE

En la última década se han desarrollado un gran número de investigaciones en torno a la modelación hidrológica de cuencas para determinar los caudales generados por la unidad hidrográfica utilizando el software SWAT; y algunos otros estudios sobre las cuencas del municipio de Cali y Jamundí, en torno al recurso hídrico. Entre ellas resaltan los estudios presentados a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2. Investigaciones anteriores relacionadas al presente estudio.

Nombre, Año	Resultados	Lugar de Estudio
(Verdú Arnal, Martínez Casasnovas, & García Hernández, 2004)	Analizó la respuesta hidrológica del río Isabena como consecuencia de los cambios de vegetación en la cuenca en la década de 1990, utilizando imágenes satelitales para determinar la distribución espacial de las coberturas. Determino que la presencia de áreas de evolución regresiva aumenta el caudal producido en la subcuenca hasta en un 35%.	España, Ribagorza, Huesca, Cuenca Río Isabena
(Carvajal Escobar, Arango López, & Jiménez Escobar, 2007)	Implemento el modelo HEC-HMS para estimar caudales medios en la cuenca del río Yumbo; utilizando datos de precipitación, información morfométrica y de suelos, obteniendo una alta correlación entre los volúmenes calculados y los medidos en la estación de aforo.	Colombia, Departamento del Valle del Cauca, Cuenca Río Yumbo
(Martínez, Castrillon, & Ramírez, 2014)	Determinó las zonas de amenaza debido a inundaciones por el desbordamiento del Río Jamundí y sus tributarios dentro del municipio de Jamundí	Colombia, Departamento del Valle del Cauca, Jamundí
(Díaz Quiñones, Coral Huertas, & Carvajal Escobar, 2015)	Determino las alteraciones del régimen hídrico frente a la variabilidad climática de eventos seleccionados entre los años 1986 a 2011; obtuvo un ajuste del 96% con respecto a los registros hidrológicos.	Colombia, Departamento del Valle del Cauca, Cuenca Río Tuluá
(Sánchez Brito, 2015)	Evaluó los cambios en los caudales de la cuenca debido a la ampliación de la frontera agrícola y el crecimiento poblacional (cambio de cobertura de suelo), proponiendo 3 escenarios alternos al estado actual de la cuenca. Por medio del modelo hidrológico SWAT y HEC-HMS, este último utilizado para determinar las crecidas máximas.	Ecuador, Cuenca Río Alambi, Nanegal
(G. Ramírez, 2017)	Simuló los caudales diarios de las Cuencas Usumacinta, Grijalva, Coatzacoalcos; tributarias del golfo de México, por medio del software ArcSWAT.	México, Cuencas Usumacinta, Grijalva, Coatzacoalcos.
(Alvarado, 2017)	Evaluó lo efectos del uso de suelos en el transporte de sedimentos y la calidad del agua en la cuenca del Río Grande de Comitán; utilizando el software ArcSWAT.	México, Río Grande de Comitán, Chiapas
(Ferreira Marmontel, 2018)	Evaluó la aplicabilidad del modelo hidrológico ArcSWAT para la estimación de caudales en un tramo de la cuenca hidrográfica del Río Paraibuna, en el estado de Sao Paulo.	Brasil-Sao Paulo, Cuenca Río Paraibuna
(CVC, Secretaria de Ambiente Agricultura y Pesca, & CIAT, 2018)	Analizo la vulnerabilidad al cambio climático del recurso hídrico y los ecosistemas de paramos, así como el ambiente, la agricultura, la pesca, y la salud; estructurando medidas de adaptación.	Valle del Cauca, Cuenca alta del río Cauca

Fuente: Elaboración propia.

5 METODOLOGÍA

5.1 Descripción de la zona de estudio

La cuenca hidrográfica de Río Jamundí se encuentra localizada al sur del departamento del Valle del Cauca, perteneciente a la zona hidrográfica Cauca, dentro del área hidrográfica Magdalena-Cauca. Comprende un área de 391 km^2 , y abarca parte del municipio de Cali y Jamundí. El esquema del área de estudio se muestra a continuación en la Figura 2.

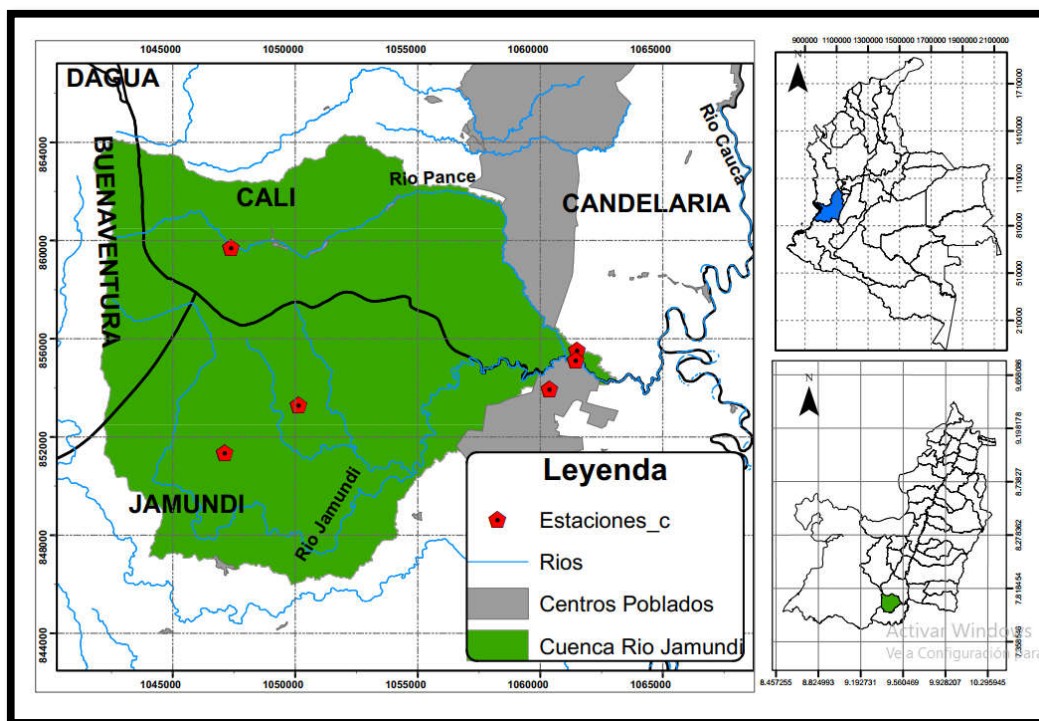


Figura 2. Ubicación geográfica Cuenca Hidrográfica del Río Jamundí.

Fuente: Elaboración propia.

El área comprendida por la cuenca hidrográfica está conformada por ecosistemas de bosque andino, subandino, y bosque seco; los cauces principales de este estudio, Río Jamundí y Río Pance, nacen en el Parque Nacional Natural Farallones de Cali, y generan una importante red hídrica debida a la cobertura vegetal de la zona y el relieve, de la cual se surten un mínimo de 100 mil habitantes y un desarrollo agropecuario de más de 18 mil ha (Alcaldía de Jamundí, 2018).

El relieve de la cuenca se eleva en su parte más alta hasta los 4060 msnm aproximadamente, sobre el parque nacional natural los farallones de Cali, y en la zona más baja, cerca de la desembocadura del río Jamundí con el río cauca, se aproxima a los 952 msnm; su cauce principal recorre cerca de 41.2 km. La precipitación media se encuentra entre los 1500 y 1700 mm al año, con una temperatura promedio de 23.9 °C, mínima promedio de 19 °C y máxima promedio de 31 °C.

5.2 Caracterización de la Cuenca

5.2.1 Delimitación de la cuenca

La delimitación de la cuenca hidrográfica del Río Jamundí se desarrolló con base en un DEM, Figura 3, con una resolución espacial de 2.5 m proporcionado por la CVC, considerado una muy buena aproximación topográfica del terreno; con este, y por medio de las instrucciones del paquete ArcSWAT, se generó la delimitación de la cuenca del Río Jamundí, mediante el valor altitudinal asociado a cada pixel y escogiendo el punto de cierre de la cuenca en las inmediaciones de la estación Puente Carretera descrita en la Tabla 4.

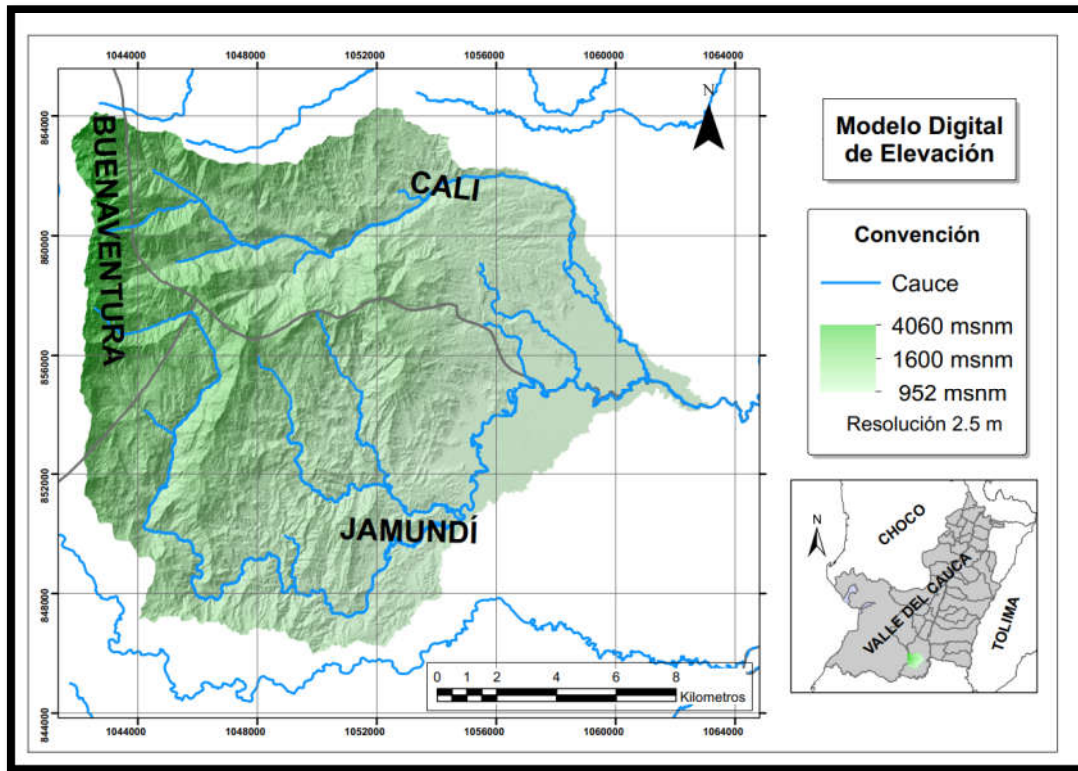


Figura 3. DEM cuenca hidrográfica del río Jamundí.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.1.1 Caracterización morfológica

La caracterización morfológica de la cuenca fue desarrollada por medio del software ArcSWAT, con base en el DEM Utilizado en el apartado Delimitación de la cuenca. El desarrollo de este procedimiento evidenció en rasgos generales el comportamiento de los procesos hidrológicos en la cuenca, a través de parámetros como la longitud del cauce principal, pendiente media de la cuenca, y pendiente media por subcuencas (Matauco, 2004); otros parámetros como tiempo de concentración, factor de forma, entre otros, fueron tomados de Arias, Escobar, Mejía, Escobar, & Mera (2015) y se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros Morfométricos

Parámetros Morfométricos	Valor	Interpretación
Factor de Forma	0.1	Cuenca Alargada
Índice de Compacidad	1.64	Oval Oblonga
Índice de Alargamiento	1.38	Alargada
Índice Asimétrico	3.01	Cauce Recostado a una Vertientes
Coeficiente de masividad	7.24	Moderadamente Montamos
Tiempo de concentración	4.75 hr	
Densidad de drenaje	3.74 km/km2	Alta densidad de drenaje
Sinuosidad del cauce principal	1.502	Mayormente Sinuosa

Fuente: Elaboración propia.

5.2.2 Información hidrológica

5.2.2.1 Selección de estaciones hidrográficas

Para hacer una adecuada caracterización de la cuenca hidrográfica se seleccionó las estaciones teniendo en cuenta el tipo de estación, la localización, fecha de instalación, años de registro, y estado actual. Escogiendo entre las estaciones presentes, un periodo de registro común en todas ellas. A continuación, en la Tabla 4, se muestra el listado de estaciones disponibles en la cuenca hidrográfica, información a cargo de la CVC y Cenicaña.

Tabla 4. Listado de estaciones presentes en la cuenca del rio Jamundí.

CÓDIGO	NOMBRE	CATEGORÍA	MUNICIPIO	X	Y	ALTITUD [msnm]	INSTALACIÓN
2622100202	JAMUNDI	CO	Jamundí	1060369	853943	969	1995-1-12
2622100403	PTE-CARRETEREA	LG	Cali	1061446	855129	961	1977-01-01
2622110101	LA ARGENTINA	PG	Cali	1047378	859711	1794	1971-11-01
2622100102	EL PALACIO	PM	Cali	1061497	855514	961	1970-01-01
2622100103	SAN VICENTE	PM	Jamundí	1050137	853301	1442	1971-05-01
2622100104	PENA MONA	PM	Jamundí	1047123	851336	2100	1971-11-01

Fuente: Elaboración propia.

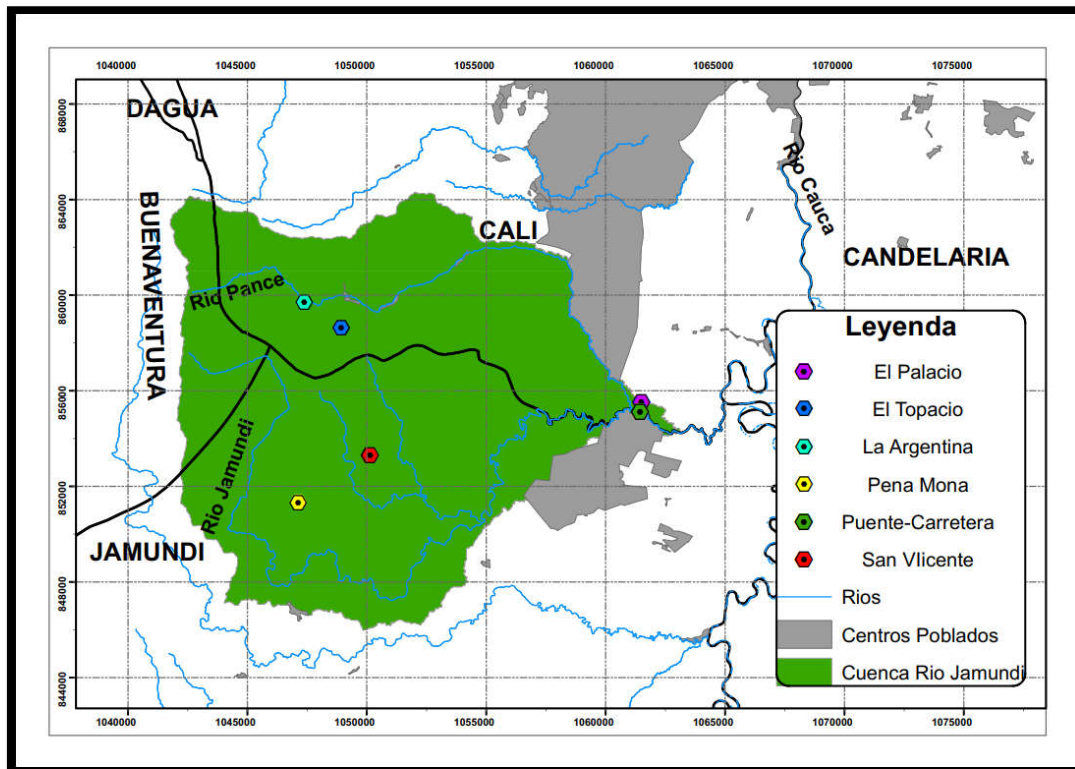


Figura 4. Distribución geográfica de las estaciones hidrológicas utilizadas.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.2 Análisis Exploratorio de Datos (AED)

Se realizó el análisis de los registros hidrológicos de las estaciones (Tabla 4) operadas en este caso por la CVC y Cenicaña, para determinar la calidad de estos, determinando los datos faltantes y un rango temporal de registro común a todas las estaciones; por medio de la matriz de datos, y el análisis cuantitativo y gráfico (Díaz, Coral, & Carvajal, 2015). Para este caso, los registros de caudal, temperatura máxima, temperatura mínima, y precipitación en la cuenca hidrográfica del Río Jamundí.

5.2.3 Caracterización de Suelos

Para la caracterización de los suelos en la cuenca hidrográfica se recurrió a las bases de datos cartográficos de la CVC, y el Estudio General De Suelos para el departamento Del Valle del Cauca realizado por la CVC en el año 2016 (Levantamiento semidetallado de suelos escala 1:25000, Cuencas priorizadas por la CVC).

De este estudio se extrajo la información relacionada con la profundidad del suelo, el número de horizontes, la profundidad de cada horizonte y sus texturas, grupo hidrológico, contenido de carbono y contenido de grava.

Posteriormente, con base en la información extraída de la CVC y utilizando los softwares SPAW y Soil Water Characteristics de la USDA, se aproximó la densidad aparente, conductividad hidráulica saturada, y capacidad de agua disponible. Los valores de fracción porosa y volumen vacío se establecieron en 0.5 por defecto, la reflectancia del suelo se estableció por defecto en 0.13, la ecuación de erodabilidad se aplicó utilizando los valores de contenido de carbono y textura.

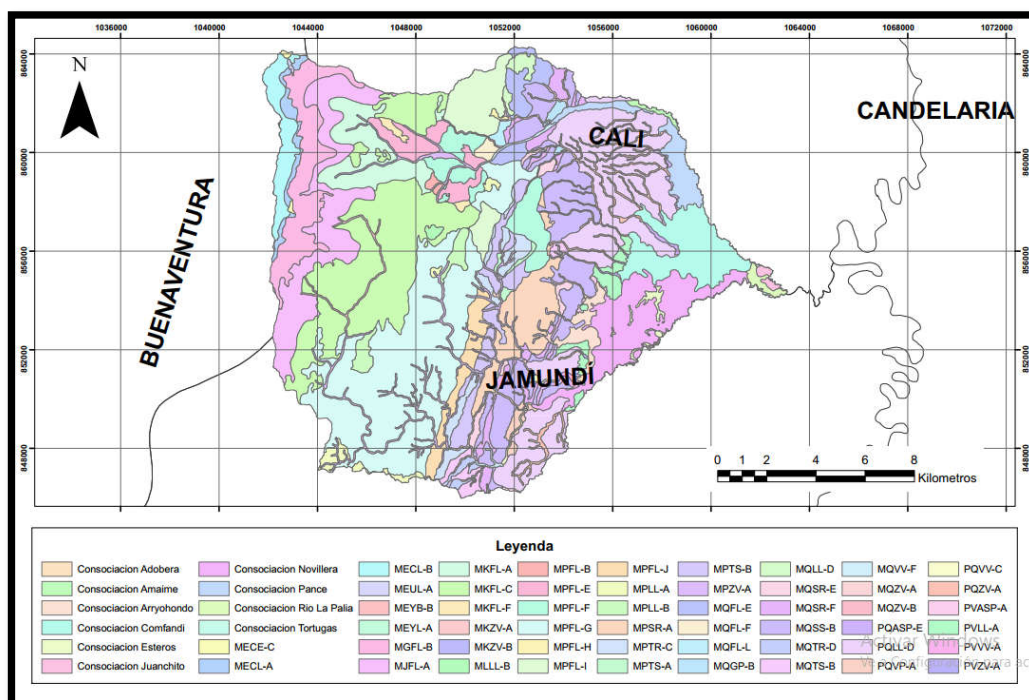


Figura 5. Clasificación de suelos en la cuenca hidrográfica del río Jamundí.

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3.1 Asignación Grupo Hidrológico

Teniendo en cuenta las características identificadas en el apartado 5.2.3 sobre los suelos en la cuenca hidrográfica, se clasificó las distintas unidades de suelo en los grupos hidrológicos asociados al potencial de escorrentía, su profundidad efectiva, y textura.

“Grupo A: suelos con bajo potencial de escorrentía y alta infiltración, aunque esté completamente húmedo. Su profundidad es especialmente grande. Es el caso de arenas o gravas excesivamente drenadas, o suelos que tengan una razón alta de transmisión de agua (mayor a $7.62 \frac{\text{mm}}{\text{hora}}$). Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B: Suelos con infiltración moderada aun completamente húmedo. Son suelos que van de moderadamente profundos a profundos. Suelos bien drenados con textura moderadamente fina a moderadamente gruesa. Tiene una razón de transmisión de agua moderada (3.81 a $7.62 \frac{\text{mm}}{\text{hora}}$). Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.

Grupo C: Suelos con baja infiltración, aunque no estén completamente húmedos, y consisten en suelos que tienen una capa que impide el movimiento descendente de agua. Son suelos con textura moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una baja razón de transmisión de agua (1.27 a $3.81 \frac{\text{mm}}{\text{hora}}$). Margas arcillosas margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelo con alto contenido de arcilla.

Grupo D: Suelos con alto potencial de escorrentía, ellos tienen una muy baja capacidad de infiltración, aun en condiciones de total humedad. Consisten principalmente de suelos arcillosos con un alto potencial de expansión, suelos con nivel freático permanentemente alto, suelos con una capa de arcillas en la superficie, suelos poco profundos sobre materiales impermeables cercanos. Estos suelos tienen una razón de transmisión de agua muy baja (0.0 a $1.27 \frac{\text{mm}}{\text{hora}}$). Suelos

que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.” (Barrios & Barroso, 2017).

5.2.4 Uso de Suelo

Para el uso de suelo se utilizó la base de datos cartográfica de la CVC, de la cual se extrajo la información relacionada con las diferentes categorías de cobertura presentes en la cuenca; posteriormente, con bases de datos de otras corporaciones donde se relacionaba las categorías de cobertura con los parámetros de entrada al modelo, se rellenó la información necesaria para el modelo en el área de la cuenca hidrográfica.

En este apartado fue difícil hacer la correlación de la información disponible debido a la falta de información sobre los parámetros de entrada al modelo y sus rangos, por lo cual se introdujo la información de cobertura tomado como ejemplo las configuraciones utilizadas por otras corporaciones para las categorías presentes en la cuenca hidrográfica, Figura 6.

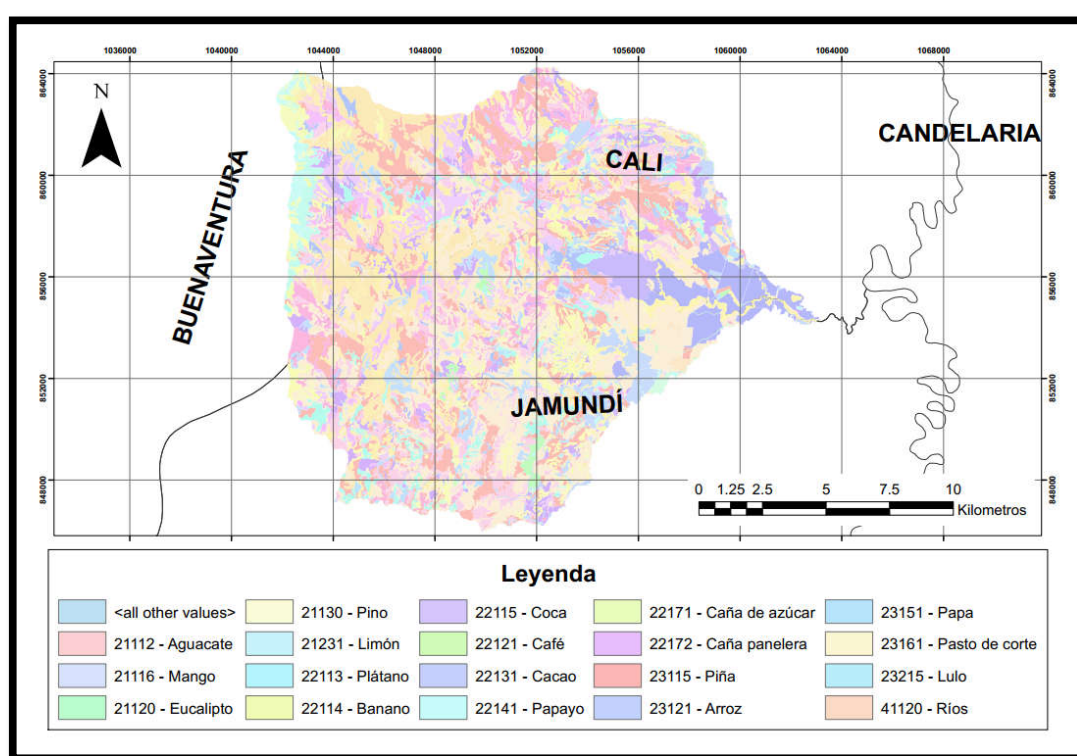


Figura 6. Cobertura vegetal o uso de suelo más representativos de la cuenca del río Jamundí.
Fuente: elaboración propia.

5.3 Modelación Hidrológica

5.3.1 Modelación Línea Base (LB)

El proceso de modelación con ArcSWAT comenzó al crear la carpeta del proyecto, en la cual se introdujo la información de entrada para las tablas de cobertura vegetal (Crop) y propiedades de suelos (Usersoil) en formato “.xlsx”, e introduciendo luego esta información en las bases de datos creadas por ArcSWAT en su archivo “SWAT2012” por medio del software Acces del paquete Office; de forma paralela se creó una tabla en formato “.dbf”(Figura 7. Tabla de relación entre códigos y clasificación de suelos y coberturas, respectivamente.Figura 7) que asociaba el nombre del tipo de suelo, o cobertura vegetal, con un código previamente establecido en cada uno de estos mapas para cada clasificación.

	A	B		A	B
1	VALUE N, 16, 6	NAME, C, 254	1	VALUE N, 16, 6	LANDUSE, C, 254
2		1 MECEC	2		1 ZUC
3		2 MECLA	3		2 ZUD
4		3 MECLB	4		3 OICC
5		4 MEULA	5		4 OISC
6		5 MEYBB	6		5 EUC
7		6 MEYLA	7		6 EUCC
8		7 MGFLB	8		7 PIN
9		8 MJFLA	9		8 PINC
10		9 MKFLA	10		9 CFOAR
11		10 MKFLC	11		10 AF
12		11 MKFLF	12		11 CT
13		12 MKZVA	13		12 PL
14		13 MKZVB	14		13 EC
15		14 MLLLB	15		14 CF
16		15 MPFLB	16		15 CF_PL

Figura 7. Tabla de relación entre códigos y clasificación de suelos y coberturas, respectivamente.
Fuente: Elaboración propia.

Luego de organizar la información de suelos y cobertura vegetal en SWAT2012, se introdujo el DEM del área de estudio, indicándose inicialmente las unidades en que se encuentra; ArcSWAT realiza en este apartado la delimitación de la cuenca y trazado del cauce expresando el nivel de detalle en relación al área escogido para las subcuencas y el punto de cierre determinado por el usuario. Este proceso tiene como resultado la delimitación y subdivisión de la cuenca, el trazado del cauce, el punto de cierre; las pendientes, las alturas máximas y mínimas, de la cuenca y cada subcuenca en ella determinada, ver Figura 8.

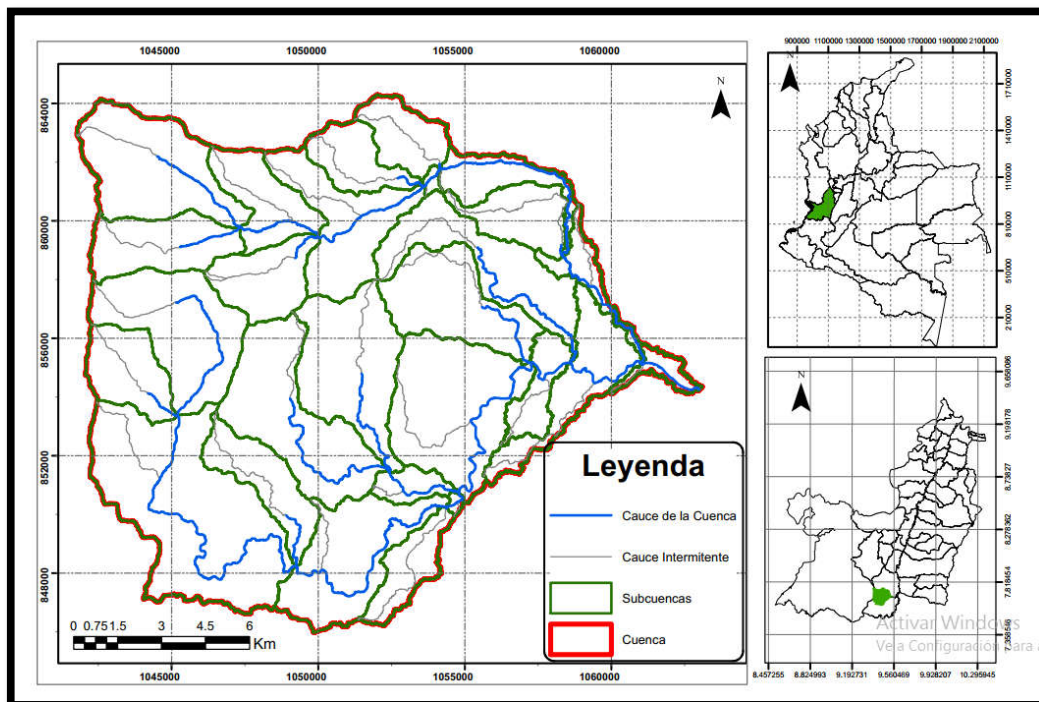


Figura 8. Esquema de cuenca y subcuencas determinadas por ArcSWAT.
Fuente: Elaboración propia.

Paso seguido, se relacionó la información de las bases de datos (Crop y Usersoil) con la clasificación de suelos en los mapas de cobertura y propiedades físicas, ver Figura 7;

Convirtiendo los mapas de cobertura y propiedades físicas en formato ráster, especificando como atributo el código relacionado a cada clasificación.

Luego, se identificaron las pendientes asociadas a la cuenca hidrográfica, estableciendo 3 pendientes dadas por el ArcGIS al aplicar la herramienta “Slope (Spatial Analyst)” y finalmente, con la información de cobertura, suelo, y pendiente, introducida hasta el momento, el software creo las correspondientes HRU’s del área de estudio, Figura 9.

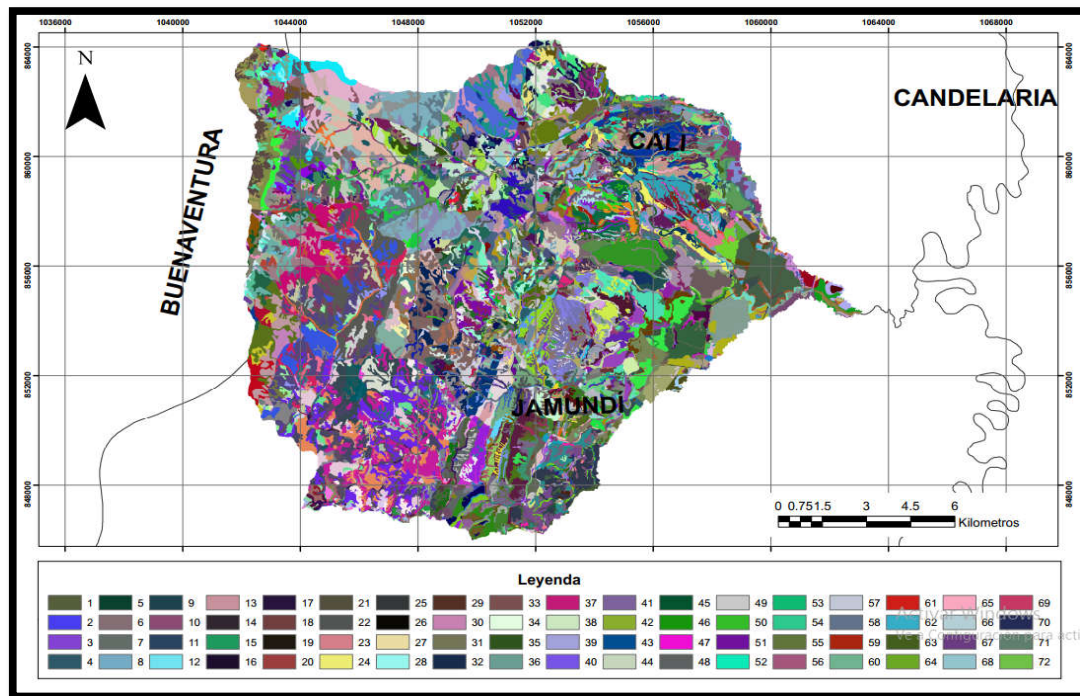


Figura 9. Mapa de HRU's en la cuenca hidrográfica.

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se dio paso a introducir la información de precipitaciones (Ver Figura 10) y temperatura (Ver Figura 11) de la cuenca, organizando la información en formato “.txt” especificado en la Tabla 1; para dar la posición de cada estación se creó un archivo con el mismo formato, para precipitación (Ver Figura 12) y temperatura (Ver Figura 13) donde se especificaba las coordenadas de cada una de las estaciones utilizadas y su elevación.

PMona: Bloc de notas					Argentina: Bloc de notas				
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
19960101.00					19960101.00				
0.00					0.00				
0.00					0.00				
0.00					2.00				
27.00					0.00				
0.00					2.00				
0.00					0.00				
0.00					0.00				
0.00					0.00				
0.00					0.00				
0.00					0.00				
0.00					0.00				
0.00					14.00				
30.00					0.00				
25.00					10.00				
0.00					0.00				
<					<				
SVicente: Bloc de notas					Palacio: Bloc de notas				
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
19960101.00					19960101.00				
0.00					0.00				
0.00					18.00				
0.00					0.00				
6.00					30.00				
9.00					0.00				
0.00					0.00				
2.00					0.00				
0.00					0.00				
0.00					0.00				
0.00					0.00				
0.00					0.00				
0.00					0.00				
1.00					0.00				
3.00					0.00				
1.00					0.00				

Figura 10. Formato entrada de datos de precipitación.
Fuente: Elaboración propia.

Cenicana: Bloc de notas				
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
19960101.00				
17.4,30.1				
17.5,29.9				
19.6,30.4				
18.5,29.9				
18.1,29.4				
18.1,29.5				
17.4,29.3				
17.3,30.6				
18.3,29.9				
17.2,31.1				
17.4,31.7				
17.8,30.8				
18.1,27.9				
18.1,29.4				
19.2,29.5				
18,29.7				
18.7,29.6				

Figura 11. Formato entrada de datos de temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

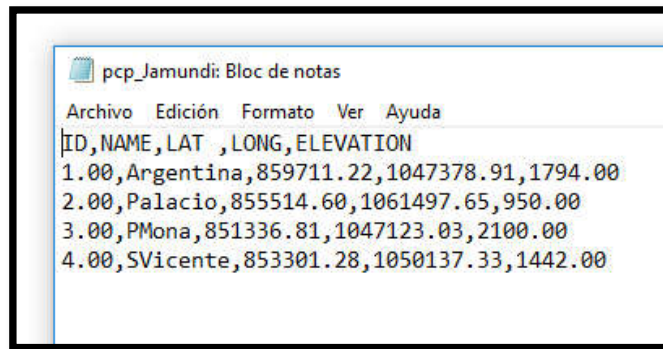


Figura 12. Formato de información para ubicación de estaciones pluviométricas.
Fuente: Elaboración propia.

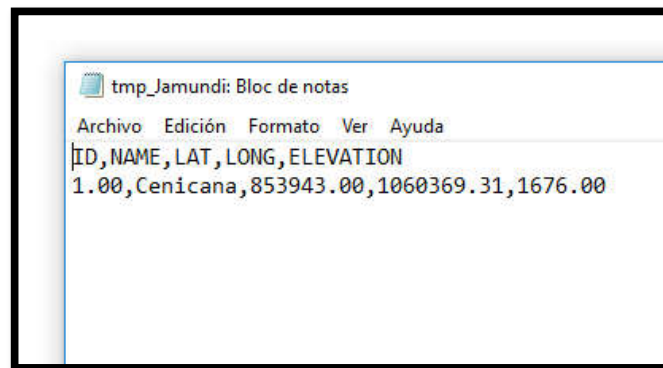


Figura 13. Formato de información de ubicación de estaciones meteorológicas.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, SWAT realizó la compilación de las tablas generadas terminando así la etapa de introducción de la información de la cuenca y dando paso a la modelación, estableciendo inicialmente el rango de tiempo a modelar, la arquitectura del procesador, el intervalo de tiempo y los años de carga del modelo.

5.3.2 *Análisis de Sensibilidad, Calibración y Validación*

El análisis de sensibilidad permite reconocer los parámetros que tienen mayor influencia en un proceso midiendo los cambios al final de este, en el caso de una modelación hidrológica, los cambios en los caudales producidos. El análisis de sensibilidad se realizó de forma manual identificando 1 a 1 los parámetros sensibles en función del cambio producido en el balance hídrico de la cuenca, utilizando estos parámetros posteriormente en el proceso de calibración.

Para realizar el proceso de calibración del modelo hidrológico se utilizó los datos de caudal entre los años 1996-2010, tomando los 4 primeros años como tiempo de carga para el modelo, estos datos fueron seleccionados previamente en el apartado 5.2.2.2, extraídos de la base de registros hidrológicos de la estación limnográfica en el punto de cierre del cauce principal en la cuenca.

Teniendo la precipitación de entrada al modelo y el caudal observado, se modificó sistemáticamente la ponderación de los parámetros del modelo hasta alcanzar un buen nivel de ajuste. Utilizando el RMSE, la Eficiencia de Nash-Sutcliffe, y el Coeficiente de PBIAS, descritos en los apartados 7.1, 7.2 y 7.3 de la sección 3, como indicadores de ajuste. Los valores de ajuste se resumen a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Interpretación de los coeficientes estadísticos para la calibración y validación.

PBIAS	NS	*RMSE	Interpretación predictiva del modelo
PBIAS<±10%	0.75<NS<1.0	RMSE≤3	Muy Bueno
±10%<PBIAS<±15%	0.65<NS<0.75	3≤RMSE≤4	Bueno
±15%<PBIAS<±25%	0.5<NS<0.65	4≤RMSE≤5	Satisfactorio

Fuente: Adaptado de CVC, CIAT, & Gobernación del Valle del Cauca (2018), * (Ritter, Muñoz-Carpena, & Regalado, 2011)

Por lo que una vez determinados los valores de los parámetros que lograron el mejor ajuste de los caudales simulados con respecto a los observados se realizó la validación, modelando el periodo comprendido entre los años 2011-2014 para corroborar a través de los métodos de evaluación la capacidad del modelo de representar las condiciones de la cuenca.

5.4 Modelación Escenarios

5.4.1 Planteamiento de Escenarios

El escenario positivo de cambio de cobertura se planteó propendiendo introducir una configuración de cobertura vegetal amigable con el medio, para esto se reemplazó 5587 ha de pasturas cultivadas y enmalezadas en la zona alta de la cuenca, por bosque abierto y matorrales, en la rivera de los cauces principales, y cuerpos lenticos naturales y artificiales; introduciendo una franja de 30 metros de cobertura entre arbusto, guadua, bosque abierto y matorrales, equivalentes a 458 ha. Reemplazando en total de 6045 ha (24.28% de la cobertura vegetal) a coberturas naturales más apropiadas.

En contra propuesta se introdujo un escenario negativo configurando una cobertura vegetal con una tendencia menos amigable desde el punto de vista de la conservación, buscando impactar áreas bien conservadas en la línea base de la cuenca, reemplazando así 6471 ha (25.99% de la cobertura vegetal) de bosque por cultivos de pasto arbolado bien distribuido, pero con importante presencia en la zona alta.

5.4.2 Simulación de Escenarios

Para simular los escenarios de cambio de cobertura, se utilizó el año con el mejor ajuste entre los valores observados y los datos arrojados por el modelo en la línea base para el periodo de validación, utilizando como criterio de referencia el valor del NS, el RMSE y el coeficiente de PBIAS para seleccionar el año.

5.5 Flujograma de la Metodología

La metodología del presente estudio se llevó a cabo siguiendo los lineamientos del flujograma de actividades presentado en la Figura 14. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es pertinente indicar que la revisión bibliográfica fue una actividad ligada a cada etapa del proyecto.

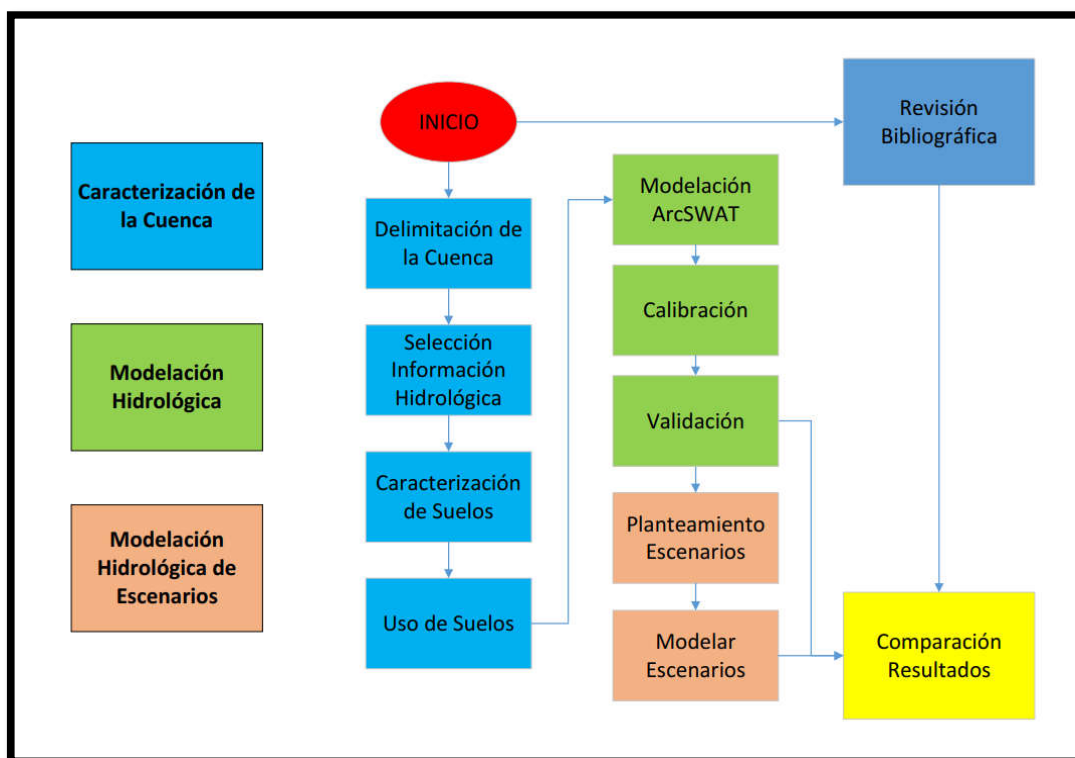


Figura 14. Flujograma de la metodología.

Fuente: Elaboración propia.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Línea Base

6.1.1 Análisis de Sensibilidad y Calibración

El análisis de sensibilidad y calibración se realizó para el periodo 1996-2010, teniendo en cuenta solo los parámetros con una alta influencia en el caudal de salida, Tabla 6, modificando sus valores en el proceso de calibración hasta lograr el mejor ajuste de los indicadores de eficiencia en la predicción, los valores con los cuales se obtuvo el mejor ajuste se muestran en la Tabla 7.

Tabla 6. Parámetros obtenidos del análisis de sensibilidad.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	PROCESO
CN2	Número de curva de escorrentía Inicial en condiciones de humedad II	Flujo base
ALPHA_BF	Factor Alpha de flujo base	Flujo base
SOL_AWC	Disponibilidad de agua del suelo	Suelo
GW_DELAY	Retraso de agua subterránea (Días)	Flujo base
CH-N2	Valor del coeficiente de Manning	Evaporación
GWQMN	Profundidad del acuífero somero para que se produzca flujo de retorno (mm)	Flujo base
ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	HRU
SOL_Z	Profundidad del suelo desde la superficie hasta el fondo del perfil (mm)	Suelo
EPCO	Factor de compensación de la absorción de la planta	HRU

Fuente: Elaboración propia con base al manual del Modelo SWAT

Tabla 7. Resultados calibración de la cuenca.

PARÁMETRO	RANGO	DEFINICIÓN	VALOR POR DEFECTO	VALOR CALIBRACIÓN
ALPHA_BF	0 - 1	Factor Alpha de flujo base	0.048	0.0001
GW_DELAY	0 - 500	Retraso del agua subterránea	31	0.1
CH_N2	0.01 – 0.3	Coeficiente de rugosidad de Maning	0.014	0.03
SOL_AWC	0 - 2000	Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo	Varia por HRU	*5.29
GWQMN	0-5000	Profundidad del agua subterránea	1000	*10
ESCO	0-1	Factor evaporación del agua	0.95	0.1
SOL_Z	0-3500	Profundidad del suelo	Varia por HRU	*0.1
EPCO	0-1	Factor de transpiración de las plantas	1	0.15

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el análisis de sensibilidad y calibración, se obtuvo que el parámetro con mayor influencia en el caudal de salida del modelo es el número de curva, CN2, el cual afecta la capacidad de infiltración del agua en el suelo y la formación de escorrentía, contribuyendo así con el agua subterránea o aumentando el caudal del cauce principal; puesto que está relacionado con la textura del suelo, pendiente, la existencia de cobertura y el tipo de cobertura (Díaz Carvajal & Mercado Fernández, 2017), se optó por no utilizar este parámetro para la calibración en aras de mantener la variabilidad introducida en los usos de suelo.

El segundo parámetro más importante del análisis es el ALPHA_BF, el cual hace referencia a la capacidad de recarga del acuífero, donde valores pequeños de este parámetro están relacionados con suelos profundos, es decir, de recarga lenta; para este caso el valor de este parámetro se estableció en 0.0001 dado que los suelos del valle del Cauca son considerados de gran profundidad (CVC, Secretaría de Ambiente Agricultura y Pesca, & CIAT, 2018).

El parámetro SOL_AWC indicador de la capacidad de retención del agua por parte del suelo se relaciona con la presencia de microporos, mesoporos y macroporos, este obedece a valores introducidos en los diferentes tipos de suelo de la cuenca por lo cual se mantuvo la heterogeneidad multiplicando por 5.29, afectando de esta forma la infiltración del suelo y la escorrentía; este parámetro se ubica como el tercer parámetro más sensible en el análisis de sensibilidad.

Los parámetros GW_DELAY y GWQMN hacen referencia al retraso del agua desde que ingresa al perfil del suelo y llega hasta el acuífero, y a la profundidad de dicho acuífero desde la superficie; estos parámetros se modificaron disminuyendo el retraso del movimiento del agua

subsuperficial y aumentando la profundidad del acuífero generando un paso más rápido del agua a través del suelo y disminuyendo el aporte del acuífero al caudal en el cauce.

Finalmente, los valores de ESCO y EPCO relacionados con la evaporación y la transpiración se redujeron desde su valor nominal 1, hasta 0.1 y 0.15 indicando así una reducción de la evapotranspiración.

A continuación, se presenta gráficamente los resultados obtenidos de la calibración del modelo para la cuenca del río Jamundí, con los parámetros mencionados en la Tabla 7, versus los valores observados en la estación limnográfica Puente-Carretera. Figura 15.

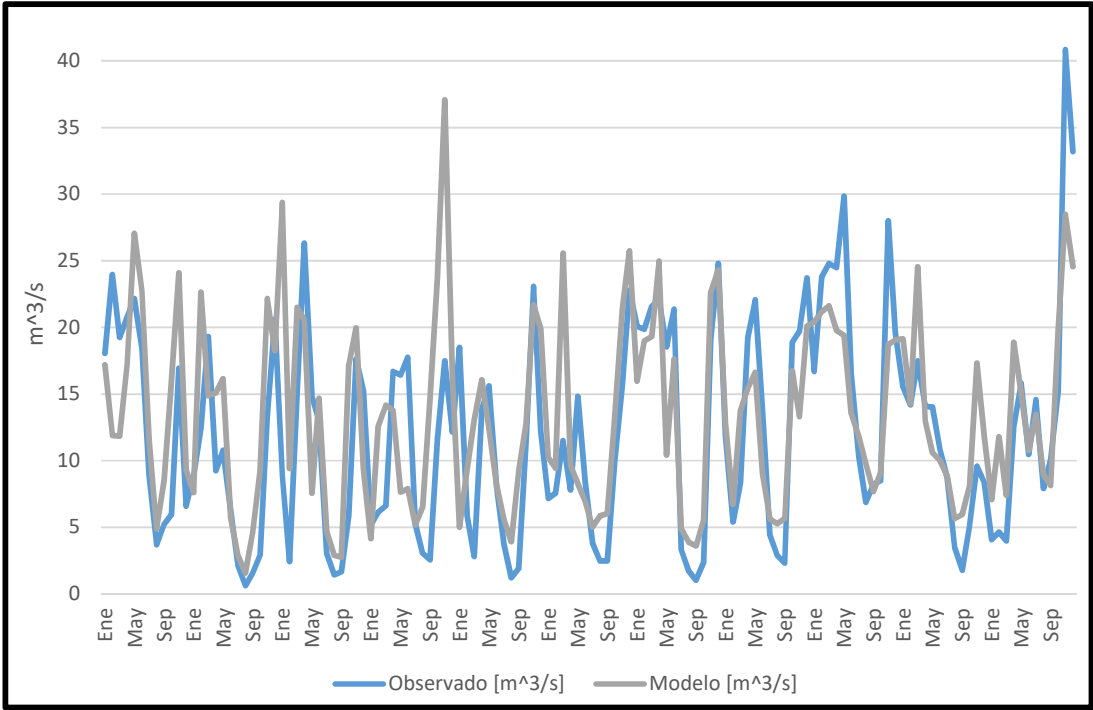


Figura 15. Calibración-Promedio mensual del Caudal medido vs simulado, en la cuenca del Río Jamundí para los años 2000 a 2010. Fuente: Elaboración propia.

El grafico presentado anteriormente evidencia el desempeño del modelo y su capacidad predictiva al representar satisfactoriamente la estacionalidad de los caudales en la cuenca y la dispersión existente entre los valores simulados y medidos. Sin embargo, para una mejor comprensión se presentan los resultados de los indicadores de eficiencia en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de la Calibración de la estación Puente-Carretera, Río Jamundí.

Estación	NS	PBIAS	RMSE
Puente-Carretera	0.46	2.78	5.80

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 15, el comportamiento de los caudales simulados con respecto a los caudales medidos presenta un ajuste estacional, dado que la mayor diferencia entre estos se observa en los puntos máximos y mínimos, con lo cual se demuestra la buena capacidad predictiva del modelo; lo cual se complementa con los resultados de la Tabla 8 donde el coeficiente PBIAS califica el modelo como “Muy Bueno” indicando además una sobrestimación en los valores modelados.

Sin embargo, las épocas en las que el modelo sobreestima los valores se contrarrestan con aquellos meses donde los valores son subestimados. Esto se debe, a que SWAT al ser un modelo continuo, no está diseñado para simular un solo evento de flujo detallado, sino para hacer una representación continua de la distribución de la lluvia y la generación de caudales en las cuencas (CVC, Secretaría de Ambiente Agricultura y Pesca, & CIAT, 2018).

El coeficiente de Nash – Sutcliffe, por su parte, clasifica la calibración como aceptable mientras que el RMSE califica la modelación como Buena.

6.1.2 Validación

La validación de la línea base se realizó modelando los años 2011-2014, e introduciendo los valores de la calibración mostrados en la Tabla 7, los resultados en los caudales obtenidos se muestran a continuación, Figura 16.

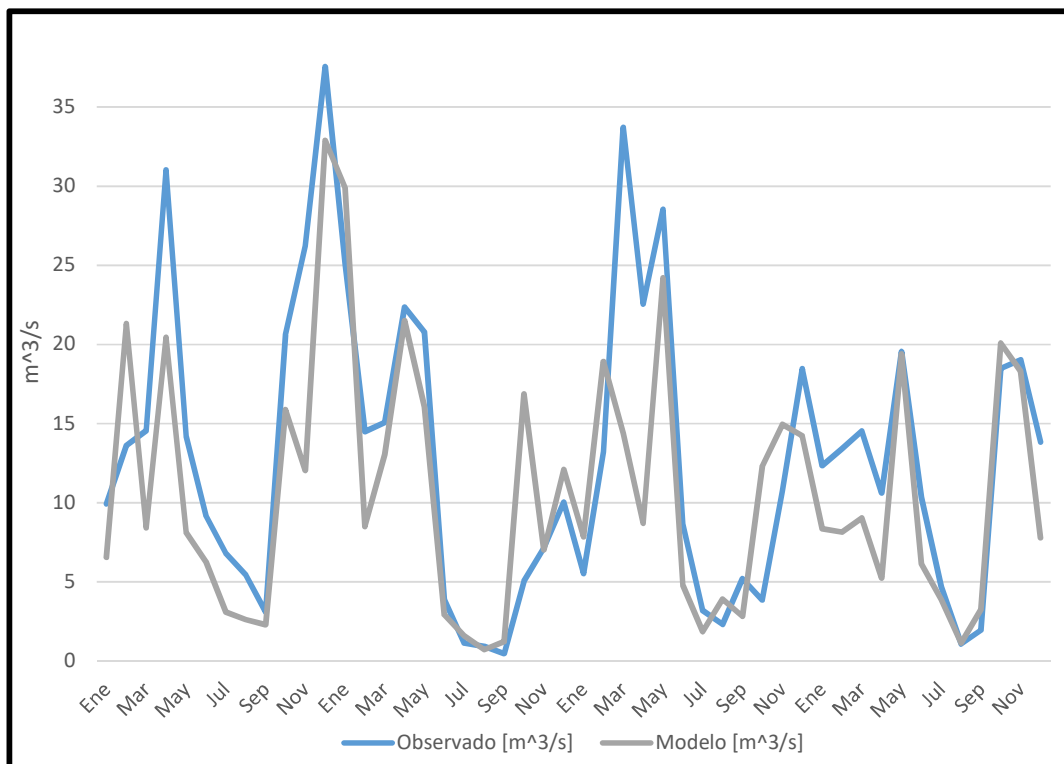


Figura 16. Validación- Promedio mensual del caudal medido vs simulado, en la cuenca del río Jamundí para los años 2011 a 2014. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 9 se muestran los valores obtenidos por parte de los índices de eficiencia de predicción para la validación, se obtuvo una mejoría en la calificación dada por los índices: NS satisfactorio, PBIAS Muy Bueno, y RMSE Bueno. Singularmente se muestran los resultados del NS para cada uno de los años modelados, siendo el año 2012 el de mejor ajuste.

Tabla 9. Resultados de la Validación de la estación Puente-Carretera, Río Jamundí.

Estación	NS	PBIAS	RMSE
Puente-Carretera	0.58	2.74	3.57
Año	NS	PBIAS	RMSE
2011	0.58	2.77	6.67
2012	0.73	1.83	4.39
2013	0.39	4.84	7.93
2014	0.63	1.16	3.68

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la Figura 16, se puede observar que el modelo no logró representar de manera adecuada la magnitud de los caudales, presentando una dispersión menor que en la fase de calibración; también es de resaltar que el año 2012 presentó el mejor ajuste entre los años modelados en esta etapa con un valor de NS de 0.73, lo cual lo califica como muy bueno en los tres índices de eficiencia por lo cual se seleccionó este año para analizar la producción hídrica por HRU y realizar la evaluación de los escenarios.

6.1.3 Producción Hídrica por HRU

De acuerdo a los resultados anteriores, es posible asumir que el modelo representa satisfactoriamente el proceso hidrológico en la cuenca, aportando una buena base sobre la cual se puede evaluar diferentes escenarios, entre ellos el impacto del cambio de cobertura vegetal planteado en los escenarios para esta investigación. En la Tabla 10 se presentan las características generales de la cuenca.

Tabla 10. Características generales de la cuenca.

CUENCA	ÁREA [HA]	SUBCUENCAS	HRU	ELEVACIÓN MIN [MS.N.M.]	ELEVACIÓN MAX [MS.N.M.]
Río Jamundí	39137	27	27	952	4060

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados que se muestran a continuación (ver Figura 17) corresponden a los caudales arrojados por el modelo en condiciones de línea base, donde se identifica el aporte al caudal en milímetros a través de cada una de las subcuencas que drenan al Río Jamundí para el año 2012, escogido por presentar el mayor ajuste (0.73 para el NS) entre los años modelados en la validación.

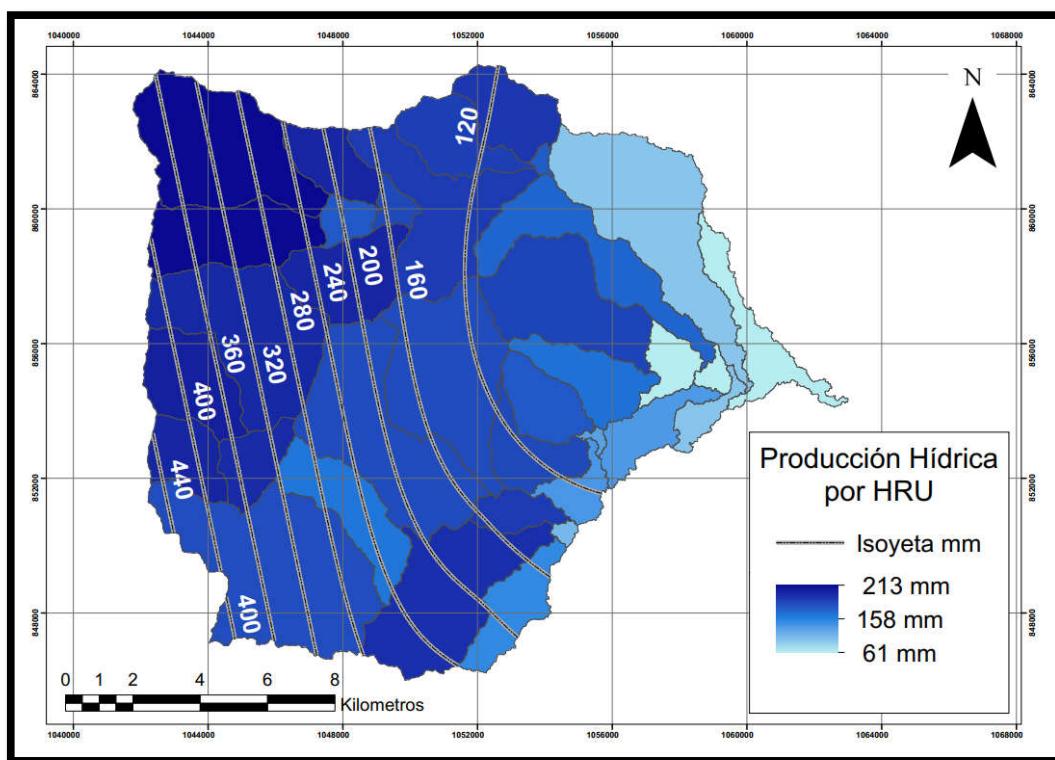


Figura 17. Promedio mensual de producción hídrica por HRU e isoyetas de precipitación media para el año 2012 de la cuenca del Río Jamundí.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 17 se observa en color azul oscuro aquellas subcuencas del río Jamundí con mayor producción hídrica, concentrándose en la parte alta de la cuenca y especialmente en la zona norte perteneciente a la subcuenca del río Pance; en la zona baja de la cuenca se puede observar una menor producción hídrica relacionada con la topografía y la precipitación dado que es una zona regularmente plana donde posiblemente aumenta la recarga al acuífero.

6.2 Modelación de Escenarios

Teniendo en cuenta los lineamientos planteados en la sección 5.4.1, para el caso del escenario de coberturas amigables con el medio, se planteó coberturas de bosque, guadua y matorrales que contribuyeran a mantener por mayor tiempo el agua en la cuenca para así prolongar la disponibilidad del recurso; mientras que en el escenario negativo el análisis se enfocó en reemplazar coberturas bien establecidas de bosque en la zona alta y las riberas de los ríos por cultivos de pasto. Los resultados obtenidos de estos escenarios se muestran en contraposición a los datos arrojados por el modelo en la línea base, para el año 2012 el cual presentó la mejor calificación en la eficiencia de predicción de Nash, ver Figura 18.

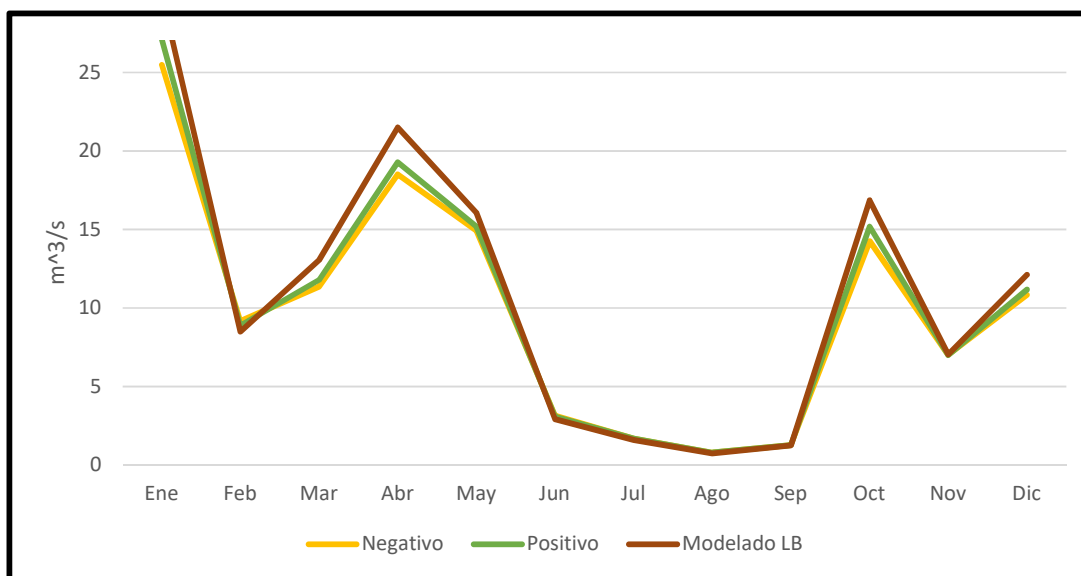


Figura 18. Comparación entre los valores obtenidos de la modelación de la línea base, el escenario positivo y el escenario negativo. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 18 hay una disminución en los caudales generados por la cuenca a lo largo del año 2012 para ambos escenarios, especialmente en el escenario negativo, evidenciando una variación en los caudales producidos debida al cambio de cobertura vegetal; en la Tabla 11 se compara los resultados obtenidos en ambos escenarios con respecto a los resultados obtenidos de la modelación de la línea base.

Tabla 11. Comparación entre los escenarios propuestos y los resultados obtenidos del modelo en la línea base.

Estación	NS	PBIAS	RMSE
Escenario Positivo	0.98	0.15	1.26
Escenario Negativo	0.95	0.32	1.86

Fuente: Elaboración propia.

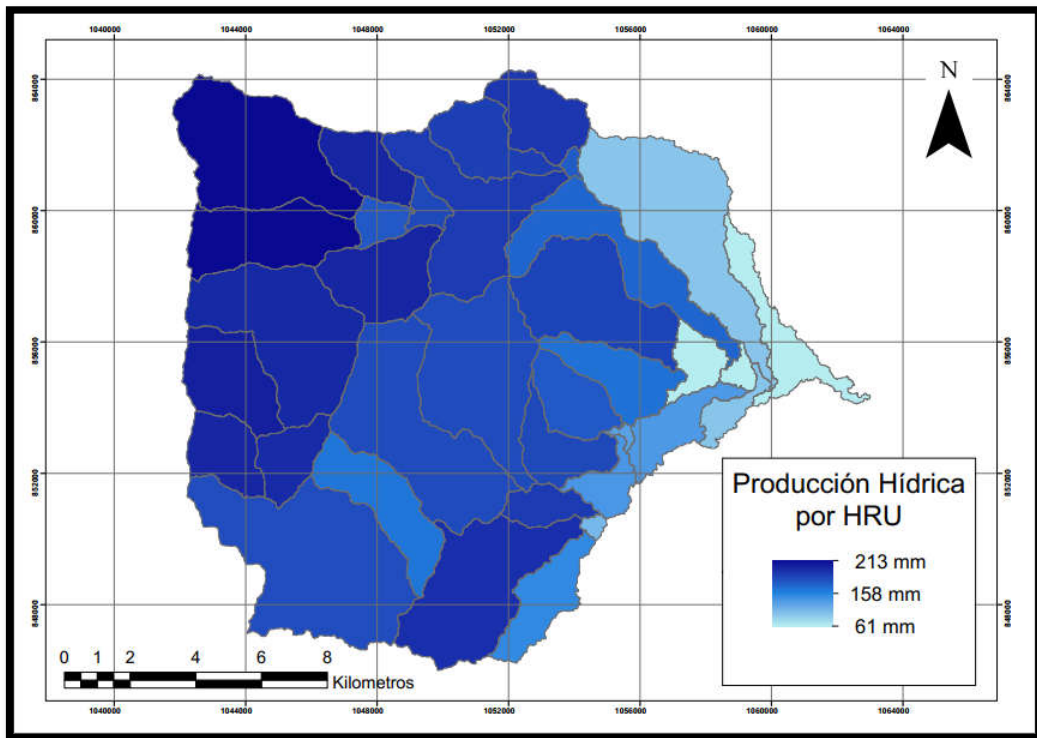


Figura 19. Producción hídrica, expresada en mm, por subcuenca de la cuenca del río Jamundí para el año 2012 en la línea base. Fuente: *Elaboración propia*.

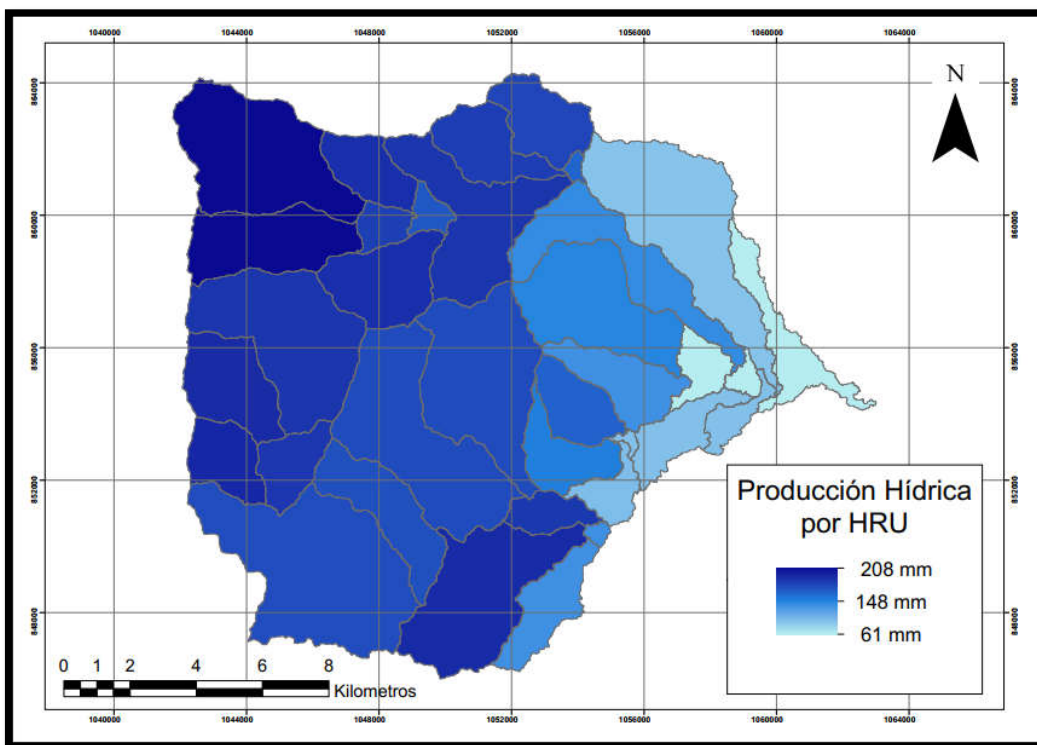


Figura 20. Producción hídrica, expresada en mm, por subcuenca de la cuenca del río Jamundí para el año 2012 en el escenario positivo. Fuente: *Elaboración propia*.

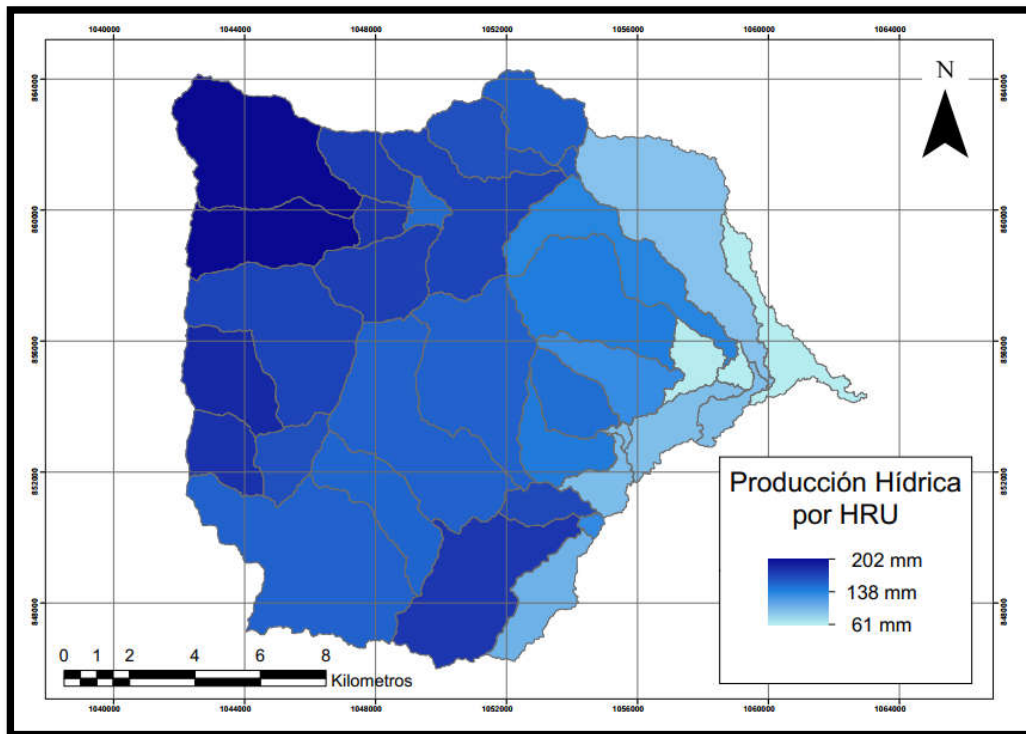


Figura 21. Producción hídrica, expresada en mm, por subcuenca de la cuenca del río Jamundí para el año 2012 en el escenario negativo. Fuente: *Elaboración propia*.

Comparando los mapas de producción hídrica por subcuenca, se puede observar entre el escenario negativo y el escenario positivo una disminución en la producción del recurso, apreciando como disminuye en las subcuencas de la zona baja de la cuenca, manteniéndose más estable las subcuencas de la zona alta del río Pance.

Sin embargo, los resultados evidenciaron diferencias en la producción hídrica por subcuenca, en la línea base se produce en promedio 158 mm de agua, en el escenario positivo 148 mm, y en el escenario negativo 138 mm de agua por subcuenca; lo cual evidencia diferencias notables entre las diferentes configuraciones teniendo en cuenta que la cuenca hidrográfica del río Jamundí presenta un área de 39137 ha, generando 61.9 millones de $\frac{m^3}{s}$ en la línea base, 58.1 millones de $\frac{m^3}{s}$ en el escenario positivo, y 54.4 millones de $\frac{m^3}{s}$ en el escenario negativo.

Finalmente, al plantear la diferencia entre los escenarios positivo y negativo con respecto a la línea base se puede observar con mayor detalle el efecto en cada una de las subcuencas; para esto se plantean las figuras 22 y 23 a continuación.

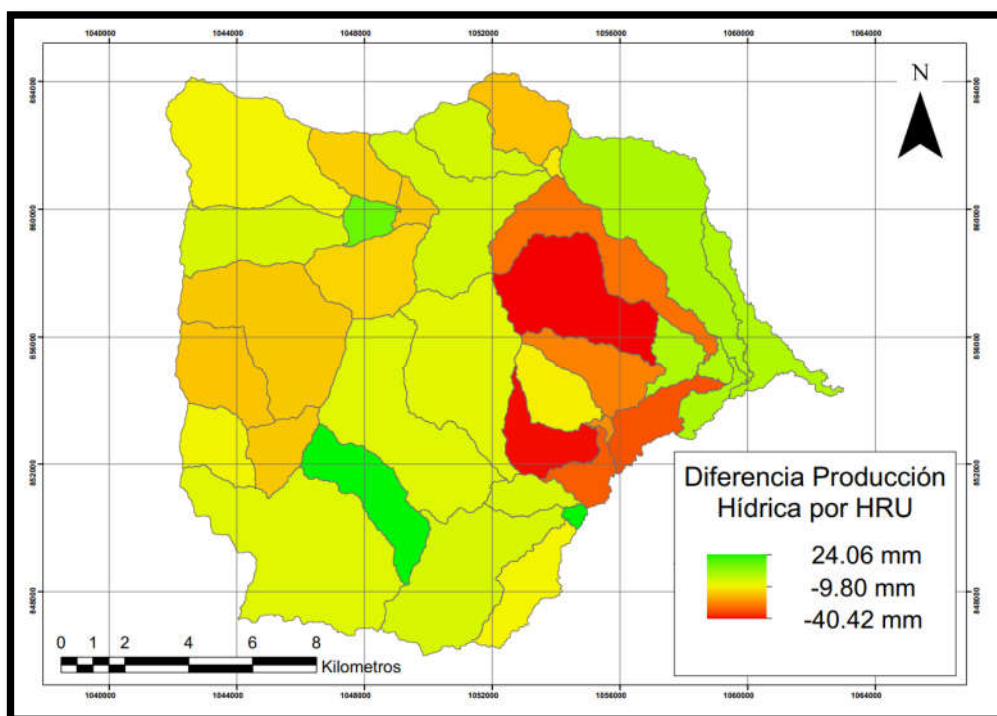


Figura 22. Diferencia entre la producción hídrica en el escenario positivo menos la línea base, expresada en mm, por subcuenca, para el año 2012. Fuente: Elaboración propia.

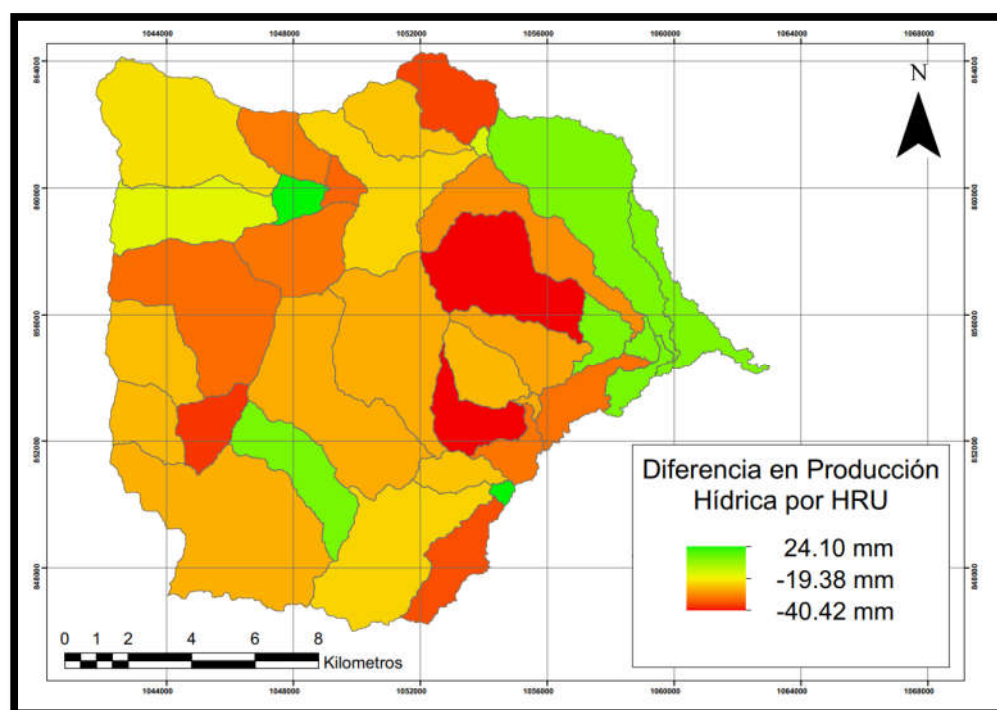


Figura 23. Diferencia entre la producción hídrica en el escenario negativo menos la línea base, expresada en mm, por subcuenca, para el año 2012. Fuente: Elaboración propia

En las figuras 22 y 23, se puede observar como los cambios introducidos en la cobertura vegetal de cada uno de los escenarios genero amplias diferencias en la producción hídrica, mostrándose mayor producción en el escenario positivo, con mayor homogeneidad en la producción.

7 CONCLUSIONES

- La caracterización de la cuenca del río Jamundí, con base en las propiedades físicas del suelo se realizó satisfactoriamente. La información de suelos presentada por la CVC y el IGAC fue suficiente para la modelación hidrológica, ya que comprendía las variables físicas de forma detallada, profundidades, texturas, contenido de materia orgánica; dejando estandarizadas según la textura el contenido de humedad del suelo, densidad aparente, y conductividad eléctrica del suelo.

La cobertura vegetal por su parte supuso un mayor reto, dado que SWAT requiere información con alto detalle sobre los diferentes usos de suelo, incluido en el proceso la decodificación de cada uno de los parámetros; para esta investigación la información del uso de suelo fue obtenida de las corporaciones regionales; sin embargo, para realizar un estudio con mayor detalle sería prometedor obtener esta información en campo.

- La modelación de la cuenca hidrográfica del río Jamundí obtuvo en su validación, un valor de 0.58 para el NS, 2.74 para el coeficiente de PBIAS, y RMSE de 3.57, al comparar los valores arrojados por el modelo con los valores de caudal medidos directamente de la estación limnimétrica puente-carretera en el cierre de la cuenca del río Jamundí; clasificando la modelación “Satisfactoria” validando la aplicabilidad del modelo al entorno hidrológico de la cuenca hidrográfica.
- Los caudales generados mensualmente por la cuenca hidrográfica del río Jamundí no mostraron amplias diferencias entre la línea base y los escenarios negativo y positivo, siendo registrado un coeficiente de PBIAS de 0.15 para el escenario positivo, y PBIAS de 0.32 para el escenario negativo al comparar cada uno con la línea base. Sin embargo, la productividad hídrica evidenció una clara mejoría en el escenario positivo, con respecto al escenario negativo; con mayor homogeneidad, distribución y mayor cantidad de agua producida en la parte alta de la cuenca.
- Dado que el modelo hidrológico realizado en esta investigación logró un nivel de ajuste satisfactorio, y tomando en cuenta los resultados de los escenarios propuestos; se presenta este modelo como una herramienta aplicable a la toma de decisiones en torno al ciclo hidrológico de la cuenca, que permite identificar los efectos del cambio de cobertura en la producción hídrica de la cuenca detallando estos resultados espacialmente por subcuencas.

8 RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer un estudio detallado de las coberturas vegetales en la cuenca dado el alto nivel de detalle requerido por SWAT en este apartado, y teniendo en cuenta que los cambios de uso de suelo propuestos en los escenarios no presentaron diferencias notables en los caudales generados por la cuenca; lo cual se puede deber a que las coberturas fueron tomadas de estudios realizados anteriormente por las corporaciones enfocados a escenarios de cambio climático basados en cambios de temperatura, mientras que los cambios en la cobertura representan una incertidumbre que es corregida durante el proceso de calibración del modelo.

Con el fin de mejorar el detalle de la información requerida para las coberturas vegetales en la zona de estudio, podría realizarse la captura de imágenes aéreas con una resolución mayor a la generada por las imágenes satelitales, de forma que se pueda extraer de aquí la información requerida por SWAT realizando la menor cantidad de aproximaciones, y apoyándose también en mediciones in-situ de los parámetros, muestreando aleatoriamente las coberturas vegetales más representativas de la zona de estudio, de forma que se coteje la representatividad de los valores agregados al programa con información de primera mano.

- Al enfocar el estudio en escenarios de cambio de uso de suelo es recomendable identificar durante la calibración los parámetros relacionados con la cobertura vegetal, dado que con este enfoque es imperativo mantener la heterogeneidad de las coberturas y al modificar algunos parámetros de la calibración dicha heterogeneidad puede verse comprometida; por lo que en estos casos es recomendable acudir a influencias porcentuales y no a reemplazar valores, o en su defecto acudir a parámetros establecidos de forma arbitraria por SWAT, como es el caso de ESCO, EPCO, y GWMN, entre otros.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldia De Jamundi. (1 De 06 De 2018). Alcaldia De Jamundi. Obtenido De [Http://Www.Jamundi.Gov.Co/Mimunicipio/Paginas/Presentacion.Aspx](http://www.jamundi.gov.co/mimunicipio/paginas/presentacion.aspx)
- Alvarado, J. (2017). Evaluación Del Transporte De Sedimentos Y La Calidad Del Agua, Utilizando SWAT, En El Río Grande De Comitán, Chiapas. Ciudad De Mexico: Universidad Nacional Autonoma De Mexico.
- ANDI. (Mayo De 20117). Guia Tecnica De Criterios Pa El Acotamiento De Las Rondas Hidricas En COLOMBIA. Obtenido De [Http://Www.Andi.Com.Co/Uploads/Guia_Acotamientorondas_Hidricas_CP.Pdf](http://www.andi.com.co/uploads/Guia_Acotamientorondas_Hidricas_CP.Pdf)
- Arias, J., Escobar, D., Mejia, M., Escobar, M., & Mera, J. (2015). Deeterminacion De Las Caracteristicas Biofisicas Y Socioeconomicas De La Cuenca Hidrografica Jamundi. Santiago De Cali.
- Arnold, J. G. (1998). Large Area Hydrologic Modeling And Assessment Part I: Model Development. JAWRA Journal Of The American Water Resources Association, , 34(1), 73-89.
- Barrios, A., & Barroso, F. (2017). Estudio Climatológico E Hidrológico En El Área De Influencia De Cuatro Sitios En Los Que Se Desarrollan Proyectos De Invernaderos En La Sierra Nevada De Santa Marta Y En La Serrania Del Perijá.
- Bathis, K., & Ahmed, S. (2016). Rainfall-Runoff Modelling Of Doddahalla Watershed— An Application Of HEC-HMS And SCN-CN In Ungauged Agricultural Watershed. Saudi Society For Geosciences.
- Beleño, I. (12 De Febrero De 2011). El 50% Del Agua En Colombia Es De Mala Calidad. Unperiodico, Pág. 28. Recuperado El 25 De Marzo De 2017, De [Http://Www.Unperiodico.Unal.Edu.Co/Dper/Article/El-50-Del-Agua-En-Colombia-Es-De-Mala-Calidad.Html](http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/el-50-del-agua-en-colombia-es-de-mala-calidad.html)
- Cabrera, J. (2011). Calibracion De Modelos Hidrologicos. Instituto Para La Mitigación De Los Efectos Del Fenómeno El Niño, Lima, Peru. Recuperado El 3 De 10 De 2018, De [Http://Www.Imefen.Uni.Edu.Pe/Temas_Interes/Modhidro_3.Pdf](http://www.lmefen.uni.edu.pe/temas_interes/modhidro_3.pdf)
- Caracol Radio. (14 De 04 De 2017). Viviendas Inundadas Deja El Desbordamiento Del Rio Jamundi. Recuperado El 07 De 06 De 2018, De Caracol Radio: [Http://Caracol.Com.Co/Emisora/2017/04/14/Cali/1492193394_962132.Html](http://caracol.com.co/emisora/2017/04/14/Cali/1492193394_962132.html)
- Cardona, J. L. (2015). Propuesta Metodológica Para La Valoración Ambiental De Corrientes Hídricas Desde La Perspectiva De La Restauración Fluvial Caso De Estudio Quebrada Olivares-Minitas Manizales (Caldas). Universidad Nacional. Manizales: Universidad Nacional. Recuperado El 07 De 10 De 2018, De [Http://Www.Bdigital.Unal.Edu.Co/49713/7/1088253862.2015.Pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/49713/7/1088253862.2015.pdf)
- Carvajal, Y., Arango, D., & Jimenez, H. (10 De Julio De 2007). Estimación De Caudales Promedios Mensuales Por Subcuencas Hidrograficas Mediante Modelacion Con HEC-HMS. Tecnura, 11(21), 14-28. Recuperado El 3 De 4 De 2017, De [Https://Scholar.Google.Es/Citations?View_Op=View_Citation&Continue=/Scholar%3Fh](https://scholar.google.es/citations?view_op=view_citation&continue=/scholar%3Fh)

l%3Des%26as_Sdt%3D0,5%26scilib%3D1024&Citilm=1&Citation_For_View=Gf527vyaa
aaj:Uebtzra9y70c&Hl=Es&Oi=P

- Castro, L., & Carvajal Escobar, Y. (8 De Junio De 2010). Analisis De Tendencia Y Homogenidad De Series Climatologicas. (Eidenar, Ed.) EIDENAR, 15-25. Recuperado El 6 De 06 De 2017, De Bibliotecadigital.Univalle.Edu.Co/Bitstream/10893/3457/1/03art03.Pdf
- Chavez Jimenez, A., & Gonzalez Zeas, D. (30 De Julio De 2015). El Impacto De Los Caudales Medioambientales En La Satisfacción. Revista Iberoamericana Del Agua, 2, 3-13. Recuperado El 29 De 3 De 2017, De [Http://Www.Sciencedirect.Com/Science/Article/Pii/S2386378115000043#](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2386378115000043#)
- Corporacion Autonoma Regional Del Cauca. (4 De 4 De 2017). CRC.Gov.Co. Obtenido De Cambio Climatico: [Http://Www.Crc.Gov.Co/Index.Php/Ambiental/Cambio-Climatico](http://www.crc.gov.co/index.php/ambiental/cambio-climatico)
- CVC, CIAT, & Gobernacion Del Valle Del Cauca. (2018). Plan Integral De Cambio Climático Para El Valle Del Cauca. Santiago De Cali. Recuperado El 03 De 04 De 2019, De [Http://Ecopedia.Cvc.Gov.Co/Riesgo-Y-Cambio-Climatico/Gestion-Del-Cambio-Climatico/Plan-Integral-De-Cambio-Climatico-Para-El](http://ecopedia.cvc.gov.co/riesgo-y-cambio-climatico/gestion-del-cambio-climatico/plan-integral-de-cambio-climatico-para-el)
- CVC, Secretaria De Ambiente Agricultura Y Pesca, & CIAT. (2018). Plan Integral De Cambio Climatico Para El Valle Del Cauca PCCC. Santiago De Cali. Recuperado El 11 De 04 De 2019
- DANE. (2005). Boletin Censo General 2005 Jamundi. Boletin, Bogota. Recuperado El 14 De 06 De 2018, De [Https://Www.Dane.Gov.Co/Files/Censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/76364T7T000.PDF](https://www.dane.gov.co/files/censo2005/PERFIL_PDF_CG2005/76364T7T000.PDF)
- Diario De Occidente. (15 De 09 De 2017). Jamundí Impulsa El Desarrollo. Obtenido De Diario De Occidente: [Http://Occidente.Co/Jamundi-Impulsa-El-Desarrollo/](http://occidente.co/jamundi-impulsa-el-desarrollo/)
- Diaz Carvajal, A., & Mercado Fernandez, T. (2017). Determinacion Del Numero De Curva En La Subcuenca De Betanci (Cordoba Colombia) Mediante Teledeteccion Y SIG. SCIELO, 35(2), 19. Recuperado El 11 De 4 De 2019, De [Www.Scielo.Org.Co/Pdf/Inde/V35n2/2145-9371-Inde-35-02-00452.Pdf](http://www.scielo.org.co/pdf/inde/V35n2/2145-9371-inde-35-02-00452.pdf)
- Diaz, L., Coral, C., & Carvajal, Y. (2015). Modelación Hidrológica Apoyada En Herramientas Geomáticas, Para El Análisis De Caudales Maximos En La Fase Fría Del Fenómeno Enos. Tesis Pregrado, Universidad Del Valle, Valle Del Cauca, Santiago De Cali.
- El Pais. (27 De 01 De 2017). Desbordamiento De Río Jamundí Afectó Tres Urbanizaciones En La Zona Rural. Recuperado El 07 De 06 De 2018, De El Pais: [Http://Www.Elpais.Com.Co/Valle/Desbordamiento-De-Rio-Jamundi-Afecto-Tres-Urbanizaciones-En-La-Zona-Rural.Html](http://www.elpais.com.co/valle/desbordamiento-de-rio-jamundi-afecto-tres-urbanizaciones-en-la-zona-rural.html)
- El Tiempo. (06 De 06 De 1997). Jamundí Analiza Su Futuro Ambiental. El Tiempo, Pág. 1. Recuperado El 25 De 06 De 2018, De [Http://Www.Eltiempo.Com/Archivo/Documento/MAM-636122](http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-636122)
- El Tiempo. (16 De Agosto De 2014). Mercurio Por Minería Ilegal Ya Llega A 80 Municipios. Eltiempo. Obtenido De [Http://Www.Eltiempo.Com/Archivo/Documento/CMS-14391252](http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14391252)
- El Tiempo. (27 De Julio De 2014). Panorama Ardiente: Alerta Por Los Estragos Que Abren Paso Al Fenómeno De El Niño. El Tiempo. Obtenido De

Esquivel, G., Sanchez, I., Lopez, Lopez, A., Lopez, R., & Bueno, P. (2013). Modelación Del Escurrimiento En Una Subcuenca Del Trópico Húmedo De México Y Su Análisis Mediante Indices De Eficiencia Predictiva. *Agrofaz*, 13(2), 6. Recuperado El 3 De 10 De 2018, De [Http://Www.Agrofaz.Mx/Wp-Content/Uploads/Articulos/2013132VII_1.Pdf](http://www.agrofaz.mx/wp-content/uploads/articulos/2013132VII_1.pdf)

Esri. (2017). Learn Arcgis. Recuperado El 13 De 08 De 2018, De Arcgis: [Https://Learn.Arcgis.Com/Es/Related-Concepts/Digital-Elevation-Models.Htm](https://learn.arcgis.com/es/related-concepts/digital-elevation-models.htm)

FAO. (2013). Afrontar La Escasez De Agua Un Marco De Accion Para La Agricultura Y La Seguridad Alimentaria. Organización De Las Naciones Unidas Para La Alimentación Y La Agricultura, Roma. Recuperado El 4 De 4 De 2017, De [Http://Www.Fao.Org/3/A-I3015s.Pdf](http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf)

FAO. (2018). Portal De Suelos De La FAO. Recuperado El 14 De 08 De 2018, De Propiedades Físicas Del Suelo: [Http://Www.Fao.Org/Soils-Portal/Soil-Survey/Propiedades-Del-Suelo/Propiedades-Fisicas/Es/](http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/properties-of-soil/properties-physical/es/)

Ferreira Marmontel, C. (2018). Modelo Hidrológico Swat Na Bacia Hidrográfica Do Rio Paraibuna, Região Da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil. Tesis, Sao Paulo, Brasil. Recuperado El 15 De 06 De 2018, De [Https://Repositorio.Unesp.Br/Bitstream/Handle/11449/154141/Marmontel_Cvf_Dr_Botfca.Pdf?Sequence=3](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/154141/Marmontel_Cvf_Dr_Botfca.pdf?sequence=3)

Franquet, J. M. (2003). Cinco Temas De Hidrología E Hidráulica. Catalunya: Universidad Internacional De Catalunya.

G. Ramirez, J. (2017). Modelado De Descargas Diarias De Los Ríos Usumacinta, Grijalva Y Coatzacoalcos Hacia El Golfo De México. Ensenada Center For Scientific Research And Higher Education, 1. Recuperado El 15 De 06 De 2018, De [Https://Www.Researchgate.Net/Profile/Javier_G_Ramirez/Publication/323429962_Modelado_De_Descargas_Diarias_De_Los_Rios_Usumacinta_Grijalva_Y_Coatzacoalcos_Hacia_El_Golfo_De_Mexico/Links/5a95bf6baca27214056943ef/Modelado-De-Descargas-Diarias-De-Los-Rios-Usumacinta-Grijalva-Y-Coatzacoalcos-Hacia-El-Golfo-De-Mexico](https://www.researchgate.net/profile/Javier_G_Ramirez/publication/323429962_Modelado_De_Descargas_Diarias_De_Los_Rios_Usumacinta_Grijalva_Y_Coatzacoalcos_Hacia_El_Golfo_De_Mexico/links/5a95bf6baca27214056943ef/Modelado-De-Descargas-Diarias-De-Los-Rios-Usumacinta-Grijalva-Y-Coatzacoalcos-Hacia-El-Golfo-De-Mexico.pdf)

Gamarra Vergara, J. R. (2007). La Economía Del Departamento Del Cauca: Concentración De Tierras Y Pobreza. Banco De La Republica. Cartagena De Indias: Banco De La Republica. Recuperado El 03 De Marzo De 2017, De [Http://Www.Banrep.Gov.Co/Docum/Lectura_Finanzas/Pdf/DTSER-95.Pdf](http://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_Finanzas/Pdf/DTSER-95.Pdf)

Hydrologic Engineering Center. (2014). Us Army Corps Of Engineers. Recuperado El 06 De 05 De 2017, De [Http://Www.Hec.Usace.Army.Mil/Software/Hec-Hms/Features.Aspx](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/features.aspx)

IDEAM. (2001). El Agua. En P. LEYVA (Ed.), EL MEDIO AMBIENTE EN COLOMBIA (2 Ed., Pág. 76). Bogota D.C.: IDEAM. Recuperado El 6 De 4 De 2017, De [Http://Documentacion.Ideam.Gov.Co/Openbiblio/Bvirtual/000001/Cap4.Pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap4.pdf)

IDEAM. (2013). Zonificación Y Codificación De Unidades Hidrográficas E Hidrologológicas De Colombia. Bogota D.C., Colombia: Publicación Aprobada Por El Comité De Comunicaciones Y Publicaciones Del IDEAM.

- IDEAM. (2014). IDEAM.Gov.Co. Recuperado El 12 De 05 De 2017, De MODELACIÓN HIDROLÓGICA: [Http://Www.Ideam.Gov.Co/Web/Agua/Modelacion-Hidrologica](http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica)
- IDEAM. (2015). Estudio Nacional Del Agua 2014. Bogota, D.C.: IDEAM.
- IGAC. (2009). Estudio General De Suelos Y Zonificacion De Tierras Departamento Del Cauca. Bogota: Imprenta Nacional De Colombia. Obtenido De [Ftp://Gisweb.Ciat.Cgiar.Org/Dapa/Users/Apantoja/London/Colombia/Suelos/00_Shape_suelos/Proyecto_Dnp/Memorias_Suelos_Oficiales/Cauca/](ftp://gisweb.ciat.cgiar.org/dapa/users/apantoja/london/colombia/suelos/00_shape_suelos/proyecto_dnp/memorias_suelos_oficiales/cauca/)
- IGAC. (01 De 09 De 2015). Suelos Afectados Por El Mal Uso, Empiezan A Sufrir Las Consecuencias De La “Ola De Calor” En Colombia. Obtenido De IGAC: [Https://Noticias.Igac.Gov.Co/Es/Contenido/Suelos-Afectados-Por-El-Mal-Uso-Empiezan-Sufrir-Las-Consecuencias-De-La-Ola-De-Calor-En](https://noticias.igac.gov.co/es/contenido/suelos-afectados-por-el-mal-uso-empiezan-sufrir-las-consecuencias-de-la-ola-de-calor-en)
- IGAC. (5 De Diciembre De 2016). Cauca No Debería Basar Su Economía En El Uso Agropecuario De Sus Tierras. Obtenido De [Http://Noticias.Igac.Gov.Co/Cauca-No-Deberia-Basar-Economia-Uso-Agropecuario-Tierras/](http://noticias.igac.gov.co/cauca-no-deberia-basar-economia-uso-agropecuario-tierras/)
- IGAC. (05 De 12 De 2016). Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Recuperado El 19 De 06 De 2018, De Tanta Caña De Azúcar Ha Generado Estragos En Los Suelos Del Valle Del Cauca: IGAC: [Https://Noticias.Igac.Gov.Co/En/Contenido/Tanta-Cana-De-Azucar-Ha-Generado-Estragos-En-Los-Suelos-Del-Valle-Del-Cauca-Igac](https://noticias.igac.gov.co/en/contenido/tanta-cana-de-azucar-ha-generado-estragos-en-los-suelos-del-valle-del-cauca-igac)
- IRENA. (2005). Marco Conceptual Y Manejo De Cuencas En El Peru. Delimitacion Y Codificacion De Cuencas Hidrograficas En Peru. Obtenido De Direccion De Recursos Hidricos: [Www.Ipnades.Org/Files/Educ/Delimitacion_Codificacion_Cuencas.Pdf](http://www.ipnades.org/files/educ/delimitacion_codificacion_cuencas.pdf).
- Martinez, D., Castrillon, A., & Ramirez, C. (2014). Zonificación De Amenazas Po Inundaciones En Las Zonas Urbana Y De Expansión Del Municipio De Jamundi (Valle Del Cauca). Santiago De Cali: Universidad Del Valle. Recuperado El 07 De 06 De 2018, De [Http://Bibliotecadigital.Univalle.Edu.Co/Bitstream/10893/7738/1/3754-200446255.Pdf](http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7738/1/3754-200446255.pdf)
- Matauco, A. I. (2004). Análisis Morfométrico De La Cuenca Y De La Red De Drenaje Del Rio Zadorra Y Sus Afluentes Aplicado A La Peligrosidad De Crecidas. Boletín De La Agen, 311-329. Obtenido De [Https://Scholar.Google.Es/Scholar?Hl=Es&Q=An%C3%81lisis+Morfom%C3%89trico+De+La+Cuenca+Y+De+La+Red+De+Drenaje+Del+Rio+Zadorra+Y+Sus+Afluentes+Aplicado+A+La+Peligrosidad+De+Crecidas&Btnq=&Lr=](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=an%C3%81lisis+morfom%C3%89trico+de+la+cuenca+y+de+la+red+de+drenaje+del+rio+zadorra+y+sus+afluentes+aplicado+a+la+peligrosidad+de+crecidas&btnq=&lr=)
- MINAMBIENTE. (2016). SIAC. Recuperado El 14 De 08 De 2018, De Suelo: [Http://Www.Siac.Gov.Co/Suelo](http://www.siac.gov.co/suelo)
- Ministerios De Ambiente Y Desarrollo Sostenible. (2 De 8 De 2012). Decreto Numero 1640. Bogota D.C., Colombia.
- Miranda Aragon, L., Ibañez Castillo, A., Valdez Lazalde, R., & Hernandez De La Rosa, P. (2009). Modelación Hidrológica Empírica Del Gasto De 100 Años De Periodo De Retorno Del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero En Dos Escenarios De Uso Del Suelo. Agrociencia, 333-344.
- Molnar, P. (2011).
- Moncada, L. (2009). Econometria. Universidad Catolica De Loja.

- Munar Vivas, O. J. (2010). Determinación Del Potencial De Los Modelos Digitales De Elevación Como Fuente De Datos Para La Evaluación De La Aptitud De Las Tierras. Caso Del Cultivo De Mango. Universidad Nacional. Bogota: Facultad De Agronomía. Obtenido De [Http://Bdigital.Unal.Edu.Co/2671/1/795055.2010.Pdf](http://Bdigital.Unal.Edu.Co/2671/1/795055.2010.Pdf)
- Noticias RCN. (14 De 01 De 2018). Alerta En Cali Por Torrencial Aguacero Que Ha Causado Estragos En La Comunidad. Recuperado El 07 De 06 De 2018, De Noticias RCN: [Https://www.Noticiasrcn.Com/Videos/Alerta-Cali-Torrential-Aguacero-Ha-Causado-Estragos-Comunidad](https://www.noticiasrcn.com/videos/alerta-cali-torrential-aguacero-ha-causado-estragos-comunidad)
- OMM. (2012). Glosario Hidrológico Internacional (No.385 Ed.). WMO. Recuperado El 20 De 4 De 2017, De [Http://Unesdoc.Unesco.Org/Images/0022/002218/221862M.Pdf](http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.Pdf)
- Ritter, A., Muñoz-Carpena, R., & Regalado, C. (2011). Capacidad De Predicción De Modelos aplicados A La ZNS: Herramienta Informática Para La Adecuada Evaluación De La Bondad De Ajuste Con Significación Estadística. ZONANOSATURADA. Recuperado El 11 De 4 De 2019, De [Www.Zonanosaturada.Com/Zns11/Publications/P259.Pdf](http://www.zonanosaturada.com/zns11/publications/p259.pdf)
- Rodríguez López, Y., & Marrero De León, N. (2015). Simulación Hidrológica En Dos Subcuencas De La Cuenca Del Río Zaza De Cuba. Ingeniería Hidráulica Y Ambiental, 36(2), 109-123. Recuperado El 3 De 4 De 2017, De [Http://Scielo.Sld.Cu/Pdf/Riha/V36n2/Riha09215.Pdf](http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v36n2/riha09215.pdf)
- Rojas, R. (Octubre De 2005). Evaluación Preliminar Del Modelo HEC-HMS. Centro De Estudios Forestales Y Ambientales De Postgrado. Universidad De Los Andes. Recuperado El 03 De 04 De 2017, De [Http://Webdelprofesor.Ula.Ve/Ingenieria/Rojas.R/Evalhec.Pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/rojas.r/evalhec.pdf)
- Sanchez, H. (2015). Simulación Hidrológica De La Cuenca Del Río Alambi En Nanegal Frente Al Cambio Del Uso Del Suelo Y Su Impacto En El Recurso Hídrico. Recuperado El 3 De 4 De 2017, De [Http://Www.Dspace.Ups.Edu.Ec/Handle/123456789/9457](http://www.dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/9457)
- Uribe, N. (2010). SWAT Conceptos Básicos Y Guía Rápida Para El Usuario. CIAT. Recuperado El 1 De 6 De 2018, De [Https://Swat.Tamu.Edu/Media/46967/Swat2005-Tutorial-Spanish.Pdf](https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf)
- Urrego Zuluaga, J. P. (2008). Modelación De La Subcuenca Río Ovejas Aplicando HEC-HMS 3.1.0 Para Estimar La Escorrentía Y El Análisis De Escenarios Meteorológicos. Trabajo De Grado, Universidad Del Valle, Santiago De Cali.
- Valencia, F., & Guevara, E. (2014). Validación Del Modelo HEC HMS En La Cuenca Del Río Cabriales Para El Análisis Hidrológico. Revista Ingeniería UC, 21(1), 36-49. Recuperado El 24 De 05 De 2017
- Vásquez, F. (2015). Caracterización De La Relación Precipitación-Escorrentía En Las Microcuencas El Guayabo Y Los Anteojos. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Zamorano, Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Recuperado El 30 De 3 De 2017, De [Https://Bdigital.Zamorano.Edu/Bitstream/11036/4524/1/IAD-2015-032.Pdf](https://Bdigital.Zamorano.Edu/Bitstream/11036/4524/1/IAD-2015-032.Pdf)
- Verdú, J., Martínez, J., & García, N. (2004). Respuesta Hidrológica De La Cuenca Del Río Isábena (Huesca) A Los Cambios En La Vegetación Y Los Usos Del Suelo En La Década De Los Noventa. (L. Mallada, Ed.) Revista De Ciencias(11), 213-228.