

Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Frio, municipios de Ciénaga y zona bananera, departamento del Magdalena

Hydrologic and hydraulic analysis of the Frio river basin, municipality of Cienaga and zona bananera, Magdalena's Department

Análise hidrológica e hidráulica da cuenca do rio Frio, municípios de Ciénaga e zona bananera, departamento do Magdalena

Alfredo Ramos Moreno **
José Antonio Pacheco Fontalvo ***

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - Universidad Central

Resumen

Los modelos hidrológicos e hidráulicos han permitido grandes avances en los estudios de las cuencas hidrográficas, la utilización de modelos

Fecha de recepción del artículo: 24 de enero de 2016

Fecha de aceptación del artículo: 1 de Junio de 2017

DOI: <http://dx.doi.org/10.22335/rlct.v9i1.302>

*Artículo resultado de investigación del proyecto. "Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del Río Frio, municipios de Ciénaga y zona bananera, departamento del Magdalena"

** Ingeniero Agrícola énfasis en Suelos Aguas. M.Sc. Hydrology, Hydraulic and Environmental Engineering. Magister Ecología y Ecosistemas Estratégicos. Docente Investigador. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. UPTC - Tunja. Docente cátedra Universidad Central - Bogotá. Email: <http://orcid.org/0000-0002-2707-4726>

*** Ingeniero Ambiental. Filiación: Universidad Central. Email: josepachecofontalvo@gmail.com Orcid: <http://orcid.org/0000-0002-4463-8538>

como HEC RAS y HEC HMS los cuales han recibido una gran acogida por la comunidad mundial de ingenieros que se desempeñan en el área de la meteorología, hidrología, hidráulica y otras áreas relacionadas con el manejo del recurso hídrico. Gracias a sus grandes aproximaciones los modelos de HEC RAS y HEC HMS fueron seleccionados para realizar las modelaciones para determinar el comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Frio ubicada en el municipio de Zona Bananera, departamento del Magdalena como producto de las inundaciones que se han presentado en los últimos años.

En este artículo se expone una cantidad de análisis cuantitativos y cualitativos que

posibilitan la obtención de la información de entrada de los modelos de simulación, posteriormente, dicha información fue introducida a los modelos para lograr determinar el comportamiento bajo escenarios extremos a los que la cuenca del río Frío puede ser sometida.

De acuerdo con los resultados obtenidos las áreas donde se presentan los principales inconvenientes de carácter hidráulico e hidrológico, se deben principalmente a la configuración geométrica de la batimetría del río y al desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas que han generado cambios en el uso del suelo, modificando los números de curva y aumentando la escorrentía hacia los afluentes y finalmente hacia el río principal.

Frente a esta situación se relacionan una serie de recomendaciones que buscan corregir el régimen hidrológico y comportamiento hidrodinámico para evitar nuevas inundaciones que pongan en riesgo a la población que se encuentra en las inmediaciones del río Frío en el municipio de la Zona Bananera Departamento del Magdalena.

Palabras clave: Modelos, HEC RAS, HEC HSM, cuenca, hidrología, hidráulica.

Abstract

The hydrologic and hydraulic models has allowed major advancements in the study of watersheds; the usage of models such as HEC RAS and HEC HMS has had a great reception from the global community of engineers who work at the areas of meteorology, hydrology, hydraulics, and other areas related with management of water resources. Thanks to their large approximations, the models HEC RAS and HEC HMS were selected to do the modeling in this work, having in mind, this degree work seeks to determine the hydrologic and hydraulic behavior of the basin of Rio Frio in the municipality of the "Zona Bananera Departamento del Magdalena" as a result of the floods that have occurred in the last few years.

In this article we show an amount of quantitative and qualitative analysis that makes the obtaining of the input of simulation models possible. Subsequently, that information was introduced to the models to determine the behavior under the extreme scenarios to which the basin Río Frio can be exposed.

According to the obtained results, the areas where the major disadvantages of hydraulic and hydrological character is present, is mainly due to the geometric configuration of the river bathymetry and the development of farming activities. These attributes have generated changes in the land use, modifying the curve numbers and increasing the runoff toward the tributaries and finally toward the main river.

Faced with this situation a number of recommendations that seek to correct the hydrological regime and hydrodynamic behavior to prevent new floods that can put in risk the population that is found at the vicinity of the Rio Frio basin in the town of Zona Bananera Departamento del Magdalena.

Keywords: Models, HEC RAS, HEC HSM, basin, hydrology, hydraulics.

Resumo

Os modelos hidrológicos e hidráulicos permitiram grandes avanços no estudo das bacias hidrográficas; O uso de modelos como HEC RAS e HEC HMS recebeu uma ótima recepção da comunidade global de engenheiros que trabalham nas áreas de meteorologia, hidrologia, hidráulica e outras áreas relacionadas à gestão de recursos hídricos. Graças às suas grandes aproximações, os modelos HEC RAS e HEC HMS foram selecionados para fazer a modelagem neste trabalho, tendo em mente que este trabalho de licenciamento busca determinar o comportamento hidrológico e hidráulico da bacia de Rio Frio no município do "Zona Bananera Departamento del Magdalena" como resultado das inundações ocorridas nos últimos anos.

Neste artigo, mostramos uma quantidade de análise quantitativa e qualitativa que possibilita

a obtenção da entrada de modelos de simulação. Posteriormente, essa informação foi introduzida nos modelos para determinar o comportamento sob os cenários extremos aos quais a bacia do Rio Frio pode ser exposta.

De acordo com os resultados obtidos, as áreas em que as principais desvantagens do caráter hidráulico e hidrológico estão presentes, deve-se principalmente à configuração geométrica da batimetria do rio e ao desenvolvimento de atividades agrícolas. Esses atributos geraram mudanças no uso da terra, modificando os números das curvas e aumentando o escoamento em direção aos afluentes e, finalmente, para o rio principal.

Diante dessa situação, uma série de recomendações que buscam corrigir o regime hidrológico e o comportamento hidrodinâmico para evitar novas inundações que possam arriscar a população que se encontra nas imediações da bacia do Rio Frio na cidade da Zona Bananera Departamento del Magdalena.

Palabras-clave: Modelos, HEC RAS, HEC HSM, bacia, hidrologia, hidráulica.

Introducción

Colombia se enfrenta a una situación de riesgo a tener desastres naturales que podrían afectar su desarrollo. Factores como la migración de la población de zonas rurales a sectores urbanos, la degradación ambiental y el cambio acelerado de uso del suelo agravan más la situación actual (Campos, et al., 2012). Estos factores contribuyen a fomentar la ocurrencia de anomalías naturales como sismos, deslizamientos e inundaciones; esta última anomalía ha cobrado mayor relevancia en los últimos años debido a que provoca millonarias pérdidas al país y perjudica la calidad de vida de sus habitantes. Uno de los hechos más históricos que sufrió el territorio colombiano fue la emergencia invernal como consecuencias del fenómeno de La Niña en el periodo 2010 – 2011, cuando 3'219.239 personas (cerca del 7% de la población nacional) se vieron damnificadas o afectadas por las inundaciones (CEPAL, 2012).

La cuenca hidrográfica del río Frio es uno de los principales recursos hídricos del Departamento del Magdalena y una importante fuente de abastecimiento de agua para el desarrollo de las actividades económicas y domésticas de las comunidades de la región que se ven beneficiadas a través de su red de drenajes (CORPAMAG, 2014).

En los municipios del departamento de Magdalena los desastres producidos por el fenómeno de La Niña, hicieron que el 29% de la población quedara afectada por las fuertes lluvias (UNGRD, 2012). Precisamente en el corregimiento de Río Frio en el municipio de Zona Bananera el cauce del río Frio al aumentar su nivel de agua como consecuencia de estas precipitaciones dejó a 533 adultos y 278 niños damnificados por la ola invernal (Alcaldía Zona Bananera, 2010). Ante esta emergencia, las autoridades administrativas y ambientales del departamento han manifestado la necesidad de implementar medidas de control frente a la situación para poder mitigar o evitar las inundaciones del río Frio en el municipio de Zona Bananera.

Sin embargo, las prácticas agropecuarias intensivas en la parte alta y media de la cuenca hidrográfica del río Frio, la reducción de la ronda hídrica y otras actividades han provocado desbordamientos del río Frio que afectan a las zonas de riego y disminuyen los recursos naturales perjudicando la calidad de vida de los pobladores del municipio de Zona Bananera. Igualmente la alta sedimentación por arrastre de depósitos aluviales en la desembocadura del río (Ciénaga Grande de Santa Marta) agrava aún más la situación ya que este fenómeno potencia las inundaciones por los procesos de colmatación (Universidad de Cartagena, 2012, pág. 178).

Como alternativas a la problemática de la Cuenca del río Frio se ha dispuesto la implementación de modelos de simulación hidráulicos e hidrológicos (HEC HMS y HEC RAS) que admitan alcanzar un análisis detallado de los escenarios propensos a sufrir en las cuencas hidrográficas y en los cauces que componen las

mismas. Las herramientas computacionales son utilizadas mundialmente gracias a su eficacia en el análisis de alternativas de corto y largo plazo permiten la ejecución y planeación de obras de control de inundaciones (Bustamante R. 2008).

Metodología

Para el desarrollo de la modelación de la cuenca del río Frío se desarrollaron varios procedimientos que se describen a continuación:

Recopilación de información

CORPAMAG (mapas de topografía y drenajes, de tipos y usos del suelo y de geología de la Cuenca). Batimetría del cauce del río Frío que cuenta con 24 km medidos con secciones cada 50 metros.

IGAC - Bogotá (cartografía básica - planchas 18 y 19) escala 1: 100000.

IDEAM - Bogotá (series históricas de las estaciones climatológicas y mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio).

Caracterización de la zona de estudio

Visita de campo a los tramos del cauce del río Frío para lograr identificar ciertas condiciones hidrológicas e hidráulicas importantes a la hora de ejecutar las modelaciones respectivas.

Caracterización y modelación hidrológica

Hidrografía de la cuenca, identificando la cantidad de subcuencas pertenecientes al área de estudio.

Determinación de las características físicas de la cuenca del río Frío a través del software ArcGIS.

Estimación y cálculo de las precipitaciones de diseño por el método de las curvas de intensidad, duración y frecuencia (Curvas IDF) de las estaciones relevantes para la zona, para

obtener los hietogramas de precipitación y la aplicación del modelo HEC HMS.

Determinación del flujo base en cada una de las subcuencas, el procedimiento se realizó a través de la estación hidrometeorológica San Isidro del IDEAM, única activa en la zona estudio, aplicando la técnica de un ajuste por rendimientos para poder obtener los flujos bases para cada una de las subcuencas.

Evaluación de los tránsitos a lo largo del cauce principal de la cuenca del río Frío, tomando la batimetría suministrada por CORPAMAG la cual fue modificada por un canal antrópico para el cálculo del transporte de la escorrentía.

Caracterización y modelación hidráulica

Obtención de las hidrógrafas de salida de HEC HMS se procedió a obtener los parámetros hidráulicos a través del software HEC RAS.

Información batimétrica del río Frío y curva de granulometría de CORPAMAG, se obtiene el número de Manning, la longitud del cauce aguas abajo, los bordes de las secciones, entre otros valores relevantes para la modelación del régimen de flujo permanente.

Determinación de los aportes de sedimentos que el río Frío hace a la Ciénaga Grande de Santa Marta a través del módulo de sedimentos que HEC RAS.

Resultados y discusión

La cuenca del río Frío se localiza entre los municipios de Ciénaga y Zona Bananera, departamento del Magdalena, que nace en la vertiente occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, entre las coordenadas 10°50'N, 74°16'W y 11°1'N, 73°51'W y vierte sus aguas en la Ciénaga Grande de Santa Marta entre las coordenadas 10°52'6.28"N, 74°19'17.98"W y 10°52'7.21"N, 74°19'26.85"W. La cuenca limita con las cuencas del río Córdoba y río Guachaca por el norte, con las cuencas de los ríos Buritaca y Don Diego por el este, al sur con las cuencas

del río Sevilla y Orihueca y por el oeste con la cuenca de La Ciénaga del Chino que hace parte del complejo de la Ciénaga Grande de Santa

Marta (CORPAMAG, 2010). La cuenca del río Frío cuenta con una red hidrográfica de varios afluentes (Figura 1).

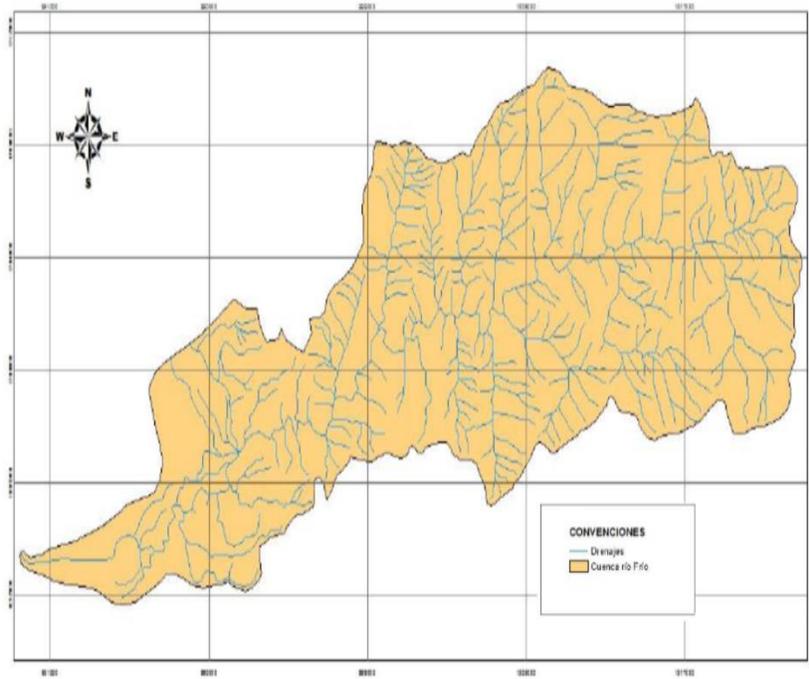


Figura 1. Mapa de la cuenca del río Frío.
Fuente: Autores.

Para la caracterización hidrológica del estudio se requirió dividir la cuenca del río Frío en subcuencas, este procedimiento se logró a través del sistema de información geográfico ArcGIS tomando como referencia la cartografía básica de las planchas 18 y 19 del IGAC a escala 1:100000, generando veintidos (22) subcuencas (Figura 2).

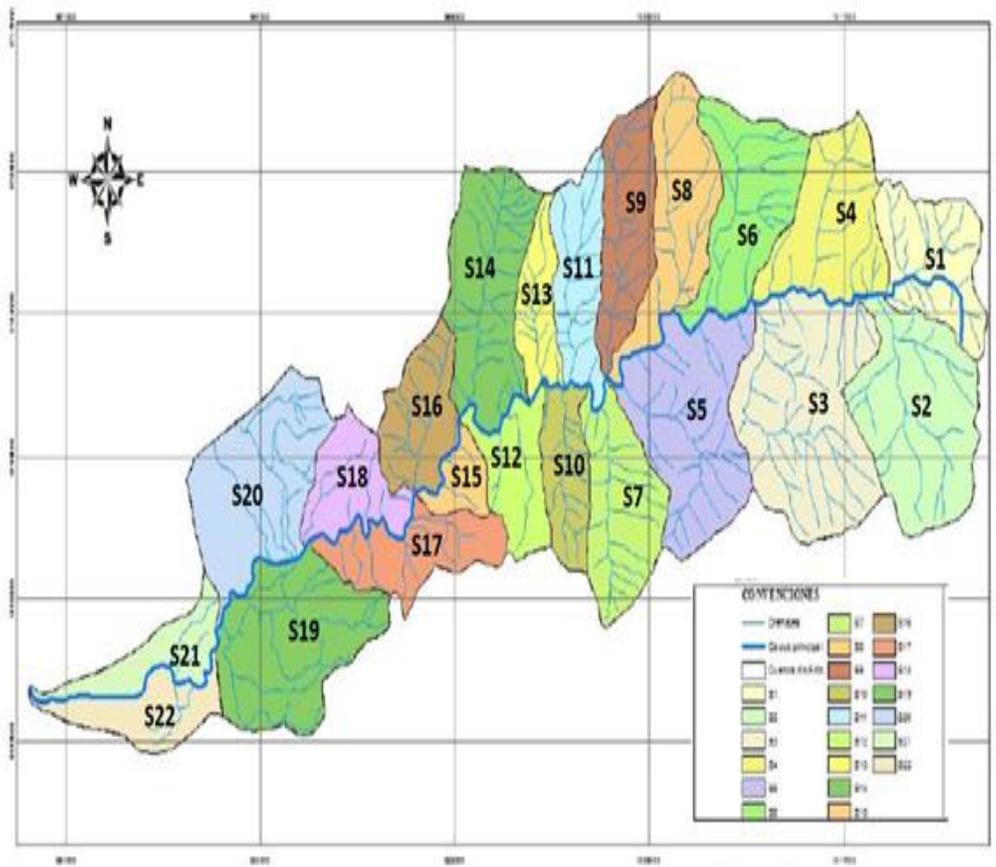


Figura 2. Mapa de las subcuencas del río Frío
Fuente: RAMOS M. A. (2012). Analisis de climático e hidrológico de los distritos de riego Prado Sevilla, Río Frío y Tucurínca. INCODER.

En la Tabla 1 y Figura 2 se presentan los parámetros morfométricos obtenidos de las subcuencas del río Frío.

Tabla 1.

Parámetros morfométricos de las subcuencas del río Frío

ID	NOMBRE DE LA SUBCUENCA	AREA (Km ²)	LONGITUD (m)	ALTITUD MAXIMA (msnm)	ALTITUD (msnm)	PENDIENTE Sc (m/m)	Tc (min)	Tlag (min)
S1	Cuenca Alta	16.17	3 414.0	3100	2000	0.322	13.1	7.8
S2	Q. Cimarrona	28.28	7 349.7	4000	2000	0.272	27.5	16.5
S3	Q. La Murcia	35.95	9 633.3	3800	1400	0.249	35.9	21.5
S4	Q. Sin Nombre	20.08	5 507.6	2800	1600	0.218	22.3	13.4
S5	Q. Bodelta	28.41	7 763.8	2400	900	0.193	31.1	18.7
S6	Q. Piedras Blancas 1	19.77	7 313.3	2100	1200	0.123	33.3	20.0
S7	Q. Palmichal	17.46	6 407.0	1800	700	0.172	27.6	16.6
S8	Q. La Reserva	18.43	7 342.0	2400	1100	0.177	31.3	18.8
S9	Q. La Sirena	14.95	8 990.1	2100	800	0.145	40.7	24.4
S10	Q. Guandusaca	9.73	5 088.6	1500	600	0.177	23.1	13.9
S11	Q. Piedras Blancas 2	13.10	6 032.5	1700	600	0.182	26.4	15.9
S12	Q. Eugenia	10.75	4 843.4	1500	500	0.206	21.1	12.7
S13	Q. Nueva Granada	8.01	5 554.4	1500	600	0.162	26.2	15.7
S14	Q. La Secreta	22.90	7 223.6	1100	300	0.111	33.1	19.9
S15	Q. San Pedro	4.66	1 881.9	1000	300	0.372	7.9	4.8
S16	Q. La Unión	12.46	4 810.0	800	300	0.104	23.7	14.2
S17	Q. Santa Clara	14.24	3 188.5	1000	200	0.251	13.0	7.8
S18	Q. La Matea	11.27	4 849.9	900	100	0.165	22.0	13.2
S19	Q. Rodriguez	27.40	9 650.3	500	18	0.050	50.9	30.5
S20	Q. Calabacito	26.29	6 941.3	500	18	0.069	34.4	20.7
S21	Q. Estación San Isidro	9.39	3 143.9	20	12	0.003	33.5	20.1
S22	Q. Desembocadura	10.55	2 990.7	20	12	0.003	31.2	18.7

Fuente: Autores.

En la evaluación de la precipitación se tomaron siete (7) estaciones climatológicas cercanas al área de estudio o dentro de ella, estas estaciones pertenecen al IDEAM (Tabla 2). Cada estación posee registros históricos de la precipitación total mensual y precipitación máxima en 24 horas expresadas en mm, las series de datos históricos fueron utilizados en los diferentes procedimientos antes de ser ingresados a la plataforma del software HEC HMS, para el cálculo del modelo lluvia-escorrentía.

Tabla 2.

Estaciones climatológicas del IDEAM ubicadas en la cuenca del río Frío

CODIGO	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	TIPO
29060280	SAN ISIDRO	ZONA BANANERA	MAGDALENA	PM
29060070	SAN PABLO	CIENAGA	MAGDALENA	PM
29060310	SEVILLANO	CIENAGA	MAGDALENA	PM
29060550	EL RUBY	ZONA BANANERA	MAGDALENA	PM
15015050	APTO SIMON BOLIVAR	SANTA MARTA	MAGDALENA	SP
15015060	SAN LORENZO	SANTA MARTA	MAGDALENA	CP
15015110	ALTO DE MIRA	SANTA MARTA	MAGDALENA	CO

Fuente: IDEAM.

Distribución de la precipitación

La distribución de la precipitación se hizo para la totalidad del área de estudio, teniendo en cuenta que las estaciones no presentan una distribución uniforme que permitan trazar curvas de igual precipitación sobre la Cuenca, por lo tanto se utiliza el método de polígonos de Thiessen (Bateman, 2007). De acuerdo a lo anterior se construyen los polígonos de Thiessen mediante la herramienta de ArcGIS y respecto a las siete (7) estaciones del IDEAM correspondientes a la zona de influencia de la Cuenca del río Frío (Tabla 2 y Figura 3).

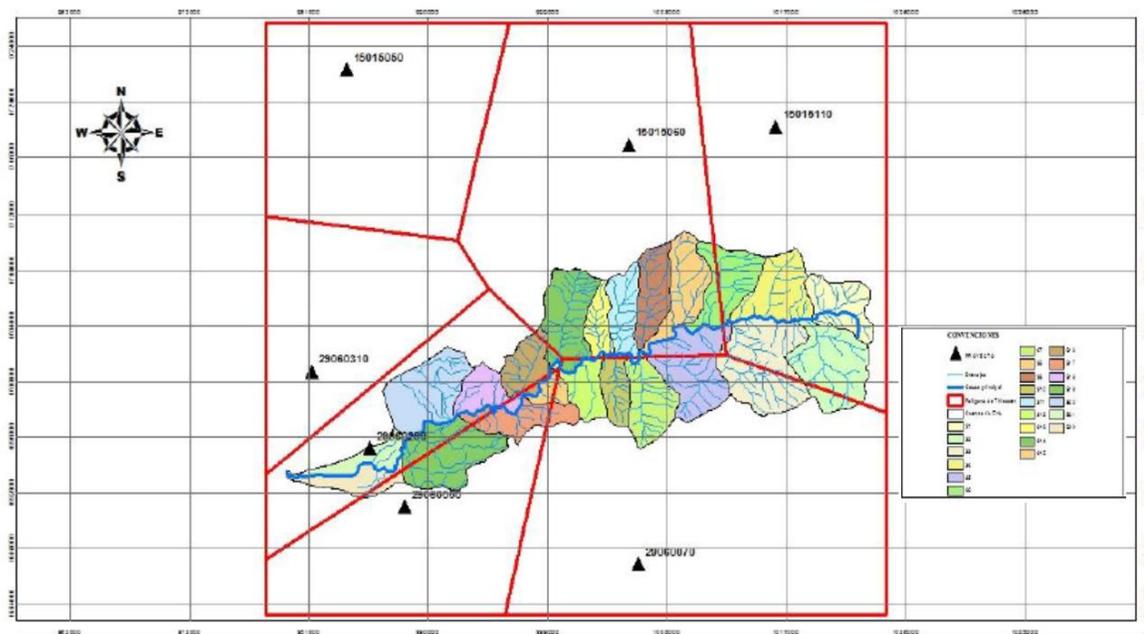


Figura 3. Polígonos de Thiessen de la cuenca del río Frío

Fuente: Autores.

Con base a los polígonos de Thiessen obtenidos, se procede a determinar el porcentaje del área que ocupa cada estación sobre las subcuencas del río Frío nuevamente utilizando ArcGIS; las estaciones de Sevillano (29060310) y Apto Simón Bolívar (15015050) no se les asigna ningún área dentro de la cuenca por lo cual estas no serán relevantes en la asignación de los pluviómetros.

Curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF)

Las curvas de intensidad, duración y frecuencia de cada una de las estaciones seleccionadas se obtuvieron por el método de Curvas sintéticas regionalizadas de IDF para Colombia o también llamado método simplificado; este procedimiento se puede llevar a cabo siempre y cuando no se disponga en el área de estudio de datos históricos de corta duración es decir de datos pluviográficos (Instituto Nacional de Vías, 2009). La expresión que se utiliza para esta metodología es la siguiente:

$$i = \frac{a \times T^b \times M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c} \quad (1)$$

donde:

i: Intensidad de precipitación (mm/h)

T: Periodo de retorno (años)

t: Duración de la lluvia (min)

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual

a, b, c, d: Parámetros de ajuste, que dependen de la ubicación geográfica de la zona de interés en Colombia.

Respecto a la zona de estudio en la que se ubica la cuenca del río Frío los parámetros de ajuste a, b, c y d corresponden a 24.85, 0.22, 0.50 y 0.10 respectivamente; por lo que la ecuación adquiere de la siguiente forma:

$$i = \frac{24.85 \times T^{0.22} \times M^{0.10}}{\left(\frac{t}{60}\right)^{0.50}} \quad (2)$$

A partir de ecuación anterior se determina las curvas de intensidad, duración y frecuencia de la estación San Isidro como la más importante en la zona de estudio la cual se presenta en la Tabla 3 y Figura 4.

Tabla 3. Curvas IDF (mm/hr)de la estación San Isidro

Tiempo (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	20	50	100
10	110.19	134.80	157.01	182.87	223.71	260.57
20	77.92	95.32	111.02	129.31	158.19	184.25
30	63.62	77.83	90.65	105.58	129.16	150.44
40	55.10	67.40	78.50	91.44	111.86	130.28
50	49.28	60.28	70.22	81.78	100.05	116.53
60	44.29	55.03	64.10	74.66	91.33	106.38
70	41.65	50.95	59.34	69.12	84.56	98.48
80	38.96	47.66	55.51	64.65	79.09	92.12
90	36.73	44.93	52.34	60.96	74.57	86.86
100	34.85	42.63	49.65	57.83	70.74	82.40
110	33.22	40.64	47.34	55.14	67.45	78.56
120	31.81	38.91	45.32	52.79	64.58	75.22
130	30.56	37.39	43.55	50.72	62.05	72.27
140	29.45	36.03	41.96	48.87	59.79	69.64
150	28.45	34.81	40.54	47.22	57.76	67.28
160	27.55	33.70	39.25	45.72	55.93	65.14
170	26.73	32.69	38.08	44.35	54.26	63.20
180	25.97	31.77	37.01	43.10	52.73	61.42

Fuente: Autores.

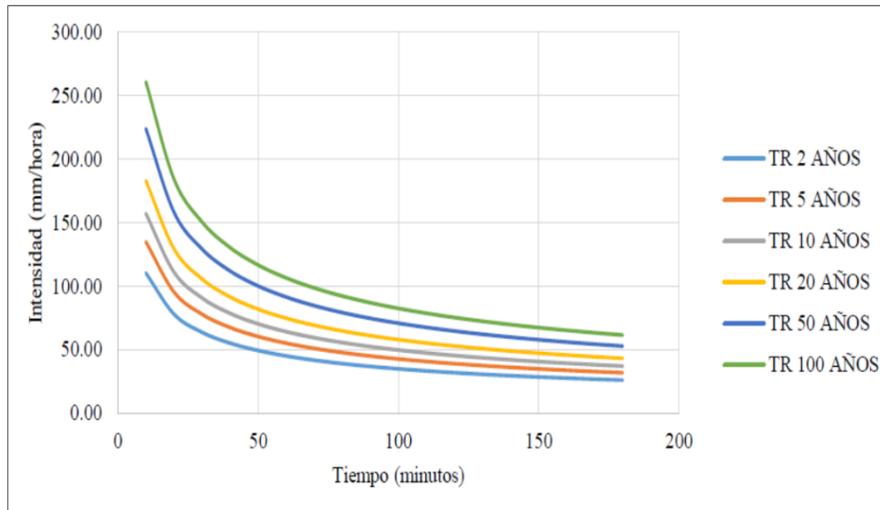


Figura 4. Curvas IDF de la estación San Isidro
Fuente: Autores.

Curvas de masa de precipitación (curvas de lluvia acumuladas)

Los hietogramas son registros pluviográficos que dan como resultado una curva de masas de precipitación, o una curva de lluvias acumuladas, o la cantidad de agua que ha caído desde que se inició el aguacero (Monsalve, 1995). A partir de las curvas de IDF determinadas para cada periodo de retorno de la estación representativa para este estudio, se calculan las curvas de masas de aguaceros puntuales para intervalos de tiempo de 10 minutos y hasta 3 horas de duración, este criterio se tomó con base a que duraciones mayores a estos valores no afectan el hidrograma de escorrentía superficial; posterior a este procedimiento se obtiene los incrementos de lluvias puntuales de los hietogramas de precipitación; por último se ajustan los incrementos de lluvias puntuales para generar un escenario más crítico del aguacero como generalmente se aplica en este tipo de análisis, por medio del método del Bloque Alterno, los incrementos de lluvias de los hietogramas se deben previamente arreglar de manera que el valor más bajo se colocará en primer lugar, el segundo valor más bajo se colocará en el último lugar, ese orden el tercer valor se colocará en el segundo lugar, el cuarto valor se ubicará en el penúltimo lugar y así sucesivamente hasta completar la serie de datos del hietograma (Ramos A. 2012). Este resultado se le denomina como los incrementos arreglados de lluvias puntuales de los hietogramas de precipitación (Instituto Nacional de Vías, 2009). Los resultados de los procedimientos anteriormente mencionados se muestran en las Tabla 4 y 5 con la estación San Isidro, que es la más relevante para la zona de estudio.

Tabla 4. Curvas de masa de aguaceros puntuales de la estación San Isidro

Tiempo (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	20	50	100
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	18.4	22.5	26.2	30.5	37.3	43.4
20	26.0	31.8	37.0	43.1	52.7	61.4
30	31.8	38.9	45.3	52.8	64.6	75.2
40	36.7	44.9	52.3	61.0	74.6	86.9
50	41.1	50.2	58.5	68.2	83.4	97.1
60	45.0	55.0	64.1	74.7	91.3	106.4
70	48.6	59.4	69.2	80.6	98.6	114.9
80	51.9	63.5	74.0	86.2	105.5	122.8
90	55.1	67.4	78.5	91.4	111.9	130.3
100	58.1	71.0	82.7	96.4	117.9	137.3
110	60.9	74.5	86.8	101.1	123.7	144.0
120	63.6	77.8	90.6	105.6	129.2	150.4
130	66.2	81.0	94.3	109.9	134.4	156.6
140	68.7	84.1	97.9	114.0	139.5	162.5
150	71.1	87.0	101.3	118.0	144.4	168.2
160	73.5	89.9	104.7	121.9	149.1	173.7
170	75.7	92.6	107.9	125.7	153.7	179.1
180	77.9	95.3	111.0	129.3	158.2	184.2

Fuente: Autores.

Tabla 5. Incrementos arreglados de las lluvias puntuales del hietograma de precipitación de la estación San Isidro

Tiempo (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	20	50	100
0 - 10	18.4	22.5	26.2	30.5	37.3	43.4
10 - 20	7.6	9.3	10.8	12.6	15.4	18.0
20 - 30	5.8	7.1	8.3	9.7	11.9	13.8
30 - 40	4.9	6.0	7.0	8.2	10.0	11.6
40 - 50	4.3	5.3	6.2	7.2	8.8	10.3
50 - 60	3.9	4.8	5.6	6.5	8.0	9.3
60 - 70	3.6	4.4	5.1	6.0	7.3	8.5
70 - 80	3.4	4.1	4.8	5.6	6.8	7.9
80 - 90	3.2	3.9	4.5	5.2	6.4	7.5
90 - 100	3.0	3.6	4.2	4.9	6.1	7.0
100 - 110	2.8	3.5	4.0	4.7	5.8	6.7
110 - 120	2.7	3.3	3.9	4.5	5.5	6.4
120 - 130	2.6	3.2	3.7	4.3	5.3	6.1
130 - 140	2.5	3.1	3.6	4.1	5.1	5.9
140 - 150	2.4	3.0	3.4	4.0	4.9	5.7
150 - 160	2.3	2.9	3.3	3.9	4.7	5.5
160 - 170	2.3	2.8	3.2	3.8	4.6	5.3
170 - 180	2.2	2.7	3.1	3.6	4.5	5.2
TOTAL	77.9	95.5	110.9	129.3	158.4	184.1

Fuente: Autores.

Una vez determinado el hietograma de la estación relevante (Tabla 5), es necesario asignar la precipitación a cada una de las subcuencas teniendo en cuenta la distribución de la precipitación obtenida por los polígonos de Thiessen. Considerando lo anterior se presenta detalladamente la precipitación adoptada para la subcuenca S2 (Quebrada Cimarrona) que es la representativa para la zona de estudio. A continuación se presenta los resultados obtenidos del hietograma de precipitación de la subcuenca S2, presentando valores altos en el intervalo 90 -100 minutos (Tabla 6):

Tabla 6. Histograma de precipitación para la quebrada La Cimarrona S2

Tiempo (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	20	50	100
0 - 10	2.3	2.8	3.2	3.8	4.6	5.4
10 - 20	2.4	2.9	3.4	4.0	4.9	5.7
20 - 30	2.6	3.2	3.7	4.3	5.2	6.1
30 - 40	2.8	3.4	4.0	4.6	5.7	6.6
40 - 50	3.1	3.8	4.4	5.1	6.3	7.3
50 - 60	3.5	4.2	4.9	5.8	7.0	8.2
60 - 70	4.0	5.0	5.8	6.7	8.2	9.6
70 - 80	5.1	6.2	7.2	8.4	10.3	12.0
80 - 90	7.9	9.6	11.2	13.0	16.0	18.6
90 - 100	19.0	23.2	27.0	31.5	38.5	44.9
100 - 110	6.0	7.4	8.6	10.0	12.2	14.3
110 - 120	4.5	5.5	6.4	7.4	9.1	10.6
120 - 130	3.7	4.6	5.3	6.2	7.6	8.8
130 - 140	3.3	4.0	4.6	5.4	6.6	7.7
140 - 150	2.9	3.6	4.2	4.9	5.9	6.9
150 - 160	2.7	3.3	3.8	4.5	5.4	6.3
160 - 170	2.5	3.0	3.6	4.1	5.1	5.9
170 - 180	2.3	2.9	3.3	3.9	4.7	5.5

Fuente: Autores.

Coberturas vegetales y suelos

La información del tipo de suelo en la cuenca del río Frío se obtuvo de la cartografía de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena (CORPAMAG) y Ramos, 2012, mientras que las coberturas vegetales y usos del suelo que conforman el área de estudio fueron suministradas por el IDEAM en convenio con las entidades de la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena (CORMAGDALENA) y el IGAC quienes desarrollaron los mapas de las coberturas vegetales a escala 1:100.000 a través de la metodología *Corine Land Cover* (CLC), este método permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, a partir de imágenes satelitales de resolución media (LANDSAT) para elaborar los mapas de las coberturas (Valencia & Anaya, 2009).

Con base en la información obtenida de los mapas del IGAC, elaboró el mapa de coberturas vegetales en la cuenca del río Frío a escala 1:100.000 (Figura 5), este proceso se desarrolló satisfactoriamente por medio del software ArcGIS. Adicionalmente, se tomó como criterio de clasificación de la cobertura vegetal presente en la zona de estudio, la adopción de unos nombres los cuales se pueden observar en la Tabla 7 para la definición de trece (13) coberturas vegetales.

Tabla 7. Convenciones adoptadas para el mapa de coberturas vegetales

Tipo de Cobertura Vegetal	Convención
Arbustos y matorrales	AM
Bosque natural denso	BND
Bosque natural fragmentado	BNF
Caña panelera	CP
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	MCPEN
Mosaico de pastos con espacios naturales	MPEN
Palma africana	PA
Pastos arbolados	PR
Pastos enmezados o enrastrados	PEE
Pastos limpios	PL
Tejido urbano continuo	TUC
Vegetación de páramo y subpáramo	VPS
Zonas pantanosas	ZP

Fuente: IGAC – CORPAMAG.

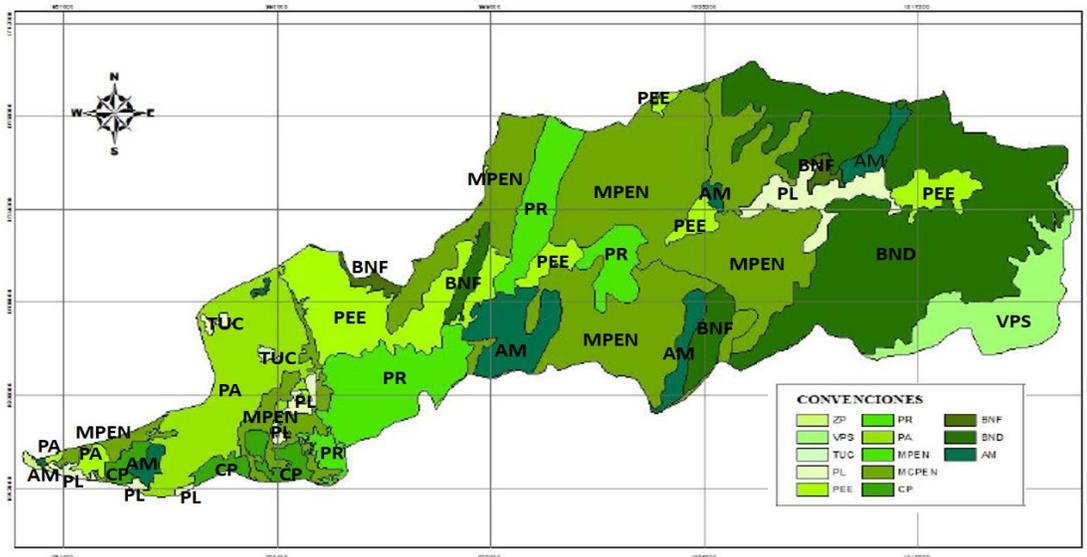


Figura 5. Mapa de usos del suelo en la cuenca del río Frío
Fuente: RAMOS M. A. (2012). Actualización de agrológica de los distritos de riego Prado Sevilla, Río Frío y Tucurínca. INCODER. Adaptado de IGAC 2009. Bogotá D.C.
RAMOS M. A. (2012). Análisis de climático e hidrológico de los distritos de riego Prado Sevilla, Río Frío y Tucurínca. INCODER.

Aplicando la metodología de clasificación de suelos definida por IGAC y a través de la herramienta de ArcGIS se logró elaborar el mapa de tipos de suelo (Figura 6), donde se definieron tres (3) unidades cartográficas de suelos (Ramos A. 2012, adaptado de IGAC 2009), para un total de dieciséis (16) tipos de suelos para la cuenca de río Frío (ver tabla 8).

Tabla 8. Unidades cartográficas de suelos identificadas en la Cuenca del río Frio.

UNIDAD CARTOGRAFICA DE SUELOS DE MONTAÑA (M)	
MBA	Suelos con afloramientos rocosos Lithic Cryorthents, las características de sus suelos Son superficiales, bien drenados, texturas medias gruesas, muy fuertemente ácidos y fertilidad natural muy baja, su litología granodiorita, cuarzdiorita, ignimbritas y gneis.
MHA	Este tipo de suelo se diferencia por afloramientos rocosos. Sus características del suelo son moderadamente profundos y muy superficiales, excesivamente drenados, texturas medias a gruesas, muy fuerte a moderadamente ácidos y fertilidad natural baja. Por último, su litología y sedimentos los ubica entre la granodiorita, cuarzomonzonita y gneis.
MKA	Unidad cartográfica compuesta por Typic Udorthents, afloramientos rocosos, Humic Pachic Dystrudepts, las características de los suelos Son moderadamente profundos y superficiales, excesivamente drenados, texturas medias a gruesas, muy fuerte a moderadamente ácidos y fertilidad natural baja. Su litología y sedimentos están representada por granodiorita y cuarzdiorita.
MKB	Unidad cartográfica está compuesta por Typic Udorthents, afloramientos rocosos, Humic Pachic Dystrudepts, además, Su litología y sedimentos caracterizados por gneis y esquistos. Las características de sus suelos muy superficiales a profundos, bien drenados, textura media a gruesa, extremada a fuertemente ácidos y fertilidad natural baja.
MPB	De litología y sedimentos de gneis hornbléndico y esquistos. Las características de sus suelos son profundos, bien drenados, textura media a moderadamente gruesa, reacción fuertemente ácida, saturación de bases baja y fertilidad natural baja. Su unidad cartográfica está compuesta por Typic Dystrudepts y afloramientos rocosos.
MQB	Suelos Profundos y superficiales, bien drenados, texturas moderadamente finas y moderadamente gruesas, fuerte a muy fuertemente ácidos, saturación de bases baja y fertilidad natural baja a muy baja. Litología y sedimentos gneis retrógrados y esquistos. Por último, su unidad cartográfica contiene Humic Dystrudepts, Typic Dystrudepts, Typic Udorthents y afloramientos rocosos.
MQC	Suelos profundos, bien drenados, texturas medias y moderadamente finas, fuertemente ácidos, saturación de bases bajas y fertilidad natural baja. Tiene unidades cartográficas como Typic Dystrudepts, Typic Udorthents y afloramientos rocosos, litología y sedimentos compuesta por gneis con bandas graníticas y piroxenas.
MVA	Litología y sedimentos de gneis y esquistos, características de suelo profundos y moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias y moderadamente gruesas, fuertes a moderadamente ácidos, saturación de bases medias a alta y su fertilidad natural baja a moderada. Tiene unidades cartográficas como afloramientos rocosos, Typic Hapludolls, Typic Eutrudepts y Typic Udorthents.
MWA	Unidad cartográfica compuesta por Lithic Ustorthents, Typic Haplustepts y afloramientos rocosos. Suelos superficiales y profundos, bien drenados, texturas gruesas a medias, fuerte a moderadamente ácidos y neutros, saturación de bases alta y fertilidad natural moderada. Litología y sedimentos de esquistos y gneis.
UNIDAD CARTOGRAFICA DE SUELOS DE PIEDEMONTA (PW)	
PWB	Depósitos aluviales de origen mixto con abundantes fragmentos rocosos (piedra, cascajo). Unidad cartográfica Typic Haplustepts, Fluventic Haplustepts y Typic Ustorthents. Suelos profundos y muy superficiales, bien drenados, texturas moderadamente gruesas, ligeramente ácidos a neutros, saturación de bases alta y fertilidad natural moderada a baja.

UNIDAD CARTOGRAFICA DE SUELOS DE PLANICIE ALUVIAL (RW)

- RWA** Litología y sedimentos de depósitos aluviales medios. Suelos profundos, bien drenados, texturas medias, moderadamente gruesas a moderadamente finas, fuertemente ácidos a fuertemente alcalinos, alta saturación de bases y fertilidad alta a moderada. Unidad cartográfica Typic Haplustolls, Fluventic Haplustepts.

- RWG** Litología y sedimentos de depósitos aluviales mixtos, suelos superficiales a muy superficiales, texturas medias a gruesas, pobre a imperfectamente drenados, fuertemente ácidos a moderadamente alcalinos, saturación de bases alta y fertilidad natural moderada a muy baja. Unidades cartográficas y componentes taxonómicos Aeríc Fluvaquents, Fluventic Haplustepts, Typic Psammaquents y Typic Ustipsammts.

- RWI** Depósitos aluviales moderadamente gruesos y finos, suelos profundos y superficiales, pobre a bien drenados, texturas finas a medias, neutros a extremadamente alcalinos, saturación de bases alta y fertilidad natural muy baja a muy alta. Componentes taxonómicos y unidades cartográficas Typic Haplustepts, Aeríc Fluvaquents y Typic Haplustolls.

- RWO** Litología y sedimentos de depósitos fluvio marinos medios, suelos profundos a muy superficiales, bien a imperfectamente drenados, texturas finas a medias, reacción ligeramente ácida a fuertemente alcalina, saturación de bases media a alta y fertilidad natural moderada a muy alta. Unidad cartográfica y componentes taxonómicos Typic Haplustepts, Aquic Ustifluvents y Fluventic Haplustepts.

- RWP** Depósitos fluvio marinos medios, suelos muy superficiales a moderadamente profundos, pobres a imperfectamente drenados, textura fina a media, muy fuertemente ácidos a moderadamente alcalinos, saturación de bases alta y fertilidad natural alta. Unidad cartográfica Aeríc Fluvaquents, Aquic Haplustepts, Aeríc Endiaquepts y Chromic Haplustepts.

Fuente: RAMOS M. A. (2012). Actualización de agrológica de los distritos de riego Prado Sevilla, Río Frio y Tucurínca. INCODER. Adaptado de IGAC 2009. Bogotá D.C.

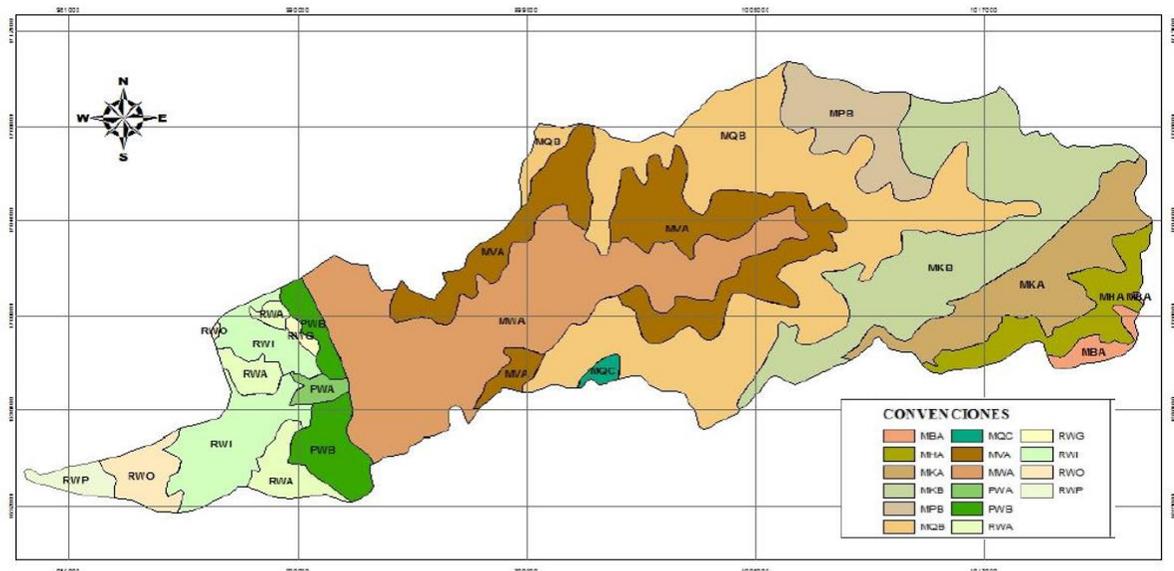


Figura 6. Mapa de tipos de suelos en la cuenca del río Frio

Fuente: RAMOS M. A. (2012). Actualización de agrológica de los distritos de riego Prado Sevilla, Río Frio y Tucurínca. INCODER. Adaptado de IGAC 2009. Bogotá D.C.

Flujo base y tránsito de caudales

El flujo base se calculó como medida de ajuste dentro de las corriente principales de cada subcuencas a partir del rendimiento, debido a que se cuenta con una sola estación hidrométrica, el flujo base se toma como el promedio mensual multianual de la estación hidrométrica mes a mes (considerando que el flujo base en una corriente que varía en cada uno de los meses del año) multiplicado por el área de la subcuenca y dividido en el área total de la cuenca. Los flujos bases mensuales obtenidas para cada subcuenca se detallan en la tabla 9.

Tabla 9. Cálculo del flujo base de las subcuencas del río Frío

ID	NOMBRE DE LA SUBCUENCA	FLUJO BASE CUENCA RIO FRIO (m³/s)												ANUAL
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
S1	Cuenca Alta	0.277	0.218	0.204	0.245	0.459	0.591	0.650	0.767	0.938	1.101	0.891	0.488	0.569
S2	Q. Cimarrona	0.484	0.382	0.357	0.429	0.803	1.033	1.137	1.341	1.640	1.925	1.558	0.852	0.995
S3	Q. La Murcia	0.615	0.485	0.454	0.545	1.021	1.313	1.445	1.705	2.084	2.447	1.980	1.083	1.265
S4	Q. Sin Nombre	0.344	0.271	0.254	0.304	0.570	0.733	0.807	0.952	1.164	1.367	1.106	0.605	0.706
S5	Q. Bodelta	0.486	0.383	0.359	0.431	0.807	1.037	1.142	1.348	1.647	1.934	1.565	0.856	1.000
S6	Q. Piedras Blancas 1	0.338	0.267	0.250	0.300	0.562	0.722	0.795	0.938	1.146	1.346	1.089	0.596	0.696
S7	Q. Palmichal	0.299	0.236	0.221	0.265	0.496	0.638	0.702	0.828	1.012	1.189	0.962	0.526	0.615
S8	Q. La Reserva	0.315	0.249	0.233	0.279	0.524	0.673	0.741	0.874	1.069	1.255	1.015	0.556	0.649
S9	Q. La Sirena	0.256	0.202	0.189	0.227	0.425	0.546	0.601	0.709	0.867	1.018	0.824	0.451	0.526
S10	Q. Guandusaca	0.167	0.131	0.123	0.147	0.276	0.355	0.391	0.461	0.564	0.662	0.536	0.293	0.342
S11	Q. Piedras Blancas 2	0.224	0.177	0.165	0.199	0.372	0.478	0.527	0.621	0.759	0.892	0.722	0.395	0.461
S12	Q. Eugenia	0.184	0.145	0.136	0.163	0.305	0.393	0.432	0.510	0.623	0.732	0.592	0.324	0.378
S13	Q. Nueva Granada	0.137	0.108	0.101	0.121	0.228	0.293	0.322	0.380	0.464	0.545	0.441	0.241	0.282
S14	Q. La Secreta	0.392	0.309	0.289	0.347	0.651	0.836	0.921	1.086	1.328	1.559	1.262	0.69	0.806
S15	Q. San Pedro	0.080	0.063	0.059	0.071	0.132	0.170	0.187	0.221	0.270	0.318	0.257	0.141	0.164
S16	Q. La Unión	0.213	0.168	0.157	0.189	0.354	0.455	0.501	0.591	0.722	0.848	0.686	0.376	0.438
S17	Q. Santa Clara	0.244	0.192	0.180	0.216	0.405	0.520	0.573	0.676	0.826	0.970	0.785	0.429	0.501
S18	Q. La Matea	0.193	0.152	0.142	0.171	0.320	0.412	0.453	0.535	0.654	0.767	0.621	0.34	0.397
S19	Q. Rodríguez	0.469	0.370	0.346	0.415	0.778	1.000	1.101	1.300	1.589	1.865	1.509	0.826	0.964
S20	Q. Calabacito	0.450	0.355	0.332	0.398	0.747	0.960	1.057	1.247	1.524	1.790	1.448	0.792	0.925
S21	Q. Estación S. Isidro	0.161	0.127	0.119	0.142	0.267	0.343	0.377	0.445	0.544	0.639	0.517	0.283	0.330
S22	Q. Desembocadura	0.180	0.142	0.133	0.160	0.300	0.385	0.424	0.500	0.611	0.718	0.581	0.318	0.371

Fuente: Autores.

El tránsito de caudales del río Frío se calculó para evaluar el transporte del caudal producido en la Cuenca a partir de la simulación en el software HEC HMS que opera a través de la metodología de la onda cinemática y se requirió de una información morfométrica de las corrientes de la Cuenca considerado como un canal antrópico, para el caso puntual de este proyecto se consideró a través de la batimetría del cauce que las corrientes se comportaban de manera trapezoidal (Tabla 9).

Tabla 10. Diseño de tránsitos método de la onda cinemática

Tránsito	Tipo Sección Transversal	Longitud (m)	Altitud Máxima (msnm)	Altitud Mínima (msnm)	So (m/m)	n Manning	b (m)	H: V	y (m)	Am (m)	Pm (m)	Rh (m)	T(m)	Qbase (m ³ /s)
1	TRAPEZOIDAL	1930.9	2200	2000	0.104	0.039	9.767	1.5	0.051	0.502	9.951	0.050	9.920	0.566
2	TRAPEZOIDAL	3659.9	2000	1600	0.109	0.039	9.767	1.5	0.093	0.921	10.102	0.091	10.046	1.582
3	TRAPEZOIDAL	2564.3	1500	1400	0.039	0.039	9.767	1.5	0.158	1.581	10.337	0.153	10.241	2.289
4	TRAPEZOIDAL	2030.9	1400	1200	0.098	0.039	9.767	1.5	0.156	1.560	10.329	0.151	10.235	3.560
5	TRAPEZOIDAL	2686.8	1400	1100	0.112	0.039	9.767	1.5	0.167	1.673	10.369	0.161	10.268	4.248
6	TRAPEZOIDAL	4041.2	1100	900	0.049	0.039	9.767	1.5	0.232	2.347	10.603	0.221	10.463	4.897
7	TRAPEZOIDAL	761.2	900	800	0.131	0.039	9.767	1.5	0.194	1.951	10.466	0.186	10.349	5.918
8	TRAPEZOIDAL	917.9	900	800	0.109	0.039	9.767	1.5	0.216	2.180	10.546	0.207	10.415	6.448
9	TRAPEZOIDAL	2229.1	800	600	0.090	0.039	9.767	1.5	0.242	2.451	10.640	0.230	10.493	7.076
10	TRAPEZOIDAL	353.8	800	600	0.565	0.039	9.767	1.5	0.145	1.448	10.290	0.141	10.202	7.550
11	TRAPEZOIDAL	1132.2	700	600	0.088	0.039	9.767	1.5	0.259	2.630	10.701	0.246	10.544	7.865
12	TRAPEZOIDAL	2305.4	600	500	0.043	0.039	9.767	1.5	0.327	3.354	10.946	0.306	10.748	8.141
13	TRAPEZOIDAL	2830.9	600	500	0.035	0.039	9.767	1.5	0.358	3.689	11.058	0.334	10.841	8.551
14	TRAPEZOIDAL	2931.4	400	300	0.034	0.039	9.767	1.5	0.382	3.950	11.144	0.354	10.913	9.368
15	TRAPEZOIDAL	1490.7	400	300	0.067	0.039	9.767	1.5	0.315	3.225	10.903	0.296	10.712	9.510
16	TRAPEZOIDAL	697.7	400	200	0.287	0.039	9.767	1.5	0.210	2.117	10.524	0.201	10.397	9.979
17	TRAPEZOIDAL	6924.3	300	100	0.029	0.039	9.767	1.5	0.429	4.466	11.314	0.395	11.054	10.473
18	TRAPEZOIDAL	603.4	200	100	0.166	0.039	9.767	1.5	0.260	2.641	10.704	0.247	10.547	10.843
19	TRAPEZOIDAL	5047.3	100	75	0.005	0.039	9.767	1.5	0.777	8.495	12.569	0.676	12.098	11.805
20	TRAPEZOIDAL	2887.9	100	50	0.017	0.039	9.767	1.5	0.561	5.951	11.790	0.505	11.450	12.730
21	TRAPEZOIDAL	1554.3	75	50	0.016	0.039	9.767	1.5	0.583	6.204	11.869	0.523	11.516	13.091

Fuente: Autores. Adaptado de software HEC HSM.

Características hidráulicas

Las características hidráulicas se definen a partir del registro de batimetría del río Frío que suministró CORPAMAG se aplicó el modelo HEC RAS que nos muestra los resultados obtenidos en forma tabular y grafica (Perfiles 2D y 3D) de las condiciones hidráulicas del río Frío (Figuras 7, 8 y 9) que son críticas entre los 8000 a 10000 metros de distancia del canal y el resto presentan niveles uniformes en diferentes períodos de retorno.

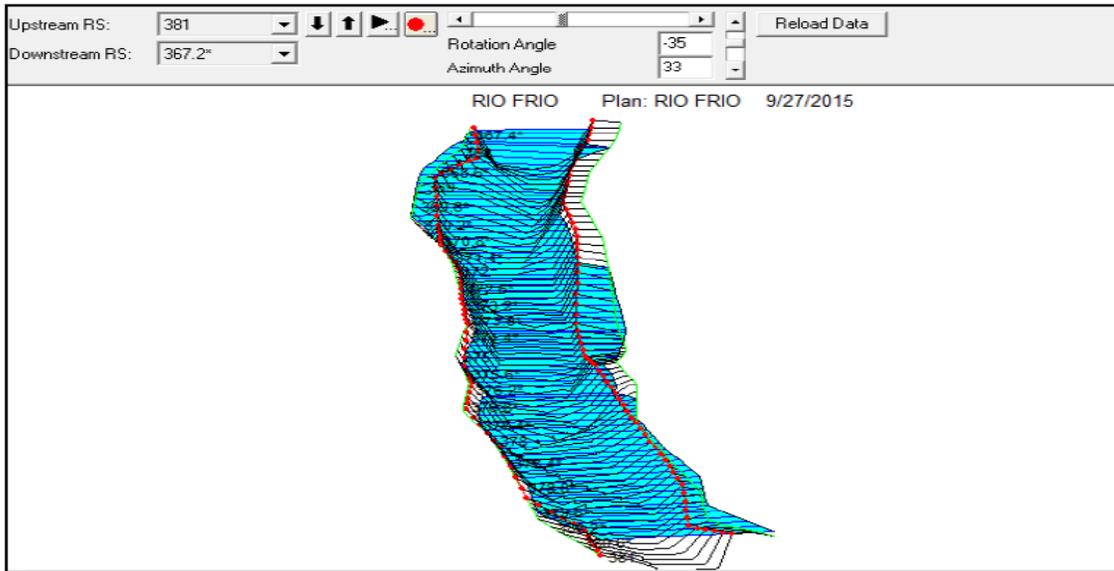


Figura 7. Perfil 3D tramo del cauce principal
Fuente: Autores. Adaptado de software HEC RAS

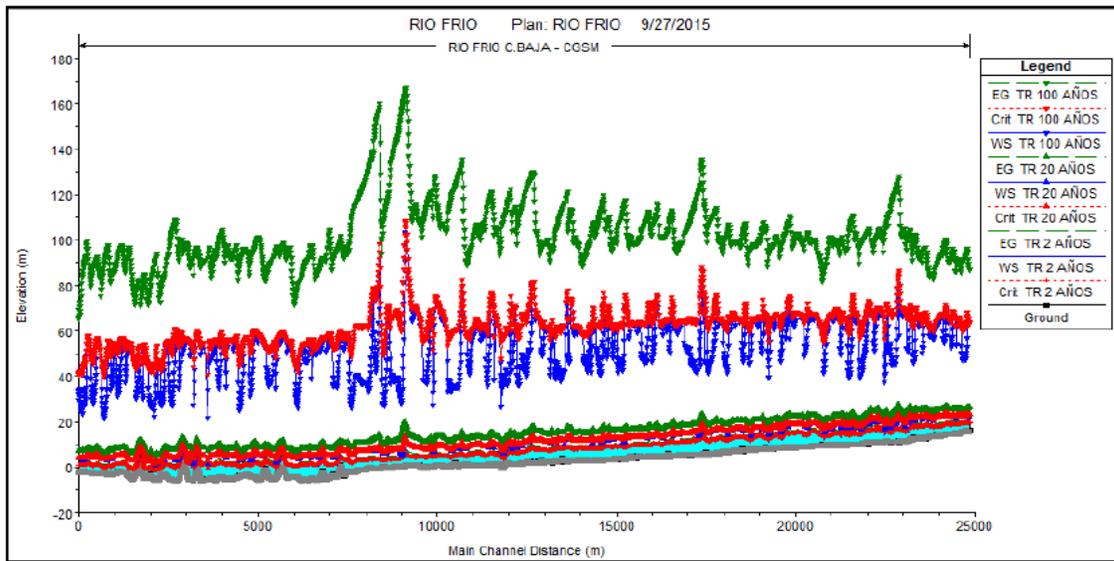


Figura 8. Perfiles de los niveles de agua
Fuente: Autores. Adaptado de software HEC RAS

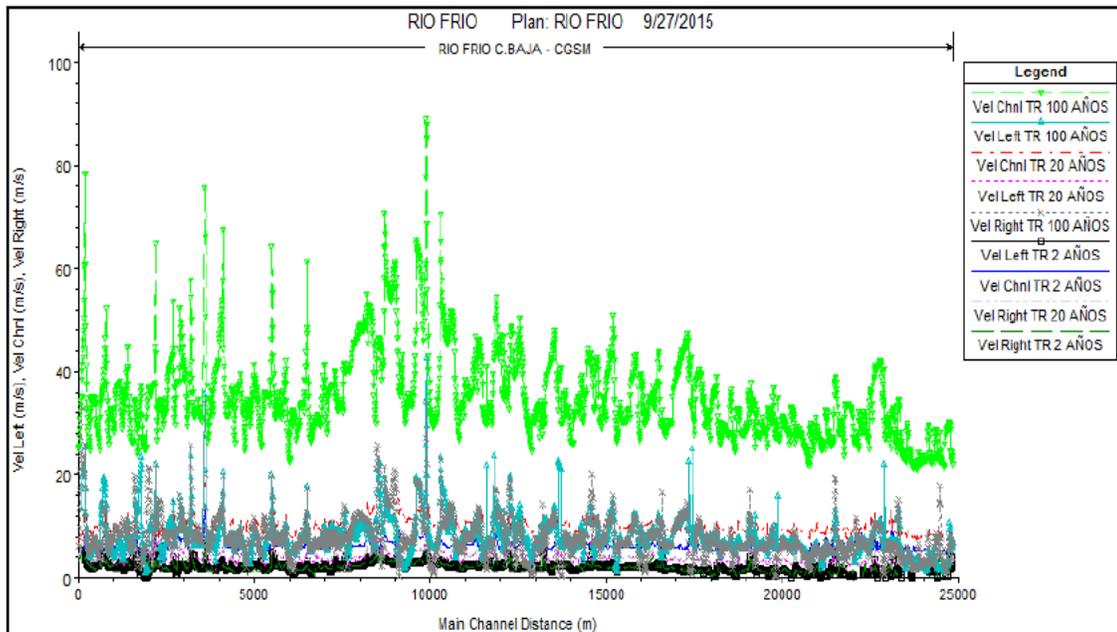


Figura 9. Perfiles de velocidades
Fuente: Autores. Adaptado de software HEC RAS

Características hidrológicas

La simulación del transporte de sedimentos realizadas en el software HEC RAS, se definieron las secciones socavadas y sedimentadas del río Frío, para un regimen de flujo permanente.

En los tramos iniciales (parte alta de la Cuenca) hasta los 5000 metros, se reporta una socavación alta, pero en los tramos de 10000 a 25000 metros se aprecian la acumulacion de sedimentos que reporta el río Frío en la parte media y final de la cuenca. (Figuras 10 y 11). Los menores aportes de escorrentía directa se encuentran en la parte alta de la cuenca, debido a que la cobertura vegetal no ha sufrido cambios considerables por ser zona de protección, luego los cambios del uso del suelo en estas áreas son mínimos provocando bajos números de curva y por ende bajas contribuciones de caudal hacia el afluente principal de la cuenca del río Frío.

Con el desarrollo del modelo HEC RAS que la subcuenca S20 (Q. Calabacito) es la que mayor caudal por escorrentía directa aporta a la cuenca para cada uno de los 6 periodos de retornos que se utilizaron en la corrida del modelo. Respecto a los caudales picos generados se aprecian que en la totalidad de las simulaciones realizadas, este valor se manifiesta aproximadamente a las 2 horas de iniciado el proceso de lluvia-escorrentía.

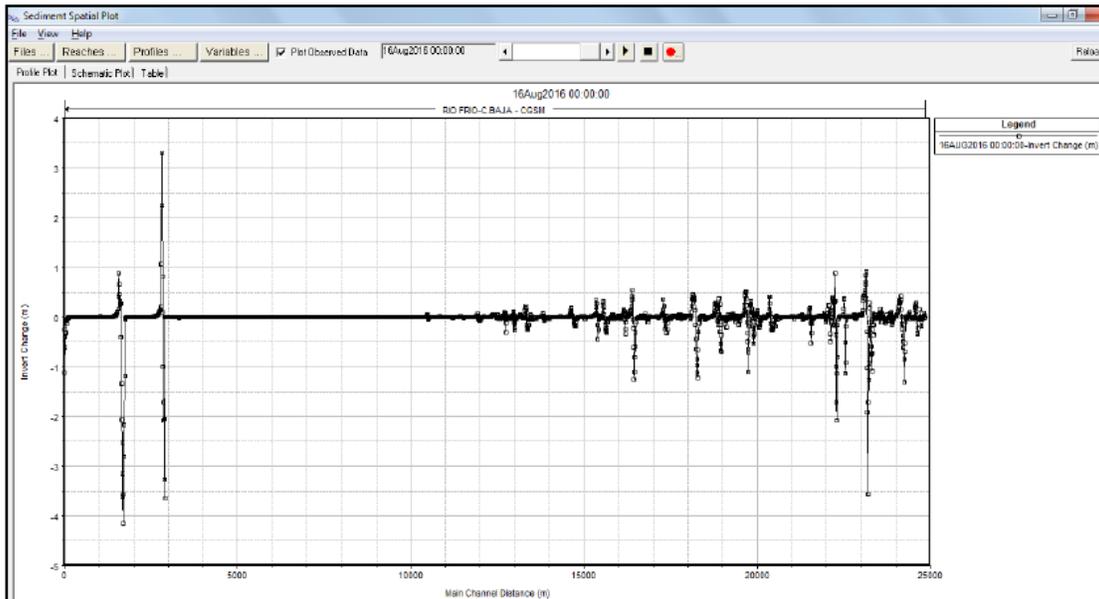


Figura 10. Perfil de las secciones socavadas o sedimentadas
Fuente: Autores. Adaptado de software HEC RAS

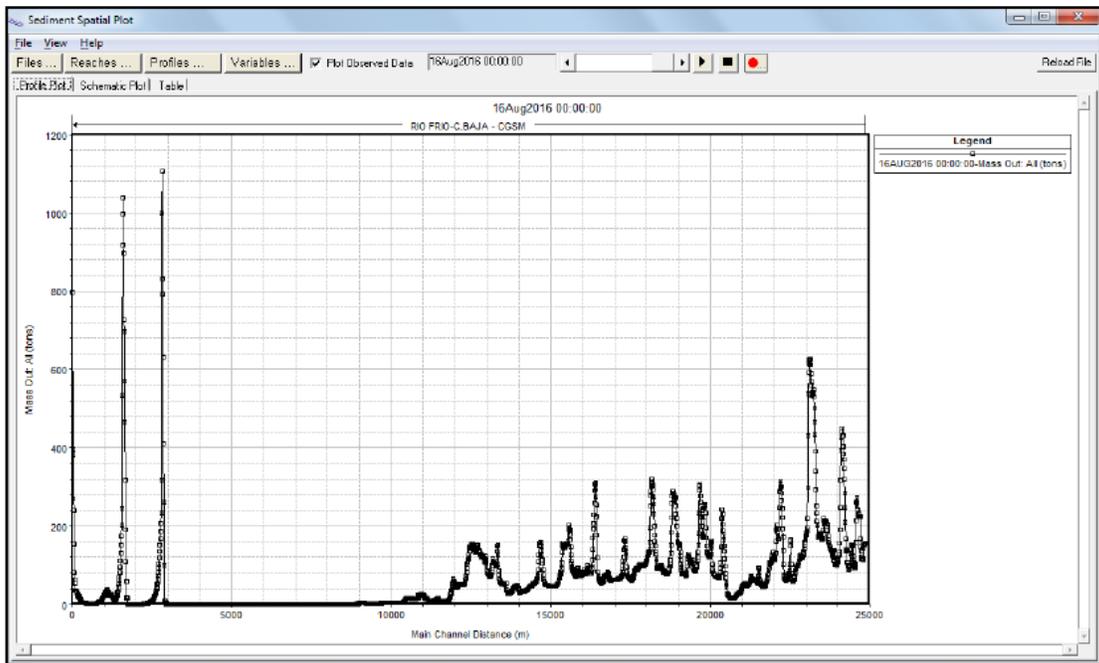


Figura 11. Masa de sedimentos transportada por el río Frío
Fuente: Autores. Adaptado de software HEC RAS

Además, se aprecian que las abstracciones de precipitación que se dan tanto en la parte media

como baja de la cuenca son insuficientes, ya que se producen caudales excesivos que alimentan al

tramo principal de la cuenca. Esta consecuencia está causada básicamente por el desarrollo de actividades de la ganadería, la agricultura y la deforestación, que provocan cambios en los números de curva e incrementos de la escorrentía aguas abajo de la cuenca del río Frío.

Como también, en la figura 11, se evidencian las cantidades excesivas de caudal que son transportadas desde las subcuencas hasta el afluente principal del río Frío, estos caudales elevados pueden favorecer en el proceso de las inundaciones que se presentan en el área de estudio, provocando a su paso destrucción de las zonas aledañas y posibles alteraciones en la hidrodinámica del río, como el presentado en el año 2010 a causa del fenómeno de la Niña, sin embargo se debe de corroborar que las condiciones hidráulicas son afectadas como producto de este cambio en las condiciones del uso del suelo para ratificar que la subcuenca se encuentra susceptible a sufrir inundaciones.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en la aplicación del programa HEC RAS es una aproximación, por lo tanto serían más acertados, si dentro de la cuenca del río Frío se ubicaran más estaciones hidrometeorológicas; permitiendo reducir la incertidumbre de los datos de entrada ingresados al modelo tales como hietogramas y caudales bases, brindando mayor confiabilidad de la información y resultados más cercanos a la realidad que sufre la cuenca del río Frío particularmente en los municipios de Ciénaga y Zona Bananera.

Con relación a la modelación hidráulica realizada en HEC RAS para un régimen de flujo permanente esclarece que las condiciones hidráulicas del río para las situaciones proyectadas no son las mejores, teniendo en cuenta que los niveles de lámina de agua superan los bordes de las secciones transversales incluso para el primer periodo de retorno diseñado (2 años). Esto se debe principalmente a los aportes de caudales que las subcuencas realizan desde la cuenca media

hasta la parte baja de la cuenca del río Frío. Otro factor preocupante son los perfiles de flujo obtenidos, ya que estos muestran que el río tiene velocidades altas tanto en las márgenes izquierda y derecha.

Considerando los resultados obtenidos de la modelación del módulo de transporte de sedimentos se puede precisar que las secciones sedimentadas superan los tres metros de altura, mientras que la socavación máxima supera los cuatro (4) metros de profundidad, particularmente estos valores máximos se encuentran aguas abajo del tramo del río Frío ingresado, lo que permite establecer que las condiciones hidrodinámica del río varían considerablemente por acción del caudal y la curva granulométrica asociada al modelo. Las secciones socavadas en el río Frío son: 17, 29, 330, 348 y 369 los valores en los cuales se presenta las máximas socavaciones son entre los 2 a 5 metros aproximadamente. Por otro lado las secciones donde mayor sedimentación se presenta en el río

El desarrollo del método de la onda cinemática es favorablemente para el desarrollo de la modelación del río Frío, ya que los errores obtenidos no superan el 4% para las 6 modelaciones realizadas, lo que infiere que la modelación hidrológica de los tránsitos utilizados con el programa HEC HMS fueron muy acertados.

La evaluación hidráulica del río Frío incorporando el componente de movilidad del sedimento, proporciona resultados que se aproximan a la realidad. Por otra parte permite determinar los tramos del río que son sensibles a erosión y que pudiesen poner en riesgo las estructuras hidráulicas proyectadas en el río, más aún cuando los ríos son de régimen mixto. Para el río Frío que presenta cambios constantes en el régimen del flujo, este tipo de análisis permitió determinar que en estas condiciones se pueden presentar procesos tanto de agradación como de degradación del cauce. Esta información resulta importante puesto que permite predecir los cambios morfológicos que

podría tener un río ante la incorporación de una estructura hidráulica como este puente.

Referencias bibliográficas

Acosta, M. (2006). *Aplicación de un modelo hidrológico conceptual NAM precipitación-escorrentía en la cuenca del río de Oro. (Trabajo grado)*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Pregrado en Ingeniería Civil.

Alcaldía Zona Bananera. (16 de 09 de 2010). *Fuertes lluvias dejaron a 143 casas afectadas en el corregimiento de Río Frío*. Obtenido de <http://www.zonabananera-magdalena.gov.co/apc-aa/view.php3?vid=1090&cmd%5B1090%5D=x-1090-1779572>

Aparicio, F. (2006). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Distrito Federal, México: Ed. limusa.

Bastidas, C. (2012). *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH)*. Recuperado el 29 de 06 de 2015, de http://www.inameh.gob.ve/documentos/MANUAL_HECHMS.pdf

Bateman, A. (2007). *Hidrología Básica y Aplicada*. Barcelona, España: Grupo de Investigación de Transporte de Sedimentos - GITS.

Bocco, g., mendoza, M., & Masera, o. (2000). *La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación*. Morelia, México: Instituto de Ecología UNAM.

Bustamante, Y. A. (2013). *Modelamiento numérico de una onda de avenida generada por la rotura de una presa de tierra y su estimación de riesgo (Trabajo de grado)*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Pregrado en Ingeniería Mecánica de Fluidos.

Bustamante, R. (2008). *Calibración y validación del modelo HEC HMS en la cuenca de Huechún*

región metropolitana (Trabajo de grado). Talca, Chile: Universidad de Talca, Pregrado en Ingeniería Forestal.

Bustos, J. C. (2011). *Cálculo de flujo gradualmente variado con HEC RAS (Tesis de maestría)*. México D.F., México: Universidad Nacional Autónoma de México, Maestría en Ingeniería Civil - Hidráulica.

Cadavid, J. (2006). *Hidráulica de canales: fundamentos*. En J. Cadavid. *Introducción a la hidráulica de canales* (págs. 8 - 30). Medellín, Colombia: Universidad EAFIT.

Campos, A., Holm-Nielsen, N., Díaz, C., Rubiano, D., Costa, C., Ramírez, F., & Dickson, E. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá, Colombia: Banco Mundial.

Cardona, O. (2001). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo*. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.

Carrillo, L. R. (2013). *Simulación de Lahares del volcán Cotopaxi en sus drenajes del lado norte con el uso del programa HEC RAS (Trabajo de grado)*. Sangolquí, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército, Pregrado en Ingeniería Civil.

CEPAL. (2012). *Valoración de daños y pérdidas: Ola invernal en Colombia 2010 - 2011*. Bogotá, Colombia: Banco Interamericano de Desarrollo - BID.

Chow, v., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A.

CORPAMAG. (2010). *Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del hidrográfica del río Frío*. Santa Marta, Colombia: Corpamag.

CORPAMAG. (2014). *Recuperación de la capacidad hidráulica del río Frío como estrategia para la mitigación del riesgo por inundación en el municipio de Zona Bananera, departamento*

del Magdalena. Santa Marta, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Magdalena.

CVC. (2008). *Caracterización del río Cauca tramo Salvajina - La Virginia*. Cali, Colombia: Corporación autónoma regional del Valle del Cauca - Subdirección de gestión ambiental, grupo de recursos hídricos.

Díaz, J. (01 de 08 de 2008). *Hidráulica Aplicada - HEC RAS*. Recuperado el 12 de 08 de 2015, de <https://jeffreydiaz.files.wordpress.com/2008/08/1-hidraulica-aplicada-hec-ras-flujo-uniforme.pdf>

Estrada, v., & Pacheco, R. (2011). *Modelación hidrológica con HEC HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba (Tesis de maestría)*. Santiago de Cuba, Cuba: Universidad de Oriente, Maestría en Ingeniería Hidráulica.

García, R. (2012). *Análisis y evaluación del transporte de sedimentos en cuencas mediterráneas, (Trabajo de Grado)*. Murcia, España: Universidad Politécnica de Cartagena, Pregrado de Ingeniería Civil.

Gómez, E., & Castillo, H. (2005). *Aplicación del modelo computacional HEC HMS en la estimación de caudales máximos en la cuenca del río Frío Cundinamarca (Trabajo de grado)*. Bogotá, Colombia: Universidad Católica de Colombia, Pregrado en ingeniería Civil.

Henao, J. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomás.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2009). Subdirección de agrología. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras. Departamento del Magdalena. Escala 1: 100.000. Bogotá D.C.

Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Transporte.

Kuroiwa, J. (2010). *Introducción al uso de HEC RAS*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

Martín, J. P. (2002). *Ingeniería de ríos*. Barcelona, España: Universidad politécnica de Cataluña.

Ministerio del Medio Ambiente. (2004). *Decreto 1729*. Bogotá, Colombia: Ministerio del Medio Ambiente.

Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Ocampo, O. (2012). *Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático (Tesis de maestría)*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Ingeniería Química.

Ponce, H. E. (2008). *Comportamiento hidráulico y sedimentológico de la bocatoma independiente de Aguas Andinas en el río Maipo (Trabajo de grado)*. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile, Pregrado en Ingeniería Civil.

Ramos, M. A. (2012). Actualización de agrología de los distritos de riego Prado Sevilla, Río Frio y Tucurínca. INCODER. Adaptado de IGAC 2009. Bogotá D.C.

Ramos, M. A. (2012). Analisis de climático e hidrologico de los distritos de riego Prado Sevilla, Río Frio y Tucurínca. INCODER.

Reyes, A., Barroso, F., & Carvajal, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valler.

Rocha, A. (2009). *Morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales*. Lima, Perú: VIII Congreso internacional obras de infraestructura vial.

Sánchez, J. (2012). *Hidrología e Hidrogeología - Universidad de Salamanca (España)*. Recuperado

el 26 de 06 de 2015, de http://hidrologia.usa.es/temas/Hid_sup_3.pdf

Solis, H., & Cuevas, J. (1995). *Modelación hidrológica e hidráulica en la cuenca del río Caldera*. Ciudad de Panamá, Panamá: IRHE.

U.S. Army Corps of Engineers. (2013). *Hydrologic Modeling System HEC HMS user's manual version 4.0*. Davis, USA: Hydrologic Engineering Center.

UNGRD. (2012). *Plan departamental de gestión del riesgo Magdalena*. Bogotá, Colombia: Panamericana.

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA. (2012). *Plan De Ordenamiento Y Manejo De La Cuenca Hidrográfica Del Río Frío (Pomca) VERSIÓN 4*. Cartagena de Indias, Colombia: Instituto de Hidráulica y Saneamiento Ambiental de la Universidad de Cartagena.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA. (2007). *Transporte de sedimentos*. Popayán, Colombia: Facultad de Ingeniería Civil - Departamento de hidráulica.

Valencia, G., & Anaya, J. (2009). *Implementación de la metodología Corine Land Cover con Imágenes Ikonos*. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.

Zapata, A., & Manzano, F. (2010). Aplicación de la teoría de la onda cinemática al estudio de hidrogramas generados mediante simulador de lluvias sobre suelos permeables. *Agrociencia*, 873-884. Recuperado el 2015 de 05 de 10, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=302197360>