

**DETERMINACION DE CAUDALES PARA EVENTOS DE CRECIDA DEL RIO VIJES,
CON DATOS MAXIMOS DE PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS MULTI
ANUAL, DESDE SU INGRESO A LA CABECERA MUNICIPAL HASTA SU
DESEMBOCADURA**

CRISTHIAN FRANCISCO RESTREPO MORENO

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS

Especialización en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Bogotá D. C.

2021

**DETERMINACION DE CAUDALES PARA EVENTOS DE CRECIDA DEL RIO VIJES,
CON DATOS MAXIMOS DE PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS MULTI
ANUAL, DESDE SU INGRESO A LA CABECERA MUNICIPAL HASTA SU
DESEMBOCADURA**

**Trabajo presentado como requisito parcial para optar el título de:
Especialista en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas**

Tutor:

Julio Alberto González

Biol. Esp., MSc.

Docente

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS

Especialización en Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Marzo 2021

NOTA DE ACEPTACION

Tutor

Jurado 1

Jurado 2

PAGINA DE DEDICATORIA

Quiero agradecer a Dios y la Santísima Virgen María por todas las bendiciones que cada día me da, y por iluminarme en el desarrollo del presente trabajo. Gracias a mi madre, mi hermano y mi padre por demostrarme día a día su amor, y finalmente quiero agradecer al amor de mi vida por su apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida.

CARTA DE AUTORIZACION

Yo, Cristhian Francisco Restrepo Moreno, identificado con cedula de ciudadanía 1.1.30.679.692 de Cali, autorizo al Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación CRAI-USTA de la Universidad Santo Tomás, para que con fines académicos mi trabajo de grado sea visible y pueda ser consultado en el Repositorio Institucional “ Porticus” por los usuarios a los que sea de su interés. La reproducción parcial del trabajo se hace de acuerdo con lo establecido por el artículo 30 de la ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993 “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION.....	1
2.	JUSTIFICACIÓN.....	2
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
4.	ANTECEDENTES	6
5.	DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	10
5.1	OBJETIVO GENERAL	10
5.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
6.	MARCO REFERENCIAL	11
6.1.	MARCO TEÓRICO	11
6.1.1	ÁREA DE ESTUDIO.	11
6.1.2.	DIAGNÓSTICO AMBIENTAL.....	12
6.1.3.	AREAS PROTEGIDAS.	15
6.1.4.	PENDIENTES.	15
6.1.5.	ZONA DE RECARGA.....	15
6.2.	MARCO LEGAL.....	15
6.3.	MARCO CONCEPTUAL.....	16
6.3.1.	GENERALIDADES DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.	16
6.3.2.	DELIMITACIÓN Y UBICACIÓN DE LA CUENCA.....	16
6.3.3.	ASPECTOS FÍSICO-BIÓTICOS DE LA CUENCA.	17
6.3.4.	CLIMATOLOGÍA Y UNIDADES CLIMÁTICAS.....	17
6.3.5.	HIDROMETEOROLOGÍA Y EL RECURSO HÍDRICO.....	17
6.3.6.	MORFOMETRÍA DE CUENCA.....	17
6.3.6.1.	FACTOR DE FORMA.	18
6.3.6.2.	COEFICIENTE DE COMPACIDAD.....	19
	SEGÚN REYES, ULISES & CARVAJAL (2014), CON EL CÁLCULO DE ESTE ÍNDICE SE BUSCA DETERMINAR LA SIMILITUD DE LA CUENCA CON RELACIÓN A UN CÍRCULO.	19
6.3.6.3.	COEFICIENTE DE CIRCULARIDAD.	19
6.3.6.4.	PARÁMETROS MORFOMÈTRICOS ASOCIADOS AL RELIEVE.....	19
6.3.6.5.	HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE ALTITUDES	20
6.3.6.6.	CURVA HIPSOMÉTRICA	20
6.3.6.7.	DENSIDAD DE DRENAJES (DD).....	20
6.3.6.8.	COEFICIENTE DE TORRENCIALIDAD (CT).	20
6.3.6.9.	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	21
6.3.7.	DISTRIBUCIONES DE FRECUENCIA EMPLEADAS.	21
6.3.7.1.1.	DISTRIBUCIÓN GUMBEL	21

6.3.7.1.2.	DISTRIBUCIÓN GAMMA 2.....	23
6.3.7.1.3.	DISTRIBUCIÓN GAMMA DE TRES PARÁMETROS O PEARSON TIPO III	24
6.3.7.1.4.	DISTRIBUCIÓN DE LOG-PEARSON TIPO III (DISTRIBUCIÓN LOG-GAMMA O LOG-PEARSON DE 3 PARÁMETROS)	25
6.3.7.1.5.	PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE DE SMIRNOV-KOLMOGOROV	27
6.3.8.	PRECIPITACIONES DE DISEÑO	29
6.3.9.	NÚMERO DE CURVA.....	31
6.3.9.1.	EL COMPLEJO DE SUELO - HIDROLÓGICO QUE CONSIDERA LA INTERRELACIÓN SUELO - COBERTURA VEGETAL.....	32
6.3.9.2.	LA CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE; DE ACUERDO CON ESTAS VARIABLES SE FIJA UN NÚMERO DE CURVA (CN) QUE REPRESENTA TAL INTERRELACIÓN.....	33
6.3.10.	PARÁMETROS DE ENTRADA AL MODELO.	33
6.3.11.	HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL DEL SCS.	35
6.3.12.	ÁREA FORESTAL PROTECTORA	36
6.3.13.	INSTRUMENTOS DE PLANIFICACIÓN TERRITORIAL	36
7.	METODOLOGÍA.....	38
7.3.	MORFOMETRÍA.....	38
7.3.9.	DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	38
7.3.9.1.	LLENADO DE DEPRESIONES.....	38
7.3.9.2.	DIRECCIÓN DE FLUJO.....	39
7.3.9.3.	ACUMULACIÓN DE FLUJO.....	39
7.3.9.4.	TRAZADO DE LA CUENCA	39
7.3.10.	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS GENERALES.	39
7.3.11.	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA FORMA DE LA CUENCA.	41
7.3.11.1.	FACTOR DE FORMA.....	41
7.3.11.2.	COEFICIENTE DE COMPACIDAD.....	41
7.3.11.3.	COEFICIENTE DE CIRCULARIDAD.	42
7.3.12.	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS AL RELIEVE.....	42
7.3.12.1.	HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE ALTITUDES Y CURVA HIPSOMÉTRICA.	43
7.3.13.	PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA RED DE DRENAJE.....	44
7.3.13.1.	ORDEN DE LA CUENCA.....	45
7.3.13.2.	LONGITUD TOTAL DE DRENAJES.	45
7.3.13.3.	DENSIDAD DE DRENAJES (DD).....	45
7.3.13.4.	NUMERO DE DRENAJES DE 1 ORDEN.....	46
7.3.13.5.	COEFICIENTE DE TORRENCIALIDAD (CT).	46
7.3.13.6.	PENDIENTE DEL CAUCE (%).	46
7.3.13.7.	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	46
7.3.14.	OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	49

7.3.14.1.	RASTER CALCULATOR.....	49
7.3.14.2.	STREAM LINK	49
7.3.14.3.	STREAM TO FEATURE.....	49
7.4.	CLIMATOLÓGÍA	50
7.4.1.	PRECIPITACIÓN DE DISEÑO	51
7.5.	HIETOGRAMAS DE DISEÑO.....	51
7.5.1.	PRECIPITACIÓN MÁXIMA PÓNDERADA.....	53
7.5.1.1.	POLIGONOS DE THIESSEN.....	53
7.6.	TRANSFORMACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA	53
7.6.1.	NÚMERO DE CURVA	54
7.7.	MODELACION LLUVIA ESCORRENTIA.	58
8.	RESULTADOS.....	60
8.4.	MORFOMETRIA.....	60
8.4.1.1.	DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	60
8.4.2.	PARÁMETROS MORFOMÈTRICOS GENERALES.	61
8.4.3.	PARÁMETROS MORFOMÈTRICOS ASOCIADOS A LA FORMA DE LA CUENCA.	61
8.4.4.	PARÁMETROS MORFOMÈTRICOS ASOCIADOS AL RELIEVE.	61
8.4.4.1.	HISTOGRAMAS DE FRECUENCIAS DE ALTITUDES.	62
8.4.4.2.	CURVA HIPSOMÉTRICA.	63
8.4.5.	PARÁMETROS MORFOMÈTRICOS ASOCIADOS A LA RED DE DRENAJE.....	64
8.4.5.1.	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	64
8.5.	PRECIPITACIÓN DE DISEÑO.....	67
8.6.	HIETOGRAMAS DE DISEÑO.....	71
8.7.	MODELACION LLUVIA-ESCORRENTÍA.....	77
9.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	78
10.	CONCLUSIONES.	81
11.	RECOMENDACIONES.	83
12.	REFERENCIAS.	85

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. PROTOCOLO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA.....	6
TABLA 2. CALCULO DEL CAUDAL DE CRECIMIENTO POR EL MÉTODO RACIONAL EN EL CAÑO DE PAVAS EN LA VEREDA DE VELÁSQUEZ EN EL MUNICIPIO DE PUERTO BOYACÁ.....	7
TABLA 3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA EL ESTUDIO DE INUNDACIÓN, EN EL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA, DEL RÍO FRÍO A LA ALTURA DEL MUNICIPIO DE CHÍA.....	8
TABLA 4. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL MUNICIPIO DE VIJES.	11
TABLA 5. CONDICIONES ANTECEDENTES DE HUMEDAD BÁSICAS EMPLEADAS EN EL MÉTODO SCS	33
TABLA 6. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS GENERALES	39
TABLA 7. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS AL RELIEVE	42
TABLA 8. PARÁMETROS CALCULO ZONAL STADISTICS	43
TABLA 9. HISTOGRAMA DE FRECUENCIA DE ALTITUDES Y CURVA HIPSOMÉTRICA.	43
TABLA 10. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA RED DE DRENAJE	44
TABLA 11. MÉTODOS PARA CÁLCULO DE TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	47
TABLA 12. ESTACIONES HIDROCLIMATOLÓGICAS	50
TABLA 13. DISTRIBUCIÓN ESTADÍSTICA	51
TABLA 14. VALORES DE NUMERO DE CURVA PARA HUMEDAD ANTECEDENTE II.	55
TABLA 15. RESULTADOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS GENERALES	61
TABLA 16. RESULTADOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA FORMA DE LA CUENCA	61
TABLA 17. RESULTADOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS AL RELIEVE	61
TABLA 18. HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA DE ALTITUDES.....	62
TABLA 19. CURVA HIPSOMÉTRICA	63
TABLA 20. RESULTADOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LAS RED DEL DRENAJE	64
TABLA 21. DATOS PARA CALCULO DE TC.	65
TABLA 22. RESULTADOS TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	66
TABLA 23. PROMEDIO TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	67
TABLA 24. CALCULO DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA PONDERADA	69
TABLA 25. CAUDALES MÁXIMOS DE DISEÑO	77

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL ACUMULADA DE LA PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO.	52
FIGURA 2. PROCEDIMIENTO NUMERO DE CURVA.....	54
FIGURA 3. MAPA DE COBERTURA DE SUELO.....	56
FIGURA 4. MAPA DE TEXTURA DE SUELO.....	57
FIGURA 5. MÉTODOS DEL MODELO.....	58
FIGURA 6. ESQUEMA DEL MODELO	59
FIGURA 7. ÁREA DE ESTUDIO	60
FIGURA 8. HISTOGRAMAS DE ALTITUDES	63
FIGURA 9. CURVA HIPSOMÉTRICA	64
FIGURA 10. INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES SOBRE EL ÁREA DE LA CUENCA	68
FIGURA 11. NÚMERO DE CURVA.....	70
FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL PARCIAL DE LA PRECIPITACIÓN EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	71
FIGURA 13. HIETOGRAMA Tr 2.33 AÑOS.....	72
FIGURA 14. HIETOGRAMA Tr 5 AÑOS.....	72
FIGURA 15. HIETOGRAMA Tr 10 AÑOS.....	73
FIGURA 16. HIETOGRAMA Tr 15 AÑOS.....	73
FIGURA 17. HIETOGRAMA Tr20 AÑOS.	74
FIGURA 18. HIETOGRAMA Tr25 AÑOS.	74
FIGURA 19. HIETOGRAMA Tr30 AÑOS.	75
FIGURA 20. HIETOGRAMA Tr50 AÑOS.	75
FIGURA 21. HIETOGRAMA Tr100 AÑOS.	76
FIGURA 22. HIETOGRAMA Tr500 AÑOS.	76
FIGURA 23. HIDROGRAMA.....	77

1. INTRODUCCION

Este proyecto busca estimar caudales para eventos de crecida en el río Vije, mediante bases técnicas ya establecidas, esto es importante porque cuando se tiene claro dichos datos, es un insumo importante para iniciar la identificación de equipamientos urbanos que se encuentran vulnerables; así, el municipio y la autoridad ambiental puede tomar acciones técnicas y administrativas para la correcta gestión en el territorio. El comportamiento de la precipitación, el tipo de cobertura, y la pendiente, son determinantes para determinar los caudales de los cuerpos de agua. Este trabajo está enfocado a la Gestión Integral de las Cuencas Hidrográficas, debido a que se debe abordar todos los componentes de las cuencas como los son Ecosistemas, Coberturas Naturales, Ordenamiento Territorial, Hidráulica, Hidroclimatología, Base Normativa y Gestión del Riesgo. Los estudios de modelamiento son sumamente importantes debido a que tiene una función de pronóstico, alerta y/o predicción sobre situaciones ambientales que ponen en riesgo a los habitantes del territorio, y la infraestructura en general

2. JUSTIFICACIÓN.

Se realizará la modelación hidrológica del río Vijes desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Cauca, para determinar caudales de eventos de crecidas, con el fin de fortalecer el componente de gestión de riesgo del municipio y optimizar la ordenación del territorio. Después de revisar el EOT del municipio de Vijes, se puede evidenciar que en el documento no se encuentra incorporado el componente de gestión del riesgo establecido en el Decreto 1807 del 2014, compilado en la sección 3 del Decreto 1077 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Adicionalmente en su artículo 17, el EOT establece que las áreas de protección de los cauces de agua, quebradas, zanjones y canales de conducción para acueductos son aquellas que se delimita con 30 metros a todo lo largo de las márgenes derecha e izquierda de cada uno de estos cuerpos, los cuales fueron medidos perpendicularmente a las márgenes o riberas de los mismos, con el objeto de preservar las características de los cauces, regular su caudal y proteger sus márgenes y garantizar la regulación hídrica disminuyendo los riesgos de inundación en los sectores aledaños.

En modo interpretativo, se considera que el municipio asume el río Vijes como un cuerpo de agua que se comporta de la misma manera en todo su trayecto, ya que para todo el río define una sola medida para la franja protectora, si el municipio contara con los estudios respectivos para determinar cuál es el comportamiento de dicho río (desbordamiento) establecería en los puntos más críticos una franja protectora mayor y así mismo la zonificación del municipio cambiaría notablemente debido a la restricción de los usos por condición de riesgo por amenazas. Por tanto, se considera esta modelación de gran importancia, debido a que sería un insumo para los entes territoriales que les permitirá conocer cuáles son las áreas vulnerables de desbordamiento y así determinar y aumentar las franjas de protección del río y restringir el uso del suelo en dichas áreas

afectadas. De igual forma es una herramienta importante para la elaboración de estrategias para la mitigación del riesgo por amenaza. Para la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, les serviría de insumo para la elaboración de las herramientas de planificación ambiental que tengan a cargo y fortalecer su función en el territorio.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el municipio de Vijes se encuentran en proceso de expansión y cuenta con aproximadamente 11.000 habitantes, los cuales están estableciendo sus viviendas dentro de las áreas forestales protectoras del río sin tener en cuenta la normatividad municipal y ambiental vigente generando una situación de riesgo por posible amenaza de desbordamiento del río. Es importante indicar que el Decreto 1076 de 2015 en su artículo 2.2.1.1.18.2 literal b) establece que, a cada lado de los cauces de los ríos, quebradas y arroyos, sean permanentes o no, y alrededor de los lagos o depósitos de agua debe permanecer una faja no inferior a 30 metros de ancha, paralela a las líneas de mareas máximas. De igual forma, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, emitió la Resolución 2245 del 29 de Diciembre de 2017 "Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas", donde define como rondas hídricas como la faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho.

De igual forma, el Acuerdo No. 054 del 20 de diciembre de 2000 "Por medio del cual se adopta el Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Vijes, Valle del Cauca para la vigencia 2000-2010" estipula en su artículo 17 las áreas de protección de los cauces de agua, quebradas, zanjones y canales de conducción para acueductos. Donde define que son aquellas que se delimita con 30 metros a todo lo largo de las márgenes derecha e izquierda de los canales de acueducto, zanjones o quebradas en su recorrido o paso por el territorio municipal de Vijes, 30 metros que están medidos perpendicularmente a las márgenes o riveras de los mismos, con el objeto de preservar las características de los cauces, regular su caudal y proteger sus márgenes y garantizar

la regulación hídrica disminuyendo los riesgos de inundación en los sectores aledaños. Adicionalmente ni el municipio de Vijes ni la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, cuentan con registros históricos que permita conocer el comportamiento del río Vijes en las temporadas de invierno y verano, el cual es un insumo importante para desarrollar los estudios de identificación de amenazas y riesgos que permita establecer las políticas municipales de Gestión de Riesgo y Desastres en el territorio y fortalecer el Esquema de Ordenamiento Territorial para la incorporación de una estrategia de prevención ante los eventos que se pueden presentar.

4. ANTECEDENTES

A continuación, se señalan algunos antecedentes de ámbito nacional, los cuales serán la línea base para el desarrollo del presente trabajo de grado, es importante indicar que 2 de ellos pertenecen a tesis de pregrado y postgrado respectivamente, y la restante es una guía metodología que desarrolló el Ministerio de Ambiente y de Desarrollo Sostenible y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.

Tabla 1. Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica

1.1.Antecedente No. 1.	
Autor	Ministerio de Ambiente y de Desarrollo Sostenible - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
Fecha	23 de Julio de 2018
Objetivos de la Investigación	Proveer una guía orientada sobre los aspectos conceptuales, aplicaciones y consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta en el desarrollo de modelos hidrológicos e hidráulicos.

Tabla 2. Calculo del caudal de crecimiento por el método racional en el caño de pavas en la vereda de Velásquez en el municipio de Puerto Boyacá

1.2.Antecedentes No.2.	
Autor	Jesús Alejandro Pérez López.
Fecha	18 de Septiembre de 2015.
Objetivos de la Investigación	Determinar el caudal de creciente por el método racional en el Caño Pavas en la Vereda de Velásquez en el municipio de Puerto Boyacá.
Metodología	1.Consulta, revisión, evaluación y adquisidor de información existente. 2.Consulta de estudios previos y/o información base. 3.Caracterización morfométrica y climatológica del a cuenca de estudio. 4.Descripción de los resultados.
Resultados y Conclusiones	Las condiciones climatológicas y las características propias de la cuenca se identificaron como relevantes para el éxito del cálculo del caudal de creciente por el método racional en el Caño Pavas, en la Vereda Velásquez, en el municipio de Puerto Boyacá, en el Departamento de Boyacá.

Tabla 3. Modelación hidrológica para el estudio de inundación, en el departamento de Cundinamarca, del río frío a la altura del municipio de Chía

1.3.Antecedentes No 3.	
Autor	María Fernanda Torres Quintana
Fecha	2017
Objetivos de la Investigación	Realizar el mapa de inundación por medio del estudio hidrológico de la cuenca del río Frío a la altura del Municipio de Chía y elaborar la modelación de inundación con ayuda de los softwares HEC-RAS 5.0.3 y ArcGIS 10.1.
Metodología	1. Recolectar la información existente como la cartografía de la zona, registros de precipitaciones y caudales del río Frío. 2. Análisis climatológico de la zona. 3. Ajuste de los registros de caudales a la función de densidad que mejor resulte. 4. Calculo de los caudales máximos para los periodos de retorno 2.33, 5. 10. 25 50 y 100 años. 5. Construcción del DEM 6. Obtener resultados hidráulicos como Perfil de flujo, láminas de agua, numero de Froude etc 7. Esquematizar el polígono en ArcGIS que representa el mapa de inundación.
Resultados y Conclusiones	1. En la zona de estudio se presentan fuertes precipitaciones totales anuales de 748 mm, el clima es de templado a frío, la temperatura promedio de 13.4°C, humedad

	relativa cercana al 77%. 2.La estación de Pte. Virginia presenta 29 datos de registros históricos de caudales máximos y se realizó el ajuste de la mejor función de densidad de probabilidad la cual fue la Gumbel y la Pearson tipo III. Para la modelación se emplearon los caudales para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años de la fdp de mayor caudal, la Gumbel. 3.Cuando en la zona de estudio no se dispone de estaciones limnigráficas o limnimetricas que registren caudales o niveles, se opta por el cálculo de estos mediante métodos que determinan el caudal por medio de precipitaciones. 4.El río Frio cuenta con una estación; Pte. La Virginia, la cual es limnigráfica y posee registros de caudal. Ya que las áreas de cuencas de la estación y del punto del proyecto no difieren en más del 50 % se aplica el método de transposición de caudales. 5.En cuanto a la modelación se realizó con las condiciones de frontera como la pendiente del rio igual a 0.00048, caudales y la geometría generada a partir de las curvas de nivel y batimetría disponible de la zona. Se obtuvieron las láminas de agua y con ello la mancha de inundación de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 con ayuda del software ARCGIS 10.1. 6.Se comprueba que la lámina de agua rebosa los bordes e inunda el municipio de Chía en los puntos resaltados. Con estas ubicaciones en las zonas se pueden apreciar los puntos vulnerables del área de la zona de estudio y tomar medidas de prevención o mitigación acorde a las necesidades sociales o económicas.
--	---

5. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

5.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar mediante la modelación hidrológica caudales para eventos de crecida del río Vije a partir de su ingreso a la cabecera municipal hasta su desembocadura.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características morfométricas de la cuenca.
- Obtener Hietogramas correspondientes a los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 100 y 500 años.
- Obtener caudales por medio del método de Servicio de Conservación de Suelos – SCS.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1. MARCO TEÓRICO

6.1.1 Área de Estudio.

El municipio de Vijes se encuentra localizado en el departamento de Valle del Cauca, el cual es conformado por 9 corregimientos y 13 veredas. Geográficamente limita por el norte con Darién y Yotoco, por el oriente con El Cerrito y Palmira, por el sur con Yumbo y por el occidente, con La Cumbre y Restrepo. El municipio se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas planas del sistema de referencia espacial Magna Colombia Oeste:

Tabla 4. Ubicación Geográfica del municipio de Vijes.

Coordenadas Planas		
No	X	Y
1	1.071.549	898.473
2	1.074.214	904.347
3	1.071.365	914.593
4	1.067.704	915.329
5	1.060.139	906.383
6	1.062.984	900.664

En el territorio municipal se encuentran dos regiones; una plana, en las proximidades del río Cauca, y otra montañosa al occidente que corresponde a la vertiente oriental de la cordillera occidental. Entre los accidentes orográficos se destacan los altos de Calabaza, Miravalles, La Cruz, Palo Solo, Trementino, Del Oso, Del Piojo, con 1.755 metros sobre el nivel del mar, De la Julia, con 2.007 metros. También se encuentra el cerro De Portachuelo. Sus tierras se distribuyen en los pisos térmicos: cálido, medio y frío, regados por el Río Cauca al oriente, que recibe todo el sistema hidrográfico del municipio. El afluente principal del municipio es el Río Vije, el cual nace en el corregimiento de Carbonero ubicado en las coordenadas planas 1.067.687 Este, 903.701 Norte, y desemboca finalmente en el Río Cauca en las coordenadas planas 1.072.351 Este, 900.474 Norte, con una extensión total de 7.7 Kilómetros, teniendo como tributarios las quebradas Palo Soto, Carbonero, Santana y Potreritos. El área donde se desarrollará la modelación hidrológica comprende desde el inicio de la cabecera municipal hasta la desembocadura del Río Vije que es en el Río Cauca.

6.1.2. Diagnóstico Ambiental

El municipio de Vije presenta características de 2 ecosistemas representativos del Valle del Cauca, los cuales en su gran mayoría predomina el ecosistema Bosque medio Humedo en Montaña Fluvio – Gravitacional (bomhumh), y que de acuerdo con lo afirmado por CVC & FUNAGUA (2010):

(...) se encuentra en las cuencas Amaime, Anchicayá, Arroyohondo, Bugalagrande, Cali, Calima, Cañaveral, Catarina, Chanco, Dagua, Desbaratado, El Cerrito, Garrapatas, Guabas, Guachal, Guadalajara, Jamundí, La Paila, La Vieja, Las Cañas, Lili-Meléndez-Cañaveral, Los Micos, Mediacanoa, Morales, Mulalo, Pescador, Piedras, Riofrío, Rut, Sabaletas, San Pedro, Sonso, Tuluá,

Vijes, Yotoco y Yumbo, en los municipios de Andalucía, Ansermanuevo, Argelia, Bolívar, Buenaventura, Buga, Bugalagrande, Caicedonia, Calima-El Darién, Dagua, El Águila, El Cairo, El Cerrito, El Dovio, Florida, Ginebra, Guacari, Jamundí, La Cumbre, La Unión, La Victoria, Palmira, Pradera, Restrepo, Riofrío, Roldanillo, San Pedro, Santiago de Cali, Sevilla, Toro, Trujillo, Tuluá, Versailles, Vijes, Yotoco, Yumbo y Zarza, en un rango altitudinal entre los 1.000 y los 2.500 msnm. La temperatura media es entre 18°C y 24°C con precipitación media entre 1.000 a 2.000 mm/año, con régimen pluviométrico bimodal (p.97).

(...)

Comprende una variedad de relieves, desde ligeramente planos (vallecitos) hasta fuertemente escarpados (filas y vigas), generados por diversos tipos de materiales litológicos. Las formas de filas y vigas se han originado por rocas metamórficas dinamo-termales de bajo grado como filitas o esquistos, en algunos sectores por metadiabasas, gneis o rocas ígneas volcánicas máficas afaníticas y porfiríticas de diabasas o basaltos, mientras otros sectores se han originado de rocas sedimentarias clásticas conglomeráticas. El relieve de lomas se ha originado a partir de diabasas, mientras que los coluvios y vallecitos coluvio-aluviales se generan por depósitos superficiales clásticos gravigénicos e hidrogénicos como coluviones heterométricos y aluviones mixtos, respectivamente; los espinazos son originados por rocas sedimentarias clásticas arenosas, conglomeráticas y limoarcillosas. Los suelos son bien drenados, profundos y algunos moderadamente profundos limitados por material compactado. Los órdenes predominantes son Alfisoles, Andisoles, Molisoles, Inceptisoles. La vegetación está representada por especies de chagualo (*Chrysochlamys* aff.), guadua (*Guadua ongustifolia*), cascarillo, pomo, guamo (*Inga microphylla*), balso (*Ochroma pyramidale*), y cachimbo (*Erythrina poeppigiana*) (p.98).

(...)

Por otro lado tenemos el ecosistema “arbustales y matorrales medio muy seco en montaña fluvio gravitacional (ammmsh)” se encuentra representado por cuatro zonas específicas con características comunes, estas zonas son: el cañón del río Amaime, en los municipios de Palmira y

El Cerrito; el cañón del río Tuluá, en los municipios de Buga y Tuluá; los valles intramontanos localizados en los municipios de Roldanillo, El Dovio, Versalles, El Cairo y Argelia y el piedemonte de la vertiente oriental de la cordillera occidental en el que se distinguen dos sectores, uno comprendido por los municipios de Yumbo, Vijes y Yotoco, y el otro entre los municipios de Trujillo, Bolívar, Roldadillo, La Unión y Toro (p.118).

Estas zonas se localizan en las cuencas de los ríos Amaime, Tuluá, Garrapatas, Cali, Arroyohondo, Yumbo, Mulaló, Vijes, Yotoco, Mediacanoa, Riofrío, Pescador y RUT, en un rango altitudinal entre los 1.000 y los 2.000 msnm. La temperatura promedio varía entre 18 °C a 24 °C y la precipitación media es de 1.000 mm/año, con régimen pluviométrico bimodal y vegetación subxerofítica.

(...)

Las filas y vigas son el principal tipo de relieve en el paisaje de montaña fluvio-gravitacional y se encuentran constituidas por todo tipo de rocas: ígneas, metamórficas y sedimentarias; las metamórficas están representadas principalmente por esquistos y anfibolitas del Paleozoico, las ígneas tanto intrusivas como volcánicas son de composición máfica y las sedimentarias son clásticas de granulometría variable. Dentro de este paisaje de montaña sobresalen relieves como valles intramontanos (Río Garrapatas) y conos aluviales (Cañones de los Ríos Amaime y Tuluá), los primeros son amplios con pendiente promedio de 12%, los segundos son el resultado de un alto régimen fluvial.

Los suelos se caracterizan por presentar régimen de humedad ústico, es decir, que permanecen secos por periodos largos en el año, pero alternados con ciclos húmedos. Presentan contacto lítico antes de 50 cm de profundidad, son bien a excesivamente drenados. Se identifican los órdenes Alfisoles, Andisoles, Entisoles, Molisoles, Inceptisoles. En algunos sectores de este ecosistema la vegetación natural ha desaparecido casi totalmente, conservándose algunas herbáceas típicas de este clima como pega pega (*Desmodium tortuosum*), zarza, uña de gato (*Fagara pterota*), mora silvestre y algo de cactus (*Melocactus amoenus*). En el piedemonte de la cordillera central se observan especies de drago (*Croton* sp.), chagualo, carbonero (*Beforia aestuans*), guamo (*Inga*

microphylla), higuerillo (*Ricinus communis*), guayabo (*Bellucia axinantha*) y gramíneas (*Poaceae*) (p.119-120).

6.1.3. Areas Protegidas.

El municipio de Vijes en su parte alta se encuentra dentro del área de la Reserva Nacional Forestal del Pacífico establecida mediante la Ley Segunda de 1959.

6.1.4. Pendientes.

El territorio del municipio de Vijes presenta en su gran mayoría pendientes fuertemente quebrada que oscilan entre el 25% y 50%, y en una parte mínima del territorio presenta pendientes escarpadas las cuales oscilan entre el 50% y 70%.

6.1.5. Zona de Recarga.

El territorio del municipio de Vijes no se encuentra dentro de la zona de recarga de acuíferos estipuladas por el acuerdo 042 del 2010 expedida por el Consejo Directivo de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC.

6.2. MARCO LEGAL.

- Ley 388 de 1997 “Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras disposiciones”.
- POLITICA NACIONAL PARA LA GESTION INTEGRAL DEL RECURSO HIDRICO.
- Ley 1523 de 2012 “Por la cual se adopta la Política Nacional de Gestión del riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones”.

- Decreto 1640 de 2012. “Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones”.
- Decreto 1807 de 2014 “Por la cual se reglamenta el Artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la Gestión del Riesgo en los POTS y se dictan otras disposiciones”.
- Decreto 1077 de 2015. ““Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio”.

6.3. MARCO CONCEPTUAL

6.3.1. Generalidades de Cuencas hidrográficas.

Con el fin de establecer una definición de lo que habrá de entenderse en este documento por cuencas hidrográficas, resulta acertado traer a colación la conceptualización que de ellas nos ofrece el Decreto 1640 de 2012, en su artículo 6, el cual expone que:

Se entiende por la cuenca u hoya el área de aguas superficiales y 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 en el mar (Congreso de la República, 2012).

6.3.2. Delimitación y ubicación de la cuenca.

Dado que en la cuenca se mantiene en mayor tiempo los límites fisiográficos se constituye como la unidad de planificación y análisis ambiental adecuada del territorio y además involucra una serie de factores tanto espaciales como sociales (ONU, 2002).

6.3.3. Aspectos físico-bióticos de la cuenca.

El proceso de ordenación de una cuenca debe ser concebido, en esencia, desde el enfoque sistémico dado que la cuenca hidrográfica se comporta como un conjunto real, complejo y abierto, el cual presenta interacciones, entre el subsistema biofísico (el suelo, el agua, la biodiversidad y el aire), así como en lo económico, social y cultural. Si bien estos tres últimos no tienen un limitante físico, dependen de la oferta, la calidad y disponibilidad de recursos naturales que soporta la cuenca hidrográfica. (MinAmbiente, 2014, p.10).

6.3.4. Climatología y Unidades Climáticas.

La precipitación se constituye como uno de los parámetros fundamentales de la climatología de un lugar, por consiguiente, se hará un análisis detallado de este factor en este estudio, a utilizar en el modelamiento por el método del número de curva y la zonificación climática a través del análisis de los fenómenos en conjunto que definen el clima.

6.3.5. Hidrometeorología y el recurso hídrico.

La hidrometeorología es el estudio de la meteorología aplicada a los parámetros hídricos. La teoría Hidrometeorológica en general, comprende la observación, procesamiento y análisis del comportamiento de los elementos hídricos, fundamentalmente las descargas de los ríos y los volúmenes almacenados en reservorios y lagunas; de los elementos meteorológicos, fundamentalmente la precipitación pluvial.

6.3.6. Morfometría de Cuenca.

Para efectos de establecer una definición referente a la morfometría de las cuencas, resulta acertado lo expresado por Llamas (como se citó en Reyes, Ulises & Carvajal, 1981), para quien:

la forma de una cuenca es la configuración geométrica tal y como está proyectada sobre el plano horizontal. Esta forma, de acuerdo con Guilarte (1978), gobierna la tasa a la cual se suministra el agua al cauce principal, desde su nacimiento hasta su desembocadura. Cada cuenca tiene entonces una forma determinada que guarda relación con su comportamiento hidrológico. (p.25).

(...)

El análisis morfométrico de una cuenca es fundamental para comprender e interpretar su comportamiento morfodinámico e hidrológico, así como para inferir indirecta y cualitativamente sobre la estructura, características y formas de los hidrogramas resultantes de eventos de crecidas (respuesta hidrológica). También permiten analizar y comprender los elementos geométricos básicos del sistema, que ante la presencia de externalidades interactúan para originar y/o activar procesos geomorfológicos (movimientos de masa) de vertientes y aludes torrenciales (Alonso et al. 1981; Vélez y Vélez,) (p.33).

6.3.6.1. Factor de Forma.

Reyes et al. (2014) señalan que este parámetro indica el comportamiento de la cuenca frente a un evento de crecida, el cual varía de acuerdo a la forma redondeada o alargada de la misma. El valor de (F) gobierna la tasa por medio de la cual se suministra el agua al cauce principal. De igual forma, la unidad dará el dato de achatamiento de una red hídrica y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas.

6.3.6.2. Coeficiente de Compacidad.

Según Reyes, Ulises & Carvajal (2014), con el cálculo de este índice se busca determinar la similitud de la cuenca con relación a un círculo.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, este índice determina la forma de la cuenca en relación a su semejanza con formas redondas, a continuación, se enuncian los correspondientes rangos de compacidad:

- Clase Kc1: Rango entre 1 y 1,25, corresponde a forma redonda a oval redonda,
- Clase Kc2: Rango entre 1,26 y 1,5, corresponde a forma oval redonda a oval oblonga,
- Clase Kc3: Rango entre 1,5 y 1,75, corresponde a forma oval oblonga a rectangular oblonga (Reyes et al. 2014).

6.3.6.3. Coeficiente de Circularidad.

El índice de circularidad de Miller (MILLER, 1953) compara la forma de la cuenca con la de un círculo, diferente al índice de compacidad. La razón de elongación compara la longitud del eje mayor de la cuenca con el diámetro de un círculo de igual área, mientras que el factor de forma compara el área de la cuenca con la de un cuadrado con los lados iguales al eje mayor de la cuenca.

6.3.6.4. Parámetros Morfométricos asociados al Relieve.

La forma del relieve es uno de los parámetros que son importantes para iniciar un análisis hídrico en una cuenca o área de estudio. Debido que la duración de concentración de las aguas de escorrentía afluentes a un cauce principal se ve determinando por el grado de inclinación de la pendiente.

6.3.6.5. Histograma de Frecuencia de Altitudes

Representa el grado de incidencia de las áreas comprendidas entre curvas de nivel con respecto al total del área de la cuenca. Es importante para conocer el porcentaje de área que corresponde a cada uno de las altitudes y así definir como se distribuye

6.3.6.6. Curva Hipsométrica

Es una curva que indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca en km² que existe por encima de una cota determinada. Puede hallarse con la información extraída del histograma de frecuencias altimétricas.

6.3.6.7. Densidad de Drenajes (Dd).

Este índice relaciona la longitud de la red de drenaje y el área de la cuenca sobre la cual drenan las corrientes hídricas.
$$Dd = \frac{\text{Longitud corrientes km}}{\text{Área cuenca km}^2}$$
 (1) Con el fin de catalogar una cuenca como bien o mal drenada, analizando su densidad de drenaje, se puede considerar que valores de densidad de drenaje próximo a 0.5 km/km² o mayores indican la eficiencia de la red de drenaje.

6.3.6.8. Coeficiente de torrencialidad (Ct).

Índice que mide el grado de torrencialidad de la cuenca, por medio de la relación del número de cauces de orden uno con respecto al área total de la misma. A mayor magnitud, mayor grado de torrencialidad presenta una cuenca.
$$Ct = \frac{\text{Cauces orden 1}}{\text{Área cuenca km}^2}$$
 (2) La descripción de las características morfométricas, fisiográficas, hidrológicas e hidráulicas entre otros, permite un mejor entendimiento del comportamiento del flujo de agua en la cuenca.

6.3.6.9. Tiempo de Concentración.

Se entiende por el tiempo de concentración como el tiempo que tarda una gota en llegar de la parte más alejada de la cuenca hasta la salida de la misma; este a su vez cobra importancia ya que permite analizar cuál puede ser el tiempo en el cual se va a presentar el pico de la creciente debida a una precipitación dada. Existen diversas metodologías empíricas para calcular el valor del tiempo de concentración, métodos que fueron desarrollados en diferentes cuencas y teniendo distintos resultados.

6.3.7. Distribuciones de frecuencia empleadas.

A continuación, se presenta la formulación de las cuatro distribuciones de probabilidad que mejor ajuste presentaron a las series de datos de nivel máximo anual registradas en las estaciones Las Glorias, Villa María, Ocaché, Vajes y Buenos Aires.

Es importante anotar que solo se citan las formulaciones de las distribuciones de mejor ajuste a los datos de Precipitación Máxima en 24 horas anuales registrados en las estaciones en estudio, ya que considerar su completo desarrollo y la totalidad de las distribuciones empleadas sería una labor interminable que escapa al propósito del presente trabajo.

6.3.7.1.1. Distribución Gumbel

La distribución de Gumbel es la distribución estadística más utilizada en la actualidad para el cálculo de valores extremos independientes de variables meteorológicas para un periodo de retorno escogido (García, 2013).

La fórmula de la distribución de Gumbel es la siguiente:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\mu)}} \quad (\text{Ecuación 6.3.7.1.1-1})$$

Donde:

x es el valor de la variable aleatoria,

α y μ son parámetros del ajuste, y

F(x) representa la probabilidad de que se produzca un nivel con un valor menor o igual que x; es decir, F(x) representa la probabilidad de que un valor dado de x no sea superado.

Por lo tanto, la probabilidad de que se produzca una precipitación máxima con un valor mayor que ese x dado será:

$$Prob(\xi > x) = 1 - F(x) \quad (\text{Ecuación})$$

El período o lapso de tiempo T(x) dentro del cual sería esperable que se produjese esa Precipitación Máxima de valor x, llamado período de retorno para ese nivel Máximo x, sería:

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (\text{Ecuación})$$

Se definen α y μ como dos parámetros que toman los valores siguientes:

$$\alpha = \frac{S_N}{S_x} \quad (\text{Ecuación})$$

$$\mu = \bar{x} - \bar{y}_N \frac{S_x}{S_N} \quad (\text{Ecuación})$$

Donde $\bar{y}_N$ y S_N son la media y la desviación estándar de la variable y_i , la cual solo depende del tamaño de la muestra N.

Siendo $\bar{x}$ la media y S_x la desviación estándar de la muestra de los datos de valores de Precipitación Máxima en 24 Horas.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (\text{Ecuación})$$

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (\text{Ecuación})$$

Por otra parte,

$$y_i = -\ln \ln \left(\frac{N+1}{i} \right) \quad (\text{Ecuación2})$$

$$\bar{y}_N = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (\text{Ecuación})$$

$$S_N = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \bar{y}_N)^2}{N}} \quad (\text{Ecuación})$$

Despejando x de la ecuación 4-8, se obtiene finalmente la fórmula analítica para calcular la Precipitación Máxima esperada para un periodo de retorno T(x) dado:

$$x = \mu - \frac{1}{\alpha} \left[\ln \left(-\ln \frac{T(x)-1}{T(x)} \right) \right] \quad (\text{Ecuación})$$

6.3.7.1.2. Distribución Gamma 2

Las Distribuciones Gamma son unos de los modelos más populares para los procesos hidrológicos.

La distribución gamma generalizada tiene la capacidad de imitar los atributos de otras

distribuciones como la Weibull o Lognormal (García, 2013). La distribución gamma es una distribución de probabilidad continua con dos parámetros k y λ cuya función de densidad para valores $x > 0$ es:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \frac{(\lambda x)^{k-1}}{\Gamma(k)} \quad (\text{Ecuación})$$

Aquí Γ es la función gamma. Para valores $k \in \mathbb{N}$ la función gamma es $\Gamma(k) = (k-1)!$ (el factorial de $k-1$). En este caso, por ejemplo, para describir un proceso de Poisson se llaman la distribución Erlang con un parámetro $\theta = 1/\lambda$

6.3.7.1.3. Distribución Gamma de tres parámetros o Pearson tipo III

Para el cálculo de las distribuciones de frecuencia ha sido ampliamente utilizada esta distribución; puesto que la mayoría de las variables hidrológicas son sesgadas, la función Gamma se utiliza para ajustar la distribución de frecuencia de variables tales precipitaciones máximas anuales, Caudales máximos anuales, Volúmenes de flujo anuales y estacionales, entre otros. La función de distribución Gamma tiene dos o tres parámetros.

- Función de densidad:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x - x_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x - x_0}{\alpha}\right) \quad (\text{Ecuación})$$

Donde: $x_0 \leq x < a$ para $a > 0$ Y $a < x \leq x_0$ para $a < 0$

α y β son los parámetros de escala y forma, respectivamente, y x_0 es el parámetro de localización.

- **Estimación de parámetros:**

$$\hat{\beta} = \left(\frac{2}{Cs} \right)^2; \quad \alpha = s \frac{Cs}{2}; \quad x_0 = \bar{x} - \alpha \hat{\beta} \quad (\text{Ecuación})$$

Cs es el coeficiente de asimetría, $\bar{x}$ y s son la media y la desviación estándar de la muestra respectivamente.

- **Factor de frecuencia:**

$$K \approx z + (z^2 - 1) \frac{Cs}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{Cs}{6} \right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{Cs}{6} \right)^3 + z \left(\frac{Cs}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{Cs}{6} \right)^5 \quad (\text{Ecuación})$$

Donde Z es la variable normal estandarizada, Este valor de K se encuentra tabulado de acuerdo al valor de Cs calculado con la muestra.

- **Intervalos de confianza:**

$$X_t \pm t_{(1-\alpha)} Se$$

$$Se = \frac{s \cdot S}{\sqrt{n}} \quad (\text{Ecuación})$$

Donde S es la desviación estándar de la muestra, n es el número de datos y d se encuentra tabulado en función de Cs y Tr.

6.3.7.1.4. Distribución de Log-Pearson tipo III (Distribución Log-Gamma o Log-Pearson de 3 parámetros)

Si los logaritmos Y, de una variable aleatoria X se ajustan a una distribución Pearson tipo III, Se dice que la variable aleatoria X se ajusta a una distribución Log Pearson Tipo III. La distribución de Log-Pearson tipo III, es usualmente usada para realizar análisis de frecuencia de variables hidro-

climatológicas. Esta se trabaja igual que Pearson 3 pero con X_y y S_y como la medida y desviación estándar de los logaritmos de la variable original X .

- **Función de densidad:**

$$f(x) = \frac{1}{x(\alpha)\tau(\beta)} \left(\frac{\ln(x) - Y_0}{\alpha} \right)^{B-1} \exp \left(-\frac{\ln(x) - Y_0}{\alpha} \right)$$

(Ecuación)

a y b son parámetros de escala y forma, respectivamente, y Y_0 es el parámetro de localización.

- **Estimación de parámetros:**

$$\beta = \left(\frac{2}{Cs} \right)^2, \quad \alpha = S_y \frac{Cs}{2}, \quad X_0 = X_y - \alpha\beta$$

(Ecuación)

Cs es el coeficiente de asimetría, X_y Y S_y son la media y la desviación estándar de los logaritmos de la muestra respectivamente.

- **Factor de frecuencia:**

$$\ln(Y_n) = X_y + K * S_y$$

$$K \sim z + (z^2 - 1) \frac{Cs}{6} + \frac{1}{3} (z^3 - 6z) \left(\frac{Cs}{6} \right)^2 - (z^2 - 1) \left(\frac{Cs}{6} \right)^3 + z \left(\frac{Cs}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left(\frac{Cs}{6} \right)^5$$

(Ecuación)

Donde Z es la variable normal estandarizada, este valor de K se encuentra tabulado de acuerdo al valor de Cs calculadora con la muestra.

- **Intervalos de confianza:**

$$Xt \pm t(1 - \alpha)Se$$

$$Se = \frac{S * Sy}{\sqrt{n}}$$

(Ecuación)

Donde Sy es la desviación estándar de los logaritmos de la muestra, n es el número de datos y d se encuentra tabulado en función de Cs y Tr.

6.3.7.1.5. Prueba de bondad de ajuste de Smirnov-Kolmogorov

Este procedimiento es un test no paramétrico que permite probar si dos muestras provienen del mismo modelo probabilístico. El test de Smirnov-Kolmogorov (SK) se basa en la función de distribución empírica (ECDF).

F(X) es la función de distribución que se pretende estudiar.

Fs(X) es la probabilidad o proporción teórica de valores que deben ser iguales o menores que x suponiendo cierta la hipótesis planteada.

S(X) es la función de distribución obtenida en la muestra.

Se considerarán dos hipótesis:

$$H_0: F(X) = F_s(X)$$

$$H_1: F(X) \neq F_s(X)$$

Muestra: n observaciones independientes.

Estadístico de contraste: $|D_n| = \max |F_n(X) - S(X)|$

Para la aplicación del test SK, es necesario determinar la frecuencia observada acumulada.

Para la frecuencia observada en el caso especial de Gumbel, se ordena la información de menor a mayor y se aplica:

$$F_n = \frac{n}{N+1} \quad (\text{Ecuación})$$

Donde:

F_n : Frecuencia observada

N: N° total de datos.

n: número de orden

En el caso de la frecuencia teórica acumulada, ésta se determina a través de la función de distribución de probabilidad; por ejemplo, en el caso de Gumbel:

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-\mu)}} \quad (\text{Ecuación})$$

Una vez determinadas ambas frecuencias, se obtiene el supremo de las diferencias entre ambas, en la i-ésima posición de orden, que se denomina D.

$$D = \sup (F_n(x_i) - F(x_i)) \quad (\text{Ecuación})$$

Luego, asumiendo un valor de significancia, se recurre a la tabla de valores críticos de D en la prueba de bondad de ajuste de Smirnov-Kolmogorov, y considerando el tamaño de la muestra, se establece lo siguiente:

Si $D < D_{\text{tabla}}$, se acepta que el ajuste es adecuado, con el nivel de fiabilidad asumido.

Este test es ampliamente utilizado en el mundo de la ingeniería para definir la función de distribución de frecuencias de mejor ajuste frente al conjunto de datos. Por este motivo fue el empleado en contraste con la distribución empírica de Gringorten. Durante este estudio para determinar las distribuciones de frecuencia más acertadas para las series de datos de las estaciones hidro-meteorológicas.

Para hacer los procedimientos de las distribuciones de probabilidad se utilizó una herramienta virtual desarrollada en Excel, la que ajusta las leyes de probabilidad al conjunto de variables aleatorias y realiza los test de bondad de ajuste por los métodos de Smirnov-Kolmogorov y Chi-Cuadrado. Los resultados obtenidos mediante esta aplicación informática fueron validados a través del chequeo con el software EasyFit (MathWave Technologies- data analysis & Simulation, 2014).

6.3.8. PRECIPITACIONES DE DISEÑO

En la práctica de la ingeniería, el período de retorno (T_r) es utilizado en vez de una probabilidad de excedencia o no excedencia. Según Fernández, y Salas (1995), el período de retorno es una forma de expresar la probabilidad de ocurrencia. Corresponde al período en el cual, en promedio, la variable es igualada o excedida en la realización de un experimento. La relación entre la probabilidad de ocurrencia y período de retorno es la siguiente:

$$7. \quad T = \frac{1}{P(X \geq x)} \quad (\text{Ecuación})$$

De esta manera, cuando la variable aleatoria representa un nuevo máximo anual, el período de retorno es el valor esperado del número de años que transcurren hasta que ocurra un evento de magnitud igual o superior que de un evento predefinido como crítico o de diseño (Fernández y Salas, 1995). Posteriormente, las series completas de precipitación máxima en 24 horas anuales, registrados en cada una de las cinco estaciones se ajustaron distintas funciones de distribución de

probabilidad (Gumbel, Normal, Lognormal 2, Lognormal 3, Gamma 2, Pearson 3, LogPearson 3), ampliamente utilizadas en la actualidad para este tipo de análisis.

En la teoría de la probabilidad y estadística, las distribuciones de probabilidad de una variable aleatoria son funciones que asignan una probabilidad a cada suceso definido sobre la variable aleatoria. La distribución de probabilidad calcula el conjunto de valores de la variable aleatoria, y la probabilidad de que el valor de la variable aleatoria esté dentro de un rango definido (García Conde, 2013). A efectos del presente trabajo, la formulación de las variables toma un aspecto continuo y no discreto.

Dada una variable aleatoria se define función de densidad de una variable continua x , como la curva teórica que se deduce al imaginar la representación de las frecuencias de los resultados ocurridos tras la repetición del experimento aleatorio “infinitas” veces.

Dada una variable aleatoria x , se define su función de distribución, $F(x)$, como:

$$8. \quad F(x, c, k) = 1 - (1 + x^c)^{-k} \quad (\text{Ecuación})$$

Científicamente, la función de densidad de una variable aleatoria x se define como la derivada de la función de distribución $F(x)$, o de otro modo, la función de distribución es la integral de la función de densidad:

Donde:

$$F(x) = \int f(x) \cdot dx \quad (\text{Ecuación})$$

$F(x)$ = Función de distribución
 $f(x)$ = Función de densidad

Para el ajuste de las distribuciones de probabilidad se empleó una aplicación informática que corre bajo Excel, la cual ajusta las leyes de probabilidad a las series de variables aleatorias y realiza los test de bondad de ajuste por los métodos de Smirnov-Kolmogorov y Chi-Cuadrado. Cabe anotar que, los resultados obtenidos mediante esta aplicación informática fueron validados a través del chequeo con el software EasyFit (MathWave Technologies- data analysis & Simulation, 2014).

Así las cosas, la función de distribución estadística de mayor ajuste para la serie de registros de niveles máximos anuales de la estación Mediacanoa, según el test de Smirnov-Kolgomorov, es la Gamma 2, mientras que la función de distribución estadística de mayor ajuste para la serie de registros de niveles máximos anuales de la estación Guayabal, según el test de Smirnov-Kolgomorov, es la de Gumbel. Así las cosas, aplicando los distintos métodos y realizando los test de bondad de ajuste, se seleccionaron las distribuciones de mejor ajuste; según los resultados obtenidos en el Test de Smirnov-Kolgomorov.

6.3.9. NÚMERO DE CURVA

El Soil Conservation Service (1972) desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una lluvia. Para la lluvia como un todo, la profundidad de exceso o precipitación efectiva (Pe) es siempre menor o igual a la profundidad de lluvia (P); de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca (Fa) es menor o igual a alguna retención potencial máxima (S). Existe una cierta cantidad de lluvia (Ia) (abstracción inicial) para la cual no ocurriría escorrentía, luego la escorrentía potencial es $P-Ia$. La hipótesis del método del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir (Chow, 1995):

$$\frac{Fa}{S} = \frac{Pe}{P - Ia} \quad (\text{Ecuación})$$

$$Pe = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (\text{Ecuación 2.2.1.})$$

El valor de S es obtenido por medio de la siguiente formulación empírica, la cual se basa en el análisis de gran cantidad de cuencas de los Estados Unidos (Chow, 1995).

(Ecuación)

Donde:

CN: Número de escurrimiento

6.3.9.1. El complejo de suelo - hidrológico que considera la interrelación suelo - cobertura vegetal.

La determinación del tipo de suelo hidrológico se establece en términos de dos variables principales:

El tipo de suelo mediante el cual se fijan las condiciones de infiltración subsuperficial incidente en la esorrentía superficial en forma directa y por tanto la condición hidrológica del suelo se ajusta a los conceptos de tipo agrológico. La cobertura del suelo, según la cual las plantas también ejercen una fuerte influencia en la esorrentía directa no solamente en su interpretación hipotética de un coeficiente de esorrentía sino también en la capacidad de planta para absorber agua en los periodos húmedos. Esta interacción permite determinar en forma empírica una primera aproximación al valor del CN para las condiciones hidrológicas promedio a nivel local.

En función del tipo de suelo se definen cuatro grupos:

Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento y limos agregados.

Grupo B: Suelos poco profundos depositados por el viento y marga arenosa.

Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.

Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

6.3.9.2. La condición de humedad antecedente; de acuerdo con estas variables se fija un número de curva (CN) que representa tal interrelación.

Un factor importante a tener en cuenta en estas curvas son las condiciones antecedentes de humedad (Antecedent Moisture Conditions), las cuales se agrupan en tres condiciones básicas

Tabla 5. Condiciones antecedentes de humedad básicas empleadas en el método SCS

AMC (I)	Condiciones secas
AMC (II)	Condiciones normales
AMC (III)	Condiciones húmedas

Los números de curva se aplican para condiciones antecedentes de humedad normales, y se establecen las siguientes relaciones para las otras dos condiciones:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (\text{Ecuación})$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{0.13CN(II)} \quad (\text{Ecuación})$$

6.3.10. Parámetros de Entrada al Modelo.

Las hipótesis básicas del método son:

- Las alturas de los hidrogramas son proporcionales a las alturas de lluvia. Principio de proporcionalidad. Los hidrogramas son nomotéticos.

- Se cumple el principio de superposición de causa efecto. Así dos pulsos ocurridos en diferentes momentos producen hidrogramas que suman sus ordenadas en los instantes correspondientes.
- El tiempo base del hidrograma unitario se mantiene constante.

El programa HEC HMS permite multitud de metodologías de estimación tanto de lluvia - escorrentía (Inicial and constant, SCS curve Number) como de propagación de hidrograma (Muskingum, Pulse Method). Es un modelo hidrológico contrastado, de gran validez para estimación de crecientes y muy aceptado en el medio profesional (Universidad Politécnica de Cataluña - FLUMEN, 2015).

El proyecto HMS se fundamenta en la interacción de 4 elementos, o partes, que deben ser creadas por separado, pero finalmente interactúan para dar como resultado los hidrogramas de creciente. Las cuatro partes son (Bateman, 2007):

BASIN MODEL. En este apartado se introducen y edita el esquema de la red de drenaje, las conexiones existentes entre las distintas subcuencas, así como las propiedades de cuenca. En este modelo de cuenca deben aparecer también los métodos de cálculo escogidos y los parámetros hidráulicos asociados a ellos.

METEOROLOGICAL MODEL. En este apartado se deben seleccionar los distintos modelos meteorológicos que se requieren para estimar e interpolar la precipitación que cae sobre cada una de las subcuencas, a partir de los datos de las estaciones pluviométricas. Se puede escoger entre lluvias de diseño estándar (SCS storms), modelos de lluvia espacialmente distribuida (Gridded

precipitation) o hietogramas introducidos por el usuario (Specified Hyetograph). Asimismo, se puede estimar las propiedades de evapo-transpiración o de deshielo de las subcuencas.

CONTROL SPECIFICATIONS. De cara al cálculo de los hidrogramas, en este apartado debe ser introducido aspectos temporales como la fecha y hora de inicio y final de la simulación, así como el paso de tiempo (Time Interval) de cálculo.

TIME SERIES DATA. En este apartado se crea y se especifican las series temporales de lluvia correspondientes a las distintas estaciones pluviométricas existentes en la cuenca. Una vez creada una estación pluviométrica (Gage) se pueden introducir los datos de precipitación manualmente, o bien importar los datos externos de la estación en formato HEC-DSS.

En el menú de **SIMULATION RUN** se debe generar el caso de simulación específico (Run), en el que intervienen los distintos elementos comentados anteriormente. Para dicha simulación se procede al cálculo de los hidrogramas y a la visualización de resultados. Para cada subcuenca, unión y tramo pueden visualizarse tanto gráficos como tablas de los hidrogramas en dichos puntos. Finalmente, se puede representar y exportar el hidrograma en el punto de salida de la red de drenaje (OutFlow). Dichas series temporales de resultados quedan almacenados en el archivo *.DSS.

6.3.11. Hidrograma unitario adimensional del SCS.

Uno de los métodos más utilizados para procesar los datos de lluvia directa y convertirlos en un caudal de salida en la unidad hidrológica es el Método del hidrograma unitario. Este método se ha transformado algo con el tiempo, pero sigue siendo en el fondo el mismo sistema (CHOW, 1995). La idea básica es que la lluvia se toma como una capa que cae uniformemente en la unidad hidrológica y esto lo puede hacer durante un periodo de tiempo. Durante este tiempo toda el agua que cae sobre la cuenca escurre, puesto que la infiltración ya se ha restado de la precipitación total.

Así que incluso aunque lloviese durante un infinitesimal de tiempo se produciría una escorrentía en la cuenca en forma de hidrograma. Esta es básicamente la idea del hidrograma unitario. Es decir, es encontrar la respuesta de la cuenca a un impulso unitario. Esta respuesta se da en forma de hidrograma de escorrentía. Normalmente se utiliza como unidad 1 mm de lluvia. El espacio temporal varía según los datos, pero ha de tenerse en cuenta. Es decir que en definitiva el hidrograma unitario se define como la respuesta de la cuenca a un pulso de magnitud unitaria que se produce durante un determinado lapso de tiempo.

6.3.12. Área forestal protectora

De acuerdo con el Congreso de la República (1977) en su Decreto 1449 de 1977, Art. 3, se entiende por área forestal protectora lo siguiente:

- Los nacimientos de fuentes de aguas en una extensión por lo menos de 100 metros a la redonda, medidos a partir de su periferia.
- Una faja no inferior a 30 metros de ancho, paralela a las líneas de mareas máximas,
- cada lado de los cauces de los ríos, quebradas y arroyos, sean permanentes o no y alrededor de los lagos o depósitos de agua.
- Los terrenos con pendientes superiores al 100% (45°).

6.3.13. Instrumentos de planificación territorial

En lo que se refiere al Plan de Ordenamiento Territorial, el Cap. III, Artículo 9° de la Ley 388 de 1997, lo define como:

(...) el instrumento básico para desarrollar el proceso de ordenamiento del territorio municipal. Se define como el conjunto de objetivos, directrices, políticas, estrategias, metas, programas, actuaciones y normas adoptadas para orientar y administrar el desarrollo

físico del territorio y la utilización del suelo. Los planes de ordenamiento del territorio se denominarán:

- Planes de ordenamiento territorial: elaborados y adoptados por las autoridades de los distritos y municipios con población superior a los 100.000 habitantes.
- Planes básicos de ordenamiento territorial: elaborados y adoptados por las autoridades de los municipios con población entre 30.000 y 100.000 habitantes.
- Esquemas de ordenamiento territorial: elaborados y adoptados por las autoridades de los municipios con población inferior a los 30.000 habitantes (Congreso de la República, 1997).

7. METODOLOGÍA.

Teniendo en cuenta que el objetivo del presente trabajo consiste en la obtención de caudales para distintos eventos de crecida en el río Víjes a la altura del municipio de Víjes, para lograr hallar el valor de dicho caudal, se empleó la siguiente metodología.

7.3. MORFOMETRÍA.

7.3.9. Delimitación del Área de Estudio.

Para determinar el área de estudio se empleó el método del parte aguas, tomando como punto de cierre la zona inmediatamente aguas arriba de la zona de estudio. Trabajo que puede hacerse de manera más eficiente apoyándose en herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG); la cual requiere como información de entrada un Modelo Digital del Terreno (MDT), en este caso se utilizó un Modelo de propiedad de la Corporación Autónoma Regional del Valle (CVC), el cual fue levantado mediante Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR), que cuenta con una resolución espacial de 2.5 x 2.5 metros. Gracias a esto logra representar el terreno de una manera bastante acertada, logrando así determinar el parteaguas y trazar la red de drenaje del área de estudio; siendo necesario utilizar las siguientes herramientas para obtener el área de aportación y la red de drenaje.

7.3.9.1. Llenado de depresiones

Este proceso es necesario llevarlo a cabo puesto que pueden existir algunas imprecisiones en el modelo que interrumpan la dirección del flujo afectando así el parteaguas de la zona.

7.3.9.2. Dirección de flujo

Utilizando el Raster proveniente del proceso de llenado de depresiones procesa el Raster de las direcciones del flujo, el cual determina cual es el pixel a donde drenan el resto, identificando de esta manera las vías de flujo. De esta manera logrando *determinar el área de drenaje efectiva de la zona; esto mediante la herramienta *Flow Direction*.

7.3.9.3. Acumulación de flujo

Para determinar las acumulaciones de flujo se utiliza el Raster de dirección de flujo, donde se muestran las direcciones de flujo y con esta herramienta se permite observar la cantidad de pixeles vierten en un pixel determinado.

7.3.9.4. Trazado de la cuenca

Este trazado de la cuenca es posible realizarlo utilizando como insumos el raster de dirección de flujo y el punto de cierre elegido anteriormente. La herramienta tiene como nombre *Watershed*.

7.3.10. Parámetros Morfométricos Generales.

Una vez establecido el área de estudio se debe calcular los siguientes parámetros:

Tabla 6. Parámetros Morfométricos Generales

Parámetro	Símbolo
Perímetro (Km)	P
Área (Km ²)	A

Longitud máxima (Km)	LM
Longitud Cauce Principal (Km)	LCP
Ancho de la Cuenca	AC
Desnivel Altitudinal (m)	DA

Con el archivo Shape File establecido como “Área de Estudio”, se debe calcular los parámetros P, A, LM, LCP, mediante el Sistema de Información Geográfica Qgis 3.10. El procedimiento se realiza mediante la calculadora geométrica de la tabla de atributos del archivo. El ancho de la cuenca (AC) se calcula mediante la siguiente formula:

$$C = \frac{A}{LM}$$

Donde:

AC: Ancho de la Cuenca.

A: Área.

LM: Longitud Máxima

Por otro lado, el desnivel altitudinal se calcula de la siguiente manera:

$$DA = C_{max} - C_{min}$$

Donde:

DA: Desnivel Altitudinal.

Cmax: Cota Máxima (msnm).

Cmin: Cota Mínima (msnm).

7.3.11. Parámetros Morfométricos asociados a la forma de la cuenca.

7.3.11.1. Factor de Forma.

El factor de forma se calcula con la siguiente ecuación:

$$F = \frac{A}{L_m^2}$$

Donde:

- F: Factor de Forma (adimensional),
- A: Área de la Cuenca (Km²),
- L_m: Longitud de máximo recorrido (km) (Reyes et al., 2014).

A continuación, se enuncia los rangos del factor de forma:

- F > 1: Cuenca achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas,
- F < 1: Cuenca alargada, baja susceptibilidad a las avenidas (Reyes et al. 2014).

7.3.11.2. Coeficiente de Compacidad.

La ecuación que define el índice de compacidad es la siguiente:

$$Kc = \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

- Kc= Índice de la compacidad o Índice Gravelius.
- P= Perímetro de la cuenca (Km).
- A= Área de la Cuenca (km²).

7.3.11.3. Coeficiente de Circularidad.

La ecuación que define el índice de compacidad es la siguiente:

$$4\pi = \frac{A}{P^2}$$

Donde:

- P= Perímetro de la cuenca (Km).
- A= Área de la Cuenca (km²).

7.3.12. Parámetros Morfométricos asociados al Relieve.

Se seleccionaron los siguientes parámetros morfométricos asociados al relieve:

Tabla 7. Parámetros Morfométricos asociados al Relieve

Parámetro	Símbolo
Cota Máxima (msnm)	cmax
Cota Mínima (msnm)	cmin
Altitud media(msnm)	Am
Altitud más frecuente (msnm)	Af
Altitud mayor del cauce	Amc
Altitud menor del cauce	Amec
Pendiente promedio de la cuenca (%)	Smed

Para el cálculo de estos parámetros, se debe extraer las curvas de niveles del Modelo de Terreno Digital del área de estudio mediante el SIG Qgis 3.10, una vez completada la actividad, por medio de la opción ZONAL STATISTICS se calcula los siguientes parámetros:

Tabla 8. Parámetros Calculo Zonal Statistics

Parámetro	Símbolo
Cota Máxima (msnm)	cmax
Cota Mínima (msnm)	cmin
Altitud media(msnm)	Am
Altitud más frecuente (msnm)	Af

7.3.12.1. Histograma de Frecuencia de Altitudes y Curva Hipsométrica.

Antes de elaborar el Histograma de Frecuencia de Altitudes y la Curva Hipsométrica respectivamente, se debe construir una tabla de datos con base en las Cotas Máximas y Mínimas calculados anteriormente. Dicha tabla debe indicar las áreas parciales que contiene cada cota (altura). Para este ejercicio se elaboró la siguiente tabla.

Tabla 9. Histograma de Frecuencia de Altitudes y Curva Hipsométrica.

No.	Cota de Intervalo		Cota Media	Área Parcial	Área Acumulada Km2	%Área Total	% Altitudes
1	952	1022	987	1,373	27,308	100	5,03
2	1022	1092	1057	1,025	25,935	94,97	3,75
3	1092	1162	1127	1,329	24,91	91,22	4,87
4	1162	1232	1197	1,701	23,581	86,35	6,23
5	1232	1302	1267	2,223	21,88	80,12	8,14
6	1302	1372	1337	2,439	19,657	71,98	8,93
7	1372	1442	1407	1,964	17,218	63,05	7,19
8	1442	1512	1477	1,824	15,254	55,86	6,68
9	1512	1582	1547	2,171	13,43	49,18	7,95
10	1582	1652	1617	2,514	11,259	41,23	9,21
11	1652	1722	1687	2,92	8,745	32,02	10,69
12	1722	1792	1757	2,637	5,825	21,33	9,66
13	1792	1862	1827	1,805	3,188	11,67	6,61
14	1862	1932	1897	1,177	1,383	5,06	4,31
15	1932	2002	1967	0,206	0,206	0,75	0,75

Para graficar el Histograma de Frecuencia se debe generar un gráfico tipo columna donde se proyectaran los siguientes datos:

- **Eje X:** Cota media.
- **Eje Y:** % de Altitudes.

En cuanto a la Curva Hipsométrica, se debe generar un gráfico tipo lineal donde se proyectaran los siguientes datos:

- **Eje X:** % Área Total
- **Eje Y:** Cota Media

7.3.13. Parámetros Morfométricos asociados a la Red de Drenaje.

Los parámetros a calcular son los siguientes:

Tabla 10. Parámetros Morfométricos asociados a la Red de Drenaje

Parámetro	Símbolo
Orden de la Cuenca	Oc
Longitud Total de Drenajes (Km)	Lt
Densidad de Drenaje	D
# Drenajes Orden 1	
Coeficiente de Torrencialidad	Ct
Pendiente del Cauce (%)	Sc
Pendiente del Cauce (m/m)	Sc
Tiempo de Concentración (horas)	Tc

7.3.13.1. Orden de la Cuenca.

Para determinar el orden de las mismas se utilizó el método de Horton, el cual consiste en relacionar dos corrientes de un mismo orden (i) y como resultado se obtiene una corriente de orden i+1. Cuando una corriente se une con otra de orden mayor, resulta una corriente que conserva el mayor orden.

7.3.13.2. Longitud total de Drenajes.

Por medio del SIG Qgis 3.10, se selecciona el archivo SHAPE FILE de la red de drenaje extraído del raster del área de estudio, y por medio de la opción ZONAL STATISTICS se calcula la longitud total de las corrientes.

7.3.13.3. Densidad de Drenajes (Dd).

La ecuación por medio del cual se calcula la Densidad de Drenajes es la siguiente:

$$Dt = \frac{Lt}{A}$$

Donde:

- Dt: Densidad de Drenajes
- Lt: Longitud Total de Drenajes
- A: Área

7.3.13.4. Numero de Drenajes de 1 Orden.

Por medio del SIG Qgis 3.10, se realiza la cuantificación manual de los drenajes de primer orden.

7.3.13.5. Coeficiente de torrencialidad (Ct).

La fórmula para calcular el Coeficiente de Torrencialidad es el siguiente:

$$Ct = \frac{Do1}{A}$$

Donde:

- CT: Coeficiente de Torrencialidad
- Do1: Drenajes de Orden 1
- A: Area

7.3.13.6. Pendiente del Cauce (%).

La pendiente del cauce se calcula por medio de la siguiente formula:

$$Sc = \frac{Amc - Amec}{LCP \times 1000} \times 100$$

Donde:

Amc: Altitud Mayor del Cauce

Amec: Altitud menor del Cauce.

LCP: Longitud del Cauce Principal

7.3.13.7. Tiempo de Concentración.

Para el cálculo de este índice, se utilizó las siguientes ecuaciones, las cuales son las más aplicadas para cuencas rurales:

Tabla 11. Métodos para cálculo de Tiempo de Concentración

ECUACIÓN	UNIDADES
Kirpich $T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$	Tc: horas L: km S: m/m
California Culverts Practice $T_c = 60 \left(\frac{0.87075 \cdot L^3}{DA} \right)^{0.385}$	Tc: minutos L: m DA: m
Temez $T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$	Tc: horas L: km S: m/m
Valencia y Zuluaga (Uninacional Colombia) $T_c = 1.7694 A^{0.325} L^{-0.096} S^{-0.290}$	Tc: horas L: km A: km ² S: %
U.S. Bureau of Reclamation (California) $T_c = 0.066 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.5}} \right)$	Tc: horas L: km S: m/m
Pilgrim y McDermott $T_c = 0.76 \cdot A^{0.38}$	Tc: horas
	A: km ²

George Rivero $T_c = \left(\frac{16.L}{(1.05 - 0.6(0.7)).(100.S)^{0.04}} \right)$	Tc : minutos L : km S : m/m
Passini $T_c = \frac{0.108.(A.L)^{1/3}}{S^{0.5}}$	Tc : horas L : km A : km ² S : m/m
Bransby - Williams $T_c = 14.6.L.A^{-0.1}S^{-0.2}$	Tc : minutos L : km A : km ² S : %
Giandotti $T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3 \sqrt{S.L}}$	Tc : horas A : km ² L : km S : m/m

7.3.14. Obtención de parámetros del tiempo de Concentración.

El valor del área de la cuenca se determina ejecutando la operación al archivo de vectorial (SHP) proveniente del procedimiento de delimitación de la cuenca, para determinar el cauce más largo se genera la red de drenaje a partir del MDT mediante el siguiente procedimiento:

7.3.14.1. Raster Calculator

Utilizando la calculadora Ráster es posible determinar las redes de drenaje mediante el Ráster de Acumulación de Flujo, esto es posible al utilizar un condicional que asigna a todos los píxeles con un valor superior 2000 un valor de 1; descartando así la zona del Ráster que no equivale a ser una red hídrica

7.3.14.2. Stream Link

Utilizando esta herramienta se genera un Ráster que une los píxeles que se encuentran dispersos, esta unión es determinada mediante el Ráster de Dirección de flujo, generando la red de drenaje aproximada de la zona de estudio.

7.3.14.3. Stream To Feature

Utilizando esta herramienta se toma el raster del proceso anterior denominado como Stream Link y lo que hace esta herramienta es con ayuda de la dirección de flujo complementa las uniones faltantes y crea un archivo vectorial donde es posible cuantificar la longitud de las redes de drenajes y así determinar de manera adecuada cual es el mas largo probando las posibles combinaciones y eligiendo la de mayor valor.

Por otra parte, la elevación mínima y máxima se obtiene utilizando como insumo el MDT. De esta manera se consiguen los insumos necesarios para hallar el tiempo de concentración de la cuenca.

7.4. CLIMATOLÓGÍA

La obtención de las características climatológicas fue realizada a partir de los registros históricos de las estaciones que miden las variables hidro-climatológicas que se encuentran cercanas a la cuenca. Durante el presente estudio se utilizaron las estaciones instaladas y operadas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), escogiendo de esta manera las estaciones encontradas a 10 Kilómetros a la redonda y con un periodo de registros mayor a 10 años; a continuación, se muestran las estaciones utilizadas:

Tabla 12. Estaciones Hidroclimatologicas

NOMBRE	TIPO
LAS GLORIAS	CO
VILLA MARIA	PG
OCACHE	PG
VIJES	EV
BUENOS AIRES	PM

Recopilando los registros de estas estaciones, es posible realizar una aproximación a la magnitud de un evento de máxima precipitación para un periodo de retorno dado; esto es posible mediante análisis estadístico, actualmente existen varios métodos desarrollados y estos pueden ser determinísticos o estocásticos.

7.4.1. PRECIPITACIÓN DE DISEÑO

Siguiendo la aplicación la técnica estadístico-probabilística de análisis de frecuencia, se seleccionaron las series completas precipitación máxima en 24 horas anuales registradas por las estaciones hidro-meteorológicas de Las Glorias, Villa Maria, Ocaché, Víjes y buenos aires. Finalmente, se contó con una serie de registros máximos anuales de, 13 años, 35 años, 64 años y 47 años respectivamente.

A continuación, se presenta cada estación con su respectiva distribución de probabilidad.

Tabla 13. Distribución Estadística

NOMBRE	MÉT. DE MEJOR AJUSTE
LAS GLORIAS	PEARSON III
VILLA MARIA	GUMBEL
OCACHE	LOG PEARSON III
VIJES	GAMMA 2
BUENOS AIRES	PEARSON III

7.5. HIETOGRAMAS DE DISEÑO.

Una vez se obtuvieron todos los resultados climatológicos y morfométricos, se procede a obtener los hietogramas de diseños; los cuales son utilizados posteriormente para la transformación lluvia-esorrentía, mediante el método del SCS.

Para la obtención de los hietogramas de diseño asociados a diferentes períodos de retorno, es necesario conocer de manera adicional a las profundidades de lluvia máxima a escala diaria, su distribución promedia en el tiempo. Por lo anterior, se realizó el análisis de varias lluvias registradas en los pluviógrafos ubicados en cercanías a la zona de estudio, seleccionando las tormentas más importantes desde el punto de vista de su magnitud e intensidad. Para cada evento registrado se calcularon los valores porcentuales de lluvia acumulada en cada intervalo de tiempo y se graficaron la totalidad de los eventos seleccionados. Posteriormente, a partir de lo anterior, se definió una curva típica como representativa de las condiciones de la distribución de tormentas en el Valle del Cauca (Figura).

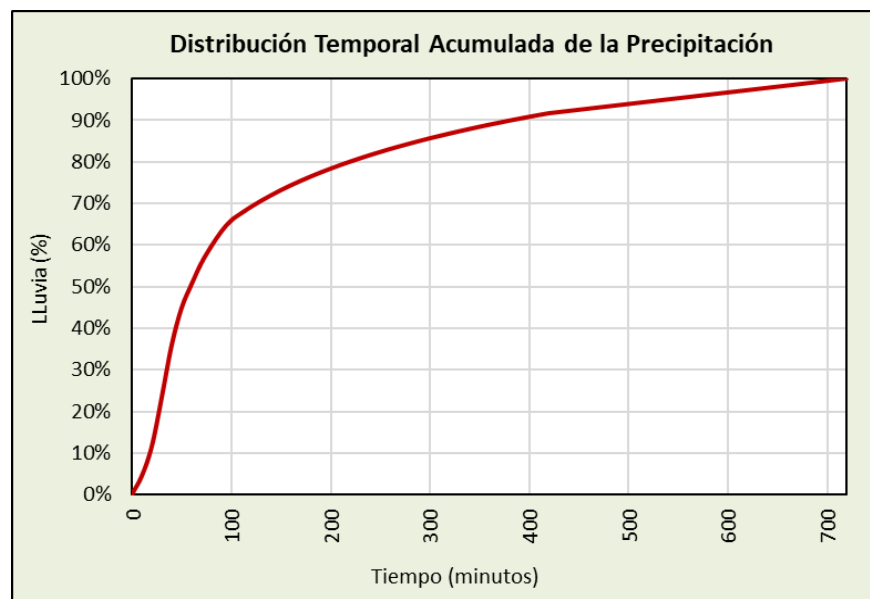


Figura 1. Distribución temporal acumulada de la precipitación en la zona de estudio.

7.5.1. PRECIPITACIÓN MÁXIMA PÓNDERADA.

Esta precipitación máxima ponderada tiene como objetivo tomar en cuenta la influencia que tiene cada estación sobre la cuenca debido a su ubicación geográfica, la metodología empleada durante esta tesis fue la de los polígonos de Thiessen. A continuación, se describe este método.

7.5.1.1. POLIGONOS DE THIESSEN

El área de influencia de cada estación sobre la cuenca está definida como la mitad de la distancia entre la posición geográfica de los distintos pluviómetros o pluviógrafos, trazando líneas perpendiculares a las líneas rectas proyectadas entre las estaciones, conformando de esta manera un conjunto de polígonos, y la influencia de la estación sobre la cuenca está dada como el porcentaje de área que se intercepte del polígono de cada estación con el polígono de la cuenca.

Utilizando la herramienta de *Polígonos de Thiessen* sobre el Shapefile de las estaciones hidrometeorológicas, teniendo como resultado un Shapefile con los polígonos de Thiessen, el cual se intersecta con el archivo de la cuenca para determinar las áreas de responsabilidad para cada una de las estaciones.

7.6. TRANSFORMACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA

Ya que esta cuenca no se encuentra instrumentada con una estación limnigráfica o limnimétrica; es necesario hacer una estimación de caudales a partir de la precipitación. Realizando una estimación del escurrimiento a través de la cuenca mediante el análisis de las características físicas de la cuenca. A este procedimiento se le llama transformación lluvia-escorrentía. En el mundo de la ingeniería existen varios modelos hidrológicos para llevar a cabo este análisis, entre esos modelos actualmente el Número de Curva es uno de los más empleados para hacer las estimaciones

de la lámina de escorrentía; por tal motivo, durante este estudio fue utilizado este modelo que fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos.

A continuación, se explica brevemente este modelo aplicado.

7.6.1. NÚMERO DE CURVA

A continuación, se describirá el procedimiento para el cálculo del Número de Curva el cual se realizó mediante el software ArcGis.

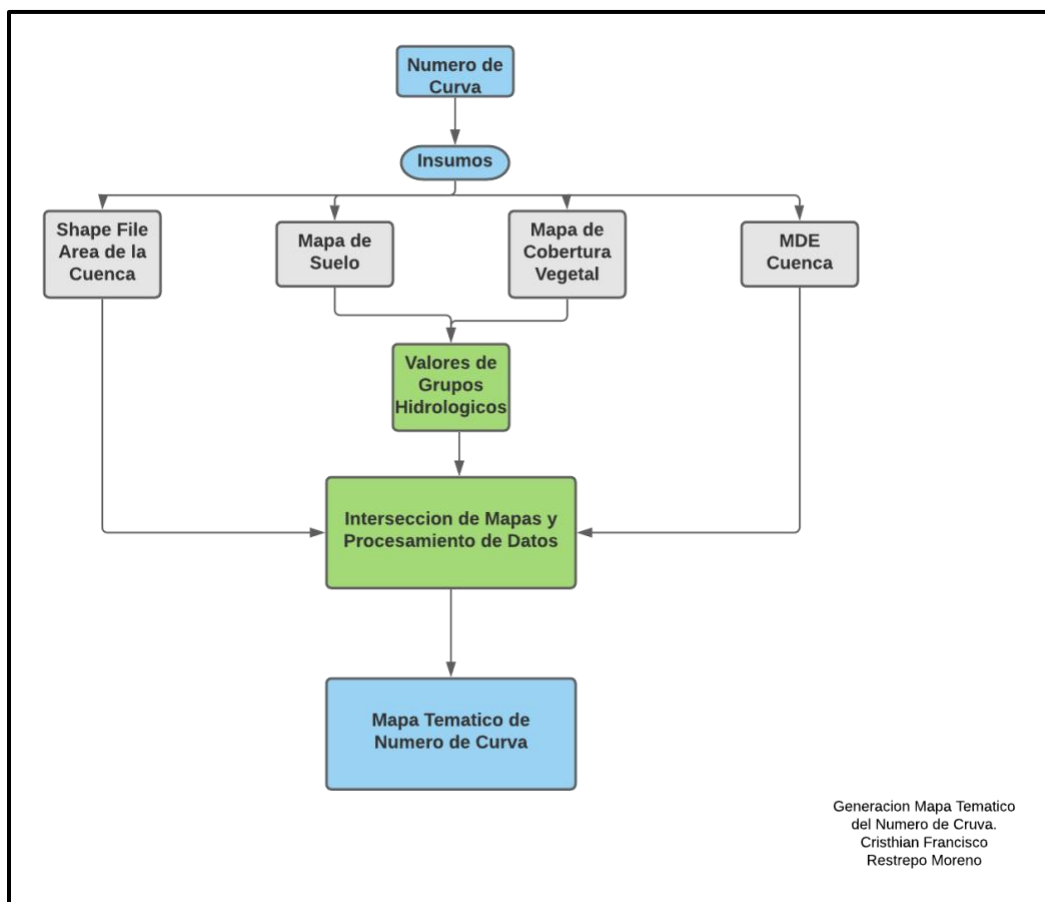


Figura 2. Procedimiento Numero de Curva

Para la obtención de los mapas de cobertura y tipo de suelo, se utilizó la cartografía base de CVC-IGAC (2014), la que se encuentra a una escala 1:25.000 y cuenta con la información de tipo de suelo y cobertura de suelo en formato shapefile, esta información se encuentra dividida en cobertura y tipo de suelo y por lo tanto es necesario reclasificarla según las convenciones del SCS e intersectandolas para conformar las unidades de respuesta hidrológica a las cuales se les asignan valores de número de curva según la siguiente tabla

Tabla 14. Valores de numero de curva para humedad antecedente II.

Cobertura	Lu value	A	B	C	D
Aguas continentales	1	100	100	100	100
Arbustales y matorrales naturales	2	54	67	77	83
áreas cultivadas sin o con poca vegetación	3	59	69	77	83
áreas naturales abiertas sin o con poca vegetación	4	57	73	82	86
Bosques naturales	5	52	60	69	76
Cultivos arbóreos plantados	6	56	64	73	78
Cultivos alineados	7	70	76	80	82
Zonas urbanizadas	8	72	82	87	89

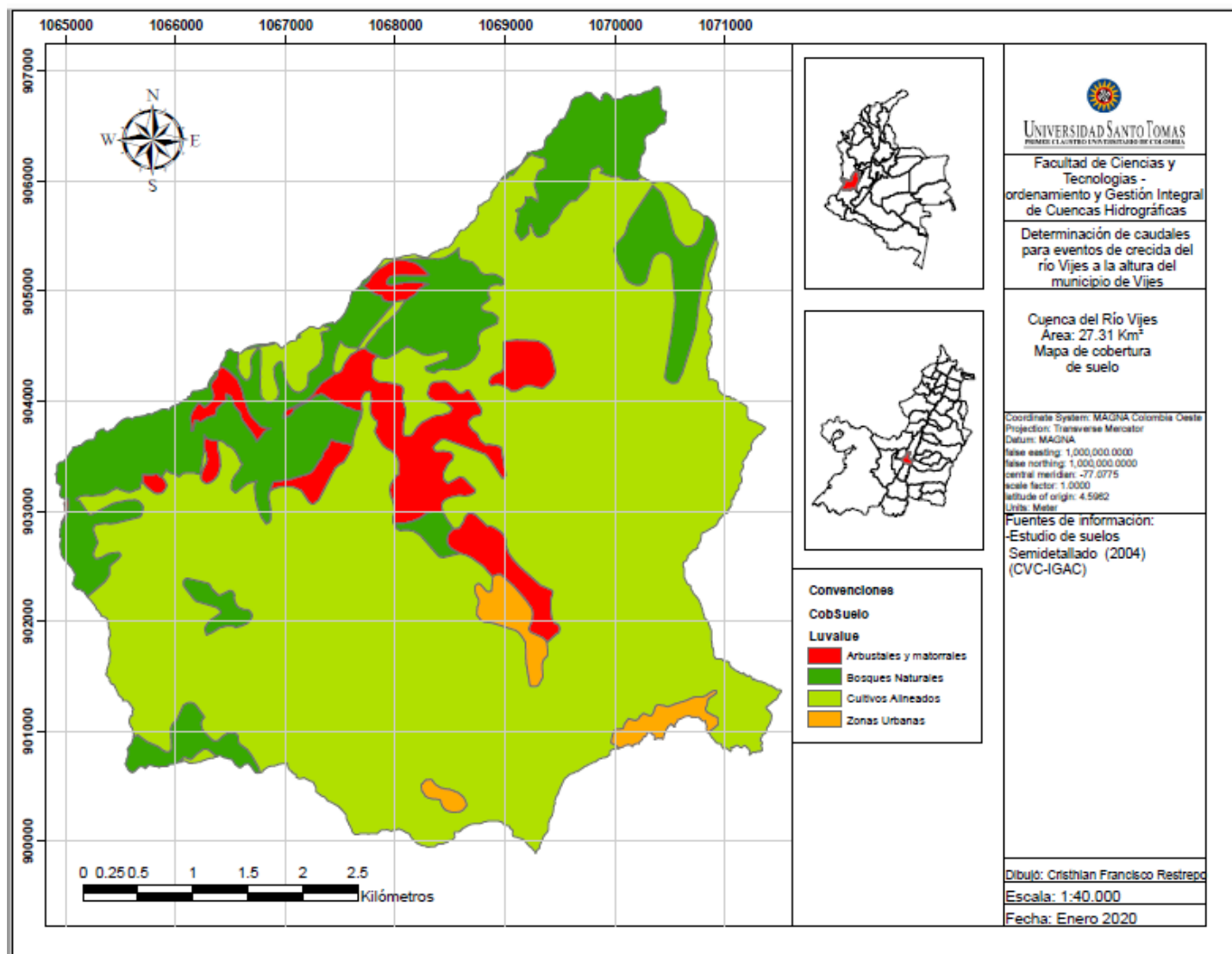


Figura 3. Mapa de cobertura de suelo

A continuación, se presentan los mapas correspondientes a la cobertura de suelo y a la textura de este, respectivamente; estos mapas fueron reclasificados según lo estipulado en la metodología del Soil Conservation Service.

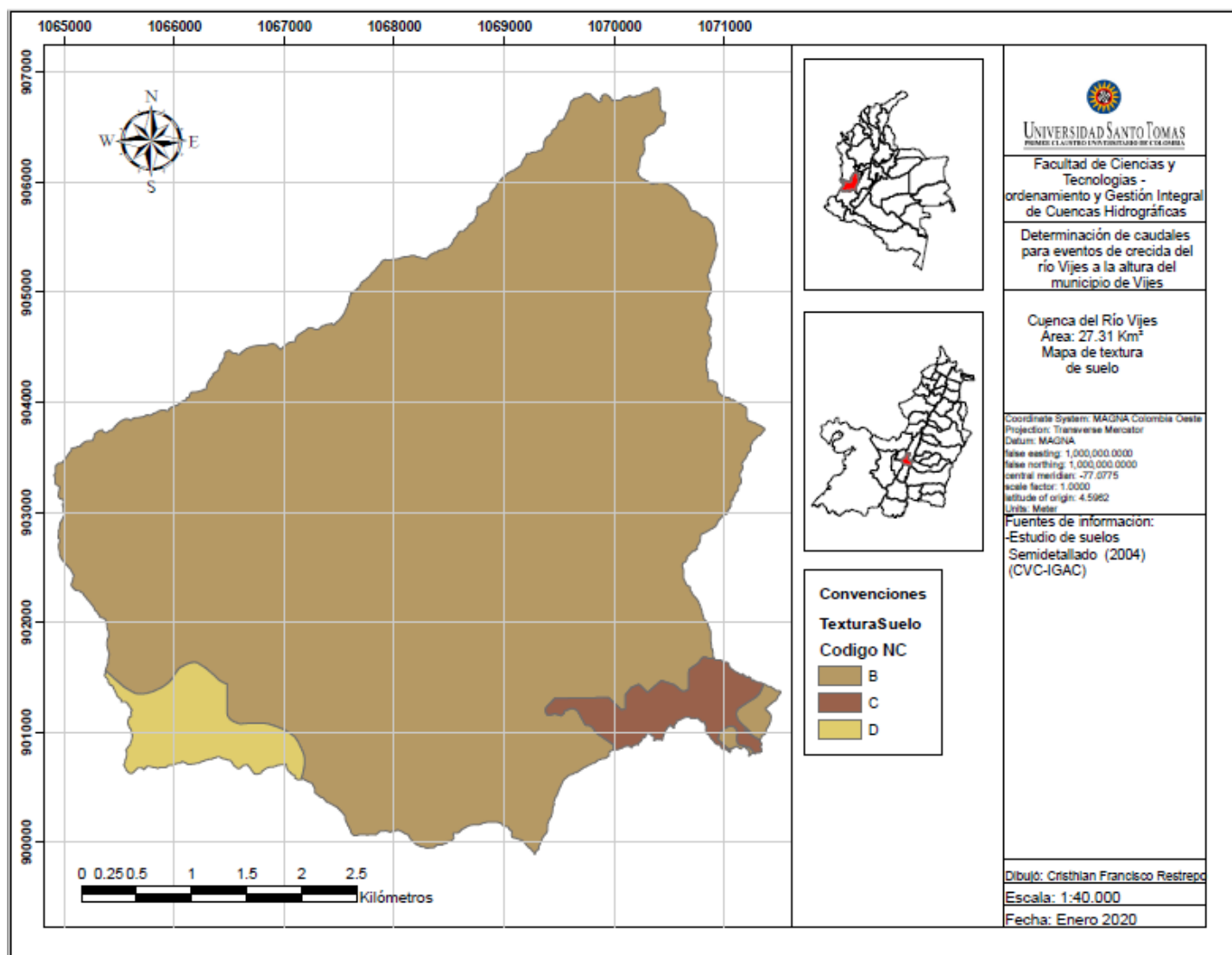
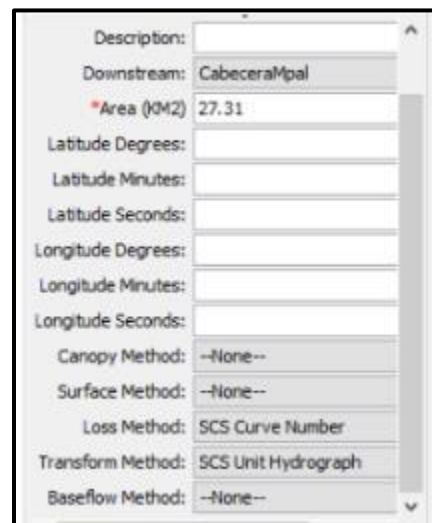


Figura 4. Mapa de textura de suelo

7.7. MODELACION LLUVIA ESCORRENTIA.

Una vez calculados los hietogramas para cada periodo de retorno, se procedió a iniciar el software HEC-HMS de acuerdo a los procedimientos descritos en el punto 7,4 de la metodología del presente trabajo. Como puntos claves de la presente modelación, se aplicó el SCS Curve Number como Método de Perdida y el SCS Unit Hydrograph como Método de Transformación, tal y como se muestra a continuación.



The image shows a screenshot of a software interface for setting up a hydrological model. The interface has a list of parameters on the left and their corresponding values or selection options on the right. The parameters and their values are:

Parameter	Value/Option
Description:	
Downstream:	CabeceraMpal
*Area (KM2)	27.31
Latitude Degrees:	
Latitude Minutes:	
Latitude Seconds:	
Longitude Degrees:	
Longitude Minutes:	
Longitude Seconds:	
Canopy Method:	--None--
Surface Method:	--None--
Loss Method:	SCS Curve Number
Transform Method:	SCS Unit Hydrograph
Baseflow Method:	--None--

Figura 5. Métodos del Modelo

Es importante indicar que para el Hidrograma Unitario no se realizó calibración debido que en el área de estudio no existe una estación hidrométrica sea limnimetrica o limnigrafica. Adicionalmente, para esta modelación no se tuvo en cuenta el flujo base, toda vez que se está abordando un evento máximo, y este caudal es prácticamente despreciable respecto a la avenida. Finalmente se precisa que la abstracción inicial se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Tiempo de rezago (Lag Time)} = \text{Tiempo de concentración } T_c \times 0,6.$$

A continuación se presenta la Estructuración Topológica de la Cuenca modelada:

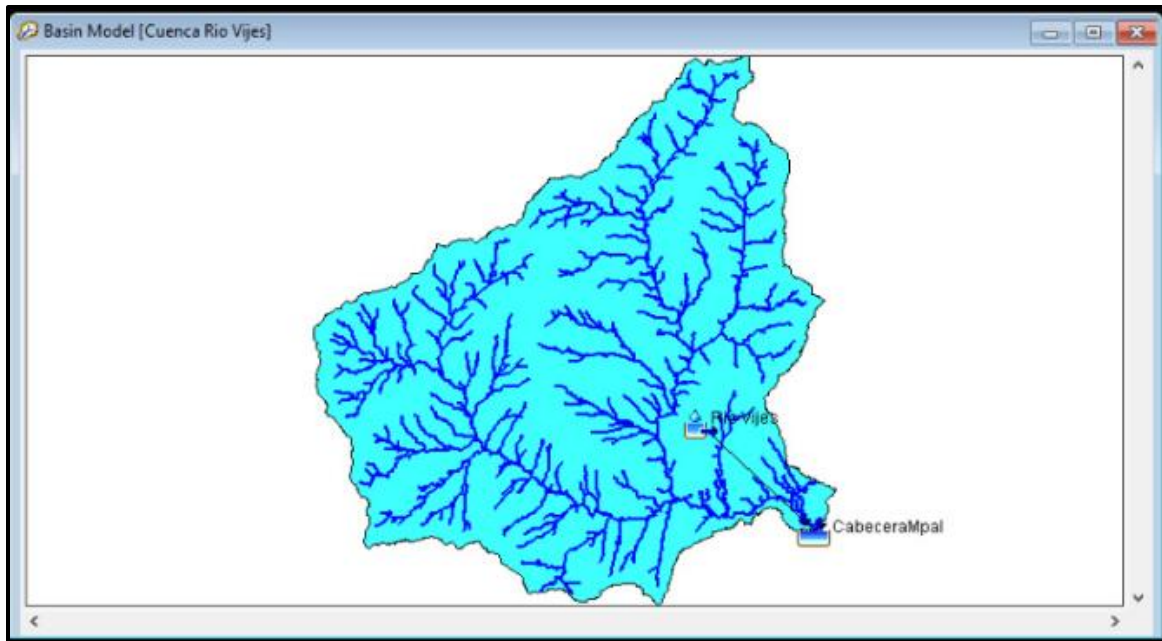


Figura 6. Esquema del Modelo

8. RESULTADOS

Una vez aplicado el procedimiento metodológico para realizar el cálculo de los caudales máximos de diseño para los distintos periodos de retorno se obtuvo la siguiente serie de resultados:

8.4. MORFOMETRIA.

8.4.1.1. Delimitación del Área de Estudio.

A continuación, se presenta el mapa de la zona de estudio con su respectiva área:

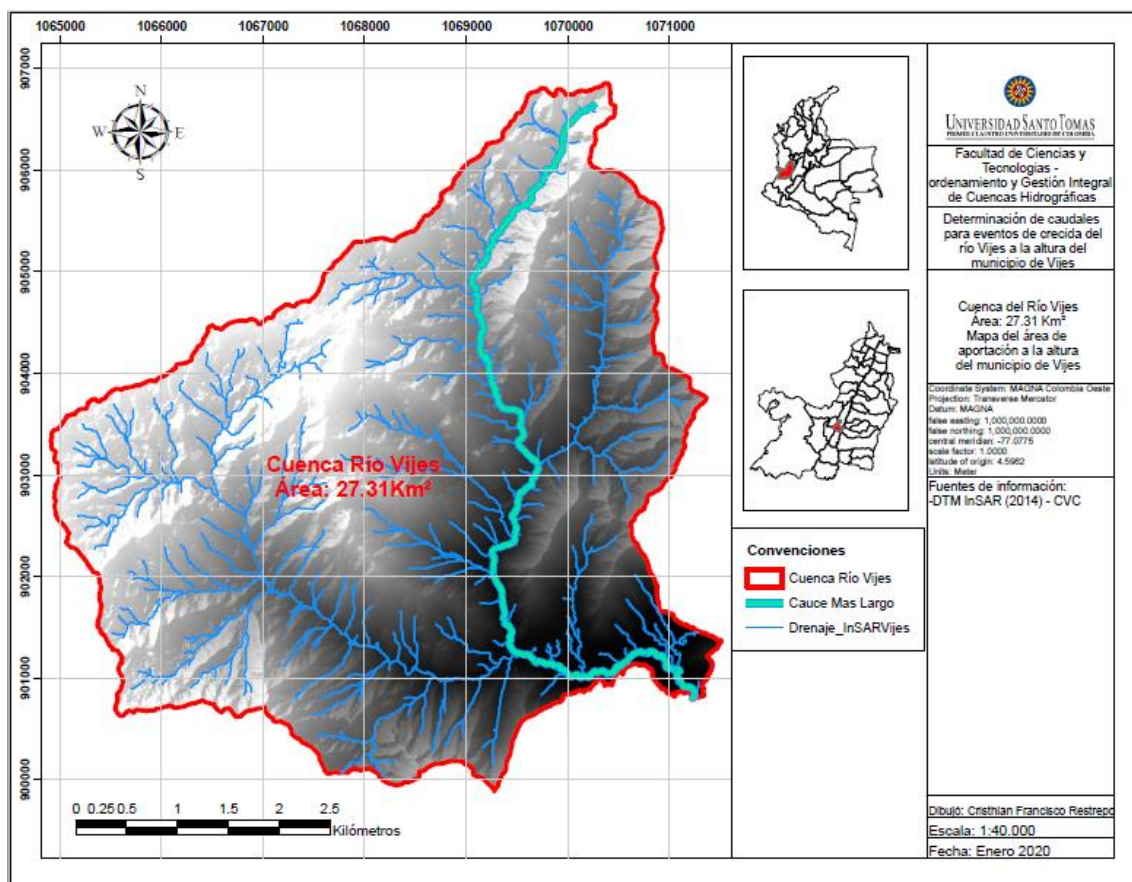


Figura 7. Área de Estudio

8.4.2. Parámetros Morfométricos Generales.

Tabla 15. Resultados Parámetros Morfométricos Generales

PARAMETROS MORFOMETRICOS GENERALES		
Parámetro	Símbolo	Valor
Perímetro (Km)	P	27,140
Área (Km ²)	A	27,311
Longitud máxima (Km)	LM	11,111
Longitud Cauce Principal (Km)	LCP	8,901
Ancho de la Cuenca	AC	2,458
Desnivel Altitudinal (m)	DA	1048,197

8.4.3. Parámetros Morfométricos asociados a la Forma de la Cuenca.

Tabla 16. Resultados Parámetros Morfométricos asociados a la Forma de la Cuenca

PARAMETROS MORFOMETRICOS ASOCIADOS A LA FORMA DE LA CUENCA			
Parámetro	Símbolo	Valor	Observaciones
Factor Forma	FF	0,729	Ensanchada
Coeficiente de Compacidad	Kc	1,454	Clase 2 - Oval Redonda a Oval Oblonga
Coeficiente de Circularidad	CC	0,466	Ensanchada

8.4.4. Parámetros Morfométricos asociados al Relieve.

Tabla 17. Resultados Parámetros Morfométricos asociados al Relieve

PARAMETROS MORFOMETRICOS ASOCIADOS AL RELIEVE		
Parámetro	Símbolo	Valor
Cota Máxima (msnm)	cmax	2001,04
Cota Mínima (msnm)	cmin	952,843
Altitud media(msnm)	Am	1479,477
Altitud más frecuente (msnm)	Af	1687
Altitud mayor del cauce	Amc	1756,108

Altitud menor del cauce	Amec	953,748
Pendiente promedio de la cuenca (%)	Smed	11,776

8.4.4.1. Histogramas de Frecuencias de Altitudes.

Tabla 18. Histogramas de Frecuencia de Altitudes

HISTOGRAMAS DE FRECUENCIAS DE ALTITUDES							
No.	Cota de Intervalo		Cota Media	Área Parcial	Área Acumulada Km2	%Área Total	% Altitudes
1	952	1022	987	1,373	27,308	100	5,03
2	1022	1092	1057	1,025	25,935	94,97	3,75
3	1092	1162	1127	1,329	24,91	91,22	4,87
4	1162	1232	1197	1,701	23,581	86,35	6,23
5	1232	1302	1267	2,223	21,88	80,12	8,14
6	1302	1372	1337	2,439	19,657	71,98	8,93
7	1372	1442	1407	1,964	17,218	63,05	7,19
8	1442	1512	1477	1,824	15,254	55,86	6,68
9	1512	1582	1547	2,171	13,43	49,18	7,95
10	1582	1652	1617	2,514	11,259	41,23	9,21
11	1652	1722	1687	2,92	8,745	32,02	10,69
12	1722	1792	1757	2,637	5,825	21,33	9,66
13	1792	1862	1827	1,805	3,188	11,67	6,61
14	1862	1932	1897	1,177	1,383	5,06	4,31
15	1932	2002	1967	0,206	0,206	0,75	0,75

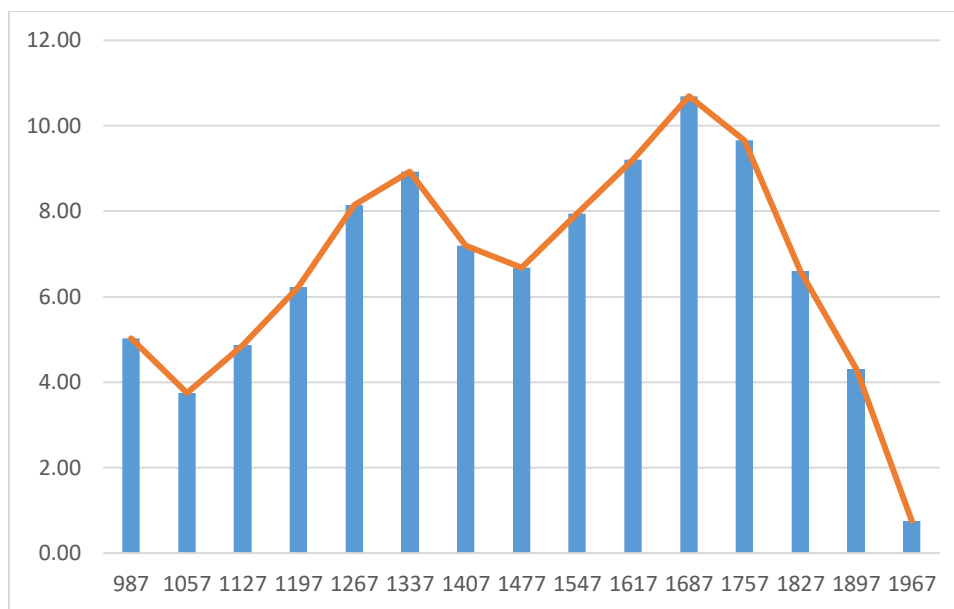


Figura 8. Histogramas de Altitudes

8.4.4.2. Curva Hipsométrica.

Tabla 19. Curva Hipsométrica

CURVA HIPSOMETRICA						
No.	Cota de Intervalo		Cota Media	Área Parcial	Área Acumulada Km2	%Área Total
1	952	1022	987	1,373	27,308	100
2	1022	1092	1057	1,025	25,935	94,97
3	1092	1162	1127	1,329	24,91	91,22
4	1162	1232	1197	1,701	23,581	86,35
5	1232	1302	1267	2,223	21,88	80,12
6	1302	1372	1337	2,439	19,657	71,98
7	1372	1442	1407	1,964	17,218	63,05
8	1442	1512	1477	1,824	15,254	55,86
9	1512	1582	1547	2,171	13,43	49,18
10	1582	1652	1617	2,514	11,259	41,23
11	1652	1722	1687	2,92	8,745	32,02
12	1722	1792	1757	2,637	5,825	21,33
13	1792	1862	1827	1,805	3,188	11,67
14	1862	1932	1897	1,177	1,383	5,06
15	1932	2002	1967	0,206	0,206	0,75

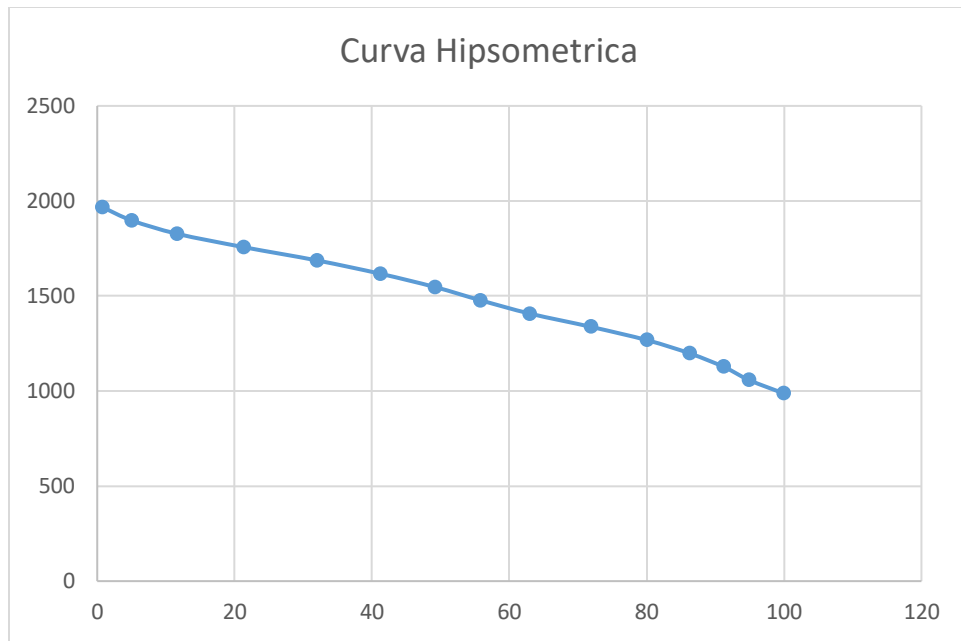


Figura 9. Curva Hipsométrica

8.4.5. Parámetros Morfométricos asociados a la Red de Drenaje.

Tabla 20. Resultados Parámetros Morfométricos asociados a las Red del Drenaje

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS ASOCIADOS A LA RED DE DRENAJES		
Parámetro	Símbolo	Valor
Orden de la Cuenca	Oc	5
Longitud Total de Drenajes (Km)	Lt	206.377
Densidad de Drenaje	D	7556,552
# Drenajes Orden 1		502
Coeficiente de Torrencialidad	Ct	18,381
Pendiente del Cauce (%)	Sc	9,014
Pendiente del Cauce (m/m)	Sc	0,090

8.4.5.1. Tiempo de concentración.

A partir de la información obtenida en este mapa se obtuvieron los datos requeridos para el cálculo de parámetros requeridos por el tiempo de concentración. Como se muestra a continuación:

Tabla 21. Datos para Calculo de TC.

DATOS MORFOMÉTRICOS			
A :	27.31	Área de drenaje, km ²	L : 10285.79 Longitud del cauce, m.
S :	0.071742666	Pendiente del cauce, m/m.	DH : 737.93 Diferencia de nivel, m.

A partir de estos datos se posibilitó aplicar las formulaciones empíricas desarrolladas para calcular el tiempo de concentración, las cuales fueron mencionadas en el capítulo de la metodología, el resultado obtenido a partir de estas ecuaciones se muestra a continuación:

Tabla 22. Resultados Tiempo de Concentración

ECUACIÓN	UNIDADES	Tc (minutos)	Tc (horas)
Kirpich $T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$	Tc : horas L : km S : m/m	65.99	1.10
California Culverts Practice $T_c = 60 \left(\frac{0.87075 \cdot L^3}{DH} \right)^{0.385}$	Tc : minutos L : m DH : m	66.06	1.10
Temez $T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$	Tc : horas L : km S : m/m	72.77	1.21
Valencia y Zuluaga (Uninacional Colombia) $T_c = 1.7694 A^{0.325} L^{-0.096} S^{-0.290}$	Tc : horas L : km A : km ² S : %	140.42	2.34
U.S. Bureau of Reclamation (California) $T_c = 0.066 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.5}} \right)$	Tc : horas L : km S : m/m	88.97	1.48
Pilgrim y McDermott $T_c = 0.76 \cdot A^{0.38}$	Tc : horas A : km ²	160.24	2.67
George Rivero $T_c = \left(\frac{16 \cdot L}{(1.05 - 0.6(0.7)) \cdot (100 \cdot S)^{0.04}} \right)$	Tc : minutos L : km S : m/m	241.43	4.02
Passini $T_c = \frac{0.108 \cdot (A \cdot L)^{1/3}}{S^{0.5}}$	Tc : horas L : km A : km ² S : m/m	158.44	2.64
Bransby - Williams $T_c = 14.6 \cdot L \cdot A^{-0.1} S^{-0.2}$	Tc : minutos L : km A : km ² S : %	182.73	3.05
Giandotti $T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3 \sqrt{S \cdot L}}$	Tc : horas A : km ² L : km S : m/m	100.30	1.67

Una vez obtenidos estos resultados se calcularon diferentes valores estadísticos, como el valor máximo, mínimo, promedio y el promedio excluyendo los valores anteriormente mencionados como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 23. Promedio tiempo de concentración

ESTADÍSTICOS	Tc (minutos)	Tc (horas)
Máximo	241.43	4.02
Mínimo	65.99	1.10
Promedio	127.74	2.13
Promedio sin valor máximo y mínimo	121.24	2.02

Finalmente se empleó el valor promedio excluyendo los valores máximos y mínimos ya que estos se sitúan alejados de la media; donde se observa que la ecuación que más se acerca al valor obtenido fue la desarrollada por Valencia y Zuluaga; quienes desarrollaron su estudio en cuencas Nacionales, concretamente en cuencas de montaña.

8.5. PRECIPITACIÓN DE DISEÑO.

Una vez seleccionadas las estaciones, se tomaron los respectivos registros de cada una y se sometieron a un análisis estadístico-probabilístico; mediante una hoja de cálculo programada en Excel, de igual forma, mediante los polígonos de Thiessen se determinó la influencia de estas estaciones sobre el área de cuenca con el objetivo de calcular la precipitación máxima ponderada de la cuenca, obteniendo el siguiente resultado:

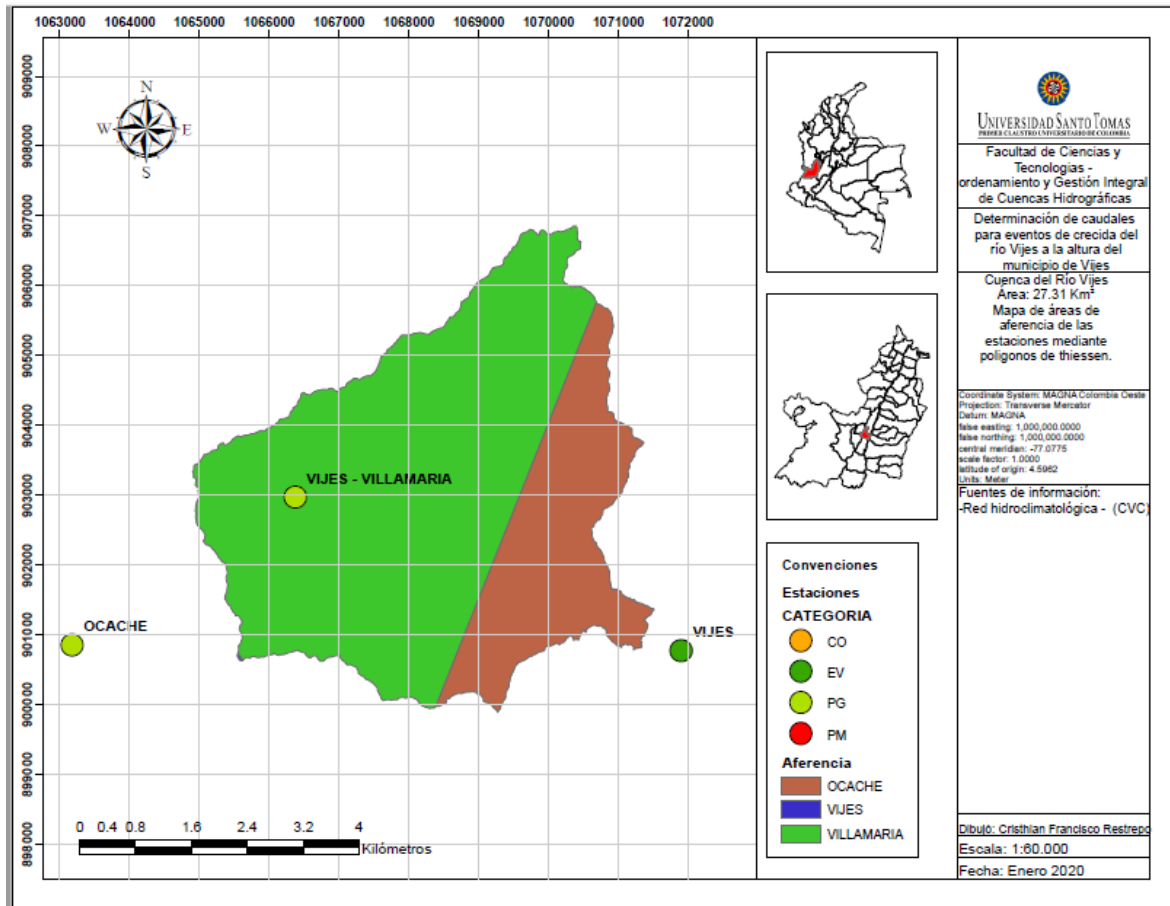


Figura 10. Influencia de las estaciones sobre el área de la cuenca

Tabla 24. Calculo de precipitación máxima ponderada

Río Vijos						
Área (Km2) =>	0.000000	0.000000	0.003832	6.907087	20.403411	27.314330
Período de retorno	Buenos Aires	Hda Las Glorias	Ocache	Vijos	Villamaría	Área Total
(Años)	Pmax (mm)	Pmax (mm)	Pmax (mm)	Pmax (mm)	Pmax (mm)	Pmax Ponderada (mm)
2.33	68.20	61.71	53.22	54.69	57.28	56.62
5.00	69.66	63.32	54.52	55.68	58.40	57.71
10.00	82.74	76.93	66.85	63.90	68.34	67.21
15.00	94.54	88.30	79.24	70.53	77.35	75.62
20.00	101.12	94.37	86.76	74.00	82.43	80.30
25.00	105.70	98.49	92.27	76.34	85.99	83.55
30.00	109.20	101.60	96.65	78.08	88.73	86.04
50.00	112.04	104.09	100.31	79.48	90.96	88.06
100.00	119.90	110.87	110.98	83.23	97.17	93.65
200.00	130.38	119.67	126.54	88.04	105.56	101.13
500.00	140.72	128.13	143.53	92.60	113.91	108.52

Una vez obtenidos estos valores de precipitación máxima ponderada, se llevó a cabo la metodología del Soil Conservation Service, donde fue necesaria la reclasificación de mapas tanto de cobertura del suelo, como el de textura del suelo, para adaptarlos al procedimiento empleado y lograr obtener el número de curva.

A continuación, se muestra el Ráster obtenido durante el procesamiento, el cual contiene la información del Número de Curva (NC) en el área que conforma la cuenca de aportación, mediante el cual fue posible obtener el valor promedio de este coeficiente para la cuenca:

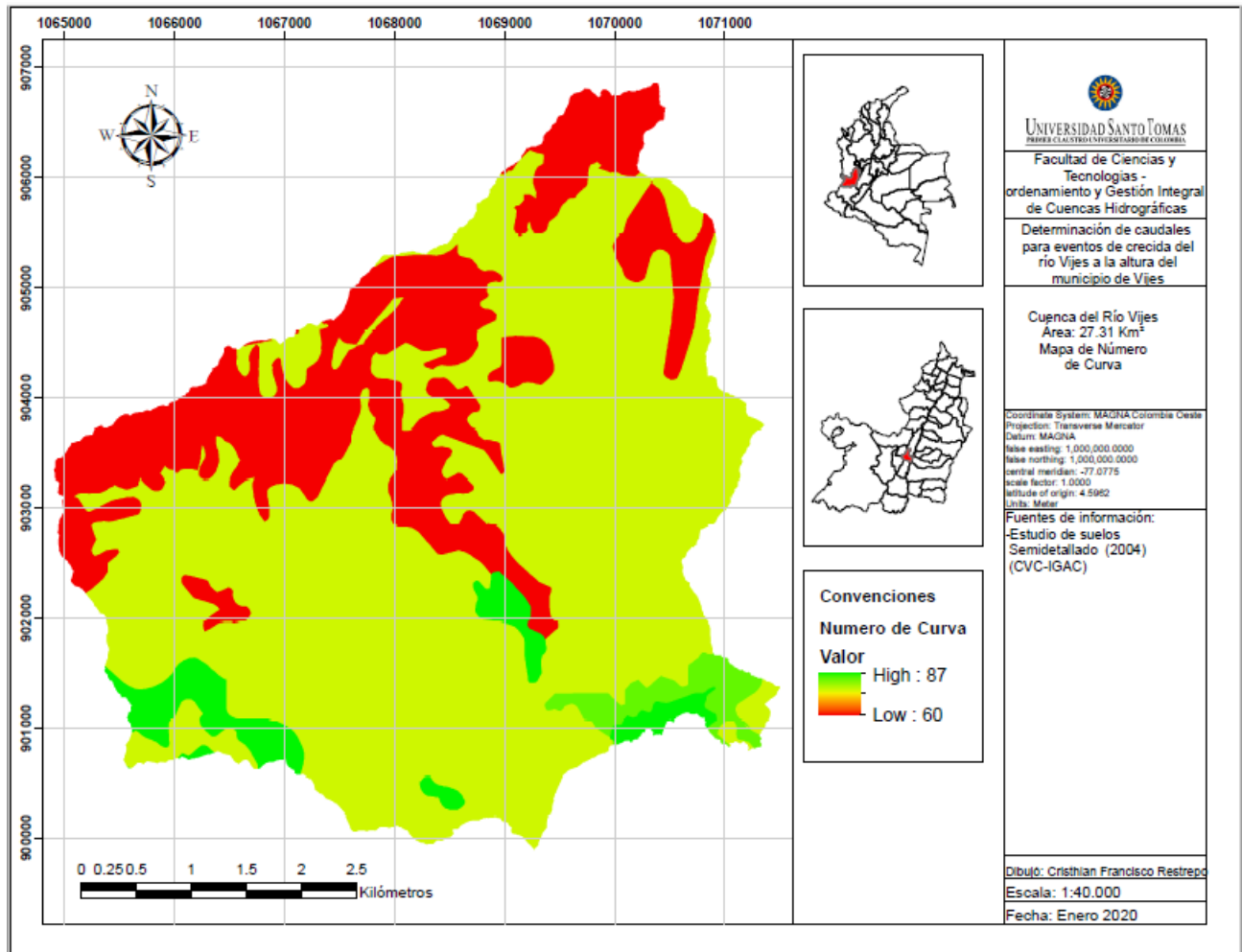


Figura 11. Número de Curva

Como se puede observar esta cuenca cuenta con un valor de CN que oscila entre 60 y 87, siendo 73 el valor promedio para el área de aportación.

8.6. HIETOGRAMAS DE DISEÑO.

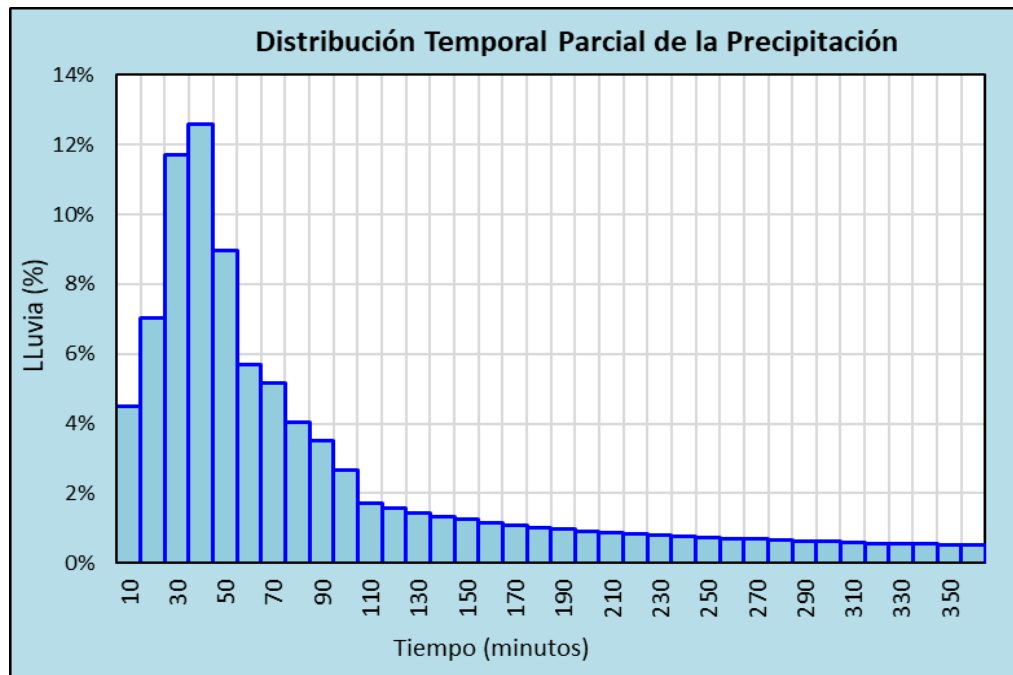


Figura 12. Distribución temporal parcial de la precipitación en la zona de estudio.

A continuación, se presentan los hietogramas de diseño asociados a diferentes períodos de retorno, los cuales se obtuvieron aplicando la distribución temporal de las lluvias estimadas para la región y las precipitaciones máximas de diseño para cuenca del río Víjes.

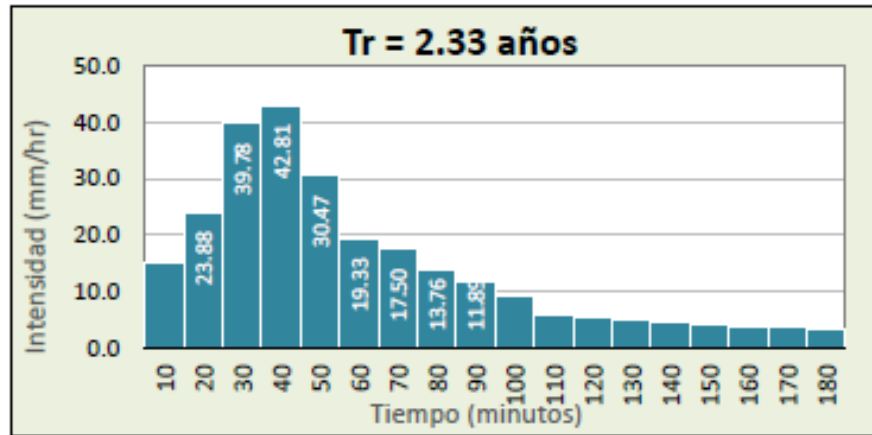


Figura 13. Hietograma Tr 2.33 años.

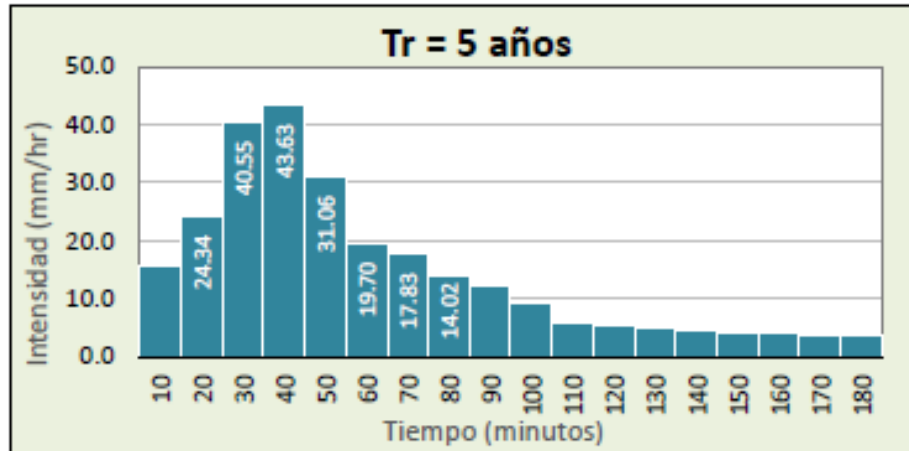


Figura 14. Hietograma Tr 5 años.

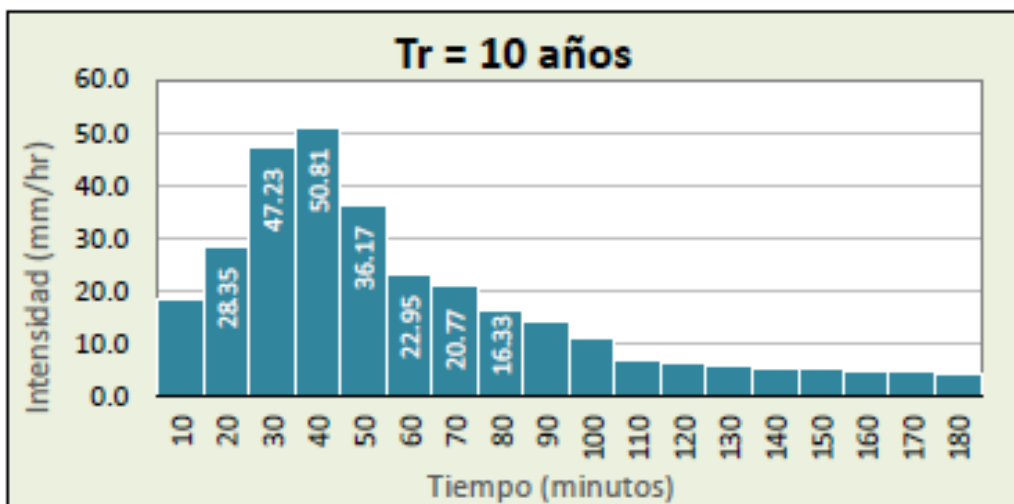


Figura 15. Hietograma Tr 10 años.

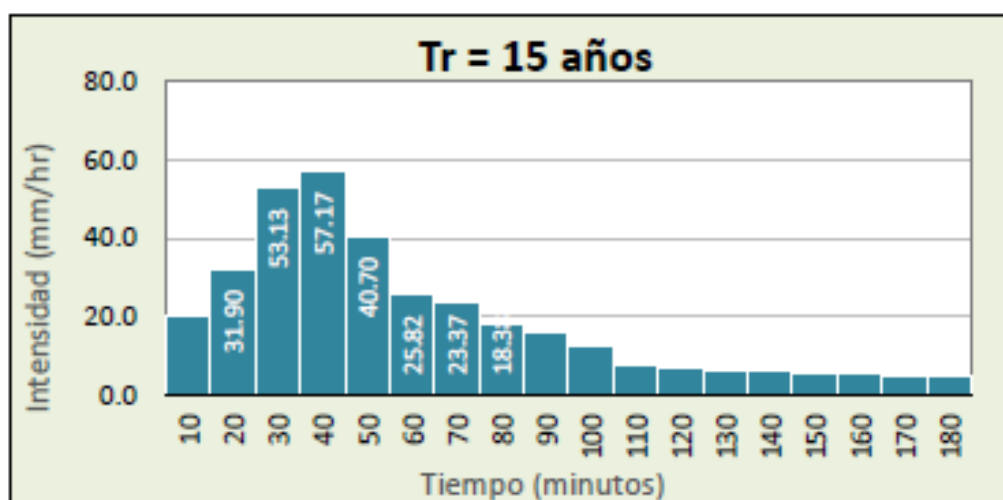


Figura 16. Hietograma Tr 15 años.

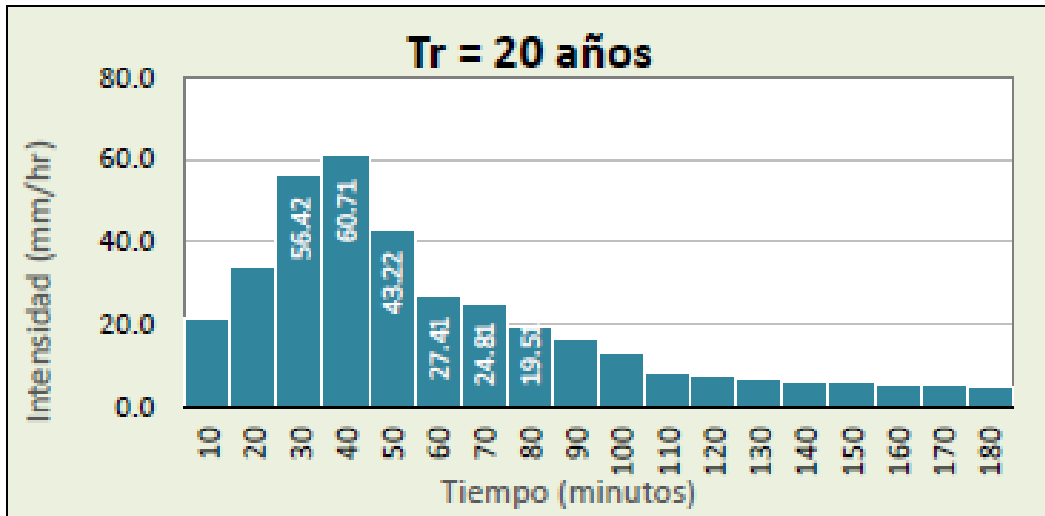


Figura 17. Hietograma Tr20 años.



Figura 18. Hietograma Tr25 años.

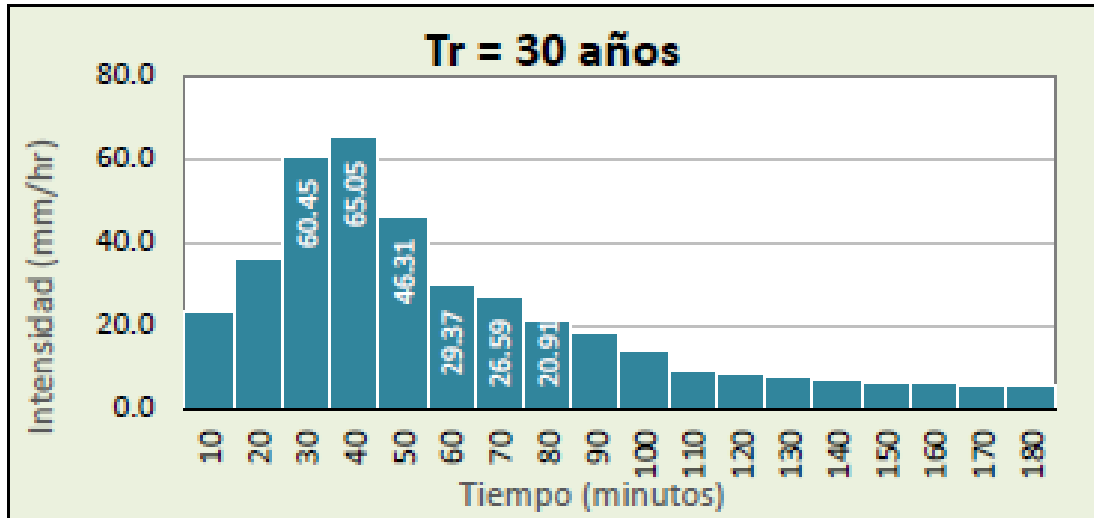


Figura 19. Hietograma Tr30 años.

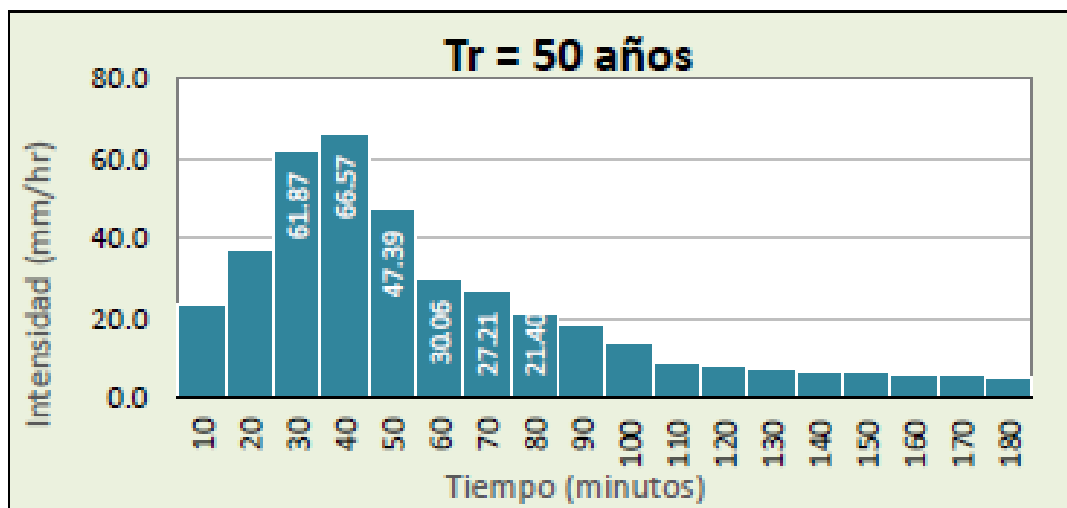


Figura 20. Hietograma Tr50 años.

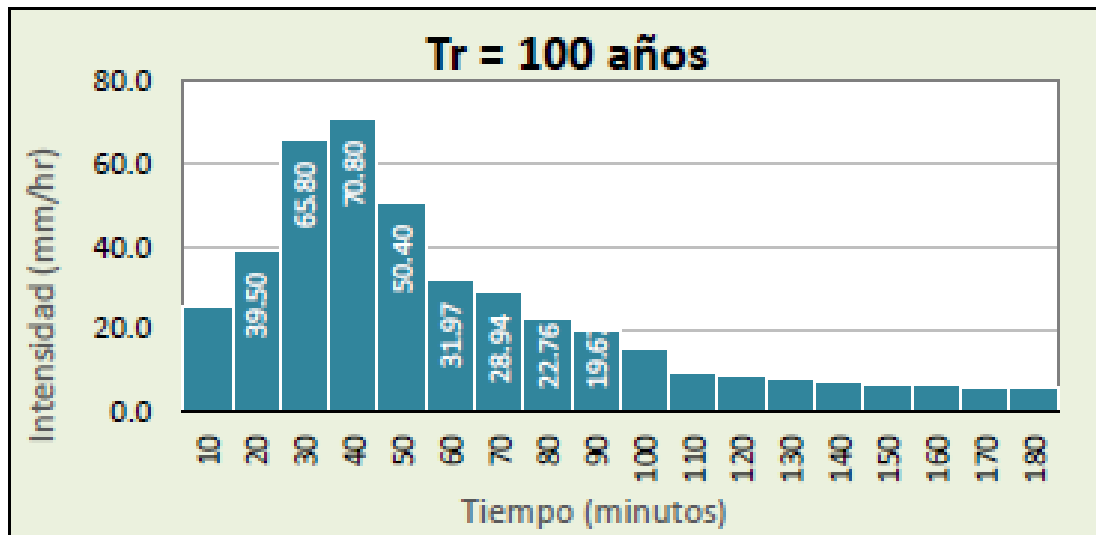


Figura 21. Hietograma Tr100 años.

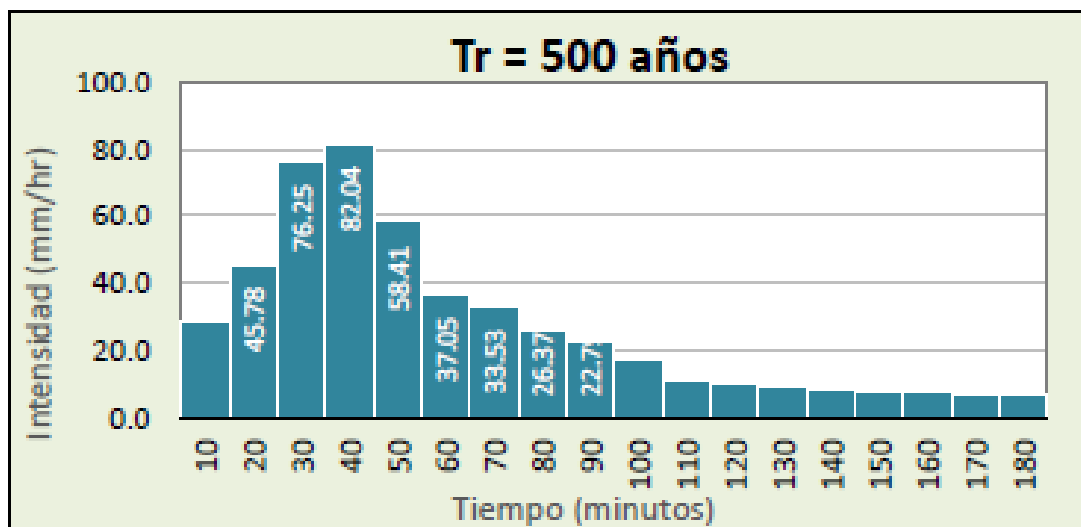


Figura 22. Hietograma Tr500 años.

8.7. MODELACION LLUVIA-ESCORRENTÍA

Después de simulado el modelo, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 25. Caudales Máximos de Diseño

Período de Retorno (Años)	2.33	5	10	15	20	25	30	50	100	200	500
Prec. Máxima 24 Horas (mm)	56.62	57.71	67.21	75.62	80.30	83.55	86.04	88.06	93.65	101.13	108.52
Factor Reducción Areal (%)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Prec. Máxima Diseño (mm)	56.62	57.71	67.21	75.62	80.30	83.55	86.04	88.06	93.65	101.13	108.52
Pérdidas e Infiltración (mm)	45.76	51.17	55.33	58.43	59.97	60.87	61.32	62.29	63.81	65.68	67.36
Prec. Efectiva o Excesos (mm)	10.86	17.03	23.26	28.94	32.15	34.13	35.18	37.52	41.43	46.71	51.99
Volumen Total (m³)	296,693	485,110	635,212	790,548	878,136	932,347	960,939	1,024,905	1,131,738	1,275,954	1,420,081
Caudal Máximo (m³/s)	14.59	25.14	36.41	46.97	53.18	57.05	59.10	63.70	71.44	81.97	92.58

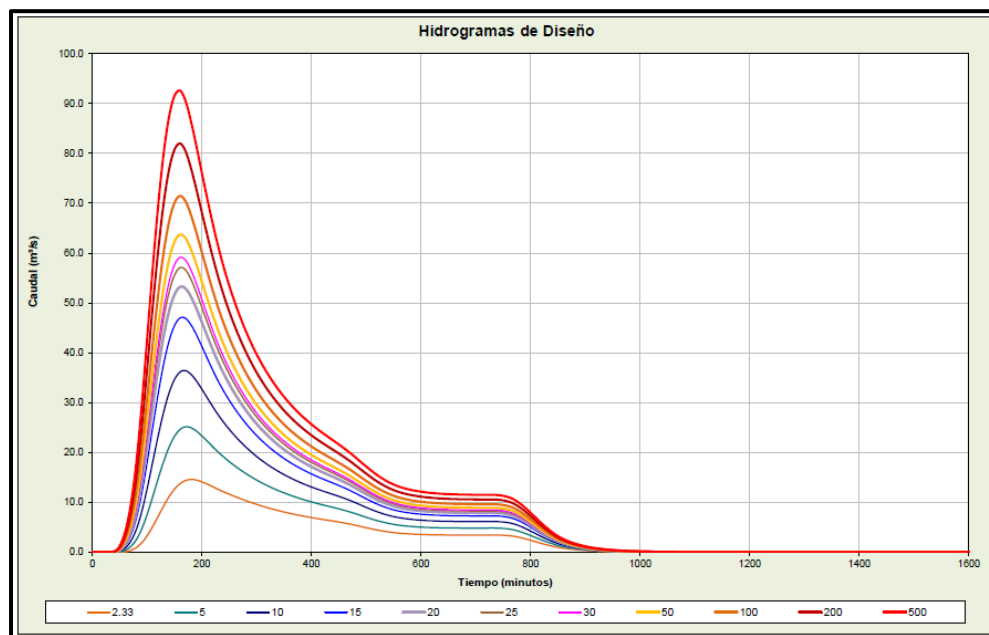


Figura 23. Hidrograma

9. ANALISIS DE RESULTADOS

Los análisis morfométricos son fundamentales para determinar el comportamiento hidrológico de una cuenca o área de estudio, teniendo en cuenta la caracterización morfométrica realizada en la cuenca del río Vijes, se determinó que corresponde a una cuenca ensanchada, sin embargo, dicho factor se pronuncia más en su parte media, lo que nos indica que en esa zona tiende a generar caudales pico. Lo anterior se puede ratificar analizando los resultados del Coeficiente de Compacidad el cual arroja 1,454, lo que indica que es una cuenca Clase 2 es decir, Oval Redonda a Oval Oblonga. De igual forma el Coeficiente de Circularidad arroja un resultado de 0,466. Este parámetro indica que valores cercanos a 0 corresponden a cuenca alargadas; teniendo en cuenta que el resultado del coeficiente está un poco más cercano a 1, se considera que la cuenca tiende más hacia lo ensanchado.

El relieve es un determinante sobre los resultados del hidrograma, debido que cuando una cuenca presenta mayores pendientes estas se relacionan directamente con la concentración de las aguas de la red de drenaje hacia el cauce principal. Por tanto, los Histogramas de Frecuencias de Altitudes indican cómo está distribuida altitudinalmente la cuenca, es decir, enseña que porcentaje de área corresponde a cada uno de los rangos. Para este caso, el rango altitudinal comprendido entre 1652 y 1722 tiene el 10,69% del área de la cuenca, es decir, es la altitud con mayor frecuencia (A_f). De igual forma, los resultados del histograma indican que en la cuenca predominan los rangos altitudinales medios y bajos, por tanto, la parte alta de la cuenca no tiene mayor representatividad con relación a las partes más bajas de la cuenca.

Por otro lado, la Curva Hipsométrica establece la distribución de áreas por rangos altitudinales, y dependiendo de su comportamiento, permite conocer la edad del cauce principal o de la cuenca. Así las cosas, y en relación con el histograma diseñado, los porcentajes de área tienen mayor

concentración en la parte media y baja de la cuenca, por tanto, se establece que el cauce principal es un río maduro. Finalmente se indica que la cuenca presenta una pendiente del 11,7%, que de acuerdo con Ortiz (2004), la cuenca es medianamente accidentado.

En cuanto a la red de drenaje, la cuenca es de orden No. 5, la longitud total de los drenajes es de 206.377 km. De acuerdo a lo anterior se considera que el área de estudio es una cuenca Bien Drenada, teniendo en cuenta el orden de la cuenca y su densidad de drenajes la cual arroja un resultado de 7556,552, lo anterior indica que el área de estudio es menos propensa a eventos torrenciales, desbordamientos e inundaciones ya que cuenta con buena bifurcación de drenaje para la evacuación de excesos hídricos en determinadas épocas.

Una gota desde la parte alta la cuenca hasta la salida de la misma tarda un promedio de 2,14 horas y mínimo de 1,10 horas, por tanto, es muy probable que las crecientes de caudales sean rápidas, generando afectación en la parte baja de la cuenca donde se encuentra ubicada la cabecera municipal.

De acuerdo a la figura 7 las lluvias en la zona en estudio en promedio tienen una duración de 720 minutos o 12 horas. Así mismo, se observa que, la precipitación máxima “caída” en 360 minutos o 6 horas de duración es del orden del 89% de la lluvia máxima total diaria. Los datos de lluvia más representativos en la modelación realizada se presentaron en las áreas de influencia de las estaciones de Villamaria y Ocache, lo cual debe tenerse en cuenta para el desarrollo de futuros estudios.

Si bien es cierto que con los resultados de la modelación hidrológica no es suficiente para poder realizar análisis de riesgo, amenaza y vulnerabilidad, toda vez que se deben realizar modelos de tipo hidráulico que permitan determinar las áreas de inundación. Si se puede realizar un ejercicio comparativo entre los caudales resultados de la modelación hidrológica VS el caudal base del Río

Vijes. Por tanto, se realizó una búsqueda bibliográfica para encontrar cuál es el caudal base del Rio Vijes; como resultado se obtuvo el *Informe Final de Caudales Específicos para las Cuencas en el Departamento del Valle del Cauca* elaborado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, por medio del cual indica que el Rio Vijes presenta en el mes de agosto el caudal medio multianual más bajo el cual es $0,145 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en mayo presente una caudal de $0,257 \text{ m}^3/\text{s}$. Es importante indicar que en dicho informe manifiestan que los caudales fueron calculados mediante la metodología de transposición de caudales, y la toma registros de la estación limnigrafica Pasoancho sobre el Río Yumbo. Lo anterior no tiene ningún sentido teniendo en cuenta que la cuenca del Rio Yumbo y la del Rio Vijes tienen características ambientales, hidrológicas y topográficas totalmente diferentes.

Analizando los resultados de la presente modelación con los del informe realizado por la CVC, se encuentra que dicha comparación no tiene ninguna validez, toda vez que a partir del periodo de retorno 2,33 aumenta más del 100 % del caudal base establecido por la autoridad ambiental.

10. CONCLUSIONES.

La morfometría de cuenca es un ejercicio que se debe actualizar constantemente y articular con visitas a campo, ya que la dinámica de las cuencas cambian a grandes velocidades debido a la expansión y presión antrópica, por ejemplo, la impermeabilización de las cuencas es un factor determinante para que los cálculos realizados anteriormente no tengan validez alguna, debido a que con un cambio en los aspectos biofísicos del territorio, las corrientes hídricas tendrían un comportamiento totalmente diferente sin perjuicio de los resultados obtenidos por el método de morfometría de cuenca.

Los datos teóricos estimados corresponden a una probabilidad de ocurrencia en el tiempo, sin embargo para estimar la cercanía a los datos reales es importante que se realicen aforos en épocas de estiaje y posiblemente de lluvias para la correcta convalidación; adicionalmente es importante que a corto y mediano plazo las entidades territoriales (municipio y departamento) y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, aúnen los respectivos esfuerzos para la construcción de una estación limnigráfica sobre el cauce principal del río Vijes, por medio del cual se controle y realice seguimiento del comportamiento del río y los caudales de entrada al municipio.

Si no se cuenta con los medios para realizar una Modelación Hidráulica, se puede estimar el riesgo y la amenaza mediante la determinación de la fecha y caudal del último evento de inundación del Río Vijes, el cual fue en el 2007, y así realizar un análisis comparativo con los caudales máximos del hidrograma.

Es importante indicar que la determinación de los caudales no solamente se enfoca en los análisis para la gestión del riesgo, pues también su determinación es funcional para estimar oferta y analizar demandas hídricas para los diferentes usos definidos por la ley. De igual forma, es un insumo

importante para cuantificar los caudales presentes en época de estiaje y así implementar acciones y tomar decisiones frente al abastecimiento. Así mismo, ayuda en el proceso del Ordenamiento Territorial, debido que es un complemento para definir los asentamientos urbanos, rurales, construcción de equipamientos e infraestructura y el establecimiento de los usos del suelo.

11. RECOMENDACIONES.

Para que las dinámicas socioeconómicas del municipio de Vijes no se vean afectadas por las pérdidas ocasionadas por los desastres, es importante que ponga en marcha la formulación e incorporación de políticas y prácticas que promuevan la correcta ocupación del territorio.

Adicionalmente se debe fortalecer el componente de Gestión del Riesgo como una Política de Estado que tenga como principios fundamentales las buenas prácticas para la gestión del riesgo y la reducción de riesgo por amenazas e impactos de los desastres. Es importante direccionar todas las políticas a la prevención y gestión y que dichas políticas de Estado se complementen con guías metodológicas que enseñen cómo implementar lo planteado en los documentos.

El gobierno nacional debe fortalecer la Política Nacional de Gestión de Desastres en el sentido de atribuir responsabilidades más concretas y aterrizadas frente a la Gestión del Riesgo, y que las Corporaciones Autónomas Regionales pasen de ser un actor de apoyo técnico de los municipios a ser responsables directos frente a la Gestión del Riesgo.

Los Planes de Ordenamiento de Cuencas Hidrográficas (POMCA) deben evaluar y analizar el riesgo más allá de lo que establece la Ley 1523 de 2012, es decir, ser un verdadero instrumento de planificación ambiental analizando los riesgos asociados al medio ambiente (coberturas vegetales, Ciclos Hidrológico, Servicios Ecosistémicos), análisis que se complementaran con los realizados por los demás instrumentos de planificación ambiental y territorial.

El alcance del presente trabajo de grado se observa en el insumo que el mismo representa para la realización de análisis de la Gestión del Riesgo en el municipio de Vijes, ya que con los caudales de diseño y la topografía del terreno es posible obtener la información correspondiente a las manchas de inundación, así como el grado de afectación debido a eventos asociados a las crecientes

del río Vijes. La función de dichos caudales es determinar el caudal circundante por el cauce en diferentes periodos de retorno para el río Vijes; la información complementaria para posibilitar la previsión de dicho evento es:

- Elaboración de un levantamiento topo-batimétrico en el área de influencia del canal aproximadamente 50 metros a cada margen del río.
- Elaboración del Modelo de Elevación Digital acoplando la información recopilada en la topo-batimetría con el levantamiento InSAR de la CVC para proyectar la mancha de inundación sobre el terreno.
- Exportación a un Sistema de Información Geográfico para establecer parámetros de entrada para el modelo como el trazado de las bancas, los diques (en caso de existir), estructuras hidráulicas y el alineamiento del cauce y de esta manera obtener las secciones de exportación a HEC-RAS
- Importar la información editada en SIG al modelo hidrodinámico HEC-RAS e introduciendo los datos de entrada como el coeficiente de Manning y el caudal de entrada, es posible obtener la altura del espejo del agua y la mancha de inundación y así mismo el perfil hidráulico del cauce.

12. REFERENCIAS.

Bateman, A. (2007). *Hidrología básica y aplicada*. Barcelona, España.

CHOW, V. T. (1995). *Hidrología Aplicada* (Mc Graw Hill, Ed.). México.

Congreso de la República de Colombia (1997). *Ley 388 del 18 de julio de 1997 Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D.C.: Congreso de la República de Colombia.

CVC & FUNAGUA. (2010). *Informe Final Convenio 256 de 2010*.

Fernández, B. & Salas, J. (1995). *Período de retorno de eventos hidrológicos*. Anales del Instituto de Ingenieros de Chile. Santiago de Chile, Chile.

García, A. (2013). *Análisis de distribuciones estadísticas alternativas a las tradicionales para la optimización de los caudales de cálculo empleados en los estudios hidrológicos*. Universidad de Extremadura.

Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas* –

POMCAS.

ONU. (2002). *Gestión del Agua a Nivel de Cuencas: Teoría y Práctica*. Recuperado de

<https://www.cepal.org/es/publicaciones/6407-gestion-agua-nivel-cuencas-teoria-practica>

Reyes, A. Ulises, F. & Carvajal, Y. (2010). *Guía Básica para la Caracterización Morfométrica de cuencas hidrográficas*. Santiago de Cali: Programa editorial Universidad del Valle.