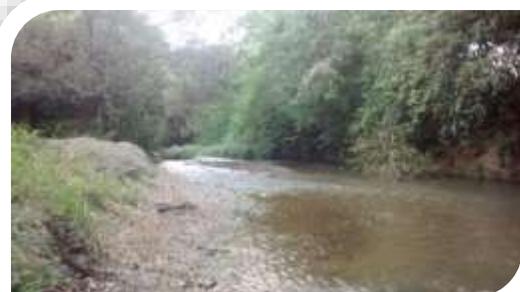


**CONVENIO INTERADMINISTRATIVO N° 0205 DE 2017  
CVC – UNIVALLE  
MUNICIPIOS DE BOLÍVAR, ROLDANILLO Y VERSALLES**



Zonificación de amenazas por inundación de la zona urbana del Municipio de Bolívar

INFORME FINAL



Santiago de Cali, Octubre de 2018



CONVENIO INTERADMINISTRATIVO N°0205  
CVC – UNIVALLE  
MUNICIPIOS DE BOLIVAR, ROLDANILLO Y VERSALLES





## **PRESENTACION**

Para la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, es una gran satisfacción aportar a los municipios de Bolívar, Roldanillo y Versalles, la evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y escenarios de afectación o daño en el componente urbano municipal, en cumplimiento de la función dada por la Ley 1523 de 2012 sobre el apoyo a los municipios en el conocimiento del riesgo.

Conocedores de la importancia y responsabilidad que reviste abordar el tema del conocimiento de las amenazas y los riesgos, la CVC llevó a cabo una alianza con el Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente, OSSO, adscrito a la Universidad del Valle, con el fin de obtener los mejores resultados en estas evaluaciones. De igual forma, es necesario reconocer el aporte, contribución y compromiso de las administraciones municipales y sus propios habitantes, a lo largo de la ejecución de este estudio. Otro objetivo es fortalecer el conocimiento que tenemos de nuestro entorno para tener certeza y articular una adecuada planificación y ocupación de nuestros territorios.

Los estudios entregados son parte fundamental de la información que se requiere para que cada municipio formule su Ordenamiento Territorial de segunda generación y son evaluaciones que dan soporte para la reducción y la elaboración de planes de emergencia y contingencia.

La presente evaluación de las amenazas y riesgos deben estructuralmente permitirle al municipio reglamentar el uso del suelo en el componente urbano, de tal manera que, como lo define la política de gestión del riesgo y en esencia la constitución colombiana, se logre avanzar hacia un desarrollo sostenible, que ofrezca seguridad para la vida de los habitantes, sus bienes y medios de subsistencia, así como a toda la infraestructura del municipio.

Finalmente, la CVC con estas evaluaciones, a través de la Universidad, espera contribuir en la formación y fortalecimiento de la capacidad profesional de la región en este tipo de estudios.

**Rubén Darío Materón Muñoz**  
Director General  
CVC



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimiento a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y la Dirección Ambiental Regional DAR-BRUT, a la Secretaria de Planeación de la Administración Municipal por la información suministrada. De igual manera se agradece a cada una de las entidades que de una u otra manera puso a disposición la información necesaria para adelantar la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa de la zona urbana del municipio de Bolívar, en el marco del Convenio Interadministrativo N°0205 de 2017 entre la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC y La Universidad de Valle, el cual tiene como objeto “Aunar Esfuerzos Técnicos y Recursos Económicos para la Elaboración de los Estudios de Zonificación de Amenaza y Vulnerabilidad y Escenarios de Afectación para las Áreas Urbanas de los Municipios de Bolívar, Versalles y Roldanillo en el Valle del Cauca”.



## **CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA – CVC**

### **DIRECTIVOS**

**RUBÉN DARÍO MATERÓN MUÑOZ**

Director General

**MARÍA CRISTINA VALENCIA RODRÍGUEZ**

Secretaria General (C)

**HÉCTOR FABIO ARISTIZABAL RODRIGUEZ**

Director Técnico Ambiental (C)

**PAULA ANDREA SOTO QUINTERO**

Directora Territorial – Dirección Ambiental Regional BRUT

### **SUPERVISIÓN**

**Yuncely Gimena Bastidas B**

Ingeniería Civil  
Especialista en Diseño Estructural  
Líder del proyecto 5001

**Arelix Andrea Ordoñez Franco**

Ingeniería Ambiental  
Supervisora del Convenio Interadministrativo N° 0205 de 2017 CVC-Univalle

### **EQUIPO TÉCNICO**

**Omar Alberto Chaves M**

Ingeniero Civil

**Alejandra María Gómez**

Ingeniera Civil  
Doctora (Ph. D.) en Geotecnia

**María Victoria Cross Garcés**

Ingeniera Agrónoma  
Especialización en Educación Ambiental



## UNIVERSIDAD DEL VALLE

### DIRECTIVOS

#### **EDAGAR VARELA BARRIOS**

Rector

#### **LILIANA ARIAS CASTILLO**

Vicerrectora Académica

#### **CLAUDIA SANTAMARÍA GAITÁN**

Vicerrector de Bienestar Universitario

#### **ANTONIO JOSÉ ECHEVERRY PÉREZ**

Secretario General

#### **INÉS MARÍA ULLOA VILLEGAS**

Vicerrectora Administrativa

#### **JAIME RICARDO CANTERA KINTZ**

Vicerrector de Investigación

#### **GLADYS STELLA LÓPEZ JIMÉNEZ**

Decana - Facultad de Humanidades

### EQUIPO TÉCNICO

#### **ELKIN DE JESÚS SALCEDO HURTADO**

Director - Observatorio Sismológico y Geofísico del Sur Occidente Colombiano - OSSO

Doctor (Ph. D.) en Física-Matemáticas

#### **GRUPO DE HIDRÁULICA**

##### **Carlos Ramírez Callejas**

Ing. Civil

##### **Andrés Fabián Barrios Hurtado**

Ing. Agrícola

##### **Fabián Ulises Barroso**

Ing. Agrícola

#### **GRUPO DE CARTOGRAFÍA Y SIG**

##### **Jhon Jairo Barona**

Doctor en Ing Geográfica

Coordinador

##### **Danny Alexander Cocuñame Ricardo**

Geógrafo

##### **Vanessa García Cardona**

Ing. Topográfica

##### **María Camila Pomeo**

Est. Ingeniería Topográfica

##### **Carlos Mauricio Mosquera Pérez**

Est. Ingeniería Topográfica

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	13
1. ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR.....	15
1.2. CAUCES EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	15
1.3. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	15
2. RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES DE CAMPO .....	17
2.1. LEVANTAMIENTOS TOPOBATIMÉTRICOS.....	17
2.1.1. RÍO PESCADOR .....	18
2.1.1.1. ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS LOCALIZADAS EN EL RIO PESCADOR TRAMO DE ESTUDIO.....	18
2.1.2. ZANJÓN GUABINERO .....	19
2.1.2.1. ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS LOCALIZADAS EN EL ZANJÓN GUABINERO .....	19
2.1.3.1. ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS LOCALIZADAS EN EL ZANJÓN EL RINCÓN.....	20
3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA .....	23
3.1.9.1. ANÁLISIS TEMPORAL DE LAS PRECIPITACIONES .....	30
3.1.9.2. PRECIPITACIONES MÁXIMAS DIARIAS .....	34
3.1.9.3. PRECIPITACIONES MÁXIMAS ASOCIADAS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO .....	38
3.1.9.4. CURVAS DE INTENSIDAD FRECUENCIA Y DURACIÓN IFD Y TORMENTA DE DISEÑO.....	40
4. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA .....	44
4.1. GENERALIDADES DEL MODELO HIDROLÓGICO IMPLEMENTADO PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO EN LOS ZANJONES GUABINERO Y EL RINCÓN.....	44
4.2. ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO EN EL ZANJÓN GUABINERO.....	46
4.2.3.1. MODELO DE PÉRDIDAS (SCS NÚMERO DE CURVA) .....	48
4.3. ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO EN EL ZANJÓN EL RINCÓN .....	56
5. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA .....	61
5.1. PENDIENTE PROMEDIA DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE BOLIVAR.....	61
5.3. RUGOSIDAD DE LAS LLANURAS DE INUNDACIÓN DEL MUNICIPIO DE BOLIVAR .....	63
6. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE NIVELES DE AMENAZA POR INUNDACIONES .....	64
6.1. ESTADO DEL ARTE .....	64
6.2. METODOLOGÍA ADOPTADA EN EL PRESENTE ESTUDIO .....	74
6.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA. GENERALIDADES DEL MODELO HIDRAULICO HEC RAS .....	77
6.3.1.1. CÁLCULO DE PERFILES DE AGUA SUPERFICIAL.....	78
6.3.1.2. COEFICIENTE DE MANNING PARA EL CANAL PRINCIPAL.....	78
6.3.1.3. EVALUACIÓN DE LA CABEZA PRINCIPAL DE ENERGÍA CINÉTICA .....	79
6.3.1.4. EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR FRICCIÓN.....	79
6.3.1.5. EVALUACIÓN DE CONTRACCIONES Y EXPANSIONES.....	80
6.3.1.6. LIMITACIONES DEL PROGRAMA .....	80
6.3.2.1. CAUDALES DE MODELACIÓN.....	81
6.3.2.2. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD.....	81

6.3.2.3.	SECCIONES TRANSVERSALES.....	81
7.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA.....	<b>81</b>
7.1.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDRAULICO HEC RAS.....	82
7.1.1.1.	DESCRIPCIÓN DE LA MALLA COMPUTACIONAL .....	82
7.1.1.2.	RUGOSIDAD DE LAS LLANURAS .....	83
7.1.1.3.	ESQUEMATIZACIÓN DE LOS RÍOS Y CANALES .....	84
7.1.1.4.	CONDICIONES DE FRONTERA .....	84
7.1.1.5.	CONDICIONES INICIALES.....	85
7.1.1.6.	SIMULACIÓN.....	85
7.1.2.	CALIBRACIÓN.....	85
7.1.2.1.	PARÁMETROS SUSCEPTIBLES DE AJUSTE EN EL MODELO MATEMÁTICO.....	86
7.1.2.2.	VERIFICACIÓN DEL MODELO.....	86
7.1.3.1.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO DE LA ZONA DE ESTUDIO DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR .....	87
7.2.	RESULTADOS .....	89
7.2.3.1.	MEDIDAS ESTRUCTURALES.....	91
7.2.3.2.	MEDIDAS NO ESTRUCTURALES .....	92
7.3.	MAPAS DE AMENAZA POR INUNDACIONES.....	92
7.4.	GENERACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE AMENAZA GLOBAL POR INUNDACIONES.....	95
7.4.1.	INTEGRACIÓN DE LOS MAPAS DE AMENAZA GLOBAL POR INUNDACIONES.....	96
	CONCLUSIONES .....	<b>98</b>
	RECOMENDACIONES .....	<b>101</b>
	REFERENCIAS .....	<b>103</b>

## LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1. LOCALIZACIÓN DE PUENTES SOBRE EL RÍO PESCADOR .....	18
TABLA 2.2. LOCALIZACIÓN DE PUENTES SOBRE EL ZANJÓN GUABINERO .....	19
TABLA 2.3. LOCALIZACIÓN DE PUENTES SOBRE EL ZANJÓN EL RINCÓN .....	21
TABLA 3.1. ESTACIONES METEOROLÓGICAS SELECCIONADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	24
TABLA 3.2. RESUMEN DE PROMEDIOS MENSUALES MULTIANUALES DE DIFERENTES VARIABLES CLIMÁTICAS REGISTRADAS EN LA ESTACIÓN TIERRABLANCA .....	24
TABLA 3.3. RESUMEN DE PROMEDIOS MENSUALES MULTIANUALES DE PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL DE LAS ESTACIONES SELECCIONADAS. ....	30
TABLA 3.4. PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MUNICIPIO DE BOLÍVAR .....	32
TABLA 3.5. PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA 24 HORAS, 48 HORAS Y 72 HORAS CON INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES LOCALIZADAS EN INMEDIACIONES DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR.....	34
TABLA 3.6. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS (MM) PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO. ESTACIÓN BOLÍVAR.....	38
TABLA 3.7. PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO. ESTACIÓN BETANIA .....	39
TABLA 3.8. PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS (MM) PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO. ESTACIÓN EL RETIRO .....	39
TABLA 3.9. VALORES DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS CON INTERVALOS DE TIEMPO DE 10 MINUTOS, CONSTRUIDAS A PARTIR DE LAS CURVAS IFD. ESTACIÓN CENTRO ADMINISTRATIVO LA UNIÓN.....	43
TABLA 4.5. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LAS UNIDADES HIDROLÓGICAS EN QUE SE DIVIDIÓ EL ZANJÓN GUABINERO .....	48
TABLA 4.6. COBERTURA ACTUAL DEL SUELO EN LA UNIDAD HIDROLÓGICA DEL ZANJÓN GUABINERO .....	49
TABLA 4.7. SUELOS CARACTERÍSTICOS Y DETERMINACIÓN DEL GRUPO HIDROLÓGICO UNIDAD HIDROLÓGICA DEL ZANJÓN GUABINERO .....	50
TABLA 4.8. VALORES DE CN PARA VARIOS TIPOS DE USO DEL SUELO.....	51
TABLA 4.9. VALORES DE CN PARA VARIOS TIPOS DE USO DEL SUELO EN CUENCAS .....	51
TABLA 4.10. PARÁMETROS HIDROLÓGICOS REQUERIDOS POR LOS MODELOS SCS NÚMERO DE CURVA Y SCS HIDROGRAMA UNITARIO .....	54
TABLA 4.11. CAUDALES MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE 2, 5, 10, 25, 50 Y 100 AÑOS GENERADOS CON EL MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS EN EL ZANJÓN GUABINERO ....	56
TABLA 4.12. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LAS UNIDADES HIDROLÓGICAS EN QUE SE DIVIDIÓ LA CUENCA DEL ZANJÓN EL RINCÓN .....	58
TABLA 4.13. COBERTURA VEGETAL ACTUAL DEL SUELO EN LAS UNIDADES HIDROLÓGICAS DEL ZANJÓN EL RINCÓN.....	58
TABLA 4.14. SUELOS CARACTERÍSTICOS Y DETERMINACIÓN DEL GRUPO HIDROLÓGICO UNIDAD HIDROLÓGICA DEL ZANJÓN EL RINCÓN .....	58
TABLA 4.15. PARÁMETROS HIDROLÓGICOS REQUERIDOS POR LOS MODELOS SCS NÚMERO DE CURVA Y SCS HIDROGRAMA UNITARIO EN LA CUENCA DEL ZANJÓN EL RINCÓN .....	59
TABLA 4.16. CAUDALES MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE 2, 3, 5, 10, 25, 50 Y 100 AÑOS GENERADOS CON EL MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS DEL ZANJÓN EL RINCÓN .....	61
TABLA 6.1. NIVELES DE RIESGOS DEFINIDOS EN LA METODOLOGÍA DEL PATRICOVA. ....	67

TABLA 6.2. NIVEL DEL RIESGO DE ACUERDO CON EL PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO DEL PLAN MEDIOAMBIENTAL DEL RÍO EBRO Y TRAMO BAJO DEL RÍO CAUCA .....	68
TABLA 6.3. DEFINICIÓN DE RANGOS DE INTENSIDAD PARA INUNDACIONES ESTÁTICAS Y DINÁMICAS (INSTITUTO NICARAGÜENSE DE ESTUDIOS TERRITORIALES). .....	70
TABLA 6.4. CATEGORIZACIÓN DE LA INUNDACIÓN SEGÚN EL PERIODO DE RETORNO.....	71
TABLA 6.5. MATRIZ DE NIVELES DE AMENAZA POR INUNDACIONES .....	72
TABLA 6.6. NIVEL DISCRETO DE AMENAZA .....	73
TABLA 6.7. DEFINICIÓN DE NIVEL DE AMENAZA .....	73
TABLA 6.8. INTENSIDAD DE LA INUNDACIÓN .....	74
TABLA 6.9. INTENSIDAD DE FLUJO DE LODOS .....	74
TABLA 6.10. NIVEL DE FRECUENCIA DE LOS EVENTOS DE INUNDACIÓN .....	75
TABLA 6.11. NIVEL DE INTENSIDAD O MAGNITUD DEL EVENTO DE INUNDACIÓN .....	75
TABLA 6.12. NIVEL DE AMENAZA SEGÚN LA FRECUENCIA Y LA INTENSIDAD O MAGNITUD DE LA INUNDACIÓN .....	76
TABLA 6.13. CLASIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES.....	77
TABLA 6.14. RUGOSIDAD HIDRÁULICA DE MANNING EN CAUCES.....	79
TABLA 7.1. VALORES ESTIMADOS DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING EN LA PLANICIE ALUVIAL DE LA ZONA DE ESTUDIO DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR .....	83
TABLA 7.2. DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES OBRAS ESTRUCTURALES PARA CONTROL DE LAS CRECIENTES E INUNDACIONES.....	91

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL MUNICIPIO DE BOLÍVAR .....	16
FIGURA 2.1. LOCALIZACIÓN PUENTES SOBRE EL RÍO PESCADOR: A. PUENTE TIENDA DE GLORIA, B. PUENTE SOBRE LA VÍA PANORAMA .....	19
FIGURA 2.2. LOCALIZACIÓN DE PUENTES SOBRE ZANJÓN GUABINERO: A. TANQUE ACUAVALLE, B. SECTOR MATADERO, C. VÍA PANORAMA .....	20
FIGURA 2.3. LOCALIZACIÓN PUENTE SOBRE ZANJÓN EL RINCÓN SOBRE VÍA PANORAMA .....	21
FIGURA 2.4. LOCALIZACIÓN EN PLANTA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS EN EL MUNICIPIO DE BOLÍVAR .....	22
FIGURA 3.1. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ESTACIONES HIDROCLIMATOLÓGICAS .....	25
FIGURA 3.2. HISTOGRAMA DE TEMPERATURA – ESTACIÓN TIERRABLANCA .....	26
FIGURA 3.3. HISTOGRAMA DE BRILLO SOLAR – ESTACIÓN TIERRABLANCA .....	27
FIGURA 3.4. HISTOGRAMA DE HUMEDAD RELATIVA – ESTACIONES CENTRO ADMINISTRATIVO LA UNIÓN Y TIERRABLANCA .....	28
FIGURA 3.5. DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA EVAPORACIÓN – ESTACIÓN TIERRABLANCA .....	29
FIGURA 3.6. HISTOGRAMA DE VELOCIDAD DE VIENTO – ESTACIÓN CENTRO ADMINISTRATIVO LA UNIÓN.....	29
FIGURA 3.7. DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN TOTAL MENSUAL DE LAS ESTACIONES UBICADAS EN ZONAS ALEDAÑAS AL PROYECTO.....	31
FIGURA 3.8 MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL MULTIANUAL MUNICIPIO DE BOLÍVAR.....	33
FIGURA 3.9. MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS MUNICIPIO DE BOLÍVAR .....	35
FIGURA 3.10. MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 48 HORAS MUNICIPIO DE BOLÍVAR .....	36
FIGURA 3.11. MAPA DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 48 HORAS MUNICIPIO DE BOLÍVAR .....	37
FIGURA 3.12. PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO. ESTACIÓN BOLÍVAR .....	38
FIGURA 3.13. PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO. ESTACIÓN BETANIA .....	39
FIGURA 3.14. PRECIPITACIONES MÁXIMAS PARA LOS DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO. ESTACIÓN EL RETIRO .....	40
FIGURA 3.15. CURVA DE INTENSIDAD FRECUENCIA Y DURACIÓN CON DATOS DE LA ESTACIÓN CENTRO ADMINISTRATIVO LA UNIÓN .....	42
FIGURA 3.16. HISTOGRAMA DE PRECIPITACIÓN DE DISEÑO HIDROLÓGICO PARA UNA DURACIÓN DE 200 MIN. ESTACIÓN CENTRO ADMINISTRATIVO LA UNIÓN.....	43
FIGURA 4.4. ESQUEMA DE LAS COMPONENTES HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS QUE UTILIZA EL MODELO HEC-HMS 4.2.1 PARA REPRESENTAR UNA CUENCA HIDROGRÁFICA. ....	45
FIGURA 4.5. ESQUEMA DEL ZANJÓN GUABINERO PARA EL MODELO HEC-HMS.....	47
FIGURA 4.6. HIDROGRAMAS DE CAUDALES MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE 2, 5, 10, 25, 50 Y 100 AÑOS EN EL ZANJÓN GUABINERO .....	55
FIGURA 4.7. ESQUEMA DEL ZANJÓN EL RINCÓN PARA EL MODELO HEC-HMS .....	57
FIGURA 4.8. HISTOGRAMA E HISTOGRAMA DE CAUDALES MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE 2, 3, 5, 10, 25, 50 Y 100 AÑOS ZANJÓN EL RINCÓN .....	60

FIGURA 6.1. CLASIFICACIÓN DE LAS ZONAS DE INUNDACIÓN DE ACUERDO CON LA AGENCIA CATALANA DEL AGUA. ....	66
FIGURA 6.2. ZONA DE INTENSO DESAGÜE DEFINIDA POR LA AGENCIA CATALANA DEL AGUA .....	66
FIGURA 6.3. DEFINICIÓN DE RANGOS DE INTENSIDAD PARA INUNDACIONES ESTÁTICAS Y DINÁMICAS .....	70
FIGURA 6.4. NIVEL DE INTENSIDAD O MAGNITUD DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES.....	76
FIGURA 7.1. MAPA DE INUNDACIONES – PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS.....	97

## INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas (IDEAM, 2013).

En la clasificación más sencilla se pueden identificar dos tipos: Inundaciones lentas, que son las que ocurren en las zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos, los incrementos de nivel diario son de apenas del orden de centímetros, reporta afectaciones de grandes extensiones, pero usualmente pocas pérdidas de vidas humanas, el tiempo de afectación puede fácilmente llegar a ser del orden de meses. El otro tipo de inundación son las llamadas crecientes súbitas, que aunque las áreas de afectación son menores, el poder destructivo es potencialmente mayor y cobra el mayor número de vidas cuando se presentan, responden rápidamente a la ocurrencia de fuertes precipitaciones en las partes altas de las cuencas, los incrementos de nivel son del orden de metros en pocas horas, y el tiempo de permanencia de estas inundaciones en las zonas afectadas son igualmente de horas o pocos días, estas se presentan en todas las cuencas de alta pendiente de la región Andina principalmente.

En Colombia, las inundaciones originadas por los desbordamientos de los ríos son altamente frecuentes a lo largo y ancho del territorio nacional. Casi todas las regiones del país son vulnerables a las inundaciones, que pueden presentarse en los ríos principales, y también a veces la población resulta afectada por el desborde de quebradas y ríos pequeños.

Las comunidades asentadas en zonas aledañas a los cauces pueden estar en riesgo a causa de las inundaciones, pues éstas son muchas veces responsables de pérdidas de vidas y daños a la infraestructura. Las inundaciones representan una amenaza para asentamientos humanos, zonas agrícolas, zonas ganaderas y vías, entre otros tipos de infraestructura localizados sobre el abanico aluvial, es decir, en la parte plana donde se deposita y almacena el flujo de agua.

Por ello es importante que las áreas amenazadas por este fenómeno sean identificadas con el fin de estimar la vulnerabilidad de los elementos expuestos y determinar los escenarios de riesgo. Éstos permitirán plantear y analizar diferentes alternativas con el propósito de prevenir, mitigar o controlar la amenaza por este tipo de fenómenos y definir posteriormente el uso adecuado de dichas áreas. En muchos casos, esto puede verse reflejado tanto en proyectos de reubicación como modificaciones de los planes de ordenamiento territorial en cuanto a las futuras áreas de expansión de los municipios. Para cumplir con esta tarea se debe desarrollar una metodología para delimitar las zonas vulnerables a este tipo de amenazas.

El municipio de Bolívar está localizado en la región centro - norte del departamento del Valle del Cauca cuyo territorio se extiende desde la Cordillera Occidental en límites con el Chocó hasta el valle geográfico del Río Cauca. Bolívar es un municipio con vocación agropecuaria que se encuentra ubicado a unos 161 km al norte de la ciudad de Cali.

El municipio de Bolívar ha tenido problemas por inundaciones, debido al desbordamiento del río Pescador, Zanjón Guabinero y Zanjón El Rincón durante periodos de invierno intenso. Con la puesta en funcionamiento del embalse Sara - Brut, disminuyo ostensiblemente la crecida súbita en el río Pescador, el proceso de regulación del caudal producto de la represa previene de que se produzcan las inundaciones en el casco urbano y zona de expansión del municipio de Bolívar, más por su importancia y trascendencia se consideró este cauce dentro del análisis. En el presente estudio se determinó el nivel de amenaza por inundaciones en el perímetro urbano y las zonas de expansión del municipio de Bolívar en el departamento del Valle del Cauca. Para ello se aplicó una metodología para la determinación de los mapas de amenaza, de acuerdo con los niveles de amenaza definidos. Además, se efectuó la caracterización hidráulica de los cauces del río Pescador, Zanjón Guabinero y Zanjón El Rincón utilizando el programa HEC - RAS con el fin de implementar un modelo matemático para simular los fenómenos de inundación.

## **1. ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR**

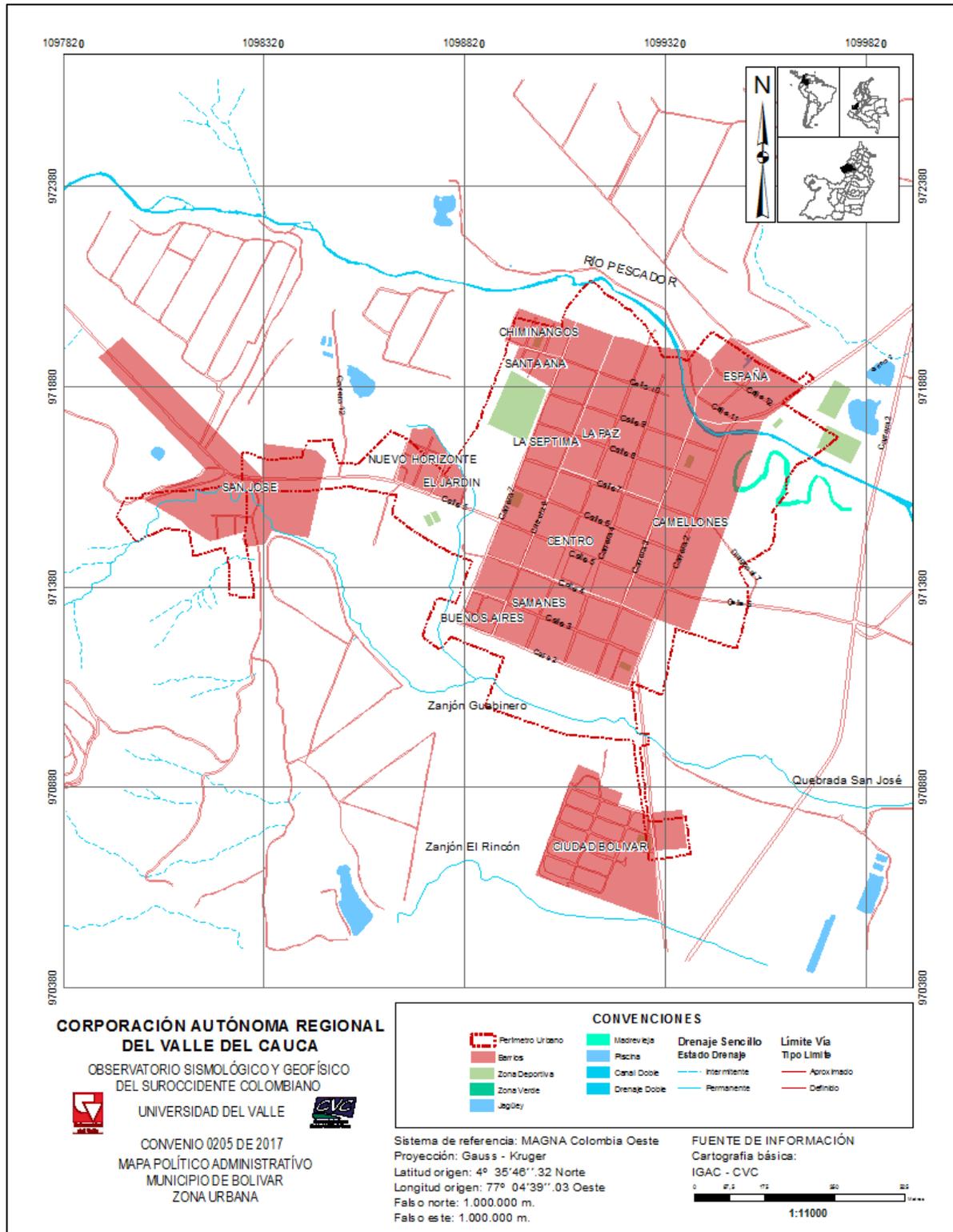
En el presente estudio se determinó el nivel de amenaza por inundaciones en el área urbana y la zona de expansión mediante la zonificación de amenaza del municipio de Bolívar en el departamento del Valle del Cauca. Para ello se efectuó la caracterización hidráulica de los cauces del río Pescador, Zanjón Guabinero y Zanjón El Rincón utilizando el programa HEC - RAS con el fin de implementar un modelo matemático y simular los fenómenos de inundación, teniendo en cuenta los parámetros de profundidad y velocidad para establecer los niveles de amenaza y definir el mapa de amenaza por inundación.

### **1.2. CAUCES EN LA ZONA DE ESTUDIO**

La información recopilada y consultada permitió identificar los diferentes cauces que transitan por el casco urbano del municipio de Bolívar. Entre las corrientes que históricamente han generado problemas por inundaciones se destacan el río Pescador, los Zanjonés Guabinero y El Rincón. El principal cauce que atraviesa el municipio de Bolívar es el río Pescador, el cual no presenta problemas de desbordamiento desde que se puso en funcionamiento el embalse Sara - Brut. También existen en el municipio algunos Zanjonés como el Guabinero y El Rincón; que ocasionalmente presentan problemas de desbordamiento ya que la capacidad de estos canales es excedida con cierta frecuencia principalmente en época de invierno.

### **1.3. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

Para la delimitación de la zona de estudio del municipio de Bolívar se consideró el área del perímetro urbano y de expansión urbana (área total de 110.75 ha), puesto que la zona a estudiar debe abarcar ambos sectores. La zona urbana tiene un área total de 94 ha y la zona de expansión urbana tiene un área de 16 ha, aproximadamente. La zona de estudio se definió, por tanto, de 110 ha con un perímetro de 7.43 km de longitud para poder abarcar todos los sectores susceptibles a inundaciones. En la Figura 1.1 se indica de manera aproximada el perímetro de la zona de estudio del municipio de Bolívar.



**Figura 1.1** Localización de la zona de estudio en el municipio de Bolívar

**Fuente:** elaboración propia

## 2. RESULTADOS DE LAS INVESTIGACIONES DE CAMPO

El trabajo de campo se hizo con la finalidad de identificar en terreno las condiciones hidrodinámicas de cada uno de los cauces que pasan por el casco urbano y de expansión del municipio de Bolívar, de tal manera que el conocimiento de cada uno de ellos sirva de insumo para el análisis hidrológico e hidráulico, todo esto con la finalidad de establecer algunos parámetros requeridos para la obtención de los caudales máximos y determinación de áreas inundables. Se realizó el levantamiento topobatimétrico de cada uno de los cauces y la georreferenciación de obras hidráulicas como puentes información que es determinante a la hora de realizar el proceso de modelación hidráulica para definir las áreas inundables. A continuación, se hace una breve descripción del levantamiento topográfico realizado y de las estructuras hidráulicas encontradas en cada uno de los cauces de pasan por el Municipio de Bolívar.

### 2.1. LEVANTAMIENTOS TOPOBATIMÉTRICOS

Los cauces monitoreados en el municipio de Bolívar son el río Pescador, El Zanjón Guabinero y El Zanjón El Rincón. La información topobatimétrica de los diferentes cauces que recorren la zona de estudio del municipio de Bolívar es de gran importancia para efectuar la modelación matemática de los fenómenos de inundación y avenidas torrenciales, pues permite obtener resultados más precisos sobre las características de los cauces (pendiente y capacidad de transporte).

Para efectuar el levantamiento topobatimétrico de las secciones transversales de los diferentes cauces y canales se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Las secciones transversales deben localizarse preferiblemente en tramos rectos del cauce.
- Las secciones no deben estar ubicadas en sectores en los cuales existan barras centrales e islas en medio del cauce.
- Las bancas de las secciones deben ser estables.
- Las secciones deben ser representativas de la morfología del cauce en cada tramo, y en su conjunto deben ser representativas de la configuración morfológica de todo el cauce.
- Las secciones transversales deben localizarse donde se observen cambios importantes en la rugosidad del cauce y en la pendiente del río.
- Las secciones se deben ubicar aguas arriba y aguas abajo de la desembocadura de corrientes tributarias importantes.
- Deben tomarse secciones en las fronteras del modelo (aguas arriba, aguas abajo e internas).
- Se debe realizar el levantamiento de secciones transversales donde existan puentes, alcantarillas, diques, derivaciones, vertimientos, compuertas y demás estructuras hidráulicas que estén presentes en los tramos de estudio de los cauces a modelar.

De acuerdo con estas recomendaciones y teniendo en cuenta las características morfológicas observadas durante las visitas de reconocimiento, se definió el espaciamiento aproximado entre las secciones transversales a monitorear en los diferentes cauces, quebradas y acequias, así:

- Río Pescador: secciones transversales cada 20 m dentro del perímetro urbano y zona de expansión urbana, cada 20 m desde el límite del área de expansión urbana hasta la vía Panorama.
- Zanjón Guabinero: secciones transversales cada 20 m en un tramo de 2.1 km.
- Zanjón El Rincón: secciones transversales cada 20 m en un tramo de 1.2km.

Teniendo en cuenta que el río Pescador es el cauce principal que recorre el municipio de Bolívar debió ser caracterizado de forma más detallada. Por ello, en el río Pescador el espaciamiento entre secciones es menor que en las demás corrientes de agua. Sin embargo, a pesar del gran espaciamiento entre las secciones transversales de los zanjones, las secciones a levantar son suficientes para reflejar la variación de la geometría (o morfología) de dichas corrientes puesto que éstas son canales cuya variación geométrica a lo largo de su recorrido por la zona de estudio no es significativa. A continuación, se indica la extensión de los tramos a modelar de cada uno de los cauces, el número total de las secciones transversales levantadas y la localización de las secciones seleccionadas como fronteras del modelo matemático para el municipio de Pescador.

### 2.1.1. Río Pescador

La cuenca del río Pescador posee un área de 20.000 has; limita al norte con las cuencas de los ríos Garrapatas y RUT, al sur con la cuenca del río Riofrío, al oriente con el río Cauca y al occidente con la cuenca del río Garrapatas. El río Pescador nace en la cordillera Occidental por la confluencia de los ríos Platanos y Calamar, aproximadamente en la cota 1.420 msnm. Este río alimenta el embalse Guacas, el cual conforma el acueducto regional Sara - Brut, con el cual se lleva agua cruda a las plantas de tratamiento de Bolívar, Roldanillo, La Unión, Toro, Zarzal, La Victoria, Obando y Ricaurte.

El río Pescador es el principal cauce natural que atraviesa el municipio de Bolívar, la longitud total del tramo a modelar del río Pescador es de 1700 m, aproximadamente. Se levantaron 85 secciones transversales espaciadas así: cada 20 m en la zona urbana y de expansión urbana, cada 20 m desde el límite del área de expansión urbana hasta la vía panorama. Para propósitos de la modelación matemática y considerando la disponibilidad de información (niveles y caudales) la frontera superior en el río Pescador se estableció en la estación hidrométrica La molina, localizada 300 m aguas arriba del polígono de la zona urbana. La frontera inferior para fines de modelación se ubicó aproximadamente 200 m aguas abajo del puente sobre la vía Panorama.

#### 2.1.1.1. Estructuras hidráulicas localizadas en el río Pescador tramo de estudio

En el tramo del río Pescador que pasa por el casco urbano y zona de expansión se encuentran dos (2) estructuras tipo puente, en la Tabla 2.1 se presenta las coordenadas la localización de las estructuras y la Figura 2.1 muestra sus respectivas fotos.

**Tabla 2.1.** Localización de puentes sobre el río Pescador

TIPO DE ESTRUCTURA	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN
Puente	1099846.17	971644.29	929.15
Puente	1099474.53	971775.27	930.22

**Fuente:** elaboración propia



a

b

Figura 2.1. Localización puentes sobre el río Pescador: a. Puente tienda de Gloria, b. Puente sobre la vía Panorama

**Fuente:** Fotografías propias

### 2.1.2. Zanjón Guabinero

El Zanjón Guabinero atraviesa el municipio de Bolívar por la parte sur del mismo. La longitud total del tramo a modelar es de alrededor de 2.100 m, con un total de 105 secciones transversales levantadas y espaciadas cada 20 m, aproximadamente.

La frontera superior se ubicó hacia el sector de la mina y la frontera inferior se localizó 100 m aguas abajo del puente sobre la vía Panorama.

#### 2.1.2.1. Estructuras hidráulicas localizadas en el Zanjón Guabinero

En el tramo del Zanjón Guabinero que pasa por el casco urbano y zona de expansión se encuentran tres (3) estructuras tipo puente (ver Figura 2.2), en la Tabla 2.2 se presenta la localización de las estructuras.

**Tabla 2.2.** Localización de puentes sobre el Zanjón Guabinero

TIPO DE ESTRUCTURA	ESTE	NORTE	ELEVACIÓN
Box Culvert	1098304.85	971583.85	951.12
Pontón	1099263.52	971007.70	923.73
Box Culvert	1099667.28	970867.17	920.33

**Fuente:** elaboración propia



a



b



c

**Figura 2.2.** Localización de puentes sobre Zanjón Guabinero: **a.** Tanque Acuavalle, **b.** Sector Matadero, **c.** Vía Panorama

**Fuente:** Fotografías propias

### 2.1.3. Zanjón El Rincón

El Zanjón El Rincón se encuentra en la zona de expansión del municipio de Bolívar, específicamente en el barrio ciudad Bolívar. La longitud del tramo a simular es de 1.200 m, con un total de 60 secciones transversales levantadas y espaciadas cada 20 m, aproximadamente.

La frontera superior se ubicó a 500 m aguas arriba del barrio ciudad Bolívar y la frontera inferior interna se localizó en cruce de esta quebrada con la vía Panorama

#### 2.1.3.1. Estructuras hidráulicas localizadas en el Zanjón El Rincón

En el tramo del Zanjón El Rincón que pasa por el casco urbano y zona de expansión se encuentran dos (2) estructuras tipo puente, en la Tabla 2.3 se presenta la localización de las estructuras y en la Figura 2.3 se muestra el registro fotográfico.

**Tabla 2.3.** Localización de puentes sobre el Zanjón El Rincón

TIPO DE ESTRUCTURA	ESTE	NORTE	ABSCISA
Box Culvert	1099409.56	970504.52	920.21
Box Culvert	1099311.80	970544.18	921.45

**Fuente:** elaboración propia



**a**

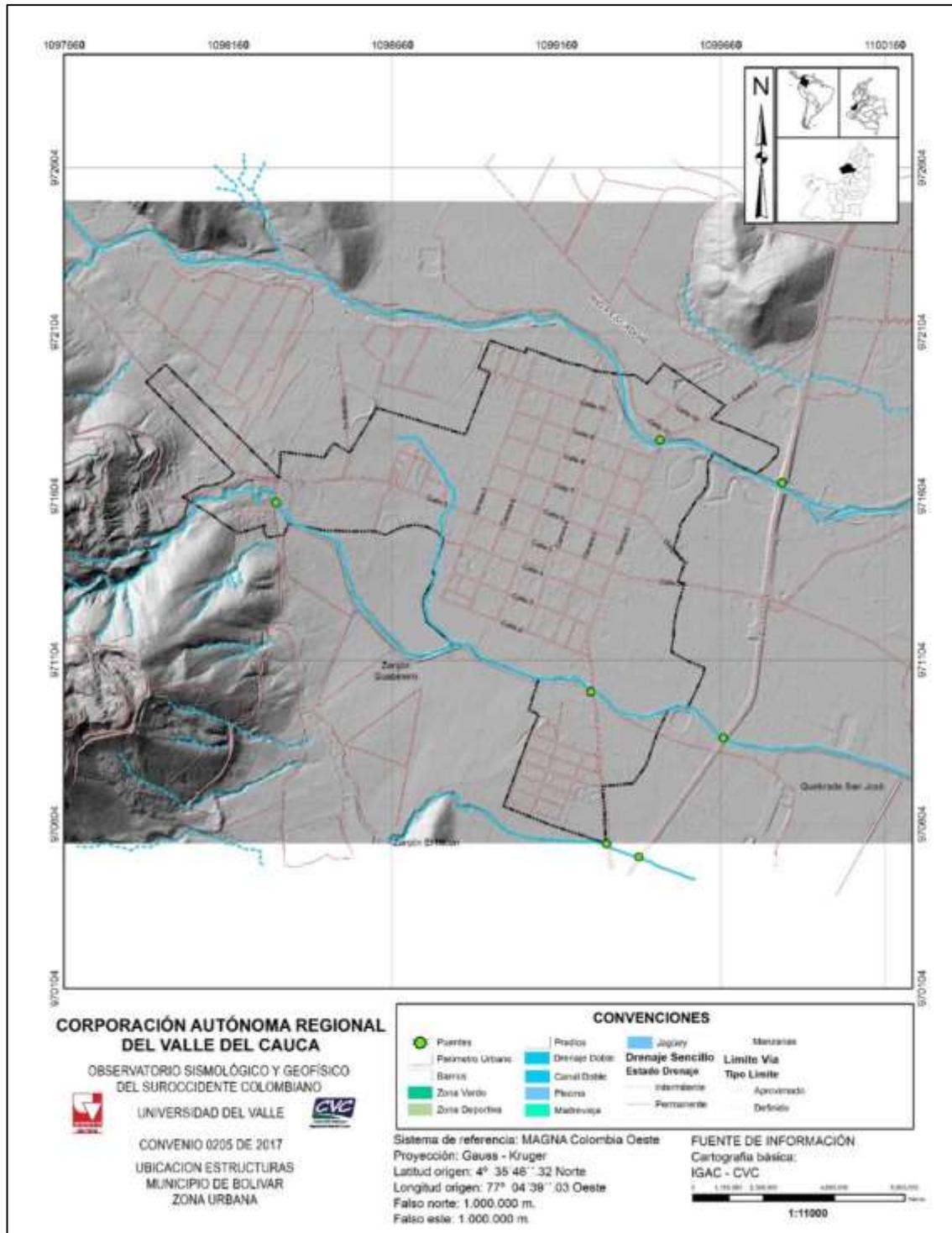


**b**

**Figura 2.3.** Localización puente sobre Zanjón El Rincón sobre vía Panorama

**Fuente:** Fotografías propias

En síntesis, en la campaña topográfica en la zona de estudio del municipio de Bolívar se realizó el levantamiento topobatimétrico de 250 secciones transversales, distribuidas así: 85 secciones en el río Pescador, 105 secciones en el Zanjón Guabinero y 60 secciones en el Zanjón El Rincón. Es importante aclarar que en todos los cauces se levantaron secciones transversales en diferentes puntos de control como puentes, diques, alcantarillas, entre otras estructuras hidráulicas ubicadas en los tramos de los cauces a modelar en el municipio de Bolívar, siguiendo los requerimientos topobatimétricos. El número total de puentes de los principales cauces localizados en el municipio de Bolívar fue de siete (7). Como se muestra en la Figura 2.3



**Figura 2.4.** Localización en planta de las estructuras hidráulicas en el municipio de Bolívar  
**Fuente:** elaboración propia

### **3. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA**

#### **3.1.1. Climatología**

El clima es el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del tiempo, durante un periodo de tiempo y un lugar o región dada, y controlado por los denominados factores forzantes, factores determinantes y por la interacción entre los diferentes componentes del sistema climático.

Debido a que el clima se relaciona generalmente con las condiciones predominantes en la atmósfera (uno de los componentes del sistema), éste se describe a partir de variables atmosféricas como la temperatura y la precipitación; sin embargo, se podría identificar también con las variables de otros de los componentes del sistema climático.

A través de la historia, se han presentado fluctuaciones del clima en escalas de tiempo que van desde años (variabilidad climática interanual) a milenios (cambios climáticos globales). Estas variaciones se han originado por cambios en la forma de interacción entre los diferentes componentes del sistema climático y en los factores forzantes.

#### **3.1.2. Elementos y variables climatológicas**

Toda propiedad o condición de la atmósfera cuyo conjunto define el estado físico del clima, en un lugar dado, para un periodo de tiempo determinado, es conocida con el nombre de elemento climático. Los principales elementos del clima son: la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento, el brillo solar y la precipitación. Estos elementos se convierten en variables climatológicas cuando se obtienen sus valores cuantitativos o cualitativos, producto de sus registros y/o mediciones. Éstas generalmente tienen los mismos nombres que sus elementos, pero se diferencian de éstos porque el elemento es la característica física en sí, mientras que la variable es su valoración. Con el análisis del comportamiento de estas variables, en el tiempo y en el espacio, es posible sacar conclusiones sobre el clima actual, el clima del pasado, las fluctuaciones climáticas de diversa escala.

#### **3.1.3. Red de estaciones meteorológicas**

El análisis del clima como factor de gran incidencia en los procesos que se presentan en el medio natural, se realizó a partir de la información disponible en las estaciones que conforman la red climatológica de la Corporación Regional Del Valle del Cauca - CVC y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, que se localizan en el área de influencia del proyecto. Se identificaron un total de 21 estaciones de las cuales: una estación es climatológica, una estación es pluviográfica, una estación es meteorológica, una estación es Evaporimétrica y 17 son pluviométricas, localizadas en zona de influencia del proyecto. La información general de las estaciones se presenta en la Tabla 3.1. En la Figura 3.1 se observa la ubicación de las estaciones en la zona de estudio.

**Tabla 3.1.** Estaciones meteorológicas seleccionadas en la Zona de Estudio

ESTACIÓN	CÓDIGO	TIPO	ENTIDAD	CORRIENTE	COORDENADAS PLANAS		ELEVACIÓN
					ESTE	NORTE	
Bolívar	26110040	PM	IDEAM	Pescador	1098466	972052	916
Higuerón	26110060	PM	IDEAM	Cauca	1106642	985745	915
Higueroncito	26110100	PM	IDEAM	Cauca	1108490	987591	920
Tierrablanca	26115030	CO/PM	IDEAM	Cauca	1108499	980218	930
Sabanazo	26115020	EV	CVC	Q.da La Unión	1103028	994446	1643
Patumac	54030010	PM	IDEAM	Garrapatas	1097184	997475	1640
Lituania	54030030	PM	IDEAM	Garrapatas	1080126	989244	1870
La Arboleda	26110290	PM	IDEAM	Cauca	1109192	992931	942
Isugu	26110230	PG	IDEAM	Cauca	1108434	980439	908
Candelaria	26115080	ME	IDEAM	Cauca	1110722	987327	901
Cent Admo La Unión	26115040	CP	IDEAM	Cauca	1112682	992899	920
El Retiro	26110170	PM	CVC	Pescador	1093500	977912	1655
Montecristo	26110180	PM	CVC	RUT	1098279	980253	1357
Betania	54030090	PM	CVC	Garrapatas	1085330	982350	1750
La María	54030140	PM	CVC	Garrapatas	1085844	994581	1410
Pto Nuevo	54030150	PM	CVC	Garrapatas	1089824	1000059	959
El Porvenir	26110050	PM	CVC	RUT	1106652	994155	996
El Aguacate	26110360	PM	CVC	RUT	1097307	977785	1394
El Lucero	26110380	PM	CVC	RUT	1107427	990958	976
El Orégano	26110390	PM	CVC	RUT	1100211	984030	1358
La Despensa	26110450	PM	CVC	RUT	1103282	990594	1342

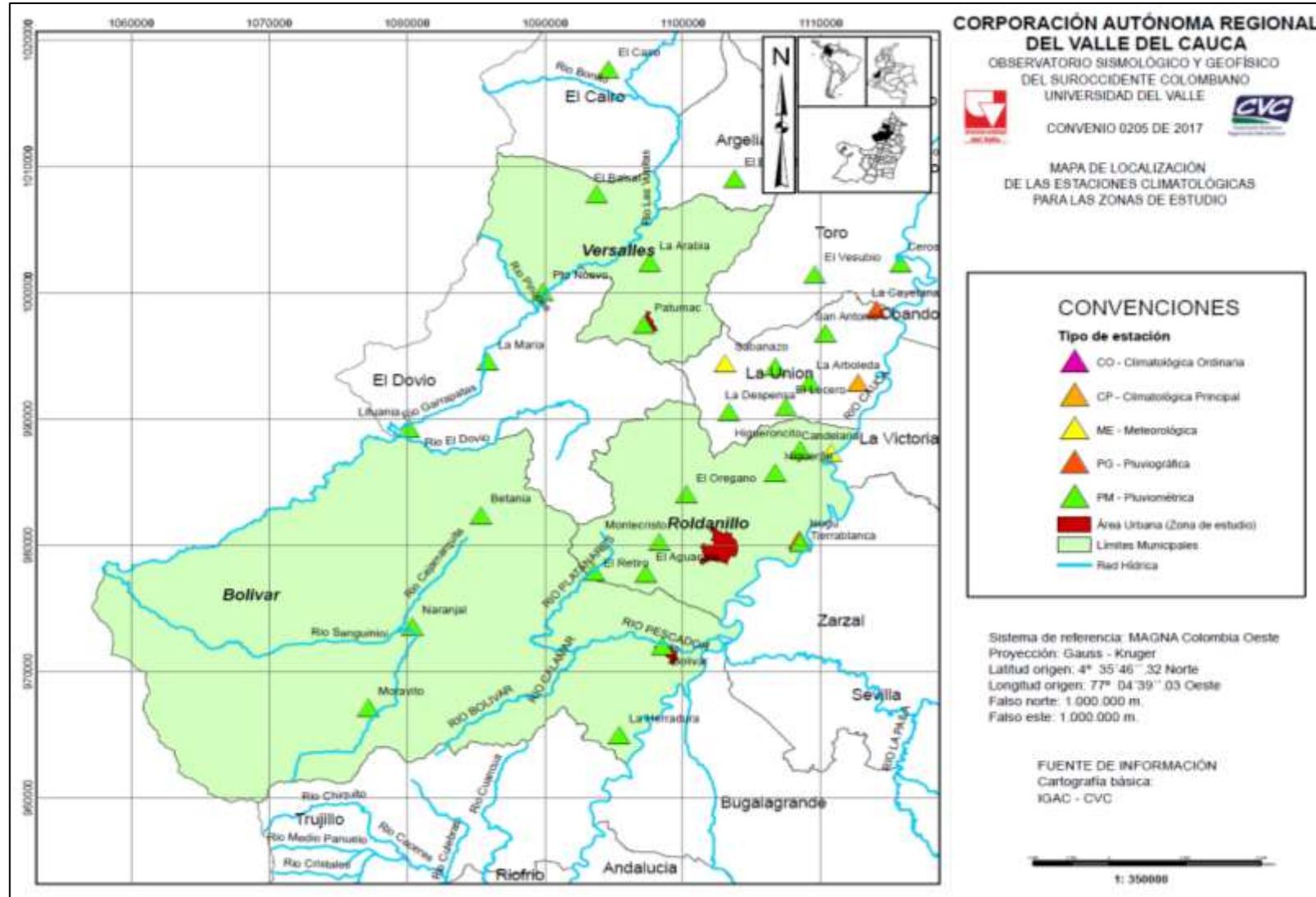
**Nota:** (CO) Climatológica Ordinaria, (CP) Climatológica Principal, (ME) Meteorológica, (EV) Evaporimétrica, (PG) Pluviográfica y (PM) Pluviométrica.

A continuación, se describen los aspectos climáticos más importantes haciendo énfasis principalmente a parámetros como: la temperatura media, máxima y mínima, humedad relativa, brillo solar, velocidad de viento y precipitación, utilizando los registros mensuales multianuales principalmente de la estación Tierrablanca, las cuales están localizadas dentro o en inmediaciones del municipio de Bolívar, variables meteorológicas las cuales son motivo de interés del presente estudio. En la Tabla 3.2 se presenta el resumen de los promedios mensuales multianuales de los parámetros climatológicos evaluados.

**Tabla 3.2.** Resumen de promedios mensuales multianuales de diferentes variables climáticas registradas en la estación Tierrablanca

ESTACIÓN	PARÁMETRO	UNIDAD	VALORES MENSUALES											
			ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Tierrablanca	HR	%	72	71	71	74	76	75	71	71	72	76	76	74
	TMAX	°C	33,5	33,9	34,4	33,7	32,8	32,9	33,8	34,1	33,6	32,5	32,2	32,7
	TMED	°C	24,5	24,7	24,8	24,5	24,2	24,3	24,5	24,6	24,4	23,8	23,8	24,2
	TMIN	°C	16,7	17,3	17,1	17,4	17,4	16,9	16,2	16,7	16,8	16,7	16,7	16,7
	BST	Horas	194	164	180	149	156	173	209	187	171	152	158	177
	EVPT	mm/mes	147	138	151	135	122	129	152	155	148	131	120	121

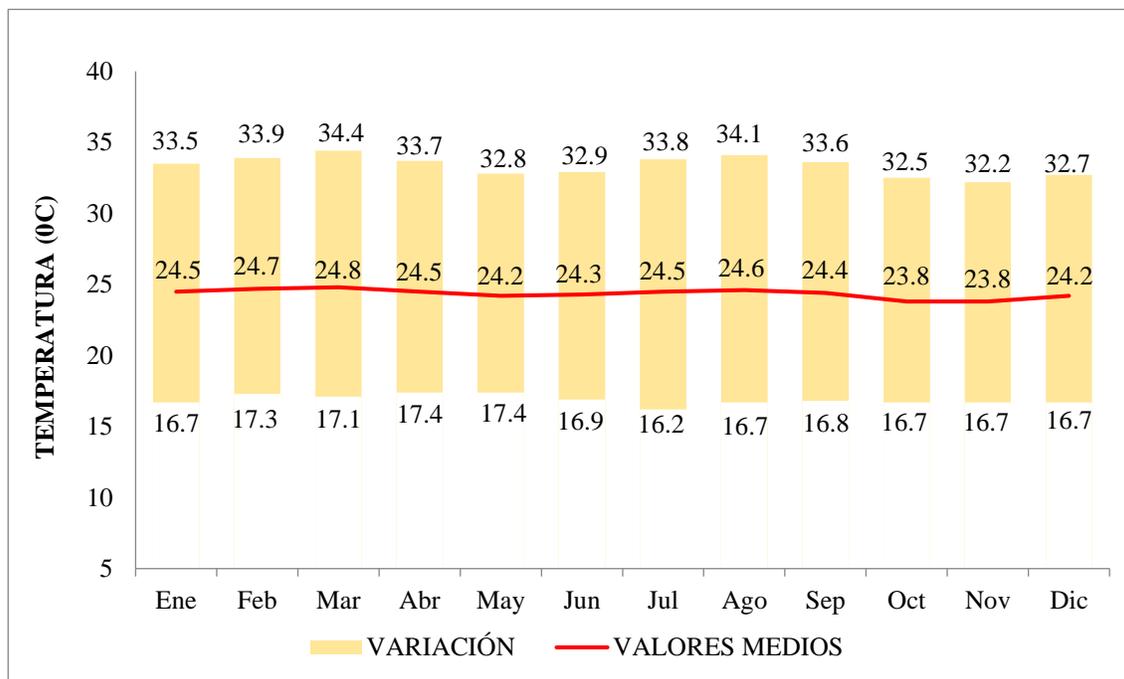
**Nota:** (TMAX) Temperatura Máxima, (TMED) Temperatura Media, (TMIN) Temperatura Mínima, (BST) Brillo Solar Total, (HR) Humedad Relativa, (EVPT) Evaporación Total, (VV) Velocidad de Viento.



**Figura 3.1.** Distribución espacial de estaciones hidroclimatológicas
   
**Fuente:** Elaboración propia con datos de IGAC y CVC (2004)

### 3.1.4. Temperatura Media

La temperatura del aire es un carácter climatológico muy importante, por su influencia en los factores hidrológicos, biológicos y económicos de una región. El comportamiento de este elemento del clima está condicionado básicamente por la presión atmosférica lo cual se traduce en una variación en función de la altura sobre el nivel del mar. El régimen de la temperatura del aire en el país está determinado por su situación geográfica en el mundo y las particularidades fisiográficas de su territorio. El primer factor influye ante todo sobre la amplitud anual de la temperatura del aire, mientras que el segundo determina en gran parte su variabilidad espacial. En la Figura 3.2 se presenta el histograma de temperaturas que se registran en la estación Tierrablanca, los valores de temperatura media registrados varían entre los 23,8 °C (en los meses de octubre y noviembre) y los 24,8 °C (mes de marzo), presentando un valor promedio mensual multianual de 24,4 °C. Las temperaturas máximas registran valores que oscilan entre los 32,2°C y los 34,4°C, siendo el valor medio mensual de temperatura máxima de 33,3°C. Los valores de temperatura mínima en la estación Tierrablanca oscilan entre los 16,2°C y los 17,4°C, teniendo un valor medio mensual de temperatura mínimas de 16,9°C..

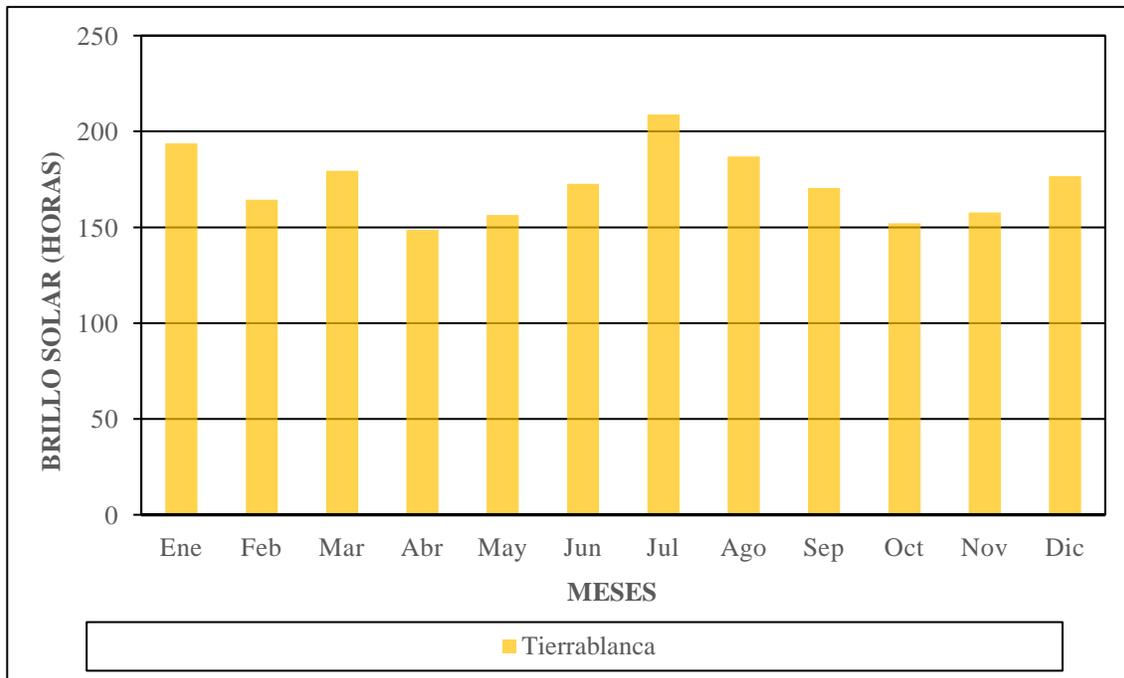


**Figura 3.2.** Histograma de Temperatura – Estación Tierrablanca

### 3.1.5. Brillo Solar

La radiación solar es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. Medir la radiación solar es importante para un amplio rango de aplicaciones, en el sector de la agricultura, ingeniería, entre otros, destacándose el monitoreo del crecimiento de plantas, análisis de la evaporación e irrigación, diseño y uso de sistemas de calentamiento solar, entre otros.

Los niveles de radiación varían durante todo el día y a lo largo del año. En términos generales se puede afirmar que los mayores niveles en el día se presentan cuando el sol se encuentra en su máxima elevación, esto es entre las 10 a.m. y las 2 p.m. (cerca del 60% de la radiación es recibida a estas horas), mientras que cuando el ángulo del sol está más cercano al horizonte llega menos radiación a la superficie de la tierra debido a que atraviesa una distancia más larga en la atmosfera y encuentra más moléculas de ozono, dando lugar a una mayor absorción. En la Figura 3.3 se presenta el histograma de brillo solar, obtenido con información de la estación Tierrablanca.

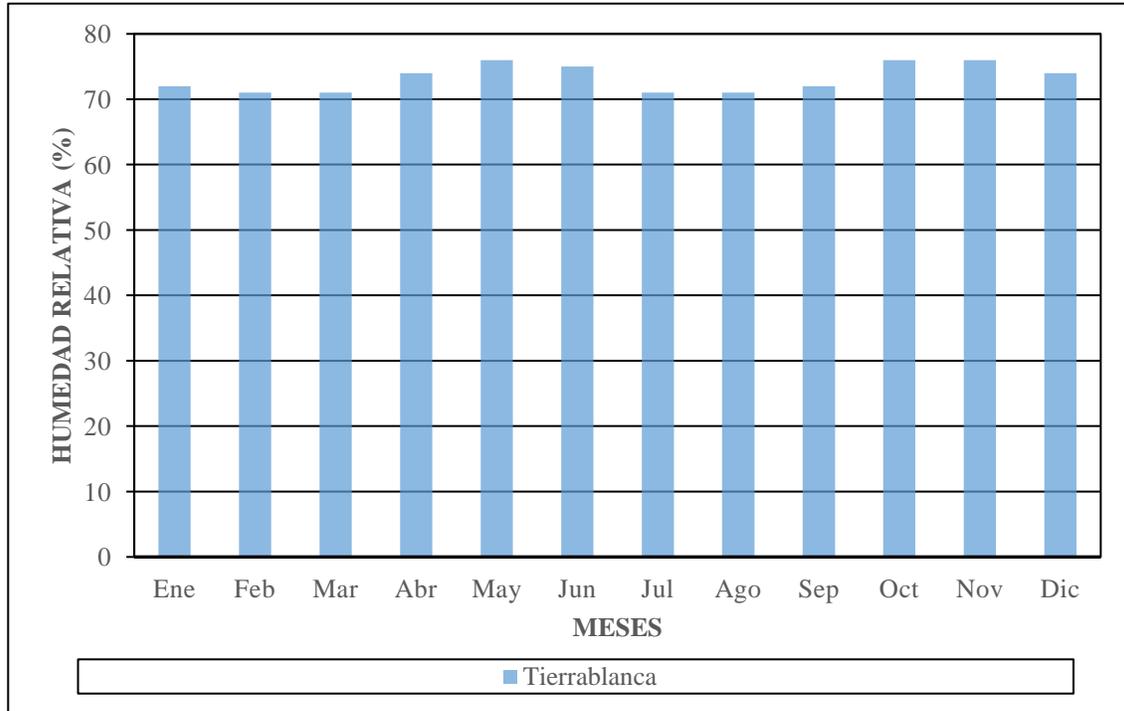


**Figura 3.3.** Histograma de Brillo Solar – estación Tierrablanca

De acuerdo a la información analizada, en la estación Tierrablanca el promedio mensual de horas de brillo solar oscila entre 149 horas a 209 horas, los valores más altos de horas de brillo solar se presentan en el mes de julio, mientras que los valores más bajos de horas de brillo solar se presentan en el mes de abril. La estación Tierrablanca presenta un valor promedio mensual de brillo solar de 172 horas.

### 3.1.6. Humedad Relativa

La humedad relativa informa de manera proporcional la cantidad de agua que se encuentra dentro de un volumen determinado de aire. Esta variable, contribuye como un factor importante para determinar el tipo de clima que se presenta en una región determinada. En Figura 3.4 se presenta los valores medios mensuales de Humedad relativa de la estación Tierrablanca.

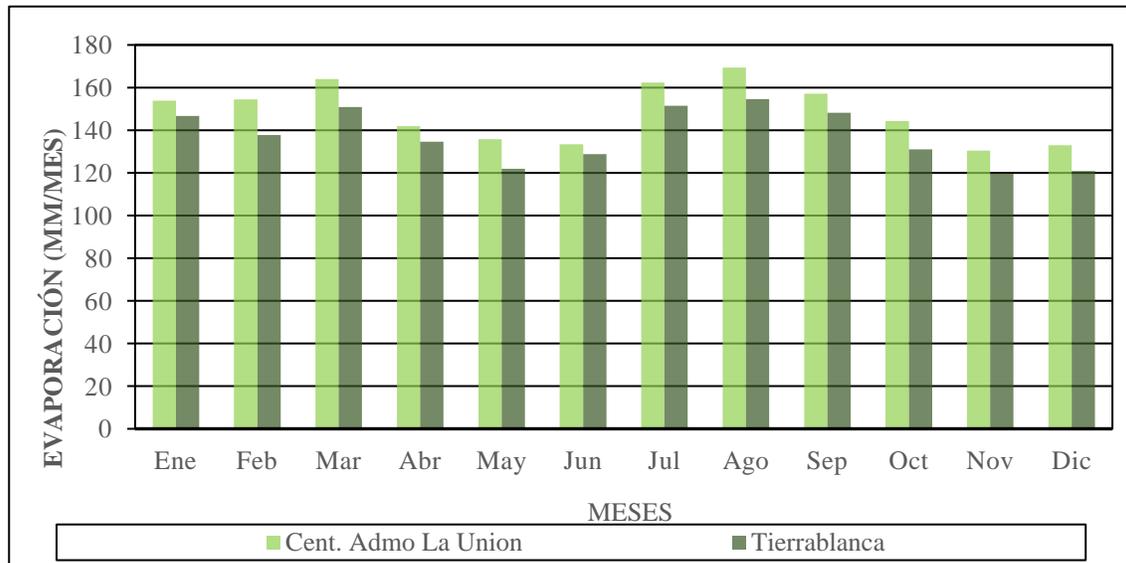


**Figura 3.4.** Histograma de Humedad Relativa – Estaciones Centro Administrativo La Unión y Tierrablanca

La estación Tierrablanca reporta valores de humedad relativa media mensual que oscila entre 71% y 76 %, y presenta un valor promedio mensual de 73%. En los meses de febrero, marzo, julio y agosto se presentan los registros más bajos, y en los meses de mayo, octubre y noviembre se registran los valores más altos.

### 3.1.7. Evaporación

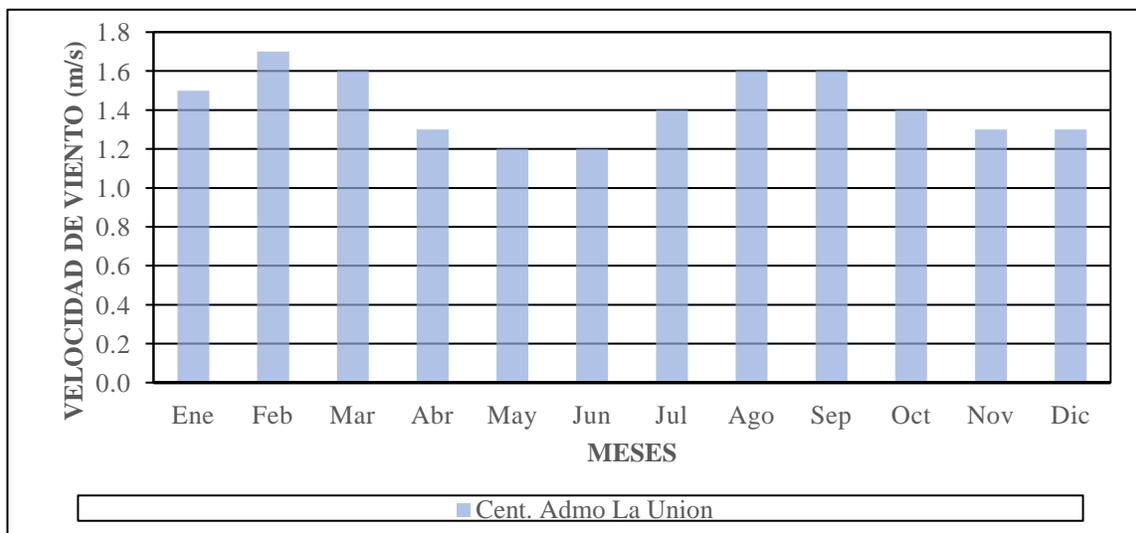
En la Figura 3.5 se presentan los valores promedios mensuales multianuales de Evaporación Total registrados en la estación Tierrablanca. Se puede observar que para la estación Tierrablanca, el valor mayor de evaporación se presenta en el mes de agosto con 155 mm/mes, mientras que el valor más bajo de evaporación se presentan en el mes de noviembre con 120 mm/mes, la estación Tierrablanca presenta un valor promedio mensual de 137 mm/mes.



**Figura 3.5.** Distribución mensual de la evaporación – Estación Tierrablanca

### 3.1.8. Velocidad de Viento

En la Figura 3.6 se presentan los valores promedios mensuales multianuales de velocidad de viento registrados en la estación Centro Administrativo La Unión. En ella se puede observar que para la estación Centro Administrativo La Unión los mayores valores de velocidad de viento se presentan en el mes de febrero con un valor de 1,7 m/s, mientras que los valores más bajos se presentan en los meses de mayo y junio con un valor medio de 1,2 m/s, la estación Centro Administrativo La Unión presenta un valor promedio mensual de 1,4 m/s.



**Figura 3.6.** Histograma de velocidad de viento – Estación Centro Administrativo La Unión

**Fuente:** elaboración propia con datos de IDEAM

### 3.1.9. Precipitación

Para el análisis temporal de la precipitación en la zona de estudio, se construyó una base de datos con la información de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas que se presentan en la Tabla 3.3, las cuales están localizadas en la zona de influencia del proyecto. Para el análisis de la precipitación media mensual se consideró un periodo hidrológico de 36 años, periodo hidrológico que inicia en el año 1982 y termina en el año 2017.

#### 3.1.9.1. Análisis temporal de las precipitaciones

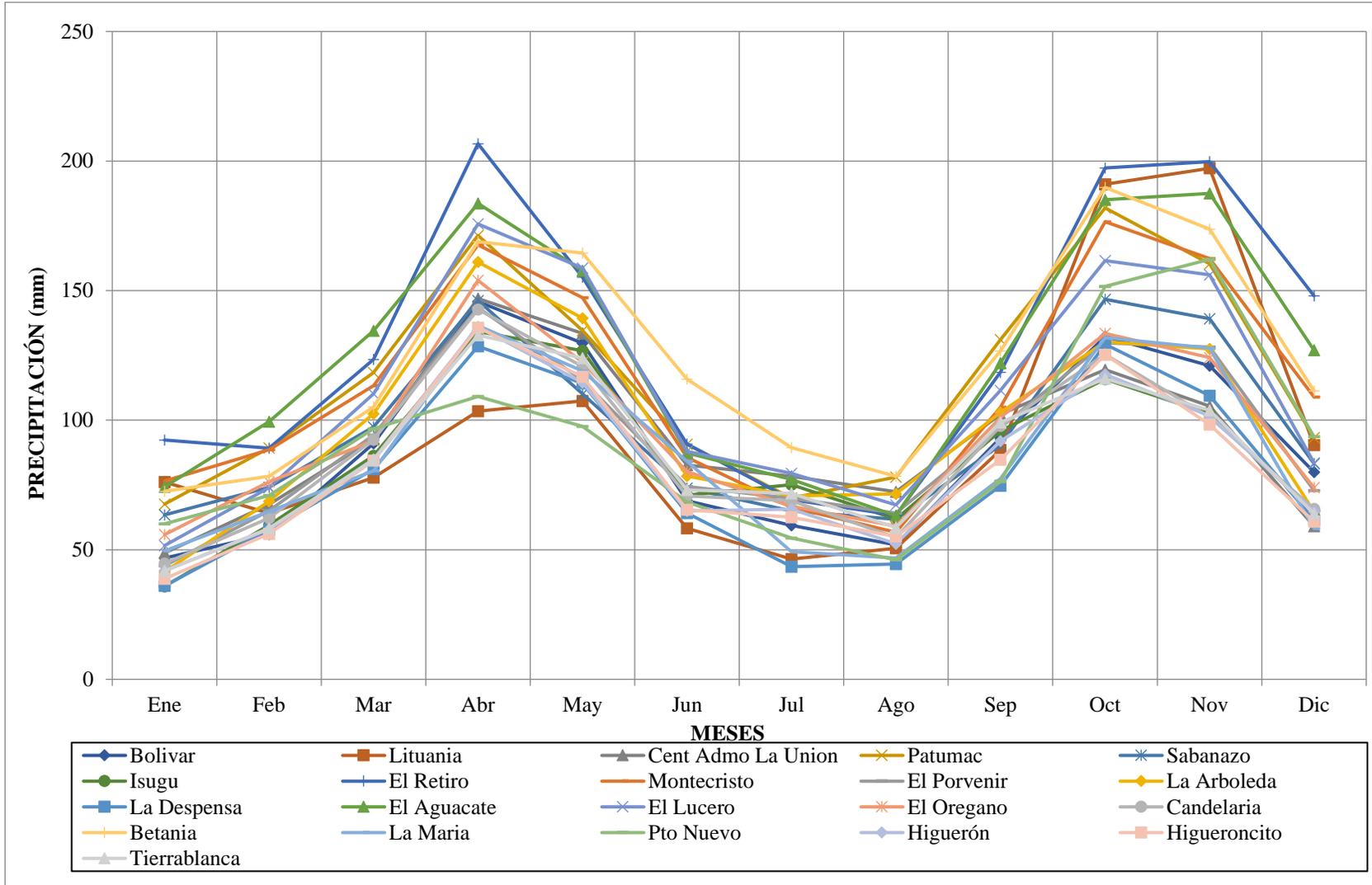
De acuerdo a los datos de precipitación media mensual multianual obtenidos de las estaciones de mayor influencia del sector evaluado, se observa que la distribución temporal de la lluvia tiende a presentar un régimen hidrológico bimodal bien definido, es decir presenta dos periodos de alta pluviosidad y dos periodos de baja pluviosidad; las mayores lluvias se registran en el periodo comprendidos entre los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, mientras que los periodos de menor pluviosidad está entre los meses de junio a agosto y de enero a febrero incluyendo el mes de diciembre. En la Tabla 3.3 se presenta el promedio de la precipitación total mensual multianual de las estaciones ubicadas en zonas aledañas al proyecto.

**Tabla 3.3.** Resumen de promedios mensuales multianuales de precipitación total mensual de las estaciones seleccionadas.

ESTACIÓN	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL
Bolívar	47	56	91	146	130	69	59	52	93	132	121	80	1076
Lituania	76	64	78	103	107	58	46	51	88	191	197	90	1151
Cent Admo La Unión	49	68	93	147	133	83	78	72	102	120	105	59	1109
Patumac	68	89	118	171	135	91	70	78	131	182	160	93	1386
Sabanazo	63	74	97	146	110	74	65	62	90	147	139	83	1151
Isugu	36	60	86	134	127	71	75	62	96	116	103	65	1030
El Retiro	92	89	123	207	155	91	69	63	119	197	200	148	1554
Montecristo	76	89	113	168	147	86	66	57	105	177	162	109	1355
El Porvenir	44	65	94	143	115	74	70	64	97	130	128	73	1099
La Arboleda	41	69	102	161	139	78	71	72	103	130	127	65	1159
La Despensa	36	58	81	128	114	64	43	44	75	129	109	61	945
El Aguacate	74	99	134	184	158	87	77	63	122	185	188	127	1499
El Lucero	52	74	110	176	159	88	79	67	112	162	156	84	1318
El Orégano	56	76	92	154	122	80	67	59	101	133	124	74	1139
Candelaria	45	62	93	143	121	71	69	55	98	125	101	66	1048
Betania	73	78	105	169	164	116	89	78	127	190	174	111	1474
La María	50	65	80	136	119	84	49	47	77	132	128	58	1025
Pto Nuevo	60	71	97	109	98	68	55	46	76	152	162	94	1087
Higuerón	42	58	85	136	114	65	66	52	92	118	102	65	994
Higueroncito	39	56	84	136	117	65	63	55	85	125	98	61	984
Tierrablanca	42	58	85	133	124	73	72	59	99	116	104	64	1028

**Fuente:** elaboración propia con datos de CVC e IDEAM

En la Figura 3.7 se muestra la distribución de la precipitación total mensual de veintiún (21) Estaciones ubicadas en zonas aledañas al municipio de Bolívar.



**Figura 3.7.** Distribución de la precipitación total mensual de las Estaciones ubicadas en zonas aledañas al proyecto

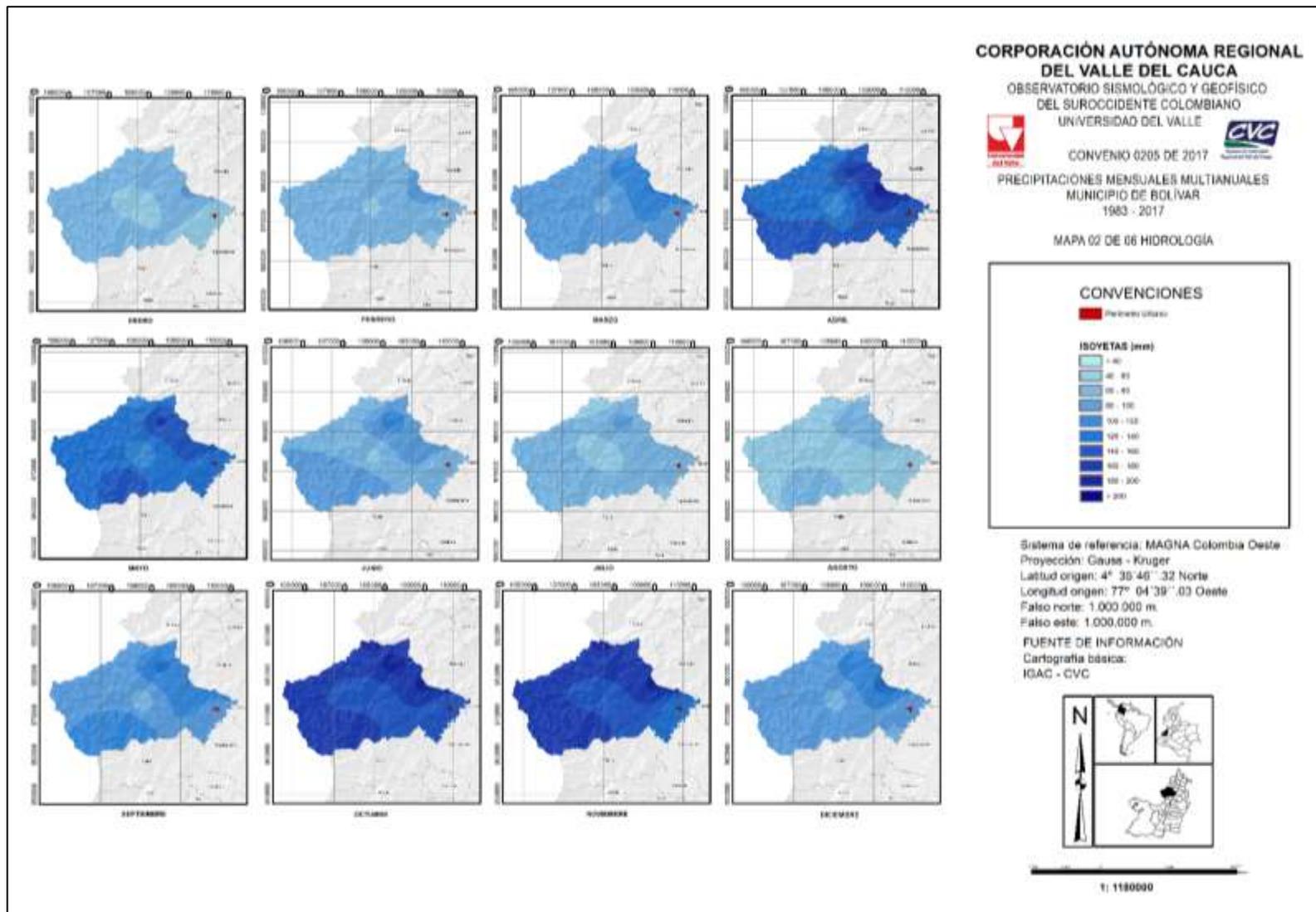
**Fuente:** elaboración propia con datos CVC e IDEAM

A nivel general todas las estaciones analizadas tienen comportamiento de tipo bimodal, para el caso de la estación Montecristo los mayores valores se presentan en el periodo entre septiembre a noviembre, siendo el mes de octubre el más lluvioso con un valor de precipitación de 177 mm/mes, el periodo más seco se presenta entre los meses de junio a agosto, siendo el más bajo el mes de agosto con una precipitación de 57 mm/mes, la estación Montecristo presenta un valor promedio mensual de precipitación de 113 mm/mes. En la estación pluviométrica El Orégano los mayores valores se presentan en el periodo entre marzo a mayo, siendo el mes de abril el más lluvioso con un valor de precipitación de 154 mm/mes, el periodo más seco se presenta entre los meses de enero y febrero incluyendo diciembre, siendo el más bajo el mes de enero con una precipitación de 56 mm/mes, la estación El Orégano presenta un valor promedio mensual de precipitación de 95 mm/mes. En la Figura 3.8 se observa la distribución espacial de la precipitación media mensual multianual en el Municipio de Bolívar y en la Tabla 3.4 se presenta la Precipitación media mensual en el municipio de Bolívar.

**Tabla 3.4.** Precipitación media mensual Municipio de Bolívar

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
64,73	74,53	105,07	152,63	136,31	84,34	70,62	66,50	106,17	163,09	159,50	92,52

Con base en la Tabla 3.4 se observa que el municipio de Bolívar presenta un régimen de precipitaciones de tipo bimodal, registrando las mayores precipitaciones en los periodos comprendidos por los meses de marzo a mayo y por los meses de septiembre a noviembre, siendo el mes de octubre el de mayor precipitación con un valor de 163,09 mm/mes. Las precipitaciones más bajas se registran en el periodo comprendido entre los meses de junio a agosto y entre los meses de enero a febrero incluyendo el mes de diciembre, siendo el mes de enero el de menor precipitación con un valor de 64,73 mm/mes. El Municipio de Bolívar presenta un valor promedio mensual de precipitación de 106,33 mm/mes y una precipitación anual de 1276 mm/año.



**Figura 3.8** Mapa de distribución espacial de la precipitación mensual multianual Municipio de Bolívar

**Fuente:** elaboración propia

### 3.1.9.2. *Precipitaciones máximas diarias*

Para la determinación de las máximas precipitaciones para 24 horas, 48 horas y 72 horas se consideró toda la serie de registros diaria de las estaciones localizadas en la zona de estudio, asumiendo que como se cuenta con información diaria, la estimación de la precipitación máxima de 48 horas es el máximo valor de precipitación acumulada durante 2 días y para el caso de las precipitaciones máximas para 72 horas es el valor máximo de precipitación acumulada durante 3 días. Con base en lo anterior se obtuvieron los siguientes registros (ver Tabla 3.5).

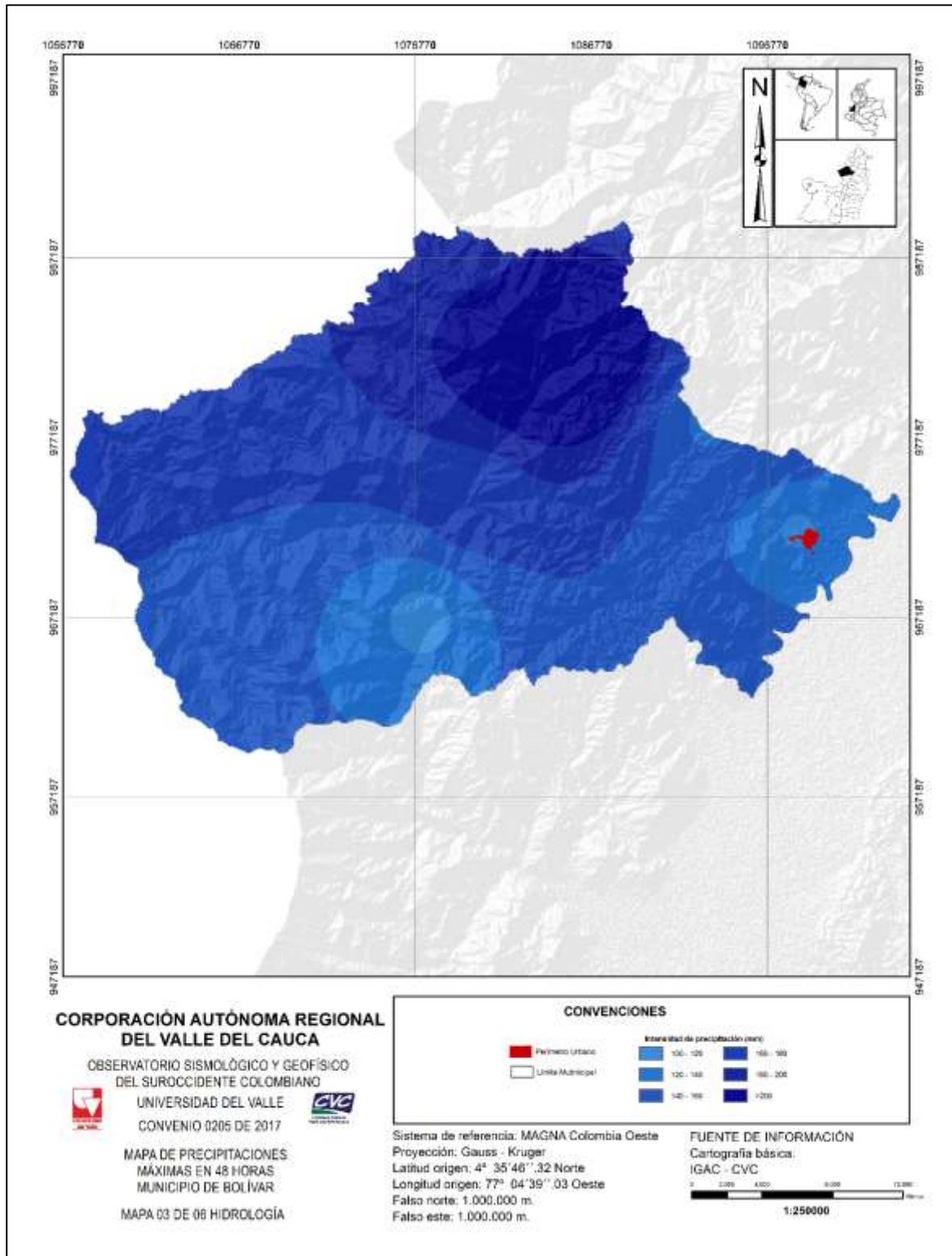
**Tabla 3.5.** Precipitaciones máximas para 24 horas, 48 horas y 72 horas con información de las estaciones localizadas en inmediaciones del Municipio de Bolívar.

ESTACIÓN	AÑOS DE REGISTROS	P24	P48	P72	ESTACIÓN	AÑOS DE REGISTROS	P24	P48	P72
Bolívar	56	115	117	140	El Aguacate	42	150	170	186
Lituania	51	133	179	194	El Lucero	42	102	180	195
Cent Admo La Unión	49	116	126	136	El Orégano	42	98	114	124
Patumac	48	120	136	150	Candelaria	39	110	174	212
Sabanazo	46	77	107	119	Betania	38	294	339	363
Isugu	46	107	120	143	La María	35	118	135	190
El Retiro	46	131	135	164	Pto Nuevo	35	110	135	165
Montecristo	46	125	142	183	Higuerón	35	86	126	133
El Porvenir	50	165	182	184	Higueroncito	35	155	186	186
La Arboleda	43	126	158	192	Tierrablanca	37	90	110	116
La Despensa	42	114	122	132					

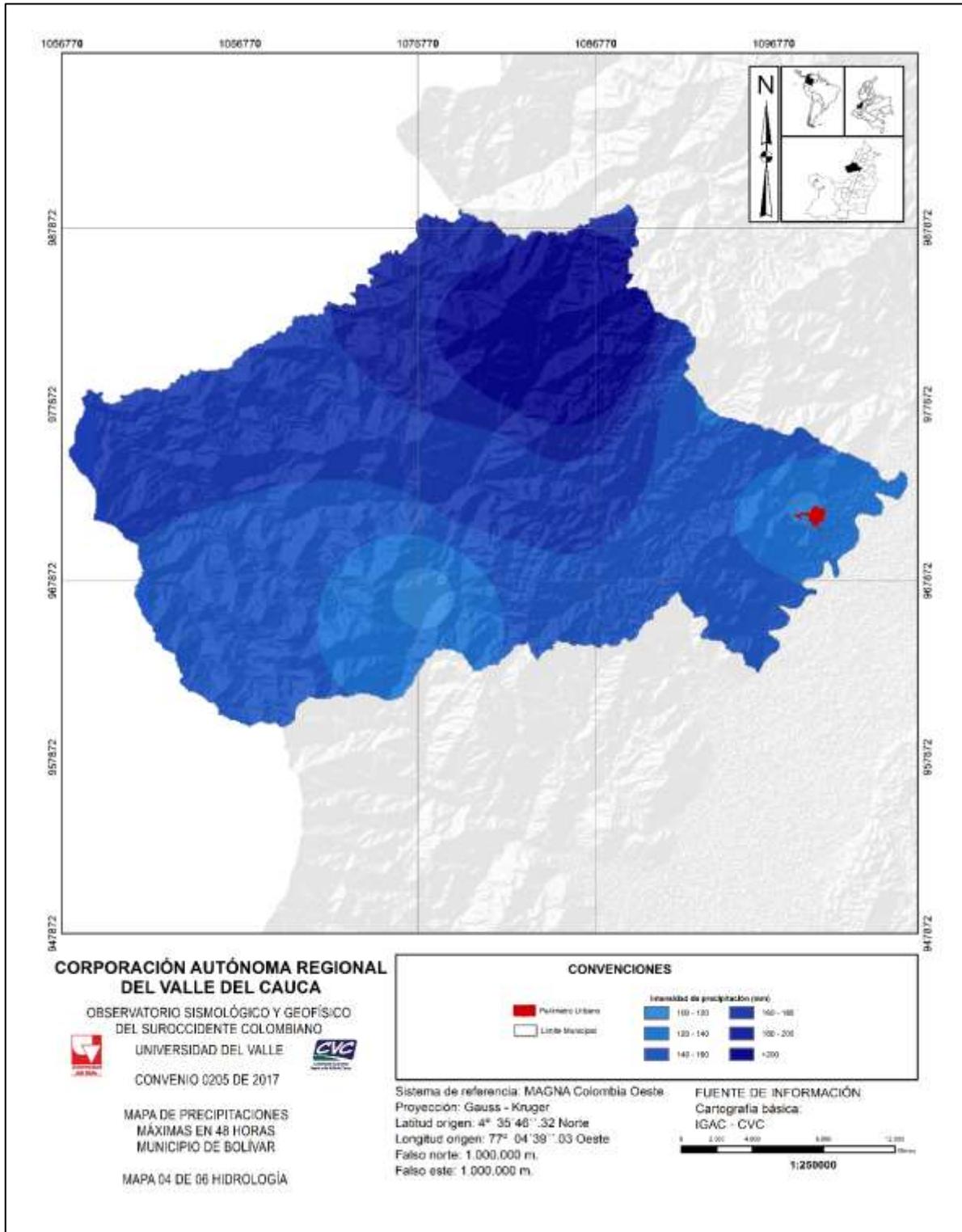
**Nota:** (P24) Precipitación Máxima en 24 horas, (P48) Precipitación Máxima en 48 horas y (P72) Precipitación Máxima en 72 horas.

**Fuente:** elaboración propia

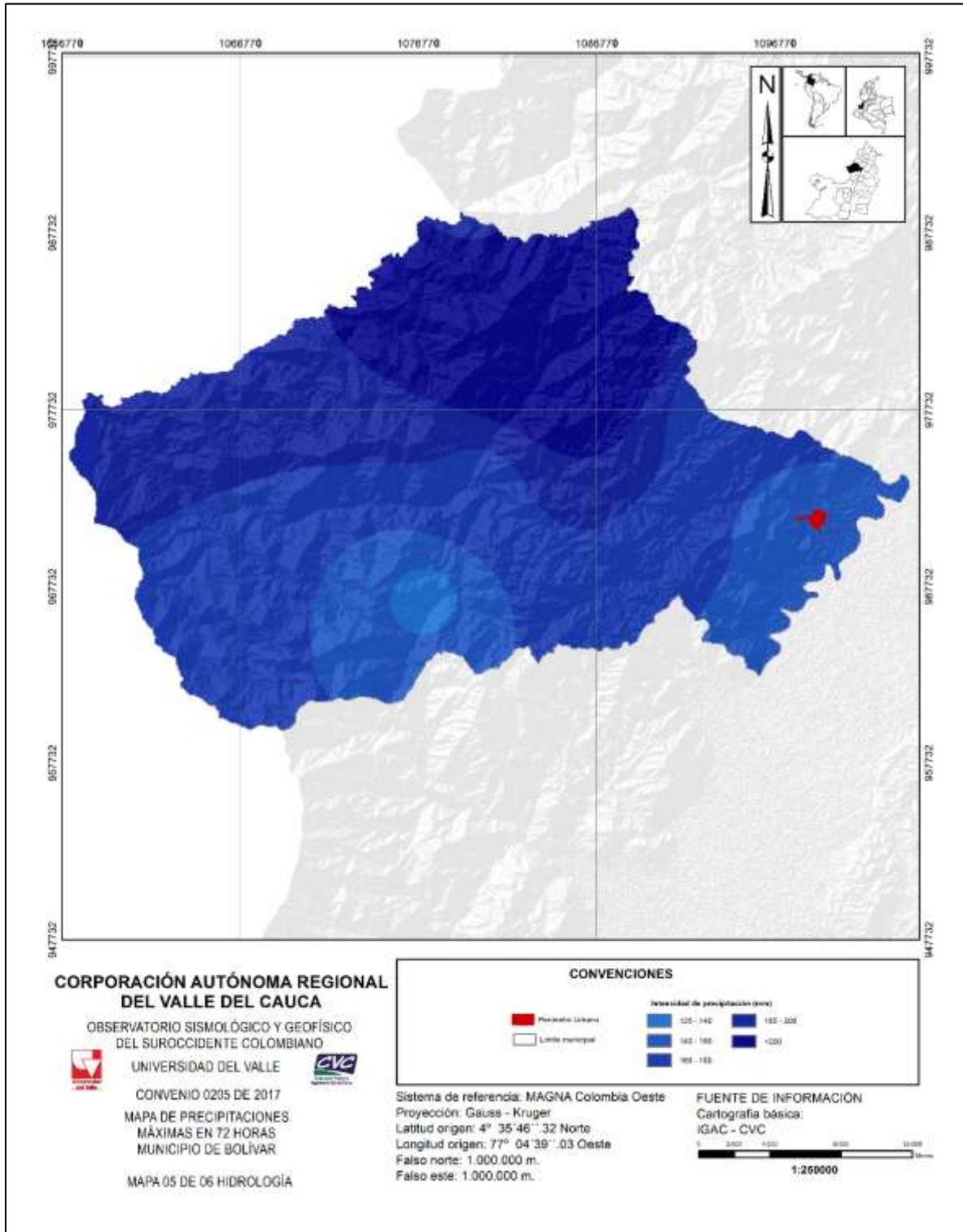
En las Figura 3.9, 3.10 y 3.11 se presentan los mapas con la distribución espacial de la precipitación máximas para 24 horas, 48 horas y 72 horas en el Municipio de Bolívar, respectivamente.



**Figura 3.9.** Mapa de distribución espacial de la precipitación máxima en 24 horas municipio de Bolívar  
**Fuente:** elaboración propia



**Figura 3.10.** Mapa de distribución espacial de la precipitación máxima en 48 horas municipio de Bolívar  
**Fuente:** elaboración propia



**Figura 3.11.** Mapa de distribución espacial de la precipitación máxima en 48 horas municipio de Bolívar  
**Fuente:** elaboración propia

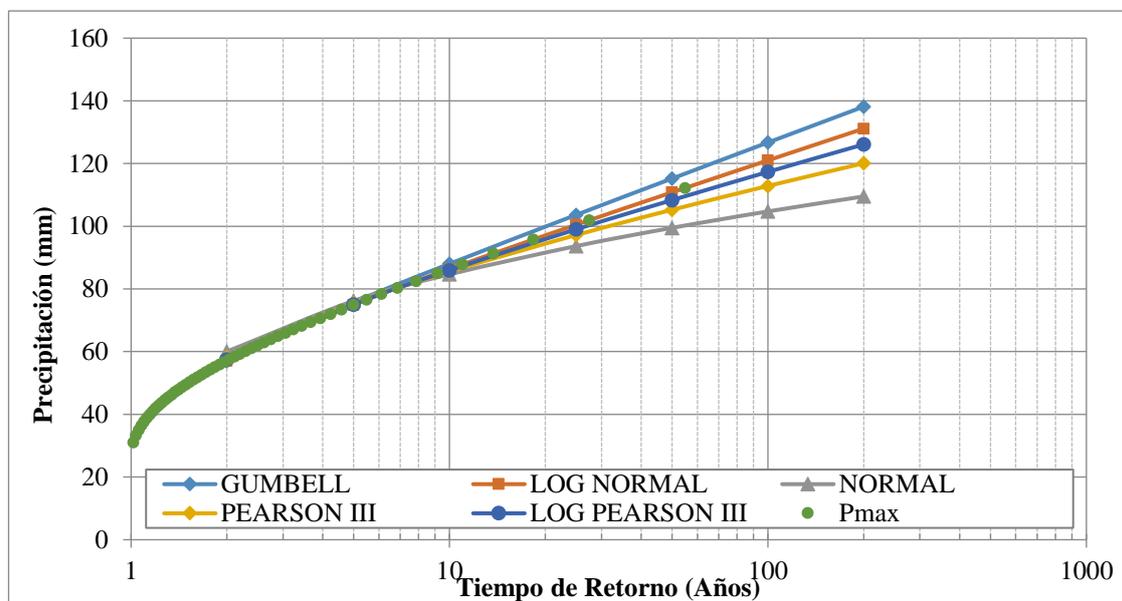
### 3.1.9.3. Precipitaciones máximas asociadas a diferentes periodos de retorno

Con base en las series de precipitaciones máximas instantáneas anuales se calcularon las precipitaciones extremas en las estaciones en estudio, para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años para cada uno de sus periodos de registros, aplicando un análisis de frecuencia utilizando como factor de frecuencia las distribuciones de Normal, Log Normal, Pearson III, Log Pearson y Gumbel. En la Tabla 3.6 y la Figura 3.12 se presentan los resultados de la probabilidad de ocurrencia de la precipitación máxima en 24 horas (mm) registrados en la estación Bolívar, para los diferentes periodos de retorno. Gráficamente se puede observar que la función de probabilidad que mejor se ajusta a los datos de precipitaciones máximas reportados en la estación es la Log Normal.

**Tabla 3.6.** Probabilidad de ocurrencia de precipitaciones máximas (mm) para diferentes periodos de retorno. Estación Bolívar

PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	NORMAL	LOG NORMAL	PEARSON III	LOG PEARSON III	GUMBELL
2	0,500	60,04	57,09	58,18	57,49	57,01
5	0,667	76,20	74,91	75,39	75,05	75,67
10	0,800	84,65	86,36	85,51	85,95	88,03
25	0,900	93,67	100,48	97,20	99,02	103,63
50	0,980	99,49	110,81	105,25	108,34	115,21
100	0,990	104,73	121,01	112,84	117,34	126,71
200	0,995	109,52	131,16	120,09	126,12	138,16
R <sup>2</sup>		0.6026	0,7048	0,6583	0,6849	0,7159

Fuente: elaboración propia



**Figura 3.12.** Precipitaciones máximas para los diferentes periodos de retorno. Estación Bolívar

Fuente: elaboración propia

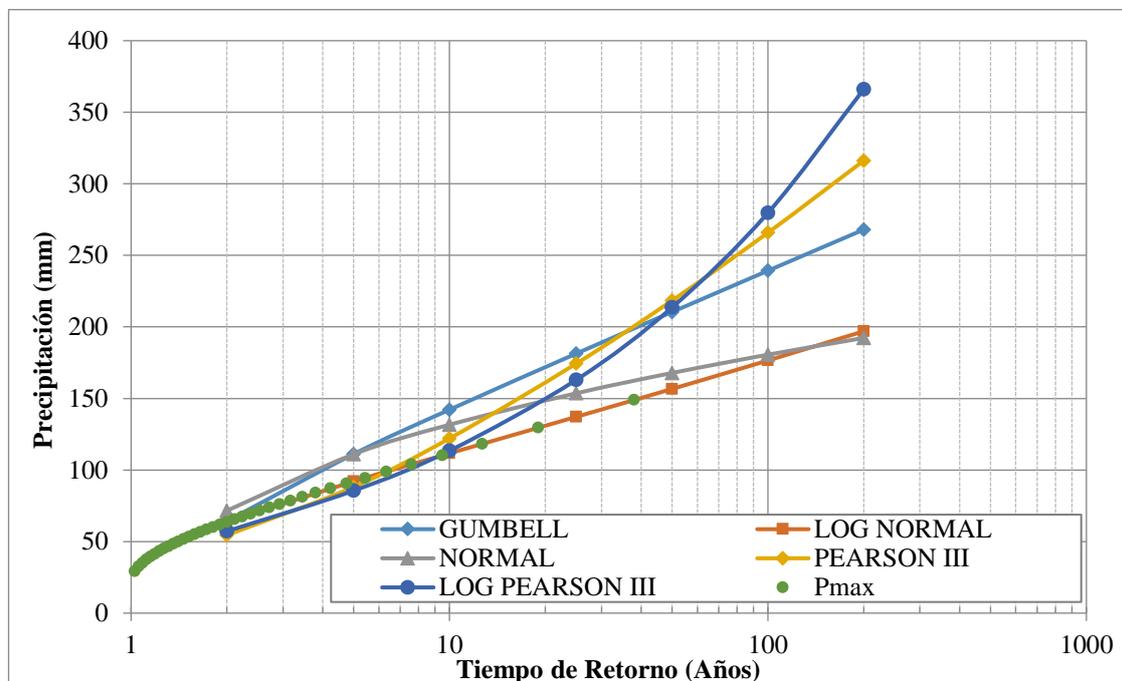
En la Tabla 3.7 y Figura 3.13 se presentan los resultados de la probabilidad de ocurrencia de la precipitación máxima en 24 horas (mm) registrados en la estación Betania, para los diferentes

periodos de retorno. Gráficamente se puede observar que la función de probabilidad que mejor se ajusta a los datos de precipitaciones máximas reportados en la estación es la Log Normal.

**Tabla 3.7.** Precipitaciones máximas para los diferentes periodos de retorno. Estación Betania

PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	NORMAL	LOG NORMAL	PEARSON III	LOG PEARSON III	GUMBELL
2	0,500	71,59	63,65	54,52	57,25	64,35
5	0,667	111,02	92,06	88,17	85,57	111,18
10	0,800	131,64	111,66	122,08	113,46	142,19
25	0,900	153,63	137,18	174,37	162,99	181,36
50	0,980	167,83	156,68	218,45	213,63	210,42
100	0,990	180,60	176,57	265,85	279,70	239,27
200	0,995	192,29	196,98	316,19	366,16	268,01
R <sup>2</sup>		0.6026	0,7387	0,8164	0,9098	0,7159

Fuente: elaboración propia



**Figura 3.13.** Precipitaciones máximas para los diferentes periodos de retorno. Estación Betania

Fuente: elaboración propia

En la Gráficamente se puede observar que la función de probabilidad que mejor se ajusta a los datos de precipitaciones máximas reportados en la estación es la Log Normal.

Tabla 3.8 y Figura 3.14, se presentan los resultados de la probabilidad de ocurrencia de la precipitación máxima en 24 horas (mm) registrados en la estación El Retiro, para los diferentes periodos de retorno. Gráficamente se puede observar que la función de probabilidad que mejor se ajusta a los datos de precipitaciones máximas reportados en la estación es la Log Normal.

**Tabla 3.8.** Probabilidad de ocurrencia de Precipitaciones máximas (MM) para los diferentes periodos de retorno. Estación El Retiro

PERÍODO DE RETORNO (AÑOS)	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	NORMAL	LOG NORMAL	PEARSON III	LOG PEARSON III	GUMBELL
---------------------------	----------------------------	--------	------------	-------------	-----------------	---------

2	0,500	59,50	56,63	53,72	54,60	56.24
5	0,667	77,11	73,32	72,68	72,07	76.87
10	0,800	86,32	83,94	86,66	85,23	90.52
25	0,900	96,14	96,95	105,12	103,75	107.78
50	0,980	102,49	106,41	119,19	119,02	120.58
100	0,990	108,19	115,70	133,37	135,64	133.28
200	0,995	113,41	124,91	147,71	153,79	145.94
R <sup>2</sup>		0.6026	0.7000	0.7422	0.7907	0.7159

Fuente: elaboración propia

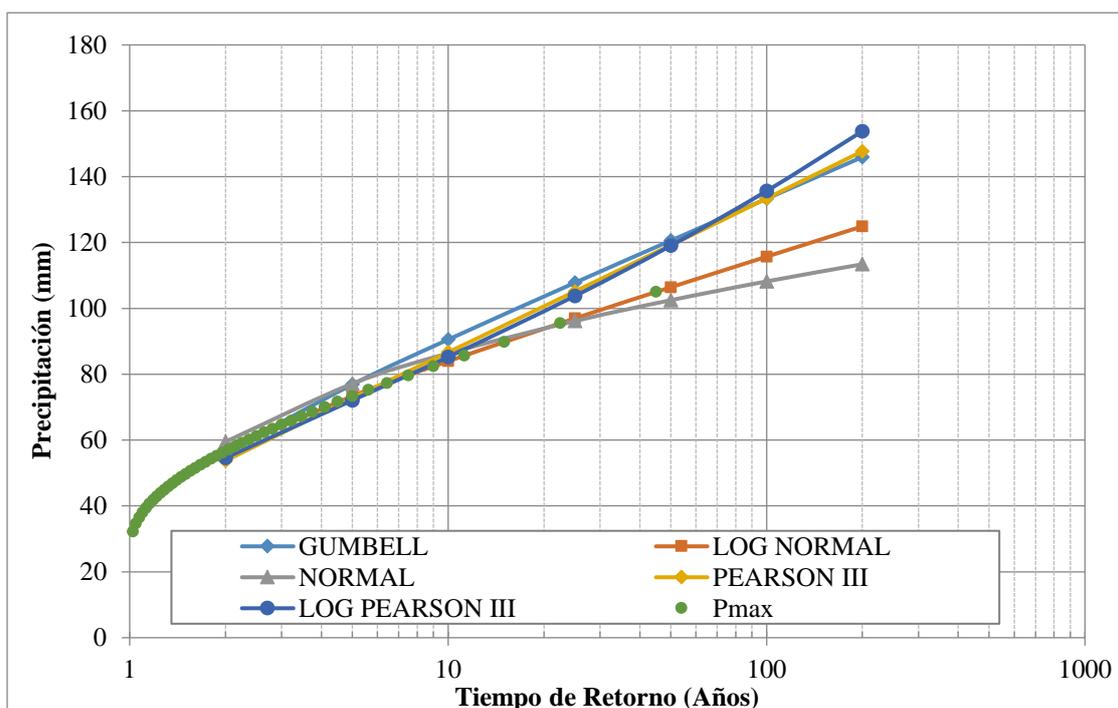


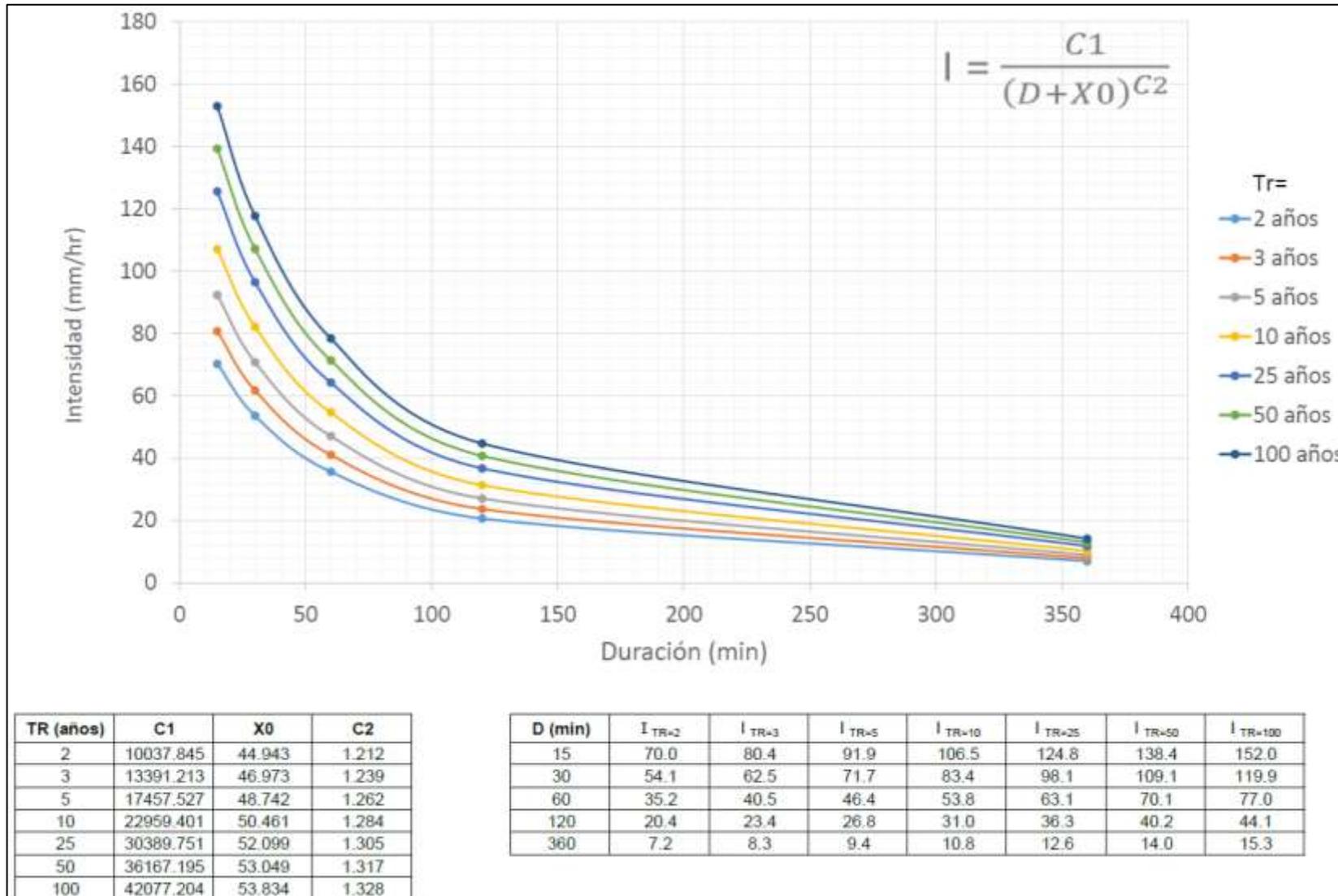
Figura 3.14. Precipitaciones máximas para los diferentes periodos de retorno. Estación El Retiro

Fuente: elaboración propia

#### 3.1.9.4. Curvas de Intensidad Frecuencia y Duración IFD y Tormenta de Diseño

Para definir la lluvia de diseño se recurre a las “CURVAS DE INTENSIDAD-FRECUENCIA-DURACION – IFD de la estación Centro Administrativo La Unión”, esto con el objetivo de definir una curva IDF necesaria para el diseño hidrológico y generación del hietograma de diseño (véase la Figura 3.15 curvas IFD para las estaciones climatológicas ordinarias Centro administrativo La Unión). Con las curvas IDF del IDEAM para la estación Centro Administrativo La Unión se Generó los hietogramas de precipitación para diferentes periodos de retorno empleando la metodología de bloque alterno (Chow; Maidment y Mays, 1994), la cual se basa en la intensidad de la precipitación para diferentes tiempos de duración. El hietograma es la representación de la distribución temporal de la intensidad de las precipitaciones, para el caso de estudio se supone una lluvia de 200 minutos de duración, para una intensidad asociado a un Tr 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. En la Figura 3.16 se presenta el hietograma de diseño de precipitación para diferentes periodos de retorno para la estación Centro Administrativo de La Unión. En la Tabla 3.9 se presenta los valores máximos de

precipitación con intervalo de tiempo de 10 minutos para diferentes periodos de retorno, construidas a partir de las Curvas IFD de la estación Centro Administrativo La Unión.



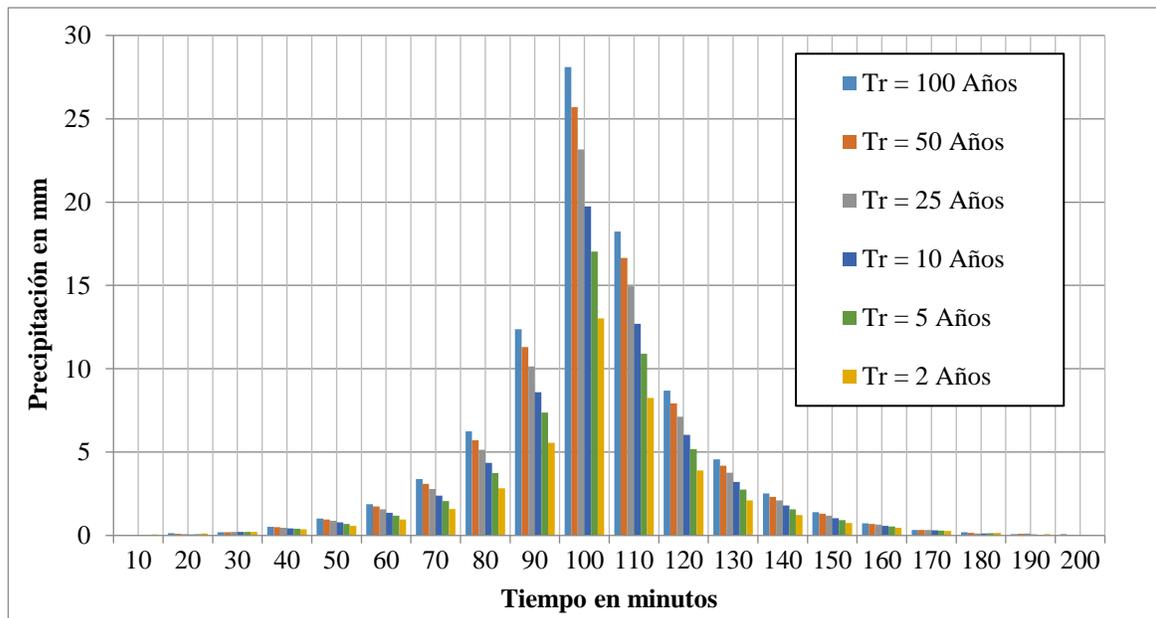
**Figura 3.15.** Curva de intensidad frecuencia y duración con datos de la Estación Centro Administrativo La Unión

Fuente: IDEAM, 2016.

**Tabla 3.9.** Valores de precipitaciones máximas con intervalos de tiempo de 10 minutos, construidas a partir de las Curvas IFD. Estación Centro Administrativo La Unión

DURACIÓN (min)	Tr = 2 Años	Tr = 3 Años	Tr = 5 Años	Tr = 10 Años	Tr = 25 Años	Tr = 50 Años	Tr = 100 Años
10	0,057	0,031	0,004	0,030	0,038	0,018	0,006
20	0,122	0,104	0,087	0,065	0,073	0,105	0,139
30	0,217	0,213	0,210	0,209	0,206	0,205	0,197
40	0,360	0,378	0,400	0,430	0,467	0,496	0,515
50	0,585	0,638	0,701	0,782	0,884	0,961	1,026
60	0,953	1,067	1,198	1,366	1,578	1,737	1,879
70	1,598	1,819	2,071	2,393	2,800	3,105	3,382
80	2,835	3,259	3,742	4,357	5,131	5,712	6,249
90	5,550	6,404	7,370	8,596	10,141	11,298	12,378
100	13,023	14,907	17,038	19,742	23,153	25,703	28,105
110	8,245	9,494	10,906	12,697	14,955	16,643	18,227
120	3,903	4,500	5,177	6,038	7,122	7,935	8,690
130	2,109	2,414	2,762	3,206	3,766	4,186	4,571
140	1,228	1,387	1,570	1,804	2,098	2,320	2,519
150	0,745	0,824	0,917	1,035	1,185	1,298	1,396
160	0,460	0,493	0,533	0,585	0,650	0,700	0,740
170	0,281	0,287	0,295	0,307	0,322	0,334	0,338
180	0,165	0,153	0,142	0,129	0,114	0,149	0,187
190	0,087	0,064	0,041	0,065	0,113	0,101	0,084
200	0,033	0,004	0,027	0,013	0,023	0,050	0,080

Fuente: elaboración propia



**Figura 3.16.** Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para una duración de 200 min. Estación Centro Administrativo La Unión

Fuente: elaboración propia

## 4. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

Para efectuar la modelación de los diferentes eventos catastróficos de inundaciones en el municipio de Bolívar fue necesario determinar las condiciones hidrológicas en las fronteras establecidas en el modelo matemático. En las fronteras superiores de los tramos a modelar del río Pescador se estimaron, considerado los caudales máximos reportados en las estación hidrométrica la Molina y en los Zanjones Guabinero y El Rincón se estimaron, mediante modelación matemática (modelo hidrológico HEC-HMS), los caudales para los diferentes periodos de retorno definidos en la metodología para la determinación de la amenaza para los dos fenómenos (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años).

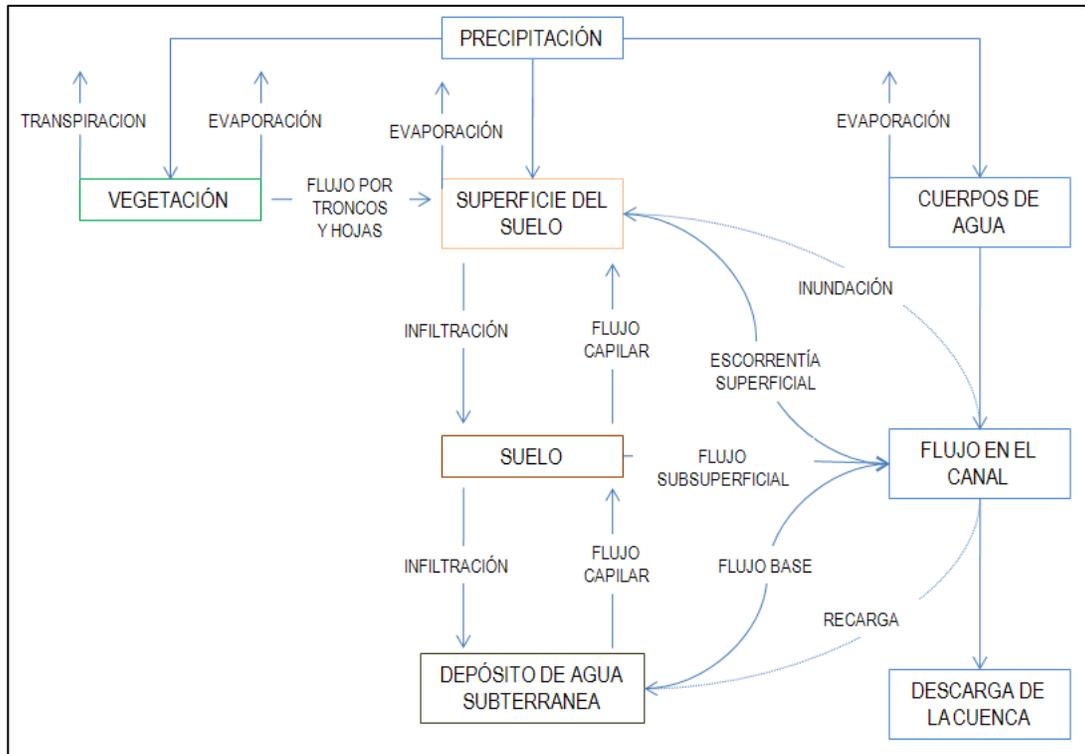
### 4.1. GENERALIDADES DEL MODELO HIDROLÓGICO IMPLEMENTADO PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO EN LOS ZANJONES GUABINERO Y EL RINCÓN

Para realizar el cálculo de los caudales máximos de crecidas de las corrientes Zanjón Guabinero y Zanjón El Rincón que atraviesan el casco urbano del municipio de Bolívar se consideró como punto de cierre de las cuencas a analizar los sitios aguas arriba del inicio de la zonas urbana y de expansión del municipio de Bolívar; para tal fin se implementó el modelo hidrológico HEC – HMS versión 4.2.1, el cual se fundamenta en la relación lluvia – escorrentía que permite calcular los caudales máximos en función de la profundidad total de precipitación, los parámetros de forma (morfométrica de las unidades de cuenca) y de los parámetros de abstracción. A continuación, se presentan algunas generalidades del modelo HEC – HMS.

#### 4.1.1. Descripción del modelo hidrológico

Un modelo hidrológico es una herramienta que permite representar la realidad de una manera simplificada y que posee un valor predictivo útil para la utilización de los recursos hídricos; además, sirve como orientación en la toma de decisiones para la solución de problemas que se puedan presentar en una zona determinada.

Dentro de los modelos de simulación hidrológica usados a nivel mundial se encuentra el HEC-HMS 4.2.1, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, el cual ha diseñado los modelos hidráulicos e hidrológicos con mayor reconocimiento y aceptación internacional. El HEC-HMS 4.2.1 (Hydrologic Model Sistema versión 4.2.1) fue diseñado para simular la escorrentía superficial de respuesta de una cuenca a la precipitación mediante la representación de la cuenca como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos (ver Figura 4.1), cada uno de las cuales refleja un aspecto del proceso precipitación-escorrentía a partir de parámetros físicos e hidrológicos.



**Figura 4.1.** Esquema de las componentes hidrológicas e hidráulicas que utiliza el modelo HEC-HMS 4.2.1 para representar una cuenca hidrográfica.

**Fuente.** Adaptado de HEC, 2000

Esta herramienta puede clasificarse como un modelo hidrológico determinístico, de tipo evento y/o continuo, distribuido y/o agregado y de propósito general. En HEC-HMS la cuenca se describe a través de una serie de elementos interconectados (subcuencas, canales de tránsito, nodos, fuentes y sumideros). Entre los múltiples procedimientos hidrológicos disponibles en HEC-HMS para transformar la precipitación en escorrentía, en este estudio, por su buen desempeño en análisis de eventos, se han seleccionado los métodos del número de curva para la estimación de la precipitación efectiva, el hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos para la transformación de precipitación de excesos en escorrentía directa y el método de tránsito de Lang para el tránsito de la creciente entre tramos.

#### 4.1.2. Datos de entrada del modelo HEC – HMS

Dentro de los requerimientos de información o datos de entrada del modelo hidrológico HEC - HMS se encuentra la siguiente:

- Cartografía básica (red hídrica, curvas de nivel y parteaguas).
- Cartografía temática (uso actual del suelo, tipo de suelos).
- Perfiles del suelo si existen estudios predios.
- Información precipitación total diaria de las estaciones más cercanas.
- Hietogramas de precipitación.

- Información de aguas subterráneas como láminas de agua y coeficientes de recarga, número de depósitos.
- Información de la velocidad del flujo en el canal o aforos.

## **4.2. ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO EN EL ZANJÓN GUABINERO**

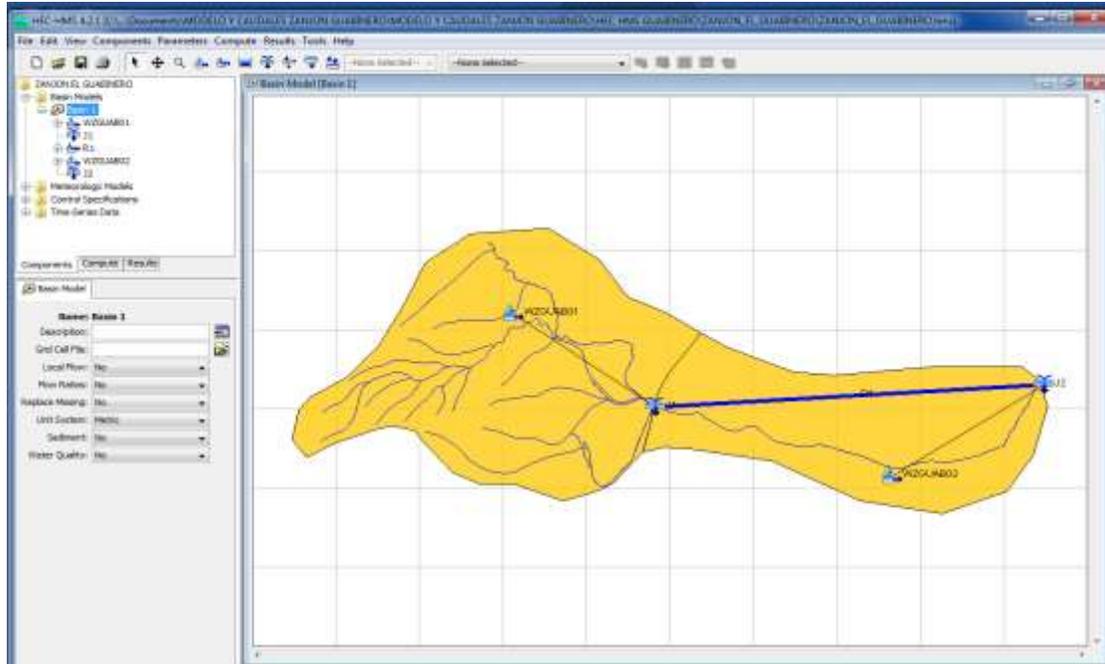
Con el fin de evaluar los caudales máximos en el Zanjón Guabinero se consideró como punto de cierre de la Unidad de análisis un sitio del río localizado aguas arriba de donde inicia su recorrido por el casco urbano y la zona de expansión y considerando tiempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Definida la zona de estudio, se recolectó y procesó la información requerida y necesaria para la estimación de caudales a partir de la utilización de la modelación hidrológica, una vez evaluada y analizada la información; se procedió a la esquematización de la cuenca, la evaluación de las características morfométricas e hidrológicas y la corrida del modelo hidrológico como se muestra a continuación.

### **4.2.1. Esquematización de la Unidad Hidrográfica del Zanjón Guabinero**

Para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de determinada cuenca es preciso, en primer lugar, llevar a cabo una representación esquemática de la misma (basin model), que refleje, de la mejor manera posible, su morfología y las características de su red de drenaje. En la Figura 4.2 se presenta un esquema general de la cuenca en estudio.

### **4.2.2. Parámetros morfométricos de las unidades de cuenca en que se dividió el Zanjón Guabinero.**

Se realizó el trazado de la línea divisoria del Zanjón Guabinero hasta el sitio localizado aguas arriba del casco urbano del Municipio de Bolívar. En general, se conoce que las áreas de drenaje están determinadas por una línea imaginaria que une los puntos más altos y encierran las áreas de confluencia, estas líneas de divorcio de aguas que separan una cuenca de las circundantes se denominan divisorias de aguas o parte aguas. A partir de los planos topográficos disponibles se procedió a determinar el área de drenaje correspondiente, la cual se dividió en 2 unidades hidrológicas. Una vez se definió el parte aguas del río Cáceres y sus respectivas unidades, se procedió al cálculo de algunas características morfométricas, tales como, el área de cada subcuenca, la longitud del cauce principal, el valor de las cotas aguas arriba y aguas abajo del cauce, la pendiente del cauce principal y los tiempos de concentración.



**Figura 4.2.** Esquema del Zanjón Guabinero para el modelo HEC-HMS

**Fuente:** elaboración propia

- Pendiente del cauce método de las elevaciones extremas

El método de las elevaciones extremas consiste en determinar el desnivel entre el punto más elevado y el punto más bajo del río en estudio y luego dividirlo entre la longitud del mismo cauce.

$$S = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L} \times 100$$

Donde:

S: Pendiente media del cauce (%).

$H_{\max}$ : Altitud máxima del cauce (m).

$H_{\min}$ : Altitud mínima del cauce (m).

L: Longitud del cauce (m).

- Tiempos de concentración mediante la fórmula de Témez

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda en llegar a la sección de salida la gota de lluvia caída en el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca. Otra definición es el tiempo que toma el agua en llegar desde el punto más alejado de la cuenca al punto de diseño y se determina mediante fórmulas experimentales. La fórmula de Témez calcula el tiempo de concentración,  $T_c$ , en minutos, según la expresión:

$$t_c = 0.3 \left( \frac{L}{J^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Donde:

$T_c$ : Tiempo de concentración, en horas.

- L: Longitud del cauce principal de la cuenca, en kilómetros.  
J: Diferencia entre las dos elevaciones extremas de la cuenca, en metros, dividida por L  
(es decir, la pendiente promedio del recorrido principal en m/m).

En la Tabla 4.1 se presentan los valores morfométricos evaluados para cada una de las unidades de cuenca en que se dividió la Unidad Hidrológica del Zanjón Guabinero.

**Tabla 4.1.** Características morfométricas de las Unidades Hidrológicas en que se dividió el Zanjón Guabinero

CODIFICACIÓN CUENCAS	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (m)	LONGITUD CAUCE (km)	ALTURA MÁXIMA (msnm)	ALTURA MÍNIMA (msnm)	DIFERENCIA DE ALTURA ΔH (m)	PENDIENTE MEDIA S (m/m)	TC FORMULA TÉMEZ (min)
WZGUAB01	2,52	2913	2,91	1530	931	599	0,21	54,79
WZGUAB02	1,73	2752	2,75	931	919	12	0,00	109,10

**Fuente:** elaboración propia

#### 4.2.3. Evaluación de parámetros hidrológicos Zanjón Guabinero

Los parámetros hidrológicos a calcular son los parámetros que requieren los modelos internos aplicados por el HEC-HMS utilizados para la determinación del proceso de transferencia lluvia-caudal para el caso de modelación de eventos, como lo es el modelo de pérdidas (SCS Número de Curva), el modelo de transformación de excesos de lluvia en escorrentía (SCS Hidrograma Unitario), el análisis del flujo base (método de recesión) y el tránsito de los hidrogramas a través de los cauces principales (LAG). Estos parámetros hidrológicos se analizaron espacialmente implementando herramientas de SIG, a partir de los mapas temáticos de la zona de estudio y el modelo digital de elevaciones -DEM.

##### 4.2.3.1. Modelo de pérdidas (SCS Número de Curva)

Para el cálculo del Número de Curva, CN, en las unidades de cuenca en que se dividió el río Cáceres se utilizaron los mapas temáticos de uso actual del suelo y tipo de suelo, información temática proporcionada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, mapas temáticos los cuales fueron cruzados en Arcgis 10.2 para obtener polígonos de igual tipo de suelo y cobertura dentro de la zona de análisis; posteriormente se realizó una caracterización de los suelos presentes en la subcuenca, donde se determinó la pendiente, profundidad efectiva, textura y drenaje natural para cada uno de los tipos de suelos presentes en la Unidad Hidrológica del Zanjón Guabinero; con esta información a cada suelo característico se le asignó un grupo hidrológico de suelo a cada uno de los polígonos mediante la utilización del software Arcgis 10.2. Finalmente, con la información de cobertura y grupo hidrológico de suelos se determinó el valor de CN, el cual fue ponderado en cada una de las unidades en que se dividió el Zanjón Guabinero. Para la caracterización de los suelos del Zanjón Guabinero hasta el sitio de interés hídrico y unidades hidrológicas se utilizó como información base el estudio “Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Valle del Cauca”, realizado en el año 2004 por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC con la participación de entidades como la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC. La descripción o caracterización de los suelos presentes en la zona de estudio corresponde a una actualización de los levantamientos de suelos

realizados por la subdirección de Agrología del IGAC en los años 1969, 1971, 1977, 1980, 1981, 1994 y 1995, donde se realizó una fotointerpretación de fotografías aéreas y un análisis de suelos, considerando los aspectos fisiográficos más sobresalientes, como son: el relieve, la pendiente, el drenaje, el uso de la tierra y la descripción de los perfiles mediante la realización de calicatas, donde se describen la morfología y las características físicas y químicas del suelo. (IGAC, CVC, 2004). En forma inicial, los suelos son agrupados en categorías, dependientes del potencial de escorrentía y de su capacidad de infiltración. La agrupación de los suelos se efectúa teniendo en cuenta la siguiente clasificación (Chow, Maidment y Mays, 1994):

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

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

**Grupo C:** Suelos con baja infiltración, aunque estén completamente húmedos, y consisten en suelos que tienen una capa que impide el movimiento descendente de agua. Son suelos con textura moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una baja razón de transmisión de agua (1.27 a 3.81 mm/hora). Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.

**Grupo D:** Suelos con un alto potencial de escorrentía, ellos tienen una muy baja capacidad de infiltración, aun en condiciones de total humedad. Consisten principalmente de suelos arcillosos con un alto potencial de expansión, suelos con nivel freático permanentemente alto, suelos con una capa de arcillas en la superficie, suelos poco profundos sobre materiales impermeables cercanos. Estos suelos tienen una razón de transmisión de agua muy baja (0.0-1.27 mm/hora). Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos. En la Tabla 4.2 se presenta la cobertura actual del suelo en la en la Unidad Hidrológica del Zanjón Guabinero hasta sitio de interés hídrico y en la Tabla 4.3 se presenta la caracterización de los suelos de la misma cuenca.

**Tabla 4.2.** Cobertura actual del suelo en la Unidad Hidrológica del Zanjón Guabinero

COBERTURA	ÁREA (m <sup>2</sup> )	PORCENTAJE (%)
Zonas urbanas continuas	341634	8.03
Zonas urbanas discontinuas	48360	1.14
Otras superficies artificiales ext. de magnesita	427722	10.06
Caña de Azúcar	15159	0.36
Misceláneo de Árboles frutales	272211	6.40
Vid (Uva)	307205	7.22
Matarratón	84294	1.98
Maíz	531693	12.50

COBERTURA	ÁREA (m <sup>2</sup> )	PORCENTAJE (%)
Melón	60960	1.43
Zapallo	56289	1.32
Maracuyá	151302	3.56
Pasto cultivado enmalezado	668055	15.71
Bosque mixto denso alto de tierra firme	7510	0.18
Arbustal y matorral denso alto de tierra firme	80535	1.89
Herbazal natural abierto subxerofítico	1175414	27.64
Estanques artificiales	22169	0.52
Ríos	2098	0.05

Fuente: elaboración propia

**Tabla 4.3.** Suelos característicos y determinación del grupo hidrológico Unidad Hidrológica del Zanjón Guabinero

CODIFICACIÓN SUELOS 2004	NOMBRE SUELO	PROFUNDIDAD EFECTIVA	TEXTURA	DRENAJE	GRUPO HIDROLÓGICO
(MN-PL)a	Complejo Manuelita - Palmira	Profunda 140 cm (V32), Muy Profunda 150 cm (V65)	Franca de los 0 a los 30 cm (V32), Franco Arcillosa de los 0 a los 80 cm (V65)	Bien drenados (V32), Bien drenados (V65)	B
(RJ-PO)ar	Complejo Rio de Janeiro - Palmasola	Superficial 45 cm, lim. De profun. Efect. Nivel freático (VA12), Superficial 28 cm, lim. De profun. Efect. Nivel freático (V123).	Arcillosa de 0 - 130 cm (VA12). Arcillosa de 0 - 110 cm (V123).	Pobrementemente drenados.	D
BUaxr	Consociación Burriga	Profunda 150 cm	Arcillosa de 0 a 150 cm	Pobrementemente drenados	D
CKa	Consociación Coke	Profunda 150 cm	Arcillosa de 0 a 40 cm	Bien drenados	B
MRff3	Complejo Tierras Cárcavas - Lithuc Ustorthents	Superficial (PO-36)	Franco Arenosa de los 0 a los 30 cm (PO-36)	Bien drenados	B
PLa	Consociación Palmira	Muy Profunda 150 cm (V65)	Franco Arcillosa de los 0 a los 80 cm (V65)	Bien drenados	B
Río Cauca	Río Cauca	-	-	-	D

Fuente: elaboración propia

Los valores de CN se presentan en las Tabla 4.4 y 4.9. Para una cuenca constituida por varios tipos de suelos y con diferentes usos de la tierra se puede calcular un CN compuesto (Chow; Maidment y Mays, 1994).

**Tabla 4.4.** Valores de CN para varios tipos de uso del suelo

DESCRIPCIÓN DEL USO DE LA TIERRA		GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO			
		A	B	C	D
Tierra cultivada <sup>1</sup> : sin tratamientos de conservación con tratamientos de conservación		72	81	88	91
		62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres condiciones óptimas		68	79	86	89
		39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas		30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas cubierta buena <sup>2</sup>		45	66	77	83
		25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc. óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%		39	61	74	80
		49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial <sup>3</sup> :					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable <sup>4</sup>				
1/8 acre o menos	65	78	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados <sup>5</sup>		98	98	98	98
grava		76	85	89	91
tierra		72	82	87	89

Fuente: elaboración propia

**Tabla 4.5.** Valores de CN para varios tipos de uso del suelo en cuencas

USO DE LA TIERRA O COBERTURA	CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE	CN POR GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO			
		A	B	C	D
Bosque (sembrados y cultivos)	Espaciado o de baja transpiración	45	66	77	83
	Normal	36	50	73	79
	Denso o de alta transpiración	25	55	70	77
Caminos	De tierra	72	82	87	89
	Superficie dura	74	84	90	92
Bosque naturales	Muy espaciados o de baja transpiración	56	75	86	91
	Espaciados o de baja transpiración	46	68	78	84
	Normal	36	60	70	76
	Denso o de alta transpiración	26	52	62	69
	Muy denso o de alta transpiración	15	44	54	61

<sup>1</sup> Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, t 972, Cap. 9

<sup>2</sup> Una buena cubierta protegida por pastizales, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

<sup>3</sup> Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

<sup>4</sup> Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva. <sup>5</sup> En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva

USO DE LA TIERRA O COBERTURA	CONDICION DE LA SUPERFICIE	CN POR GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO			
		A	B	C	D
Bosque	Pobre	45	66	77	83
	Regular	36	60	73	79
	Bueno	30	55	70	77
Secanso (sin cultivo)	Surco recto	77	86	91	94
Cultivos de surco	Surco recto	70	80	87	90
	Surco en curvas a nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Cereales	Surco recto	64	76	84	88
	Surco en curvas a nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Leguminosas (sembradas con maquinaria o al voleo) potrero de rotación	Surco recto	62	75	83	87
	Surco en curvas a nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curvas a nivel, Pobre	47	67	81	88
	Curvas a nivel, Normal	25	59	75	83
	Curvas a nivel, Bueno	6	35	70	79
Potrero permanente	Normal	30	58	71	78
Superficie impermeable		100	100	100	100
Pastos, praderas, terrenos de hierbas--forraje continuo para pastar <sup>b</sup>	Pobre	68	79	86	89
	Regular	49	69	79	84
	Bueno	34	61	74	80
Pradera- hierba continua, protegida de corte y generalmente segada para forraje		30	58	71	78
Matorral -- matorrales-maleza - pasto mezclados con matorrales como el principal elemento	Pobre	48	67	77	83
	Regular	35	56	70	77
	Bueno	30	48	65	73
Combinación de bosque y pastos. (Granja de árboles o huerto)	Pobre	57	73	82	86
	Regular	43	65	76	82
	Bueno	32	58	72	79
Granjas--Edificaciones, vías, caminos, y lotes alrededor		59	74	82	86

**Fuente:** elaboración propia

Una vez se han establecido los valores de CN para cada tipo de suelo y tipo de cobertura vegetal se procede a estimar la magnitud de las áreas que poseen estas características con el fin de estimar el valor globalizado de este parámetro para la cuenca. En la Tabla 4.6 se presentan los parámetros hidrológicos requeridos por los modelos SCS Número de Curva y SCS Hidrograma Unitario.

- **Retención potencial máxima (S)**

Representa el valor máximo de lluvia que la cuenca puede absorber. El cálculo de este parámetro se realizó mediante la siguiente expresión para cada una de las unidades de codificación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde:

CN = Número de curva de escorrentía

- **Índice de abstracción inicial (Ia)**

Representa la cantidad de agua que queda en el terreno antes de empezar a escurrir agua. Se ha encontrado que el índice de abstracción inicial es aproximadamente el 20% de la retención potencial máxima (S); la relación empírica propuesta es:

$$Ia = 0,2 S$$

- **Tiempo de retardo (T<sub>lag</sub>)**

En el análisis de hidrogramas de escurrimiento, el retardo es el tiempo medido desde el centro de masa de la lluvia efectiva hasta el instante de ocurrencia del caudal máximo del hidrograma de escurrimiento. El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, con base en el estudio de muchos eventos de lluvia para un amplio rango de condiciones en cuencas hidrográficas, recomienda la siguiente relación empírica para calcular el tiempo de retardo en función del tiempo de concentración.

$$T_{lag} = 0,6 T_c$$

- **Modelo de recesión exponencial (Flujo base)**

El flujo base se estimó mediante el método de SCS Soil Conservation Service; es aplicable en zonas donde no se tiene información de aforos con detalle suficiente que permita la obtención de hidrogramas de lluvia. Con este método se obtuvo la serie de caudales medios a partir de la serie de precipitaciones medias de la estación más cercana; para este caso específico se utilizó la precipitación media mensual multianual de la estación Bolívar. El método del Número de Curva fue propuesto por U.S. Soil Conservation Service y se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de lluvia a partir de las características del suelo, uso del mismo y su cobertura vegetal, La expresión utilizada para el cálculo del aporte de agua superficial es:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

Donde:

Q: Escorrentía superficial en mm

P: Lluvia en mm

S: Máxima infiltración en mm

Para obtener el valor de S se utiliza el Número de Curva y la expresión:

$$S = \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

**Tabla 4.6.** Parámetros hidrológicos requeridos por los modelos SCS Número de Curva y SCS Hidrograma Unitario

CODIFICACIÓN CUENCAS	Tlag (min)	CN	S (mm)	Ia (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)
WZGUAB01	32,88	73,19	93,02	18,60	0,035
WZGUAB02	65,46	74,92	85,03	17,01	0,026

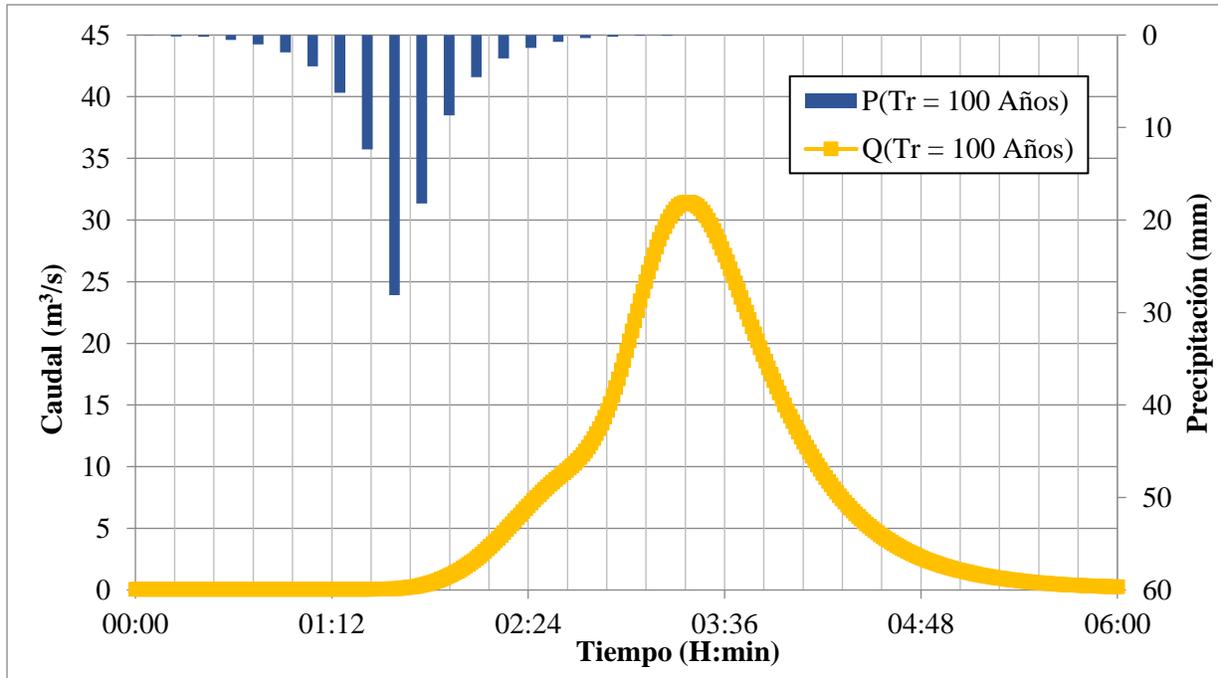
T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración; Tlag: Tiempo de demora = 0,60 T<sub>c</sub>; CN: Numero de curva; S: Máximo potencial de retención; I<sub>a</sub>: Abstracciones iniciales

#### 4.2.4. Modelo meteorológico

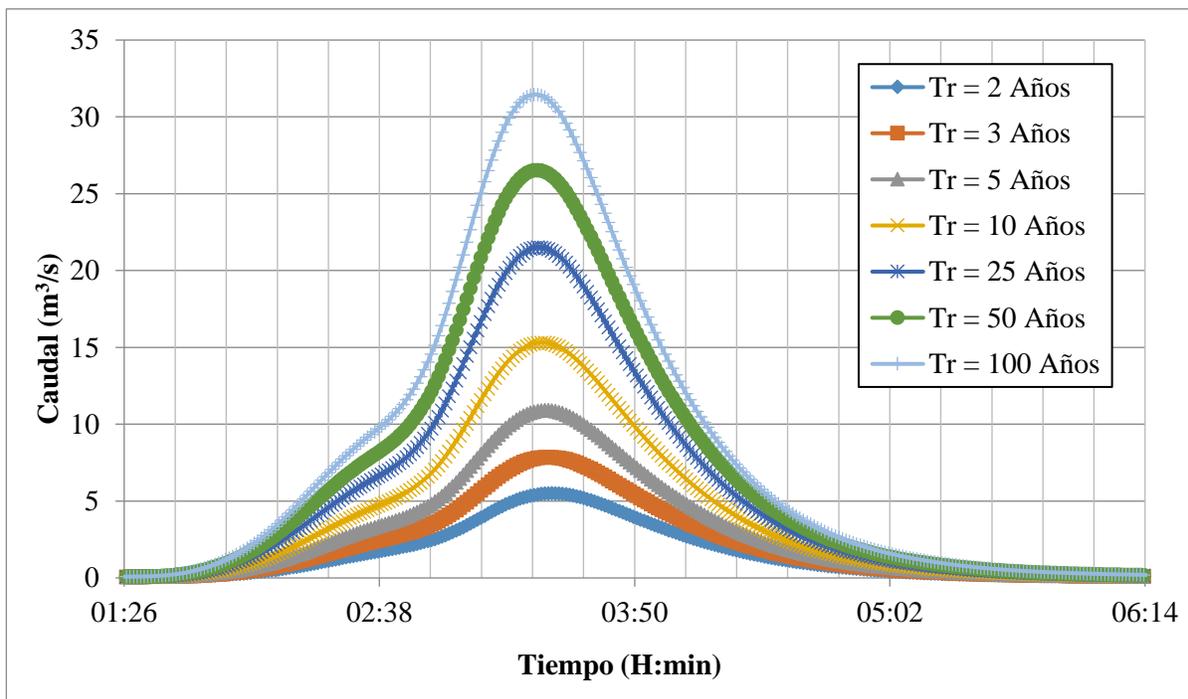
Para definir la lluvia de diseño se utilizaron las curvas de intensidad, frecuencia y duración IFD de la estación Centro Administrativo La Unión, esto con el fin de generar los hietogramas de precipitaciones máximas para diferentes periodos de tiempo mediante el método de bloque alterno. El hietograma es la representación de la distribución temporal de la intensidad de las precipitaciones; para el caso de estudio se asumió una lluvia de 200 minutos de duración para una intensidad asociada a tiempos de retorno (TR) de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años (Ver Figura 3.16).

#### 4.2.5. Resultados de la Simulación y Análisis Hidrológico

El aporte de caudales del río Zanjón Guabinero depende directamente de las características edafológicas, morfológicas e hidroclimatológicas que influyen sobre el sistema de la microcuenca. Para la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS empleando el modelo del SCS se utilizó la información que se ha descrito previamente. En la Figura 4.3 se presentan los hidrogramas de caudales máximos para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años del Zanjón Guabinero hasta el sitio del cauce localizado aguas arriba de su ingreso al casco urbano. En la Tabla 4.7 se presentan los caudales máximos para tiempos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, generados con el modelo hidrológico HEC-HMS.



Hietograma e hidrograma para un periodo de retorno de 100 años, Zanjón Guabinero.



**Figura 4.3.** Hidrogramas de caudales máximos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 Años en el Zanjón Guabinero

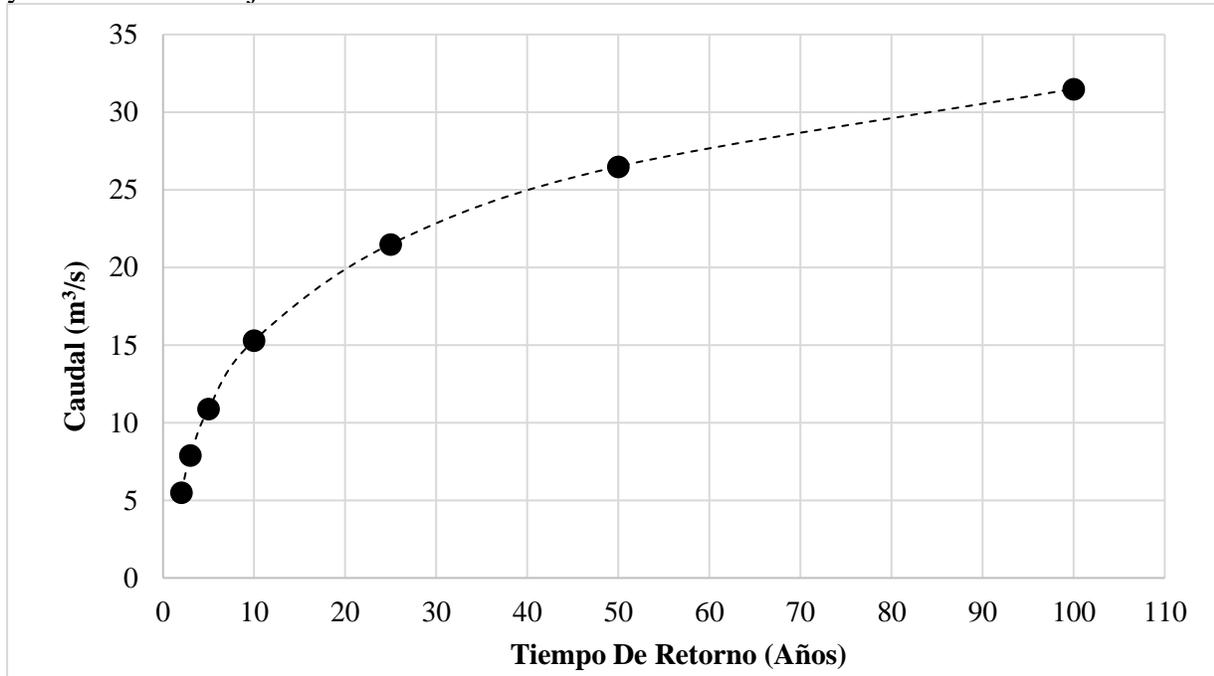
**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 4.7.** Caudales máximos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años generados con el modelo hidrológico HEC-HMS en el zanjón Guabinero

ÁREA ZANJÓN GUABINERO Km <sup>2</sup>	CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE RETORNO							
	TR (AÑOS)	2	3	5	10	25	50	100
4,25	Q (m <sup>3</sup> /s)	5,5	7,9	10,9	15,3	21,5	26,5	31,5
	Q (Lts/s)	5508	7865	10917	15316	21512	26540	31465

**Fuente:** elaboración propia

A continuación, se presentan los caudales máximos para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años del Zanjón Guabinero.



Caudales máximos para diferentes periodos de retorno, Zanjón Guabinero.

**Fuente:** elaboración propia

#### 4.3. ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO EN EL ZANJÓN EL RINCÓN

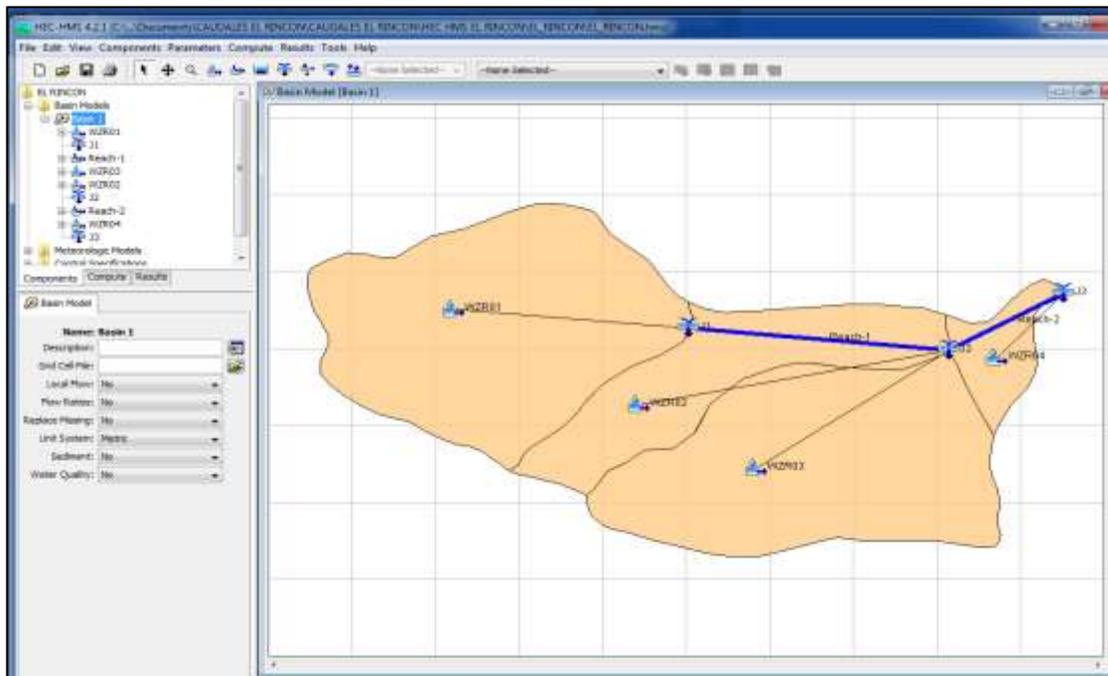
Con el fin de evaluar los caudales máximos en el Zanjón El Rincón se consideró como punto de cierre de la Unidad de análisis un sitio del río localizado aguas arriba de donde inicia su recorrido por el casco urbano y la zona de expansión y considerando periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años. A continuación, se presentan los parámetros morfométricos e hidrológicos calculados en el Zanjón El Rincón, parámetro requeridos para la estimación de los caudales máximos.

### 4.3.1. Esquematación de la Unidad Hidrográfica del Zanjón El Rincón

Para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de determinada cuenca es preciso, en primer lugar, llevar a cabo una representación esquemática de la misma (basin model) que refleje su morfología y las características de su red de drenaje. En la Figura 4.4 se presenta un esquema general de la cuenca en estudio.

### 4.3.2. Parámetros morfométricos de las unidades de cuenca en que se dividió el Zanjón El Rincón

Se realizó el trazado de la línea divisoria del Zanjón El Rincón hasta el sitio localizado aguas arriba de su recorrido por el casco urbano del Municipio de Bolívar. En general, se conoce que las áreas de drenaje están determinadas por una línea imaginaria que une los puntos más altos y encierran las áreas de confluencia; estas líneas de divorcio de aguas que separan una cuenca de las circundantes se denominan divisorias de aguas o parte aguas. A partir de los planos topográficos disponibles se procedió a determinar el área de drenaje correspondiente, la cual se dividió en 4 unidades hidrológicas. Una vez se definió el parte aguas del Zanjón El Rincón y sus respectivas unidades, se procedió al cálculo de algunas características morfométricas, tales como el área de cada subcuenca, la longitud del cauce principal, las cotas aguas arriba y aguas abajo del cauce, la pendiente del cauce principal y los tiempos de concentración.



**Figura 4.4.** Esquema del Zanjón El Rincón para el modelo HEC-HMS

**Fuente:** elaboración propia

En la Tabla 4.8 se presentan los valores de las características morfométricas evaluadas para cada una de las unidades hidrológicas en que se dividió la Unidad Hidrográfica del Zanjón El Rincón.

**Tabla 4.8.** Características morfométricas de las Unidades Hidrológicas en que se dividió la cuenca del Zanjón El Rincón

CODIFICACIÓN CUENCAS	ÁREA (km <sup>2</sup> )	LONGITUD CAUCE (m)	LONGITUD CAUCE (km)	ALTURA MÁXIMA (msnm)	ALTURA MÍNIMA (msnm)	DIFERENCIA DE ALTURA ΔH (m)	PENDIENTE MEDIA S (m/m)	TC FORMULA TÉMEZ (min)
WZR01	0,62	1139	1,14	1554	1062	492	0,43	23,31
WZR02	0,29	1464	1,46	1381	955	426	0,29	30,41
WZR03	0,57	1247	1,25	1264	955	309	0,25	27,75
WZR04	0,08	588	0,59	1024	936	88	0,15	17,26

Fuente: elaboración propia

#### 4.3.3. Evaluación de parámetros hidrológicos Zanjón El Rincón

Los parámetros hidrológicos a calcular son los parámetros que requieren los modelos internos aplicados por el HEC-HMS y que son utilizados para la determinación del proceso de transferencia lluvia-caudal para el caso de modelación de eventos, como son los modelos de pérdidas (SCS Numero de Curva) y de transformación de excesos de lluvia en escorrentía (SCS Hidrograma Unitario), el análisis del flujo base (método de recesión) y el tránsito de los hidrogramas a través de los cauces principales (LAG). Estos parámetros hidrológicos se analizaron espacialmente implementando herramientas de SIG, a partir de los mapas temáticos de la zona de estudio y el modelo digital de elevaciones -DEM.

- *Modelo de pérdidas (SCS Número de Curva)*

Para el cálculo del CN por unidades de cuenca en que se dividió el Zanjón El Rincón se utilizaron los mapas temáticos de uso actual del suelo y tipo de suelo. En la Tabla 4.9 se presenta la cobertura vegetal actual del Zanjón El Rincón hasta el sitio de interés hídrico y en la Tabla 4.10 se presenta la caracterización de los suelos de la cuenca del Zanjón El Rincón.

**Tabla 4.9.** Cobertura vegetal actual del suelo en las Unidades Hidrológicas del Zanjón El Rincón

COBERTURA DEL SUELO	ÁREA (m <sup>2</sup> )	PORCENTAJE (%)
Arbustal y matorral denso alto de tierra firme	9439	0,60
Arbustal y matorral abierto bajo esclerófilo	1510	0,10
Herbazal natural abierto subxerofítico	1544048	98,89
Estanques artificiales	6373	0,41

Fuente: elaboración propia

**Tabla 4.10.** Suelos característicos y determinación del grupo hidrológico Unidad hidrológica del Zanjón El Rincón

CODIFICACIÓN SUELOS 2004	NOMBRE SUELO	PROFUNDIDAD EFECTIVA	TEXTURA	DRENAJE	GRUPO HIDROLÓGICA
(MN-PL)a	Complejo Manuelita - Palmira	Profunda 140 cm (V32), Muy Profunda 150 cm (V65)	Franca de los 0 a los 30 cm (V32), Franco Arcillosa de los 0 a los 80 cm (V65)	Bien drenados (V32), Bien drenados (V65)	B
MRFf3	Complejo Tierras Cárcavas - Lithuc Ustorthents	Superficial (PO-36)	Franco Arenosa de los 0 a los 30 cm (PO-36)	Bien drenados	B

Fuente: elaboración propia

Finalmente, con base en la información de la cobertura vegetal y el grupo hidrológico de suelos de cada polígono se determinó el valor de CN ponderado para cada una de las unidades en que se dividió la cuenca del Zanjón El Rincón. Una vez se establecen los valores de CN para cada tipo de suelo y tipo de cobertura vegetal se procede a determinar la magnitud de las áreas que poseen estas características con el fin de estimar el valor globalizado de este parámetro para la cuenca. En la Tabla 4.11 se presentan los parámetros hidrológicos requeridos por los modelos SCS Número de Curva y SCS Hidrograma Unitario.

**Tabla 4.11.** Parámetros hidrológicos requeridos por los modelos SCS Número de Curva y SCS Hidrograma Unitario en la cuenca del Zanjón El Rincón

CODIFICACIÓN CUENCAS	T <sub>lag</sub> (min)	CN	S (mm)	I <sub>a</sub> (mm)	Q (m <sup>3</sup> /s)
WZR01	13,99	61,00	162,39	32,48	0,0047131
WZR02	18,25	61,42	159,54	31,91	0,0022692
WZR03	16,65	61,02	162,25	32,45	0,0043536
WZR04	10,36	62,98	149,33	29,87	0,0006766

T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración; T<sub>lag</sub>: Tiempo de demora = 0,60 T<sub>c</sub>; CN: Numero de curva; S: Máximo potencial de retención; I<sub>a</sub>: Abstracciones iniciales

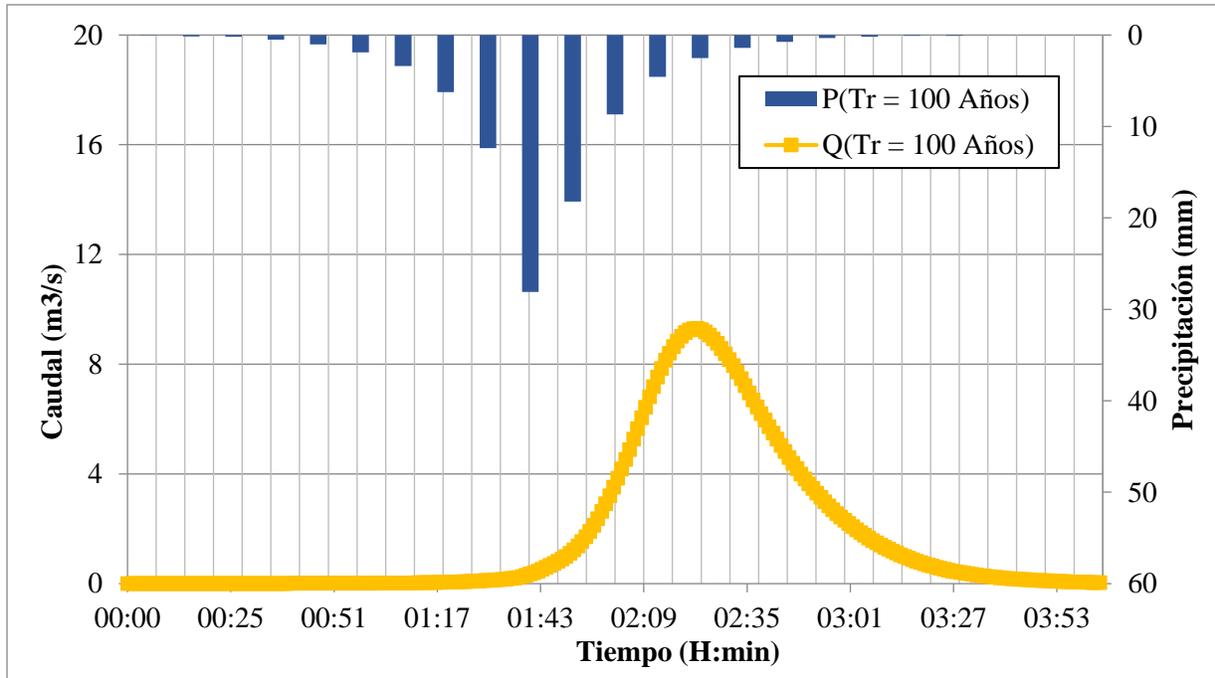
**Fuente:** elaboración propia

#### 4.3.4. Modelo meteorológico

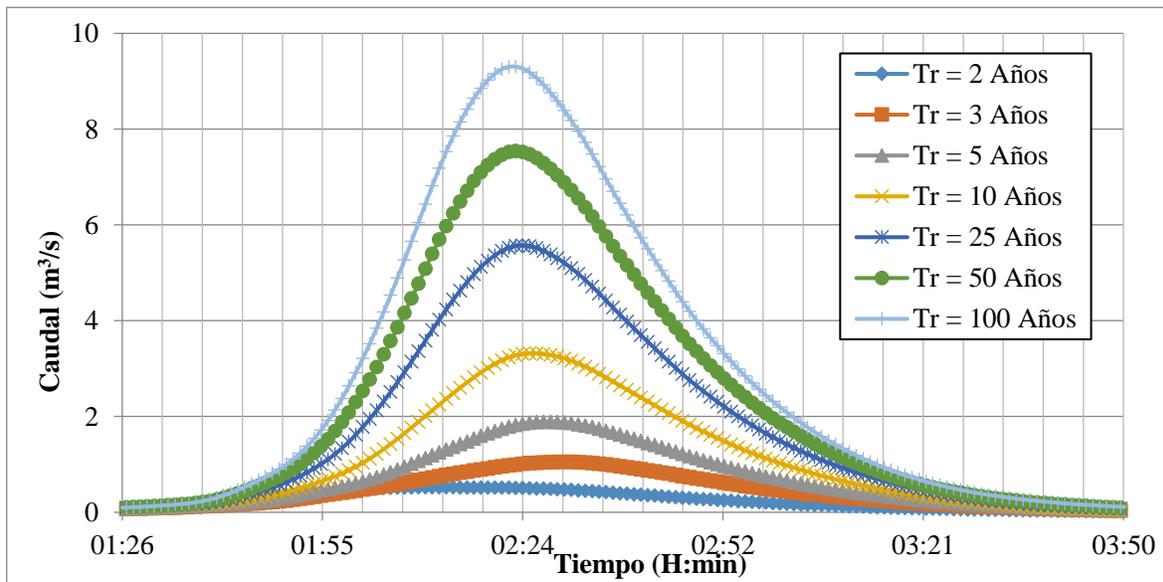
Para definir la lluvia de diseño se utilizaron las curvas de intensidad-frecuencia-duración IFD de la estación Centro Administrativo La Unión; esto con el objetivo de generar los hietogramas de precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno mediante el método de bloque alterno. El hietograma es la representación de la distribución temporal de la intensidad de las precipitaciones; para el caso de estudio se asumió una lluvia de 200 minutos de duración, para una intensidad asociada a periodos de retorno (TR) de: 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años (ver Figura 3.16).

#### 4.3.5. Resultados de la Simulación y Análisis Hidrológico

En la Figura 4.5 se presentan los hidrogramas de caudales máximos para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años del río hasta el sitio del cauce localizado aguas arriba de su ingreso al casco urbano del municipio de Bolívar. En la Tabla 4.12 se presentan los caudales máximos para tiempos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, generados con el modelo hidrológico HEC-HMS.



Hietograma e hidrograma para un periodo de retorno de 100 años, Zanjón El Rincón.



**Figura 4.5.** Hietograma e Hidrograma de caudales máximos para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 Años Zanjón El Rincón

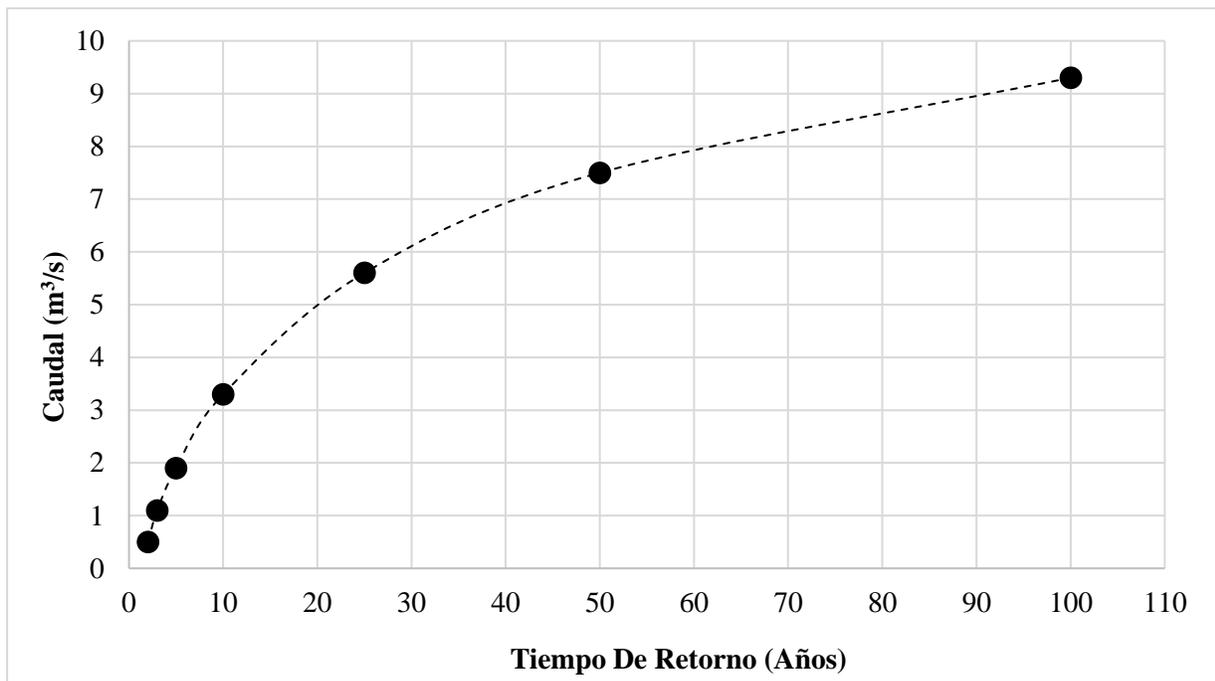
**Fuente:** elaboración propia

**Tabla 4.12.** Caudales máximos para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años generados con el modelo hidrológico HEC-HMS del Zanjón El Rincón

ÁREA RÍO ROLDANILLO km <sup>2</sup>	CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES TIEMPOS DE RETORNO							
	TR (AÑOS)	2	3	5	10	25	50	100
1,56	Q (m <sup>3</sup> /s)	0,5	1,1	1,9	3,3	5,6	7,5	9,3
	Q (Lts/s)	518,1	1050,94	1889,69	3318,67	5570,9	7543,98	9306,9

**Fuente:** elaboración propia

A continuación, se presentan los caudales máximos para periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años del Zanjón El Rincón.



**Caudales máximos para diferentes periodos de retorno, Zanjón El Rincón.**

## 5. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

La caracterización hidráulica del municipio de Bolívar se realiza considerando parámetros tales como: la pendiente, la rugosidad del lecho del río, la rugosidad de la llanura de inundación, coberturas y usos del suelo en de cada uno de fuentes hídricas que pasan por el casco urbano y zonas de expansión del municipio de Bolívar.

### 5.1. PENDIENTE PROMEDIA DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE BOLIVAR

#### 5.1.1. Longitud del cauce y alturas máximas y mínimas

La longitud del cauce corresponde a la longitud del eje del cauce principal y se obtiene al sumar los arcos en las curvas y los tramos rectos que componen el cauce principal. La longitud del cauce influye en el tiempo de concentración y en la mayoría de los índices morfométricos y puede obtenerse a partir de los mapas rasterizados de la red de drenaje.

### 5.1.2. Pendiente media de los cauces principales

La pendiente media de los cauces principales se puede estimar mediante distintos métodos; entre los métodos más comunes se tienen: (i) Método de las elevaciones extremas y (ii) Método de Taylor-Schwarz.

- *Método de las elevaciones extremas*: En este método se determina el desnivel  $\Delta H$  entre el punto más elevado y el más bajo del río dividido entre la longitud  $L$  del mismo cauce, así:

$$S = \frac{\Delta H}{L_c} \quad \text{ec. (2)}$$

donde:

$\Delta H$  = Diferencia de elevación entre las cotas extremas del cauce principal

$L_c$  = Longitud del cauce principal

- *Método de Taylor - Schwarz*: Para este método se adopta la formulación expuesta en el método de las elevaciones extremas, pero se divide el cauce en  $m$  canales de pendiente uniforme y longitud  $dx$ , en los cuales el tiempo de recorrido del agua es igual al del río.

De acuerdo con las anteriores consideraciones el método resultante es representado mediante la siguiente expresión:

$$S = \left( \frac{m}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{S_i} \right)^{1/2}} \right)^2 \quad \text{ec. (3)}$$

donde:

$m$  = Número de tramos de igual longitud en que se divide el río

$S_i$  = Pendiente en cada uno de los tramos que dividen el río

Con base a las ecuaciones anteriores se calculó la pendiente media para cada una de las fuentes hídricas analizadas. El río Pescador presenta una pendiente media de 4.4% según el método de elevaciones extremas. Según Jarrett (1984) los ríos que presentan una pendiente mayor del 0.2% en la mayoría de su trazado se clasifican como ríos de montaña. Para el caso del río Pescador la

pendiente media promedio fue de 26%, por lo que el río se clasifica como río de montaña. Los Zanjones Guabinero y El Rincón presentan una pendiente media de 21% y 28%, respectivamente.

## **5.2. RUGOSIDAD DEL LECHO DE LOS CAUCES DEL MUNICIPIO DE BOLIVAR**

Los ríos de montaña presentan diferencias importantes con respecto a los ríos aluviales o de llanura debido a las distintas condiciones topográficas, geológicas, hidrológicas, hidráulicas, sedimentológicas y geomorfológicas. Los ríos de montaña se caracterizan por el alta pendiente de su cauce, sedimentos de mayor tamaño (gravas, guijarros, cantos y bolos) que causan una mayor resistencia al flujo, flujos altamente turbulentos con velocidades relativamente altas y profundidades pequeñas; además, presentan una morfología variable espacialmente y reducida temporalmente excepto cuando son intervenidos (extracción intensiva de materiales del lecho, por ejemplo) y al producirse eventos extremos.

Hasta hace unas cuantas décadas, los ríos de llanura (constituidos principalmente de arenas de diferentes tamaños) habían sido objeto principal de estudio de la hidráulica fluvial debido a que los asentamientos humanos han estado ubicados en su mayoría en los valles aluviales. Aproximadamente desde la década de 1980 se incrementaron los estudios e investigaciones sobre el comportamiento hidráulico, sedimentológico y geomorfológico de los ríos de montaña. Estos estudios han mostrado que las relaciones hidráulicas (rugosidad, velocidad, etc.) y de transporte de sedimentos utilizadas regularmente para definir el comportamiento de ríos de llanura conducen a errores al emplearse para describir el comportamiento de los ríos de montaña (López, 2005).

Estimar la resistencia al flujo es fundamental para analizar el comportamiento hidráulico de los ríos de montaña. La rugosidad del lecho representa la resistencia al flujo ejercida por las partículas que conforman el lecho y las bancas del canal y por las formas de fondo y demás irregularidades que actúan como obstáculos al flujo de agua. Para incluir este mecanismo de disipación de energía en las ecuaciones que describen el flujo de agua en canales se han desarrollado diferentes expresiones que involucran la geometría del canal, el material del lecho, etc., cada una con ventajas y limitaciones dependiendo de las condiciones para las cuales se desee aplicar. López (2005) ha recopilado cerca de 70 expresiones que permiten calcular el coeficiente de rugosidad en cauces de montaña con lechos conformados por materiales gruesos como gravas y cantos.

## **5.3. RUGOSIDAD DE LAS LLANURAS DE INUNDACIÓN DEL MUNICIPIO DE BOLIVAR**

En la planicie de inundación de un río la presencia de vegetación y diferentes tipos de elementos y obstáculos (piedras, cercos, casas, infraestructura) producen resistencia al flujo cuando éste se desborda. La rugosidad estimada debe ser representativa de la vegetación y los diferentes elementos existentes en las llanuras de inundación ya que este factor es muy importante para obtener resultados confiables en la modelación matemática.

Para determinar los valores de la rugosidad de Manning en las planicies de inundación de la zona de estudio del municipio de Bolívar, se consideró la metodología presentada en el capítulo 6.3.

## 6. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE NIVELES DE AMENAZA POR INUNDACIONES

Se presenta inicialmente una breve descripción de algunas de las metodologías más empleadas para la determinación de los mapas de amenaza por inundaciones. Finalmente, se presentan las metodologías establecidas para el desarrollo del presente estudio, teniendo en cuenta para ello las características principales de los fenómenos o eventos que suelen presentarse en los cauces de la zona de estudio.

### 6.1. ESTADO DEL ARTE

A partir de los criterios para la clasificación de las amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales se han desarrollado en diferentes regiones alrededor del mundo numerosas metodologías para la elaboración de los mapas de amenaza. Estas metodologías generalmente se basan en la determinación de valores límites para la profundidad del agua, la velocidad del flujo o una combinación de estos dos parámetros, así como en la frecuencia de los eventos en términos de los periodos de retorno. Las metodologías existentes difieren entre sí en los requerimientos de información y los criterios establecidos para la zonificación de la amenaza (incluyendo los valores límites adoptados). Algunas de las metodologías desarrolladas y que se describen a continuación son las siguientes:

#### 1). Metodología de la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil

Esta metodología fue establecida por la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones en España del Ministerio para la Transición Ecológica Secretaria de Estado de Interior de España (1995). Para la determinación de los riesgos por inundaciones se considera la población potencialmente afectada y los elementos (edificios, instalaciones, infraestructuras y elementos naturales o medioambientales) situados en zonas de peligro que debido a la inundación puedan producir víctimas, interrumpir un servicio imprescindible para la comunidad o impedir la atención de la emergencia generada.

La vulnerabilidad de estos elementos se estima considerando sus características, su ubicación y las características hidráulicas de la creciente que genera el desbordamiento (profundidad del agua, velocidad del flujo, caudal sólido transportado y duración de la inundación).

En esta metodología, las zonas potencialmente inundables, de acuerdo con el grado del riesgo, se clasifican de la siguiente manera:

**Zona A de Riesgo Alto.** Conformada por aquellas áreas en las que las crecientes con periodos de retorno de 50, 100 o 500 años generarán graves daños a núcleos de población importantes. También se consideran zonas de riesgo alto aquellas en las que la creciente con periodo de retorno de 50 años generará impactos a viviendas aisladas o daños importantes a instalaciones comerciales o industriales y/o a los servicios básicos.

Estas zonas de riesgo alto se dividen en tres subzonas:

- **Zonas A-1. Zonas de riesgo alto frecuente.** Son aquellas en las que la creciete con periodo de retorno de 50 años generará graves daños a núcleos urbanos.
- **Zonas A-2. Zonas de riesgo alto ocasional.** Son aquellas en las que la creciete con periodo de retorno de 100 años generará graves daños a núcleos urbanos.
- **Zonas A-3. Zonas de riesgo alto excepcional.** Son aquellas en las que la creciete con periodo de retorno de 500 años generará graves daños a núcleos urbanos.

**Zonas B de Riesgo Significativo.** Conformada por aquellas áreas, no coincidentes con las zonas A, en las que la creciete con periodo de retorno de 100 años generará impactos en viviendas aisladas y las crecientes de periodo de retorno igual o superior a los 100 años causarán daños significativos a instalaciones comerciales, industriales y/o servicios básicos.

**Zonas C de Riesgo Bajo.** Son aquellas, no coincidentes con las zonas A ni con las zonas B, en las que la creciete con periodo de retorno de 500 años generará impactos en viviendas aisladas, y las crecientes consideradas en los mapas de inundación causarán daños pequeños a instalaciones comerciales, industriales y/o servicios básicos.

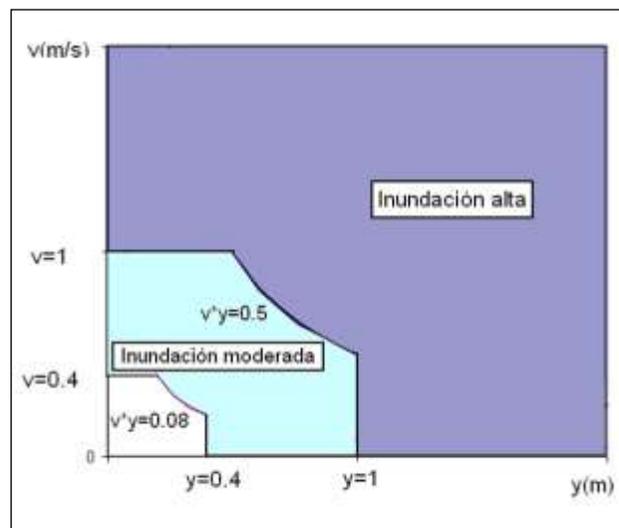
## 2). Metodología adoptada por la Agencia Catalana del Agua

Esta metodología fue adoptada por la Agencia Catalana del Agua en el año 2003. Se presenta en la guía “Recomendaciones Técnicas para los Estudios de Inundabilidad Locales” (Agencia Catalana del Agua, 2003) y propone la siguiente clasificación de las zonas potencialmente inundables:

**Zonas de Inundación Alta.** Corresponde a los sectores ubicados por fuera de las zonas de intenso desagüe, donde la profundidad del agua,  $H$ , alcanza valores superiores a 1 m, la velocidad de flujo,  $V$ , es mayor a 1 m/s o el producto de la profundidad del agua por la velocidad del flujo,  $V \cdot H$ , es mayor a  $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$  (ver Figura 6.1).

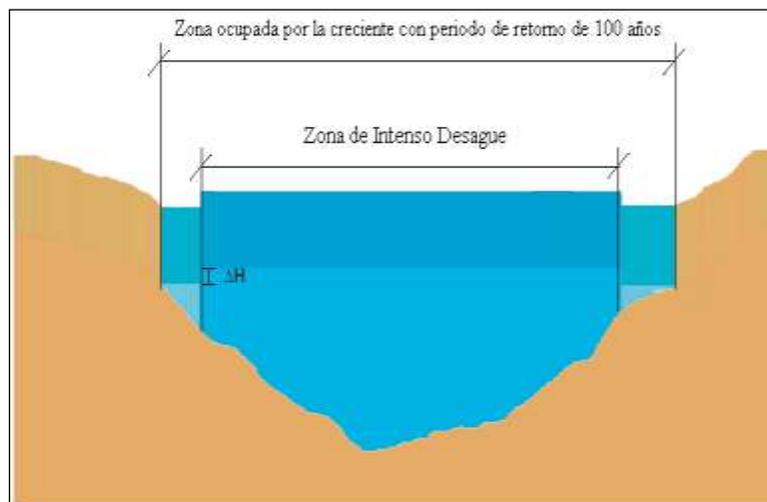
**La Zona de Intenso Desagüe.** Se define como la zona limitada por paramentos verticales imaginarios en ambos márgenes del río en la cual, al discurrir por ella la creciete con periodo de retorno de 100 años, se produciría un incremento en el nivel de agua,  $\Delta H$ , con respecto al nivel natural sin paramentos que alcanzaría la tabla de agua (ver Figura 6.2). Se define un valor máximo de  $\Delta H$  igual a 0.1 m en los sectores en los que la inundación provocaría daños importantes (sectores poblados o de alta inversión) y un valor máximo de  $\Delta H$  igual a 0.5 m en las zonas en las que la inundación generaría daños menores (poblaciones menores).

**Zonas de Inundación Moderada.** Son los sectores ubicados por fuera de las zonas de intenso desagüe en los que la profundidad del agua es superior a 0.4 m e inferior a 1 m, la velocidad de flujo es mayor a 0.4 m/s y menor a 1 m/s o el producto de la profundidad del agua por la velocidad del flujo es mayor a  $0.08 \text{ m}^2/\text{s}$  y menor a  $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$  (ver Figura 6.1).



**Figura 6.1.** Clasificación de las zonas de inundación de acuerdo con la Agencia Catalana del Agua.

**Fuente:** Agencia Catalana, (2003)



**Figura 6.2.** Zona de intenso desagüe definida por la Agencia Catalana del Agua

**Fuente:** Agencia Catalana, (2003)

### 3). Metodología planteada por el Plan de Acción Territorial

Esta metodología planteada por el Plan de Acción Territorial de carácter sectorial sobre prevención del riesgo de inundación en la comunidad valenciana, (PATRICOVA, 2002), define 6 niveles de riesgo de acuerdo con la frecuencia de ocurrencia del evento que genera el desbordamiento y la profundidad que alcanza la columna de agua en la llanura de inundación.

Para la definición de los niveles de riesgo deben considerarse tres frecuencias de ocurrencia de crecientes:

- ***Frecuencia Alta:*** corresponde a periodos de retorno inferiores a 25 años (probabilidades de ocurrencia en cualquier año superiores al 4%).
- ***Frecuencia Media:*** corresponde a periodos de retorno entre 25 y 100 años (probabilidades de ocurrencia entre 4 y 1% en cualquier año).
- ***Frecuencia Baja:*** corresponde a periodos de retorno entre 100 y 500 años (probabilidades de ocurrencia entre 1 y 0.20% en cualquier año).

De la misma forma, deben considerarse dos profundidades de la columna de agua en la planicie:

- ***Profundidades Bajas:*** corresponden a profundidades inferiores a 0.8 m. Se considera que estas profundidades generan daños menores, lo cual significa que se tendría un bajo nivel de vulnerabilidad.
- ***Profundidades Altas:*** corresponden a profundidades superiores a 0.8 m. Se asume que estas profundidades generan daños importantes, por lo cual están asociadas a altos niveles de vulnerabilidad.

Al combinar los rangos definidos para las dos variables analizadas se obtienen los seis niveles de riesgo que se presentan en Tabla 6.1

**Tabla 6.1.** Niveles de riesgos definidos en la metodología del PATRICOVA.

PROFUNDIDAD DE LA INUNDACIÓN H (m)	NIVEL DE RIESGO		
	PERIODO DE RETORNO (Tr) DE LA INUNDACIÓN (años)		
	Tr < 25 (Frecuencia alta)	25 ≤ Tr ≤ 100 (Frecuencia media)	100 ≤ Tr ≤ 500 (Frecuencia baja)
Alta: H > 0.8	1 – Alto	2 – Alto	5 – Bajo
Baja: H ≤ 0.8	3 – Medio	4 – Medio	6 – Bajo

**Fuente:** PATRICOVA (2002).

Con base en esta clasificación se establecen las siguientes restricciones en el desarrollo urbanístico:

- Las zonas potencialmente inundables sometidas a un nivel de riesgo 1 se consideran no urbanizables y deben contar con una protección especial.
- En las áreas sometidas a niveles de riesgo 2, 3 y 4 se prohíbe la construcción de viviendas, granjas, hoteles, centros escolares o sanitarios, zonas para camping, bomberos, cementerios y otros usos y actividades de naturaleza similar.
- En las zonas de riesgo 5 y 6 se permite la construcción de viviendas y hoteles con ciertas medidas de seguridad.

Para la elaboración de los mapas de riesgo aplicando esta metodología es necesario conocer los niveles de inundación para las crecientes con periodos de retorno de 25, 100 y 500 años y la extensión de las áreas que resultarían inundadas al presentarse estos eventos.

#### 4). Metodología propuesta en el Plan Medioambiental de los ríos Ebro y Cinca

Esta metodología fue propuesta en el Plan Medioambiental del río Ebro y el tramo bajo del río Cinca, en España, en el año 2005 (Gobierno de Aragón – Iberinsa, (2005).). Dicha metodología plantea la implementación de dos procedimientos para la evaluación del riesgo debido a inundaciones: un procedimiento simplificado aplicable para las situaciones de riesgo bajo, en donde no se espera que se presenten daños importantes y un procedimiento general que debe implementarse cuando los bienes amenazados son de alta vulnerabilidad o son edificaciones importantes para la atención de desastres.

**Procedimiento Simplificado.** Este procedimiento considera márgenes de seguridad bastante altos y debería aplicarse sólo para descartar el riesgo en aquellos sectores que se estima podrían estar por fuera de la zona de riesgo.

Para la estimación del nivel de riesgo, de acuerdo con este procedimiento, es necesario llevar a cabo las siguientes actividades: caracterización preliminar de la cuenca, cálculo de los caudales máximos, cálculo del tiempo de concentración, caracterización del comportamiento hidráulico de las secciones críticas, modelación hidráulica del tránsito de los caudales máximos calculados, estimación del nivel de exposición, estimación del nivel de vulnerabilidad y, finalmente, establecimiento del grado de aceptabilidad del riesgo debido a las inundaciones, en función de la profundidad del agua y la velocidad del flujo, de acuerdo con la Tabla 6.2.

**Tabla 6.2.** Nivel del riesgo de acuerdo con el Procedimiento Simplificado del Plan Medioambiental del río Ebro y tramo Bajo del río Cauca

VELOCIDAD DEL FLUJO (m/s)	NIVEL DE RIESGO	
	PROFUNDIDAD DEL AGUA H (m)	
	H < 1	H ≥ 1
Menor a 0.5	Aceptable	Inaceptable
Mayor a 0.5	Inaceptable	Completamente inaceptable

**Fuente:** Gobierno de Aragón – Iberinsa, (2005).

**Procedimiento General.** En este procedimiento la estimación del nivel de riesgo se realiza a través de la implementación de los siguientes estudios: caracterización hidrológica de la cuenca, estimación de precipitaciones máximas, elaboración del plano de localización de los cursos de agua, análisis y evaluación de la frecuencia histórica de las inundaciones, cálculo de caudales correspondientes a eventos con periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 500 años, determinación de caudales de diseño de las obras hidráulicas existentes, estimación del tiempo de concentración, identificación de las características hidráulicas de las secciones representativas y críticas de los diferentes tramos del curso de agua, modelación hidráulica a través de la cual se determinan los planos de inundabilidad para los eventos correspondientes a los diferentes periodos de retorno analizados, cálculo de las velocidades y profundidades máximas, estudio geomorfológico, estimación del nivel de exposición, estimación del nivel de vulnerabilidad, estimación cuantitativa

del nivel de riesgo y generación de una cartografía de riesgo de inundaciones en la que se diferencien cuatro zonas en función del riesgo:

**Zona Blanca.** Corresponde a los sectores en los que se considera que el nivel de riesgo es aceptable sin necesidad de tomar medidas de mitigación debido a las inundaciones.

**Zona Amarilla.** Corresponde a las zonas en las que se considera que el nivel de riesgo es bajo y deben implementarse medidas de mitigación de baja intensidad.

**Zona Azul.** Corresponde a sectores en los que se considera que el nivel de riesgo es entre medio y alto, por lo que es necesario tomar medidas de mitigación de intensidad media a alta.

**Zona Roja.** Corresponde a sectores sometidos a un alto nivel de riesgo por lo que no se permiten usos permanentes como la urbanización.

## 5). Metodología aplicada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales

Esta metodología fue aplicada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación en el año 2005. A su vez, dentro de esta metodología existen diversos criterios para la evaluación de la amenaza, los cuales se mencionan a continuación.

*1. Criterios para la evaluación de la intensidad o magnitud de la inundación.* La amenaza está en función de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y de su intensidad. La intensidad a su vez se puede definir en función de la profundidad, la velocidad del agua y la duración de las inundaciones. Por tanto, la definición de amenaza por inundaciones (en función del daño potencial) debe tener en cuenta tanto la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de la inundación como los niveles o altura del agua.

$$\text{Amenaza por inundación} = f(\text{Intensidad} \times \text{probabilidad de ocurrencia})$$

donde:

Intensidad =  $f$  (profundidad de agua, duración, velocidad)

Probabilidad =  $f$  (precipitaciones, eventos desencadenantes (huracanes y tormentas), cambios climáticos).

*2. Criterios recomendados para la evaluación de la intensidad o magnitud de la inundación.* La intensidad y los efectos potenciales de las inundaciones dependen de varios aspectos, no sólo meteorológicos sino también de las características propias del terreno, como son los tipos y usos del suelo, el tipo y la distribución de la vegetación, la litología, las características de la red de drenaje, la magnitud de las pendientes de la cuenca y las obras realizadas en los cauces, entre otros. Otros aspectos importantes a considerar son los meandros y las zonas en las que los ríos se estrechan o pierden profundidad por procesos de sedimentación, especialmente en las desembocaduras, donde se acumulan los limos y arenas arrastradas por la corriente.

Los criterios para evaluar la intensidad de las inundaciones son diferentes en dependencia del tipo de inundación. Para inundaciones estáticas se considera la profundidad o altura del flujo, mientras que para inundaciones dinámicas se recomienda utilizar el producto de la velocidad por la

profundidad del flujo (siempre y cuando esta fórmula arroje valores más altos, en términos de intensidad, que la anterior).

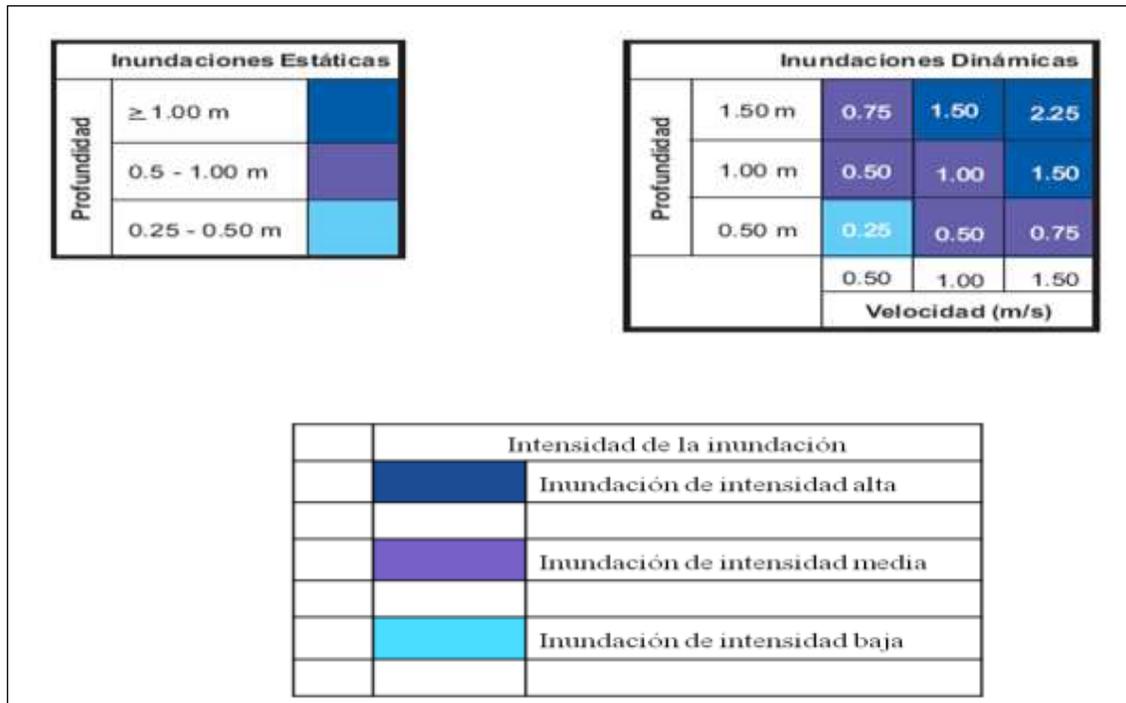
Los umbrales entre los niveles de intensidad alta, media y baja, han sido establecidos considerando la peligrosidad que una determinada columna de agua puede significar en la infraestructura, las viviendas y la vida de los pobladores.

En Tabla 6.3 y Figura 6.3 se presentan los rangos definidos para cada nivel de intensidad para el fenómeno de inundaciones.

**Tabla 6.3.** Definición de rangos de intensidad para inundaciones estáticas y dinámicas (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales).

NIVEL DE INTENSIDAD DE LA INUNDACIÓN	PROFUNDIDAD DEL FLUJO (H) (INUNDACIONES ESTÁTICAS) (M)	PROFUNDIDAD X VELOCIDAD DEL FLUJO (INUNDACIONES DINÁMICAS) (M <sup>2</sup> /S)
Alto	$H \geq 1$	$H \cdot V \geq 1.5$
Medio	$0.5 \leq H < 1$	$0.5 \leq H \cdot V < 1.5$
Bajo	$0.25 \leq H < 0.5$	$H \cdot V < 1.5$ y $H \geq 0.25$

**Fuente.** Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (2005).



**Figura 6.3.** Definición de rangos de intensidad para inundaciones estáticas y dinámicas  
**Fuente.** Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación -COSUDE (2005).

Las inundaciones de alta intensidad corresponden a aquellas que presentan profundidades de flujo mayores a 1 m o cuyo producto resultante de la velocidad por la altura de agua es mayor a  $1.5 \text{ m}^2/\text{s}$ . Los daños causados por una inundación de alta intensidad generalmente producen pérdidas de vidas humanas y altas pérdidas económicas.

Las inundaciones de media intensidad son aquellas cuya altura de agua varía entre 0.5 y 1 m o cuyo producto resultante de la velocidad por la altura de agua está entre  $0.5$  y  $1.5 \text{ m}^2/\text{s}$ . Los daños a la población y los daños económicos son menores con respecto a los causados por la inundación intensa mas no despreciables.

Las inundaciones de baja intensidad corresponden a aquellas cuya profundidad de flujo varía entre 0.25 y 0.5 m o el producto de la velocidad por la altura de agua es menor a  $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ . Los daños asociados son generalmente leves, no se esperan pérdidas de vidas humanas, aunque sí pueden darse pérdidas en áreas de cultivo y animales.

La definición de los criterios de intensidad (velocidad y profundidad) han sido concertados con base en las experiencias del equipo técnico participante y en experiencias previas de proyectos ejecutados o en ejecución en Nicaragua, tales como el PRRAC, ALARN-COSUDE, SIG-Georiesgos y el SIG para mapas de amenazas.

De igual forma, los criterios resultantes han sido revisados y comparados con criterios similares utilizados en el ámbito internacional, en particular en países como España, Venezuela y Suiza, entre otros. En España, por ejemplo, la intensidad de la inundación está en función de la altura de agua y el umbral se ha definido de 0.8 m entre una inundación intensa y otra de baja intensidad (no existen tres niveles de amenaza como los propuestos en la metodología aquí presentada).

*Criterios para la evaluación de la frecuencia, recurrencia o periodo de retorno de la inundación.* La frecuencia o recurrencia de las inundaciones, es decir, cada cuánto se inunda una determinada zona, dependerá esencialmente de la frecuencia de las precipitaciones excepcionalmente fuertes. Los periodos de retorno se establecieron en tres categorías (ver Tabla 6.4).

**Tabla 6.4.** Categorización de la inundación según el periodo de retorno

FRECUENCIA DE LA INUNDACIÓN	PERIODO DE RETORNO (TR) (AÑOS)
Alta	$Tr \leq 10$
Media	$10 < Tr \leq 50$
Baja	$50 < Tr \leq 200$

**Fuente.** Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación- COSUDE (2005).

No se consideran periodos de retorno mayores a 200 años, principalmente porque las series de datos hidrometeorológicos que existen en Nicaragua no son lo suficientemente extensas (por lo general, son menores a 50 años) y consistentes para poder extrapolar a periodos de retorno mayores. Tampoco otros métodos (como los geomorfológicos) permiten estimar con precisión satisfactoria el alcance de crecidas de periodos de retorno mayores.

Determinación de los niveles de amenaza por inundaciones. Los niveles de amenaza por inundaciones de un área dada resultan de la relación entre la frecuencia de las inundaciones y su intensidad (es decir, su profundidad o el producto de la profundidad por la velocidad). Esta forma de evaluar la amenaza es comúnmente usada en países como Australia, Estados Unidos y Suiza, y ha sido aplicada en Nicaragua en el proyecto PRRAC.

Se consideran tres niveles de amenaza: alto, medio y bajo, que resultan de la combinación de la categorización de la inundación según la frecuencia (periodo de retorno) y la intensidad ( $H$  y  $V \cdot H$ ), como se describe a continuación en la Tabla 6.5.

**Tabla 6.5.** Matriz de niveles de amenaza por inundaciones

INTENSIDAD	NIVEL DE AMENAZA			
	Alta $H \geq 1$ ó $H \cdot V > 1.5$	Alto	Alto	Alto
Media $0.5 \leq H < 1$ ó $0.5 < H \cdot V < 1.5$	Alto	Medio	Bajo	
Baja $0.25 \leq H < 0.5$ ó $H \cdot V < 0.5$	Medio	Bajo	Bajo	
FRECUENCIA		Alto $Tr \leq 10$	Medio $10 < Tr \leq 50$	Bajo $50 < Tr \leq 200$

**Fuente.** Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación -COSUDE (2005).

• **Zonas de amenaza alta.** Son aquellas zonas en donde, sin importar la frecuencia,  $H \geq 1$  m ó  $H \cdot V > 1.5$  m<sup>2</sup>/s (intensidad alta), produciendo graves daños a la población e infraestructura expuesta. También se considera zona de amenaza alta aquella inundación de alta frecuencia ( $Tr \leq 10$ ), donde  $0.5 \leq H < 1$  m ó  $0.5 < H \cdot V < 1.5$  m<sup>2</sup>/s (intensidad media).

• **Zonas de amenaza media.** Son aquellas zonas en donde, para una frecuencia media ( $10 < Tr \leq 50$ ),  $0.5 \leq H < 1$  m ó  $0.5 < H \cdot V < 1.5$  m<sup>2</sup>/s y para una frecuencia alta ( $Tr \leq 10$ ),  $0.25 \leq H < 0.5$  m ó  $H \cdot V < 0.5$  m<sup>2</sup>/s (intensidad baja). Este fenómeno ocasiona algunas pérdidas de vidas humanas y daños reparables a viviendas e infraestructura.

• **Zonas de amenaza baja.** Son aquellas zonas en donde, para una frecuencia media ( $10 < Tr \leq 50$ ),  $0.25 \leq H < 0.5$  m ó  $H \cdot V < 0.5$  m<sup>2</sup>/s (intensidad media) y para una frecuencia baja ( $50 < Tr \leq 200$ ),  $0.5 \leq H < 1$  m ó  $0.5 < H \cdot V < 1.5$  m<sup>2</sup>/s (intensidad media) y  $0.25 \leq H < 0.5$  m ó  $H \cdot V < 0.5$  m<sup>2</sup>/s (intensidad baja). Este fenómeno causa daños leves a la población e infraestructura.

## 6). Metodología propuesta por R. García, J.J. Rodríguez y J.S. O'Brien (2001)

La metodología para delimitación de mapas de amenaza propuesta por R. García, J.J. Rodríguez y J.S. O'Brien (2001) ha sido propuesta en el proyecto PREVENE. Esta metodología fue aplicada en la región de Vargas, Caracas, y está basada en estándares suizos y australianos, donde se establecen tres zonas que identifican los niveles de amenaza en ubicaciones específicas. La amenaza por inundación es función de la frecuencia e intensidad de la inundación. Grandes inundaciones ocurren

con menor frecuencia, pero poseen alta intensidad relativa a la profundidad de flujo y a la velocidad. Eventos pequeños de flujos son más frecuentes pero menos dañinos. El nivel de amenaza de flujos es entonces definido como una discreta combinación en función de la intensidad del flujo (severidad del evento) y el periodo de retorno (frecuencia) como se presenta en la Tabla 6.6.

**Tabla 6.6.** Nivel Discreto de Amenaza

INTENSIDAD	Alta				
	Media				
	Baja				
FRECUENCIA		Alta	Media	Baja	Muy baja
Periodo de Retorno		10	100	500	>> 500
Probabilidad de excedencia		10%	1%	0.2%	<<0.2%

	Amenaza alta
	Amenaza media
	Amenaza baja
	Amenaza muy baja

**Fuente:** García et, al, (2001).

En este estudio, la probabilidad de los niveles está definida para los periodos de retorno de 10, 100 y 500 años. Otros periodos de retorno podrían ser considerados en este método. Para definir la intensidad del evento existen métodos que combinan la profundidad y la velocidad de flujo. El método australiano usa la energía total definida como

$$H + V^2/2g$$

Donde:

**H** es la profundidad de flujo,

**V** es la velocidad

**g** es la aceleración de la gravedad.

El método suizo define la intensidad en términos de una combinación de **h** y del producto de **h** y **v**. Altas intensidades se relacionan con altas profundidades y se asigna independiente de la velocidad de flujo. Cuando se superpone sobre un mapa, los diferentes niveles de amenaza pueden ser delimitados como se presenta en la Tabla 6.7.

**Tabla 6.7.** Definición de nivel de amenaza

NIVEL DE AMENAZA	COLOR EN EL MAPA	DESCRIPCIÓN
Alto	Rojo	Las personas están en peligro, tanto dentro como fuera de las casas. Las edificaciones pueden ser destruidas.
Medio	Naranja	Las personas están en peligro fuera de las casas. Las edificaciones pueden sufrir daños y posiblemente destrucción, dependiendo de los materiales con los que han sido construidas.
Bajo	Amarillo	El peligro para las personas es bajo o inexistente. Las edificaciones pueden sufrir un ligero daño pero los sedimentos pueden afectar el interior.

**Fuente:** García et, al, (2001).

Siguiendo el método suizo, los criterios usados en este trabajo hacen la distinción entre inundaciones de agua e inundaciones de flujos de lodos. La intensidad está definida en términos de profundidad máxima generada por el evento y el producto de la máxima velocidad por la máxima profundidad. En este caso de flujo de lodos las intensidades se definen en la Tabla 6.8.

**Tabla 6.8.** Intensidad de la inundación

INTENSIDAD DE LA INUNDACIÓN	PROFUNDIDAD MÁXIMA H (M)		PRODUCTO DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA H Y LA VELOCIDAD MÁXIMA V (M <sup>2</sup> /S)
Alta	$H > 1.5$	ó	$V * H > 1.5$
Media	$0.5 < H < 1.5$	ó	$0.5 < V * H < 1.5$
Baja	$0.1 < H < 0.5$	y	$0.1 < V * H < 0.5$

Fuente: García et, al, (2001).

Los eventos de flujos de lodos son más destructivos que los flujos de agua; por lo tanto, los criterios de intensidad son más conservadores que los de las inundaciones de agua, como se muestra en la Tabla 6.9.

**Tabla 6.9.** Intensidad de flujo de lodos

INTENSIDAD DE FLUJOS DE LODOS	PROFUNDIDAD MÁXIMA H (M)		PRODUCTO DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA H Y LA VELOCIDAD MÁXIMA V (M <sup>2</sup> /S)
Alta	$H > 1$	o	$V * H > 1$
Media	$0.2 < H < 1$	y	$0.2 < V * H < 1$
Baja	$0.2 < H < 1$	y	$V * H < 0.2$

Fuente: García et, al, (2001).

## 6.2. METODOLOGÍA ADOPTADA EN EL PRESENTE ESTUDIO

La metodología propuesta en el presente estudio para la determinación de los niveles de amenaza por el fenómeno de inundación se fundamenta en varios de los criterios utilizados en las metodologías revisadas y en la experiencia del grupo de investigación HIDROMAR en el área de amenazas aplicadas en el río Cauca, teniendo en cuenta los diferentes acuerdos reglamentados por la CVC para protección de las planicies aluviales del río Cauca y sus tributarios (alineamientos de diques riberales, determinación de la franja protectora del río Cauca y periodos de retorno de diseño de diques para cultivos, infraestructuras y centros poblados) (CVC y Universidad del Valle, 1999, 2000, 2001, 2004 y 2005). También se consideraron los planes y esquemas de ordenamiento territorial y los planes de prevención y de atención de desastres, emergencias y contingencias de la inundación.

### 6.2.1. Niveles de frecuencia de los eventos de inundaciones

A cada escenario seleccionado para el fenómeno de inundaciones se le debe asignar un nivel de frecuencia en términos cualitativos: frecuencia alta, media y baja.

Los umbrales de periodos de frecuencia o recurrencia recomendados se presentan en el Tabla 6.10 de los periodos seleccionados corresponden inicialmente a dos veces el periodo de retorno de los

diseños de los drenajes urbanos (10 años). El segundo umbral corresponde aproximadamente a los periodos que los diseños de las obras de infraestructura vial y de cultivos deben garantizar según la normatividad colombiana (30 años). El tercer umbral corresponde a la norma que estipula que cualquier comunidad aledaña a un cauce debe tener garantizada su integridad para una creciente con un periodo de retorno de 100 años.

**Tabla 6.10.** Nivel de frecuencia de los eventos de inundación

FRECUENCIA	FRECUENCIA DE LA INUNDACIÓN
$Tr \leq 10$ años	Alta
$10 \text{ años} < Tr \leq 30$ años	Media
$30 \text{ años} < Tr \leq 100$ años	Baja

Fuente: CVC -Universidad del Valle

### 6.2.2. Niveles de intensidad o magnitud de los eventos de inundación

A cada escenario seleccionado se le debe realizar una clasificación cualitativa de acuerdo con su intensidad o magnitud. Las características hidráulicas a tener en cuenta para determinar la intensidad o magnitud son la profundidad,  $H$ , la velocidad,  $V$ , y el producto de la profundidad por la velocidad,  $H*V$ .

### 6.2.3. Metodología para determinar los niveles de amenaza por inundaciones

Los umbrales de intensidad o magnitud del evento definidos en el presente estudio se presentan en la Tabla 6.11. El primer umbral determinado corresponde al nivel o profundidad del agua observada a partir de la cual las comunidades desalojan sus viviendas (0.45 m) y el segundo umbral corresponde al criterio en el cual se considera que la vida de una persona está en riesgo (0.90 m).

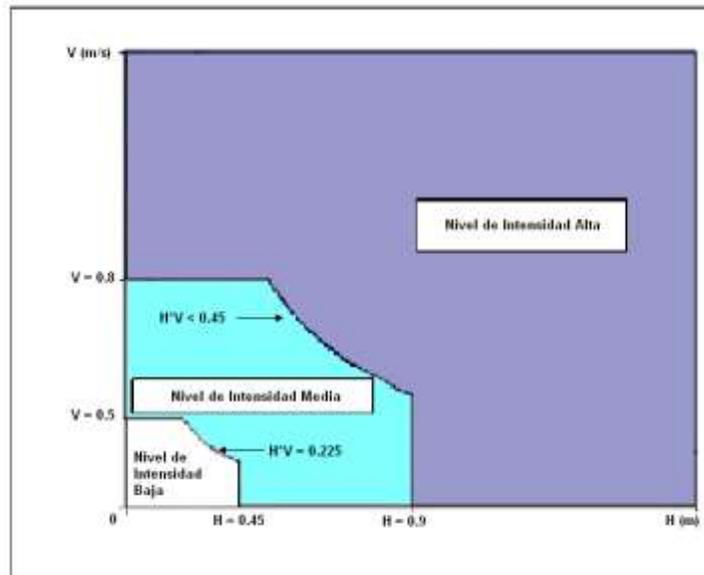
En lo que respecta a la velocidad del flujo, los umbrales corresponden a 0.5 m/s y 0.8 m/s, respectivamente. Los umbrales del producto de la profundidad por la velocidad corresponden a 0.225 m<sup>2</sup>/s y 0.45 m<sup>2</sup>/s. Los umbrales definitivos de intensidad o magnitud del evento se toman de acuerdo con el rango de niveles, el rango de velocidades y los rangos del producto de la profundidad por la velocidad.

**Tabla 6.11.** Nivel de intensidad o magnitud del evento de inundación

INTENSIDAD O MAGNITUD DE LA INUNDACIÓN	NIVEL DE INTENSIDAD O MAGNITUD DE LA INUNDACIÓN
$H \geq 0.9 \text{ m}$ ó $V \geq 0.8 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$	Alta
$0.45 \text{ m} \leq H < 0.9 \text{ m}$ ó $0.5 \text{ m/s} \leq V < 0.8 \text{ m/s}$ ó $0.225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$	Media
$0.05 \text{ m} < H < 0.45 \text{ m}$ y $V < 0.5 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.225 \text{ m}^2/\text{s}$	Baja

Fuente: CVC -Universidad del Valle

Los niveles de intensidad del evento son expresados en la Figura 6.4



**Figura 6.4.** Nivel de intensidad o magnitud de la amenaza por inundaciones.  
**Fuente:** CVC -Universidad del Valle

#### 6.2.4. Determinación de los niveles de amenaza por inundaciones

Después de determinar los umbrales y niveles de frecuencia e intensidad del evento se procede a clasificar los mapas de inundación en diferentes niveles cualitativos de amenaza (alta, significativa, media, moderada alta, moderada, moderada baja, baja, etc.).

Los niveles de amenaza que se recomienda utilizar son alta, media y baja, los cuales dependen de los niveles de frecuencia o recurrencia del evento y de los niveles de intensidad de la amenaza, expresada mediante los tres rangos de profundidades de agua recomendados, como se presenta en la Tabla 6.12.

**Tabla 6.12.** Nivel de amenaza según la frecuencia y la intensidad o magnitud de la inundación

		NIVEL DE AMENAZA		
NIVEL DE INTENSIDAD	Nivel de intensidad alto $H \geq 0.9 \text{ m}$ ó $V \geq 0.8 \text{ m/s}$ ó $H*V \geq 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$	Alto	Alto	Alto
	Nivel de intensidad medio $0.45 \text{ m} \leq H < 0.9 \text{ m}$ ó $0.5 \text{ m/s} \leq V < 0.8 \text{ m/s}$ ó $0.225 \text{ m}^2/\text{s} \leq H*V < 0.45 \text{ m}^2/\text{s}$	Alto	Medio	Medio
	Nivel de intensidad bajo $0.05 \text{ m} < H < 0.45 \text{ m}$ y $V < 0.5 \text{ m/s}$ y $H*V < 0.225 \text{ m}^2/\text{s}$	Medio	Bajo	Bajo
FRECUENCIA DE LA INUNDACIÓN		Frecuencia alta $Tr \leq 10$	Frecuencia media $10 < Tr \leq 30$	Frecuencia baja $30 < Tr \leq 100$

**Fuente:** CVC -Universidad del Valle

En la Tabla 6.13 se presenta la clasificación de amenaza por inundaciones.

**Tabla 6.13.** Clasificación de la amenaza por inundaciones

PROFUNDIDAD (m) ó VELOCIDAD (m/s) ó PROFUNDIDAD POR VELOCIDAD (m <sup>2</sup> /s)	NIVEL DE INTENSIDAD DE LA AMENAZA	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	NIVEL DE FRECUENCIA DE LA AMENAZA	CLASIFICACIÓN DE LA AMENAZA
$H \geq 0.9 \text{ ó } V \geq 0.8 \text{ ó } H*V \geq 0.45$	Alto	$Tr \leq 10$	Alto	Alto
$H \geq 0.9 \text{ ó } V \geq 0.8 \text{ ó } H*V \geq 0.45$	Alto	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Alto
$H \geq 0.9 \text{ ó } V \geq 0.8 \text{ ó } H*V \geq 0.45$	Alto	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Alto
$0.45 \leq H < 0.9 \text{ ó } 0.5 \leq V < 0.8 \text{ ó } 0.225 \leq H*V < 0.45$	Medio	$Tr \leq 10$	Alto	Alto
$0.45 \leq H < 0.9 \text{ ó } 0.5 \leq V < 0.8 \text{ ó } 0.225 \leq H*V < 0.45$	Medio	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Medio
$0.45 \leq H < 0.9 \text{ ó } 0.5 \leq V < 0.8 \text{ ó } 0.225 \leq H*V < 0.45$	Medio	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Medio
$0.05 < H < 0.45 \text{ y } V < 0.5 \text{ y } H*V < 0.225$	Bajo	$Tr \leq 10$	Alto	Medio
$0.05 < H < 0.45 \text{ y } V < 0.5 \text{ y } H*V < 0.225$	Bajo	$10 < Tr \leq 30$	Medio	Bajo
$0.05 < H < 0.45 \text{ y } V < 0.5 \text{ y } H*V < 0.225$	Bajo	$30 < Tr \leq 100$	Bajo	Bajo

Fuente: CVC -Universidad del Valle

### 6.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA. GENERALIDADES DEL MODELO HIDRAULICO HEC RAS

Los tramos del río Pescador, Zanjón Guabinero y Zanjón El Rincón se modelaron con el software HEC-Geo RAS, para el cual fue necesario realizar un Modelo Digital de terreno de toda la zona de estudio; se ingresaron los caudales máximos distribuidos en las longitudes de los canales conforme se encontraron en la información hidroclimatológica.

#### 6.3.1. Modelación hidráulica HEC GEO RAS

La modelación hidráulica se realiza con el modelo HEC-Geo RAS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, a continuación, se presenta las bases conceptuales del modelo implementado.

El HEC-GeoRAS es un sistema integrado diseñado para un uso interactivo en ambientes multiusuarios. El sistema está compuesto de una interface gráfica para el usuario, análisis de componentes hidráulicos por separado, almacenamiento de datos y manejo de funciones, gráficos y facilidades en la generación de reportes.

La versión HEC-GeoRAS soporta el cómputo de perfiles de agua en flujos permanentes y no permanentes. El modelo está diseñado para desarrollar cálculos hidráulicos en una dimensión para redes naturales y artificiales. El sistema puede manejar una red completa de canales, un sistema dendrítico o un solo río. El componente de flujo permanente soporta análisis con flujos subcríticos, supercríticos, críticos y mixtos. El procedimiento básico de computación está basado en la solución unidimensional de la ecuación de energía. La pérdida de energía es evaluada por fricción (Ecuación

de Manning) y coeficientes de contracción y/o expansión multiplicados por el cambio en la carga de velocidad. La ecuación de Momentum es utilizada en situaciones donde el perfil de agua es rápidamente variado; en estas situaciones se incluyen flujos mixtos, saltos hidráulicos, hidráulica de puentes y evaluación de perfiles en la confluencia de ríos.

### **6.3.1.1. Cálculo de perfiles de agua superficial**

Ecuaciones para los cálculos básicos de los perfiles: Los perfiles de agua superficial son calculados de una sección a otra resolviendo la ecuación de energía mediante un sistema de iteraciones “Método del paso estándar”. La pérdida de energía entre dos secciones está compuesta por pérdidas de fricción y contracción.

Subdivisiones en las secciones transversales para cálculos de transporte de caudal: La determinación del transporte total y del coeficiente de velocidad para una sección transversal requiere que el flujo sea subdividido en unidades en las cuales la velocidad es uniformemente distribuida. El algoritmo utilizado por HEC-RAS subdivide el flujo en las áreas del canal principal utilizando la entrada de los valores de coeficiente de Manning. El transporte del flujo es calculado con la subdivisión con la siguiente forma de la Ecuación de Manning:

$$Q = KS_f^{1/2} \quad K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3}$$

Donde:

K: Subdivisión para transporte

n: Coeficiente de rugosidad de Manning para la subdivisión

A: Área del flujo para la subdivisión

R: Radio hidráulico para la subdivisión

El programa suma todos los transportes para obtener el transporte adecuado en la banca derecha e izquierda. El canal principal es usualmente analizado como un elemento singular. El transporte total para la sección transversal es obtenido al sumar las tres subdivisiones de transporte (izquierdo, derecho, y canal principal)

### **6.3.1.2. Coeficiente de Manning para el Canal principal**

El flujo en el Canal principal no se subdivide excepto cuando el coeficiente de rugosidad es cambiado en el área del canal. El programa determina si el valor de n que corresponde a la sección transversal puede ser subdividida o si el valor de n compuesto para el canal principal puede ser utilizado basado en el siguiente criterio:

Si la pendiente lateral del canal es más pronunciada que 5H:1V y el canal principal tiene más de un valor de n, se calcula automáticamente un valor de n compuesto. El modelo determina la rugosidad equivalente; existen muchas hipótesis para el cálculo de este parámetro Paulovskii, (1931), Muhlhofer, (1933), Einstein y Banks, (1950) Lotter,(1932) entre otros. Además, usa las recomendaciones de Horton (1933) y Einstein (1934) que se basa en el supuesto de considerar que cada sub-área tiene la misma velocidad e igual a la velocidad media de la sección con lo cual se obtiene lo siguiente:

$$n_c = \frac{\sum (P_i \cdot n_i^{1.5})^{2/3}}{\sum P_i}$$

Dónde:

nc: Coeficiente de Rugosidad compuesta o equivalente

ni: Coeficiente de rugosidad para la subdivisión i

Pi: Perímetro mojado para la subdivisión i.

El procedimiento coincide en dividir la sección hidráulica en las partes que sean necesarias y asignarles un valor de “n” de rugosidad según corresponda a su naturaleza física de oposición al flujo. Como las secciones están geoméricamente definidas, el modelo evalúa con la fórmula anterior el valor de rugosidad equivalente, ver los capítulos 2 y 3 del manual del HEC-RAS (páginas 2-6, 2-7 y 3-12 a 3-16) y el libro Hidráulica de Canales Abiertos, Chow, (1959, págs 108 a 120 y 135), del que se obtienen los valores de referencia que se presentan a continuación:

Finalmente, a partir del reconocimiento de los factores expuestos anteriormente, Cowan propone el siguiente procedimiento:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

Donde  $n_0$  es un valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados,  $n_1$  es un valor que debe agregarse para corregir el efecto de las rugosidades superficiales,  $n_2$  considera las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal,  $n_3$  es un valor para considerar las obstrucciones,  $n_4$  tiene en cuenta la vegetación y las condiciones del flujo, y  $m_5$  es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal.

### 6.3.1.3. Evaluación de la cabeza principal de energía cinética

Debido a que el programa HEC-RAS es un programa desarrollado para perfiles de agua superficial, solamente una superficie de agua y una carga de energía se computan en cada sección transversal. Para una elevación de agua superficial dada, la energía principal es obtenida al realizar el cálculo con ponderación de las n sub-secciones en la sección transversal (Banca derecha, izquierda y canal principal).

### 6.3.1.4. Evaluación de Pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción son evaluadas por HEC-RAS como el producto de Sf y L, donde Sf es la fricción para la pendiente y L es la distancia ponderada para el tramo de análisis. El coeficiente de pendiente (pendiente de la línea de energía) para cada sección transversal es estimado con la ecuación de Manning (ver Tabla 6.14).

**Tabla 6.14.** Rugosidad Hidráulica de Manning en Cauces

CONDICIONES DEL CAUCE		VALORES DE RUGOSIDAD	
Material del Lecho	Tierra	no	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava triturada		0.028

CONDICIONES DEL CAUCE		VALORES DE RUGOSIDAD	
Grado de Irregularidad	Suave	n1	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variaciones de la Sección Transversal	Gradual	n2	0.00
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efectos Relativos de Obstrucciones	Despreciable	n3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	n4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-0.100
Meandros	Menor	m5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

**Fuente:** Chow (1959)

#### 6.3.1.5. *Evaluación de Contracciones y Expansiones*

El programa asume que una contracción está ocurriendo cuando la cabeza de velocidad aguas abajo es mayor que la cabeza de velocidad aguas arriba de igual manera, cuando la cabeza de velocidad aguas arriba es mayor que la cabeza de velocidad aguas abajo, el programa asume que una expansión del flujo está ocurriendo.

#### 6.3.1.6. *Limitaciones del programa*

Las siguientes hipótesis están implícitas en las expresiones analíticas utilizadas en la versión del programa:

- El flujo es gradualmente variado (con excepción de las estructuras hidráulicas como: puentes, tubos y vertederos). En estos casos el flujo puede ser rápidamente variado y la ecuación de momentum u otra ecuación empírica se utiliza.
- El flujo es unidimensional (los componentes de velocidad en otras direcciones que no son las del flujo no son contabilizados)
- Los canales de los ríos tienen pendientes pequeñas, es decir menor de 1:10

#### 6.3.2. Información de entrada al modelo

El HEC-GeoRAS 10.2 es una extensión de ArcGIS que provee del usuario un sistema de procedimientos, herramientas, y utilidades para la preparación de los datos de GIS para la importación de geometrías hidráulicas al HEC-RAS 5.0.3, y lectura de resultados generados. Mientras que la extensión de GeoRAS se diseña para los usuarios con experiencia geográfica limitada en los sistemas de información (GIS). Los usuarios, sin embargo, deben tener experiencia en modelar con HEC-RAS y tener con la comprensión de la hidráulica del río, una correcta interpretación de los modelos en el GIS. Se requiere ArcGIS 10.2, con las extensiones de

3DAnalyst. La información de entrada al modelo hidráulico la compone los siguientes tópicos: caudales asociados a los valores presentes en estaciones de monitoreo, Modelo Digital de Terreno (extraído del levantamiento topográfico y del diseño de la obra), establecimiento de secciones transversales y fronteras del modelo aguas abajo (condiciones desconocidas).

### **6.3.2.1. Caudales de Modelación**

Los caudales de modelación corresponden a los valores obtenidos en el estudio hidrológico para la zona de estudio y mencionado anteriormente.

### **6.3.2.2. Coeficiente de rugosidad**

En la etapa de calibración de un modelo hidráulico una de las principales incógnitas es la definición de la rugosidad del canal, ( $n$  Manning), en este caso, con la topografía de la zona e información de suelo levantada en campo, se define un coeficiente de rugosidad para el cauce.

### **6.3.2.3. Secciones Transversales**

Una vez elaborado el MDT se establecen las secciones transversales para la modelación hidráulica, estas se localizan priorizando sitios de interés, morfología del río y obras hidráulicas.

## **7. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA**

En conclusión, los resultados del modelo HEC-RAS son en el mejor de los sentidos la aproximación más exacta que se tiene del sistema de drenaje y sus resultados son propios de una simulación de un proceso de calibración metodológico. El análisis del comportamiento hidráulico de los Cauces analizados con el Software HEC-RAS, arroja los resultados para cuyo entendimiento es necesaria la codificación con la cual aparece la información, esta codificación se muestra a continuación:

Qtotal	= Caudal ( $m^3/s$ )
Min.Ch.El	= Elevación fondo (m)
Crit.W.S	= Elevación altura crítica (m)
E.G. Elev	= Elevación de la línea de energía (m)
E.G.Slope	= Pendiente de la línea de energía (m/m)
VelChnl	= Velocidad media del canal (m/s)
FlowArea	= Área mojada ( $m^2$ )
Top Width	= Ancho superior del espejo de agua (m)
Froude # Chl	= Número de Froude
Mann. comp.	= Rugosidad “equivalente” de la sección
LengthChnl-Left-Right	= longitud del canal por el eje-banca izq.-banca der. (m)
Levee El Left	= Elevación del Dique Izquierdo (m)
Levee El Right	= Elevación del Dique Derecho (m)

En este informe, se presentan los resultados para caudales modelados en diferentes secciones transversales y perfiles longitudinales a lo largo del río Pescador, Zanjón Guabinero y Zanjón El Rincón.

## **7.1. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDRAULICO HEC RAS**

Mediante la información del modelo digital de terreno, se realizó la modelación hidráulica de los cauces en la zona de estudio. Para lo cual, lo primero es la esquematización del modelo. El proceso de la implementación del modelo HEC RAS se presenta a continuación

### **7.1.1. Esquematización**

La esquematización del modelo se realizó mediante una malla computacional trazado de los ríos y los canales de acuerdo con los planos topográficos, la rugosidad de la llanura, las condiciones de fronteras, la calibración, la verificación y el análisis de sensibilidad en ambas márgenes de cada uno de afluentes en el área urbana del municipio de Bolívar.

#### **7.1.1.1. Descripción de la malla computacional**

El primer paso dentro del proceso de implementación del modelo matemático HEC RAS consiste en la construcción del modelo digital de elevaciones del terreno (DEM, por sus siglas en inglés). El DEM del municipio de Bolívar fue generado por el grupo de cartografía y SIG, incluyendo curvas de nivel menores a un metro. El siguiente paso consiste en delimitar de la manera más precisa posible el área a modelar. El área del modelo debe ser lo suficientemente grande de tal manera que el fenómeno de inundación en la zona urbana pueda ser representados y simulados correctamente, pero al mismo tiempo debe ser la menor posible con el fin de optimizar el tiempo computacional. El área a modelar debe incluir el área de principal interés del estudio como son la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Bolívar y los cauces y corrientes que se desbordan durante las crecientes y ocasionan daños en estas zonas.

También es importante ubicar de manera apropiada las fronteras abiertas del modelo, es decir, los sitios o secciones a través de los cuales ingresan y salen las corrientes de agua y flujos de lodos del área modelada. Se recomienda localizar las fronteras abiertas en aquellos sectores donde se cuente con la mayor cantidad de información posible (batimétrica, hidrológica, sedimentológica), como son las estaciones hidrométricas en los cauces. En el río Pescador la frontera abierta superior se localizó en la estación hidrométrica La Molina operada por la CVC. Frecuentemente durante la etapa de aplicación del modelo matemático (simulación de escenarios) se requiere plantear y evaluar la implementación de diferentes estructuras (tales como diques de protección, espolones, vertederos, puentes, bocatomas, etc.); estas estructuras generan variaciones las condiciones hidrodinámicas en el sector intervenido, pudiendo propagarse hasta alcanzar el sector de las fronteras abiertas del modelo; si esto llegase a presentarse se generaría un conflicto con las condiciones hidrodinámicas de frontera preestablecidas por el modelador. Para evitar este conflicto, debe procurarse que las fronteras abiertas del modelo se encuentren suficientemente distanciadas de los sitios de mayor interés en el estudio.

Un aspecto importante dentro del proceso de construcción de la malla computacional consiste en la selección del tamaño más apropiado de las celdas de la malla. La dimensión de las celdas depende de varios factores como son, la extensión del área de estudio (es decir, del área a modelar), el grado de detalle requerido o aceptable para describir el flujo, el tiempo computacional, la estabilidad numérica del modelo y las limitaciones del modelo matemático en cuanto al número máximo de celdas. Se realizaron numerosas simulaciones empleando las distintas mallas construidas como parte del proceso de análisis de sensibilidad del modelo.

Posteriormente se realizó la interpolación de los niveles topográficos disponibles en la planicie de inundación para asignar los niveles o elevaciones a cada una de las celdas de la malla computacional. Para ello el programa GDS dispone de distintas opciones de interpolación en las que el usuario elige el número mínimo de puntos de elevación a considerar en la vecindad de cada celda y el radio de interpolación, entre otros parámetros de acuerdo con la densidad de la información topográfica. En este proyecto se utilizó el promedio de la cantidad de puntos de elevación por celda y el método de la desviación estándar. De esta forma es asignado un único valor de elevación -que puede ser modificado manualmente- a cada celda de la malla computacional.

#### 7.1.1.2. *Rugosidad de las llanuras*

En la planicie del municipio de Bolívar existen cultivos, pastos naturales, árboles, guadua, rastrojo y zona urbana (superficies en concreto). En el Tabla 7.1 se presentan los valores del coeficiente de rugosidad de Manning estimados para las diferentes coberturas vegetales existentes en la zona de estudio del municipio de Bolívar.

**Tabla 7.1.** Valores estimados del coeficiente de rugosidad de Manning en la planicie aluvial de la zona de estudio del municipio de Bolívar

TIPO DE COBERTURA VEGETAL	COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING $n$ ( $s/m^{1/3}$ )
Cañaduzales	0.259
Rastrojo	0.100
Pasto natural	0.035
Zona urbana	0.025
Guadales	0.313
Árboles	0.025
Bosques	0.060

En los cultivos se asumió una densidad de 10 tallos por metro cuadrado; en los guaduales se estimó una densidad de 16 guaduas por metro cuadrado; y en los árboles se tomó un diámetro promedio de 0.5 m con base en las observaciones de campo realizadas en la zona de estudio del municipio de Bolívar. Los bosques se esquematizaron teniendo en cuenta la presencia de árboles de tronco de 0.5 m de diámetro y pasto natural, es decir, los valores de rugosidad para los bosques son la suma de los valores de rugosidad de árboles y pasto natural, para profundidades de inundación de 1 m y 0.15 m, respectivamente.

### **7.1.1.3. Esquematzación de los ríos y canales**

Posteriormente se realiza, dentro de la malla computacional, el trazado de los ríos y los canales siguiendo su alineamiento de acuerdo con los planos topográficos; este trazado de ríos y canales se efectúa siguiendo la margen izquierda de cada uno de ellos (mas no el eje de los ríos y canales); el modelo calcula o determina la margen derecha de acuerdo con el ancho de cada sección. En el modelo del municipio de Bolívar se incluyeron todos los cauces y canales existentes y que pueden originar problemas de inundación en el casco urbano, como son: río Pescador y zanjones Guabinero y el Rincón.

Inicialmente se ingresan las secciones transversales solamente del cauce principal de cada uno de los ríos y canales, es decir, sólo se introduce la sección del cauce comprendida entre las bancas derecha e izquierda, obviando la información topográfica de las llanuras puesto que ésta se encuentra incluida en el modelo digital de elevaciones del terreno DEM. Este trazado de los ríos y los canales se realiza procurando que el alineamiento de cada canal esquematizado en el modelo se asemeje a cada cauce, sin cambios bruscos en el trazado.

Es necesario señalar que el modelo HEC RAS calcula las profundidades de flujo promedio y, por consiguiente, es más significativo para la exactitud final de los resultados representar correctamente las características batimétricas promedio en un sector que representar de manera exacta la batimetría de todos los puntos de la malla.

Como se mencionó anteriormente, cada elemento de canal debe tener una sección transversal. Debido a que los levantamientos batimétricos se realizaron con un determinado espaciamiento entre secciones transversales del cauce, de acuerdo con la irregularidad de su geometría, fue necesario interpolar entre las secciones transversales levantadas en campo.

Se realizan aproximadamente cada 20 m, es necesario interpolar las secciones transversales originales para lograr que en cada celda del canal haya una sección transversal. Los valores del coeficiente de rugosidad de Manning en el río Pescador estimados e ingresados al modelo inicialmente se muestran en la Tabla 7.1 de acuerdo al tipo de cobertura. En los Zanjones Guabinero y El Rincón se asumió un valor de rugosidad constante de Manning de  $0.045 \text{ s/m}^{1/3}$  en todas las secciones transversales de estos cauces ya que todos estos cauces, a su paso por la zona urbana, se encuentran con presencia de abundante vegetación.

#### **➤ Puentes**

En la zona de estudio y sobre el río Pescador existen dos puentes, los cuales fueron implementados en el modelo. Fue necesario incluirlos en el modelo ya que éstos generan un efecto de remanso, originando mayores niveles de inundación hacia aguas arriba de ellos.

### **7.1.1.4. Condiciones de frontera**

Las condiciones hidrodinámicas a definir en las fronteras abiertas del modelo se denominan Condiciones de Frontera y revisten especial importancia durante el proceso de implementación de un modelo matemático. En el primer elemento o sección de cada canal (es decir, en la frontera

superior) se deben ingresar las hidrógrafas para los diferentes periodos de retorno que se requiere simular; la frontera inferior, es decir, en el último elemento o sección de cada canal (si éste no deriva sus aguas directamente a otro cauce) el modelo HEC RAS ofrece varias opciones de salida de flujo, entre las que se encuentran: los niveles de agua (si se dispone de ellos), la curva de calibración Nivel - Caudal (cuando se tiene) o el vertimiento libre del flujo. Aunque lo ideal sería disponer de alguna de las dos primeras opciones para propósitos de calibración, en muchos casos en la práctica no se cuenta con suficiente información medida en campo. Tal es el caso en el municipio de Bolívar, por lo cual en los cauces modelados se introdujo en las fronteras inferiores de los cauces, la opción de “Salida libre del flujo”. Además de asignar los elementos de salida de los cauces y canales se deben definir los elementos de salida del flujo de la planicie de la zona de estudio, pues, de lo contrario, se crearía un efecto de remanso que no representa la realidad. Para ello se definen la frontera aguas abajo que se encuentran ubicados en los bordes del dominio computacional, donde las elevaciones presentan los niveles más bajos. Se pueden definir cuantos nodos de salida se requieran; sin embargo, hay algunas especificaciones que deben ser tenidas en cuenta para su ubicación (deben estar alejados de las zonas de interés y no deben contener ningún otro elemento como calles u obstrucciones).

#### **7.1.1.5. Condiciones iniciales**

Las condiciones iniciales en el modelo hidrodinámico se refieren a las características hidrodinámicas (niveles de agua y caudales) que se presentan en el instante inicial ( $t = 0$ ) del periodo a simular en toda el área de estudio. Estas características hidrodinámicas deben corresponder a las condiciones reales en la naturaleza o prototipo y, por lo tanto, deben ser medidas en campo simultáneamente en toda la zona de estudio. Sin embargo, frecuentemente no es posible disponer de esta información debido a las dificultades económicas para llevarlas a cabo. El modelo matemático, teniendo en cuenta lo anterior, tiene la opción de no exigir al modelador el ingreso de estas condiciones iniciales. Considerando que en la zona de estudio del municipio de Bolívar no se dispone de esta información se optó por esta facilidad del modelo HEC RAS. En este caso el modelo genera las condiciones iniciales a partir de los caudales correspondientes al instante inicial de las hidrógrafas de caudales definidas en las fronteras del modelo.

#### **7.1.1.6. Simulación**

Una vez introducida la información esquematizada o discretizada de toda el área a analizar en el modelo matemático HEC RAS se debe dar inicio al proceso de calibración y verificación del modelo con base en la información disponible de caudales, niveles, áreas inundables y registros históricos. Igualmente, se realiza el análisis de sensibilidad con el fin de investigar la influencia de los principales parámetros numéricos y físicos en el comportamiento hidrodinámico de los cauces y canales de la zona de estudio del municipio de Bolívar.

### **7.1.2. CALIBRACIÓN**

La calibración de un modelo consiste en el proceso de ajuste de los elementos geométricos simplificados (batimetría, contornos de estructuras, etc.) y de los valores de los coeficientes empíricos (hidráulicos, de transporte, de sedimentos, etc.) que aparecen en las diferentes

ecuaciones (hidrodinámicas, de los sedimentos, etc.), de tal manera que los eventos simulados en el modelo reproduzcan de la mejor manera posible los eventos de la naturaleza.

Generalmente los resultados del modelo al inicio del proceso de calibración difieren en mayor o menor grado de los valores medidos en la naturaleza. El objetivo fundamental de la calibración es, por lo tanto, afinar el modelo de tal manera que las diferencias entre los valores calculados en la simulación y los valores medidos en la naturaleza sea mínima o despreciable. Este ajuste debe realizarse siempre teniendo en cuenta las características físicas de los diferentes parámetros y variables involucradas en los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos en los cauces, de tal manera que los mismos (parámetros y variables) deben encontrarse dentro de rangos característicos de los cauces como de la zona de estudio (rangos físicamente válidos).

El potencial de un modelo para reproducir y predecir los eventos reales (flujos, sedimentación, erosión, etc.) y la calidad potencial de su calibración dependerá de la calidad y cantidad de los datos topográficos, topológicos, hidráulicos y sedimentológicos disponibles para el sistema en estudio (Cunge, et al, 1980).

#### **7.1.2.1. Parámetros susceptibles de ajuste en el modelo matemático**

El proceso de ajuste se debe iniciar por los parámetros que más afectan los resultados del modelo. Para identificar estos parámetros, el análisis de sensibilidad puede ser de gran ayuda.

Los siguientes son los parámetros usualmente susceptibles de ajuste en el modelo matemático:

- Batimetría (área de flujo de las secciones transversales)
- Topografía de la planicie
- Rugosidad del lecho y de la planicie
- Factor de variación en la vertical de la rugosidad del lecho y la planicie
- Limitación del número de Froude
- Intervalo de tiempo,  $\Delta t$
- Tamaño de celda,  $\Delta x$

Es importante mencionar que la información con la cual se cuenta para realizar la calibración es muy limitada; únicamente se tienen, con base en los registros de eventos históricos de inundaciones, la delimitación aproximada de las zonas del casco urbano y de expansión urbana del municipio de Bolívar en donde se han presentado estos eventos. Por lo tanto, la calibración del modelo se debe realizar con base en el área inundada, asumiendo que dicha área fue afectada por inundaciones correspondientes al periodo de retorno de 100 años.

#### **7.1.2.2. Verificación del modelo**

La verificación del modelo consiste en efectuar una o más simulaciones hidrodinámicas para otras condiciones de niveles y caudales diferentes a las empleadas durante el proceso de calibración. Para ello se deberá disponer de la información de campo suficiente (para el modelo hidrodinámico son los niveles de agua, las velocidades de la corriente y los caudales) en las secciones de control preestablecidas. Los resultados del modelo para estas nuevas condiciones se compararían con los

datos de campo disponibles en las secciones o estaciones de control. Si se obtiene un buen ajuste, se considera que el modelo ha sido verificado. En caso contrario, se deberá revisar el proceso de calibración y realizar los ajustes correspondientes al modelo (p.e. revisar los factores de rugosidad, niveles batimétricos, condiciones de frontera, etc.).

En el caso particular del modelo matemático de la zona de estudio del municipio de Bolívar no se dispone de información de campo suficiente para poder realizar una verificación adecuada del modelo. Únicamente se cuenta con las hidrógrafas de caudales en los cauces modelados, correspondientes a los periodos de retorno.

Debido a esta limitación el modelo debe ajustarse lo mejor posible una vez terminada la calibración, de acuerdo con los mapas de registros de eventos históricos de inundaciones existentes en la zona de estudio.

### **7.1.3. Análisis de Sensibilidad**

Un análisis de sensibilidad permite evaluar la influencia de un determinado parámetro físico o numérico en los resultados de la simulación de un proceso en un sistema; es decir, permite investigar la respuesta del sistema cuando un parámetro dado es modificado. De esta manera es posible establecer los parámetros más sensibles o influyentes en el proceso de simulación, por cuanto pequeñas variaciones en ellos originan grandes cambios en la hidrodinámica del sistema, en algún sector o en toda el área de estudio. Este proceso puede realizarse manualmente o usando programas elaborados con este propósito. El análisis de sensibilidad suministra información valiosa para diferentes fines:

- Precisión requerida para los datos de entrada del modelo, las condiciones iniciales y otros parámetros como la rugosidad
- Establecer los parámetros que ejercen mayor influencia sobre las respuestas del modelo
- Calibración del modelo
- Diseño y ejecución de nuevos programas de campo, haciendo énfasis en las variables que mayor influencia ejercen en los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos

#### **7.1.3.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO DE LA ZONA DE ESTUDIO DEL MUNICIPIO DE BOLÍVAR**

El análisis de sensibilidad del modelo matemático de la zona de estudio del municipio de Bolívar se realizó variando de forma individual un número de factores asumidos independientemente para el fenómeno de inundaciones. Se evaluó la influencia de cada uno de los parámetros en la hidrodinámica del río, esto es, en la variación de las profundidades, los caudales y las velocidades de flujo. Esto se realizó con el fin de estimar las posibles variaciones que se generan en los resultados del modelo al modificar cada parámetro. La comparación de resultados se realizó en tres secciones transversales del río Pescador en su paso por la zona urbana. Finalmente, y como parte del proceso de calibración del modelo, se escogieron los valores de los parámetros que al ser implementados en el modelo matemático de la zona de estudio arrojan los resultados de las áreas inundadas que se asemejan más a las áreas inundadas registradas en el mapa de eventos históricos para el fenómeno de inundaciones.

Con base en los valores finalmente adoptados de los diferentes parámetros numéricos y físicos para simular el fenómeno de inundaciones se procedió a analizar el fenómeno de avenidas torrenciales, en donde se realizó también la variación de algunos parámetros como se indica más adelante; para este fenómeno se efectuó el mismo proceso de comparación de resultados en los mismos sitios de interés, hasta encontrar los valores definitivos para realizar la simulación de dicho fenómeno, es decir, la combinación de parámetros que permiten reproducir con mayor aproximación la extensión de las áreas afectadas por las avenidas torrenciales.

Para el análisis de la influencia en la hidrodinámica del río Pescador y los zanjones Guabineros y el Rincón de cada uno de los parámetros físicos y numéricos se realizaron diferentes simulaciones numéricas, variando en cada una de ellas solamente el valor del parámetro en consideración dentro de un rango relativamente amplio, así:

- Rugosidad del lecho: los valores de rugosidad de Manning se variaron desde 0.03 hasta  $0.07 \text{ s/m}^{1/3}$ . Finalmente, el valor adoptado de la rugosidad para ambos cauces fue de  $0.047 \text{ s/m}^{1/3}$ .
- Rugosidad de las planicies de inundación: para establecer la influencia de la rugosidad de la planicie de inundación sobre las características hidrodinámicas del flujo en la misma se realizaron dos simulaciones diferentes. En la primera se adoptó una rugosidad constante en la vertical, la cual se calculó de acuerdo con la metodología presentada para una profundidad de flujo de 0.15 m. El análisis de los resultados obtenidos mediante estas dos simulaciones permitió adoptar finalmente la segunda alternativa, es decir, considerando en la planicie de inundación una rugosidad variable en la profundidad, puesto que de esta forma se reproducen mejor las áreas inundadas históricamente.
- Intervalo de tiempo,  $\Delta t$ : este parámetro se redujo gradualmente hasta encontrar que las diferencias en las profundidades, los caudales y las velocidades del flujo calculadas para dos simulaciones consecutivas fueran despreciables. El intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , fue variado desde 0.1 horas hasta 0.0005 horas. De acuerdo con los resultados obtenidos, se seleccionó un intervalo de tiempo de 0.001 horas, es decir, 27 segundos, el cual permite reproducir de manera bastante aproximada las áreas inundadas históricamente. Cuando se utilizan intervalos de tiempo menores a 27 segundos no se mejora la precisión de los resultados, pero sí se incrementa de manera apreciable el tiempo computacional.
- Tamaño de celda,  $\Delta x$ : como se indicó previamente, se construyeron e implementaron cuatro mallas con celdas de distintos tamaños y se compararon los resultados. Finalmente, se adoptó un tamaño de celda de 3 m de lado, por cuanto el modelo arroja una mayor precisión y el tiempo computacional es todavía razonable pues, como se indicó previamente, la malla con celdas de 2 m de lado dio como resultado un número excesivo de celdas y, por consiguiente, un tiempo computacional muy alto.

## **7.2. RESULTADOS**

Una vez definidos los valores de los diferentes parámetros mediante los procesos de análisis de sensibilidad y calibración, se procedió a realizar las simulaciones para la determinación de las áreas potencialmente inundables y los niveles de amenaza para los escenarios correspondientes a los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años, para los fenómenos de inundaciones.

### **7.2.1. DETERMINACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE AMENAZA POR INUNDACIÓN**

Las condiciones morfológicas y climáticas del municipio de Bolívar favorecen la ocurrencia periódica de inundaciones ocasionadas por las fuertes lluvias en las partes altas y medias de la cuenca del río Pescador y el Zanjón Guabinero que provocan el aumento de los caudales y los niveles de agua en estos cauces y la escorrentía directa que llega a la zona urbana y de expansión procedente de las laderas adyacentes, inundando los sectores más bajos de la población.

Los desbordamientos de los cauces en la zona de estudio durante las épocas de invierno siempre han generado efectos negativos en las zonas pobladas y los terrenos dedicados a la agricultura y a la ganadería. Desde las primeras décadas del siglo XX las planicies de inundación de estos cauces han venido siendo urbanizadas, originando con ello un gran problema social. Con el propósito de disponer de una herramienta para la planificación del uso del suelo y gestión del riesgo se adelanta este estudio de amenazas naturales por inundaciones y avenidas torrenciales en el municipio.

En este capítulo se presentan los mapas de inundaciones (que registran las profundidades de agua en las áreas inundadas) y de amenaza por inundaciones (que indican la frecuencia y la magnitud de la inundación) originadas por los desbordamientos del río Pescador, los zanjones Guabinero y El Rincón, producto de las lluvias, que desciende de las laderas y afecta la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Bolívar.

En este estudio se evalúan las inundaciones: causadas por los desbordamientos de los cauces durante las crecientes, las cuales transportan los sedimentos del propio cauce y aquellos generados por la erosión laminar de los suelos de la cuenca por la acción directa de las lluvias y que se ha definido amenaza por inundación.

### **7.2.2. Consideraciones generales sobre las inundaciones**

Las inundaciones constituyen eventos recurrentes en los ríos y se presentan como consecuencia de lluvias fuertes y continuas que superan la capacidad de transporte de los ríos y la capacidad de absorción del suelo. Debido a esto el nivel del agua supera el nivel de banca llena del cauce principal del río y se produce la inundación de las planicies y tierras adyacentes. Estos eventos ocurren de forma aleatoria en función de los procesos climáticos locales y regionales. Se ha determinado estadísticamente que los ríos igualan o exceden su nivel de banca llena, en promedio, cada 2.33 años

Las inundaciones pueden ocurrir debido al comportamiento natural de los ríos o a alteraciones producidas por el hombre. Las condiciones naturales corresponden a las características climáticas y físicas propiciadas por la cuenca en su estado natural, como son: el relieve, el tipo de precipitación, la cobertura vegetal y la capacidad de drenaje. Entre las alteraciones provocadas por la acción del hombre se tienen: la impermeabilización de los suelos al urbanizarlos, la deforestación, la alteración de los cursos y la canalización de los ríos, la construcción de obras hidráulicas, etc.

Una cuenca en estado natural posee mayor interceptación vegetal, mayores áreas permeables, menor escurrimiento superficial del suelo y un drenaje más lento en relación con las características que presenta una vez es intervenida. Por esta razón las inundaciones se producen con menor frecuencia en una cuenca no intervenida.

Los problemas resultantes de los desbordamientos de las corrientes de agua dependen del grado de ocupación de la planicie de inundación y de la frecuencia con la cual ocurren las inundaciones. La población de mayor poder adquisitivo tiende a habitar las localidades seguras, mientras que la población más pobre tiende a ocupar las áreas de alta amenaza de inundación, provocando problemas sociales que se repiten durante cada creciente. Cuando la frecuencia de las inundaciones es baja la población subvalora la amenaza y ocupa las zonas inundables. Esta situación genera consecuencias catastróficas cuando se presentan nuevos desbordamientos. No obstante, la predicción de las inundaciones y sus efectos es una tarea bastante compleja, por cuanto el pronóstico del comportamiento hidrológico de largo plazo es difícil, debido, a la aleatoriedad de los fenómenos meteorológicos y, al gran número de parámetros y variables involucradas en los procesos hidrológicos (lluvia – escorrentía).

Normalmente las inundaciones suelen ser descritas en términos de su periodo de retorno, el cual corresponde al intervalo promedio de recurrencia entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada. Una inundación con un periodo de retorno de 100 años se refiere a un evento que presenta una probabilidad de ocurrencia del 1% en cualquier año, o también al evento que se presenta cada 100 años, en promedio. Estos periodos de retorno se determinan a partir de la información histórica existente, que en muchos casos corresponde a periodos demasiado cortos, por lo cual la estimación realizada tiene asociada una fuerte incertidumbre.

La variación del nivel del agua en una creciente de un río depende de las características climáticas y físicas de la cuenca hidrográfica y su predicción puede ser realizada a corto o largo plazo. La previsión a corto plazo, también llamada en tiempo real, permite establecer el nivel y su tiempo de ocurrencia en una sección de un río con una anticipación que depende de los tiempos de escurrimiento de la cuenca y las distribuciones temporal y espacial de la precipitación. Dado que estas distribuciones sólo pueden ser estimadas en forma confiable con antecedencia de pocos días u horas, la predicción de niveles no puede realizarse con una anticipación muy grande.

La predicción a largo plazo cuantifica la probabilidad de ocurrencia de inundaciones en términos estadísticos, sin precisar cuándo ocurrirán. La predicción se basa en la estadística de ocurrencia de niveles en el pasado y permite escoger los niveles de crecientes para algunos riesgos escogidos.

### 7.2.3. Medidas para el control y el manejo de inundaciones

Las medidas para el control y el manejo de las inundaciones pueden ser de tipo estructural y no estructural. Las medidas estructurales son aquellas que modifican el sistema fluvial evitando o mitigando los daños generados por las crecientes, en tanto que las medidas no estructurales son aquellas en que la magnitud de los daños se reduce como consecuencia de una mejor convivencia de la población con las crecientes. Las medidas estructurales son todas aquellas obras de ingeniería (diques, presas, canales de desviación, etc.) en las cuales se interviene el sistema fluvial natural afectando sus procesos hidrodinámicos y morfológicos. Estas intervenciones pueden originar efectos adversos en el sistema fluvial que requerirán para su manejo y control la construcción de nuevas obras.

Las medidas estructurales no pueden ser proyectadas para dar una protección total, ya que esto exigiría una protección contra la mayor creciente posible, lo cual física y económicamente no es factible. Es decir, las medidas estructurales no permiten controlar o evitar por completo las inundaciones, solamente tienden a minimizar los impactos originados por éstas. Una medida estructural puede crear una falsa sensación de seguridad, generando una mayor ocupación de áreas inundables, lo cual podría ocasionar daños significativos cuando se presenten inundaciones superiores al evento de diseño.

En consecuencia, el control y el manejo más eficaz de las inundaciones se obtiene al establecer estrategias que combinen las medidas estructurales y no estructurales, permitiendo a la población minimizar las pérdidas y lograr una convivencia armónica con el río. Es decir, las medidas no estructurales complementan con gran efectividad las actuaciones estructurales por encima de su umbral de protección.

El costo de protección de un área inundable a través de medidas estructurales, en general, es superior al de las medidas no estructurales. Por esta razón, las medidas no estructurales en conjunto con las estructurales pueden disminuir significativamente los daños con un costo menor.

#### 7.2.3.1. Medidas estructurales

Las medidas estructurales son obras de ingeniería construidas para reducir el riesgo originado por las crecientes. Estas medidas pueden ser extensivas o intensivas. Las medidas extensivas son aquellas que cubren toda la cuenca, procurando modificar la relación entre precipitación y caudal, como, por ejemplo, un cambio en la cobertura vegetal del suelo, la cual reduce y retarda los picos de las crecientes y controla la erosión de la cuenca.

Las medidas intensivas son aquellas que se enfocan en el río y pueden ser de tres tipos: (i) obras que aceleran el escurrimiento, como son la construcción de diques, el aumento de la capacidad de descarga de los ríos y el corte de meandros; (ii) obras que regulan la creciente, como, por ejemplo, las presas; y, (iii) obras que desvían parte del caudal, como son los canales de desvíos. En la Tabla 7.2 se presentan las principales características de las medidas estructurales.

**Tabla 7.2.** Descripción de las principales obras estructurales para control de las crecientes e inundaciones

MEDIDAS		VENTAJA	DESVENTAJA	APLICACIÓN
<b>Extensivas</b>	Cambio de la cobertura vegetal	Reducción pico de la creciente	Impracticable para grandes áreas	Cuencas pequeñas
	Control de pérdidas	Reducción del escurrimiento	Impracticable para grandes áreas	Cuencas pequeñas
<b>Intensivas</b>	Construcción de diques	Alto grado de protección	Generación de grandes daños si fallan	Ríos grandes
	Reducción de la rugosidad por desobstrucción	Aumento en la capacidad de drenaje con poca inversión	Efecto localizado	Ríos pequeños
	Corte de meandros	Aceleración del escurrimiento	Impacto negativo en ríos aluviales	Áreas de inundación estrechas
	Construcción de represas	Regulación de la creciente	Difícil localización	Cuencas medianas
	Canales de desvío	Reducción del caudal en el canal principal	Dependencia de la topografía	Cuencas medianas y grandes

**Fuente:** elaboración propia

### 7.2.3.2. Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales corresponden al conjunto de programas y actividades que permiten tener una mejor convivencia con las crecientes, minimizando las pérdidas que éstas pueden generar en las áreas inundables. Entre las medidas de protección no estructurales se tienen: los mapas de amenaza y de riesgos por inundación, los sistemas de previsión y alertas de inundaciones, los programas de protección civil y los programas de seguros contra crecientes.

En una clasificación más general identificó las siguientes medidas no estructurales: creación de aberturas en las estructuras, levantamiento de las estructuras existentes, construcción de nuevas estructuras sobre pilotes, construcción de pequeñas paredes o diques circundando una estructura, relocalización o protección de artículos que puedan resultar afectados dentro de una estructura, reubicación de estructuras por fuera del área de inundación, construcción de cerramientos con materiales resistentes al agua, implementación de un código de construcciones adecuado, compra de áreas inundables, seguros contra inundaciones, instalación de sistemas de previsión y alerta con planes de evacuación, adopción de incentivos fiscales para un uso prudente del área inundables, instalación de avisos de alerta en áreas inundables y adopción de políticas de desarrollo que impongan restricciones de uso a las áreas inundables.

### 7.3. MAPAS DE AMENAZA POR INUNDACIONES

Los mapas de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales constituyen una medida no estructural para el control de inundaciones. Estos mapas son modelos que permiten la evaluación y predicción de las consecuencias de un evento de precipitaciones extraordinarias; es decir, permiten identificar, clasificar y valorar las áreas potencialmente inundables del territorio.

La condición de amenaza se presenta únicamente cuando ocurre un evento natural en un área ocupada por actividades humanas (elementos expuestos) que deben soportar las consecuencias de dicho evento. En consecuencia, el riesgo puede dividirse en tres componentes estrechamente interrelacionados: la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición.

La amenaza o peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural con una cierta magnitud, generalmente de carácter sorpresivo y de evolución rápida, que afecta a un componente o a la totalidad del sistema territorial expuesto. En consecuencia, las inundaciones constituyen las amenazas, que son el resultado de la combinación de la tipología, las características de los eventos lluviosos y el conjunto de factores físicos del área afectada. Desde esta perspectiva, la diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo es que la primera se refiere a la probabilidad de que se manifieste un evento natural, mientras que el segundo está relacionado con la probabilidad de que se den ciertas consecuencias

La vulnerabilidad se refiere a la predisposición o susceptibilidad de los componentes antrópicos del sistema territorial para ser dañados total (destrucción) o parcialmente (deterioro) debido al impacto de la amenaza. Representa la medida de probabilidad de daño o pérdida de un componente o sistema territorial expuesto a la acción de la amenaza. La vulnerabilidad depende de dos condiciones: la ubicación del componente respecto a la zona de impacto de la amenaza (exposición) y las características y el estado de conservación del mismo. Por tanto, la vulnerabilidad es esencialmente una condición humana.

La exposición o elementos en riesgos se refieren a la distribución espacial de la población, actividades económicas, bienes materiales, obras de ingeniería, etc., sobre las que puede impactar la amenaza. En consecuencia, el riesgo de las inundaciones depende de la ocurrencia y magnitud de la amenaza natural y de la vulnerabilidad de un elemento o sistema territorial expuesto a ella.

Un desastre natural constituye la ocurrencia efectiva y real del riesgo que, debido a la vulnerabilidad de los elementos expuestos, causa efectos negativos sobre los mismos. En el caso de las inundaciones, la manifestación del desastre se presenta cuando el impacto de los desbordamientos supera los mecanismos de defensa adoptados por la sociedad, generando perjuicios económicos, sociales, físicos, etc. Así, para que un evento de desbordamiento se convierta en desastre es necesario que sus consecuencias tengan un impacto en una estructura humana vulnerable. Por esta razón, no todos los eventos de precipitaciones fuertes o constantes pueden ser considerados como amenazas, por cuanto su peligrosidad depende del grado de vulnerabilidad de los elementos expuestos al riesgo.

Para la evaluación del riesgo de inundaciones es necesario determinar, en primer término, los mapas de amenazas (mapa de inundación) y de vulnerabilidad, para posteriormente integrarlos, obteniendo el mapa de riesgos.

La realización de una cartografía de riesgo es un paso previo ineludible a la puesta en práctica de cualquier tipo de medida no estructural y, por tanto, esencial para poder llevar a cabo una gestión eficaz de las zonas inundables.

### **7.3.1. Clasificación de la amenaza en planicies de inundación**

El estado del arte en los criterios de evaluación de la magnitud del evento está basado en las combinaciones de factores hidrodinámicos y características del terreno sobre el cual actúa el fenómeno. En general, la magnitud e intensidad de la amenaza, originada por el desbordamiento de un río, en una planicie de inundación se ha establecido a partir de cuatro criterios.

1. Magnitud e intensidad asociada a las profundidades de agua. Se estima que profundidades de agua superiores a cierto valor pueden causar daños importantes. Este criterio es el más utilizado y en algunas ocasiones el único implementado por las entidades encargadas de la administración de los recursos hídricos.
2. Magnitud e intensidad asociada a la velocidad del flujo. Se fundamenta en el peligro que representa para las personas y los vehículos la capacidad de arrastre y erosión de flujos de agua de altas velocidades.
3. Magnitud e intensidad asociada a la combinación de las profundidades de agua y las velocidades. A partir de ciertos valores esta combinación resulta peligrosa e impide que las personas permanezcan de pie o puedan maniobrar a través del flujo. Este criterio fue propuesto en la última década utilizando una cantidad limitada de datos experimentales. En la actualidad se están desarrollando experimentos tendientes a determinar la profundidad y la velocidad del flujo que generan inestabilidad en las personas.
4. Magnitud e intensidad asociada a la capacidad del flujo para generar erosión y transportar escombros.

Adicionalmente, el tiempo de duración de la creciente es otro parámetro importante en la determinación de la magnitud e intensidad de la amenaza por inundaciones.

### **7.3.2. Determinación de caudales extremos**

La extensión de las áreas inundadas durante un desbordamiento está asociada al caudal que genera la creciente. Entre mayor sea el caudal que discurre por el río mayores serán las áreas que resultarán anegadas. Los caudales que generan crecientes corresponden a eventos extremos que afectan eventualmente los sistemas hidrológicos. La magnitud de estos caudales está inversamente relacionada con la frecuencia de ocurrencia (caudales muy extremos se presentan con una frecuencia muy baja) a través de un análisis basado en distribuciones de probabilidad.

El número promedio de años en que un caudal de determinada magnitud es igualado o excedido se define como el periodo de retorno o de recurrencia de ese caudal. El periodo de retorno es un concepto estadístico que no implica que un determinado caudal no pueda ser superado dos veces en un número de años menor al especificado por dicho período.

La determinación de los caudales extremos en los diferentes cauces involucrados se realizó mediante la modelación hidrológica (a través de la implementación del modelo HEC-HMS del

Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos) con base en los análisis de los registros de precipitaciones en las estaciones climatológicas localizadas en la zona de estudio.

### **7.3.3. Modelación hidrodinámica y generación de mapas de inundación**

Para la modelación hidrodinámica de las crecientes y la posterior generación de los correspondientes mapas de inundación se realizó inicialmente un análisis preliminar de las características de las inundaciones que se presentan en el río Pescador y los zanjones Guabineros y el Rincón. Las crecientes de estos cauces presentan duraciones relativamente variables. Sin embargo, en promedio las crecientes presentan una duración entre 8 y 12 horas. En este estudio se adoptó el valor más crítico registrado que corresponde a 18 horas para los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años.

La modelación hidrológica permitió determinar las hidrógrafas de caudales en las fronteras seleccionadas de los cauces de la zona de estudio, las cuales describen el comportamiento o evolución temporal de las crecientes. Posteriormente, mediante la implementación del modelo hidrodinámico HEC RAS, se realizó el tránsito de las hidrógrafas de caudales, generando de esta manera los mapas de inundaciones. Los parámetros de calibración de los modelos hidrodinámicos se determinaron siguiendo la metodología descrita previamente.

### **7.3.4. Modelación hidrodinámica y generación de mapas de inundación por escenarios para los fenómenos de inundaciones**

La modelación hidrodinámica de las crecientes de los cauces y la escorrentía superficial de las lluvias correspondientes a los periodos de retorno de 10, 30 y 100 años se inicia definiendo la zona de modelación, la cual debe incluir el área urbana y de expansión urbana del municipio. El río Pescador es el cauce principal que atraviesa el municipio; los zanjones Guabineros y el Rincón son cauces importantes que atraviesan el casco urbano. Después de definir las hidrógrafas de caudales como condiciones hidrodinámicas en las fronteras del modelo se procedió a realizar la simulación hidrodinámica siguiendo las diferentes etapas como se describió detalladamente con anterioridad (implementación del modelo, análisis de sensibilidad, calibración y simulación de escenarios). Con base en los resultados del modelo hidrodinámico HEC RAS se generaron los mapas de inundación utilizando el software ArcGIS.

Una vez obtenidos los mapas de inundaciones para los eventos correspondientes a periodos de retorno de 100 años se procedió a implementar la metodología de amenaza (niveles de intensidad vs. niveles de frecuencia) para determinar los mapas de amenaza por inundaciones, permitiendo así establecer en cada escenario los niveles de amenaza (alta, media y baja).

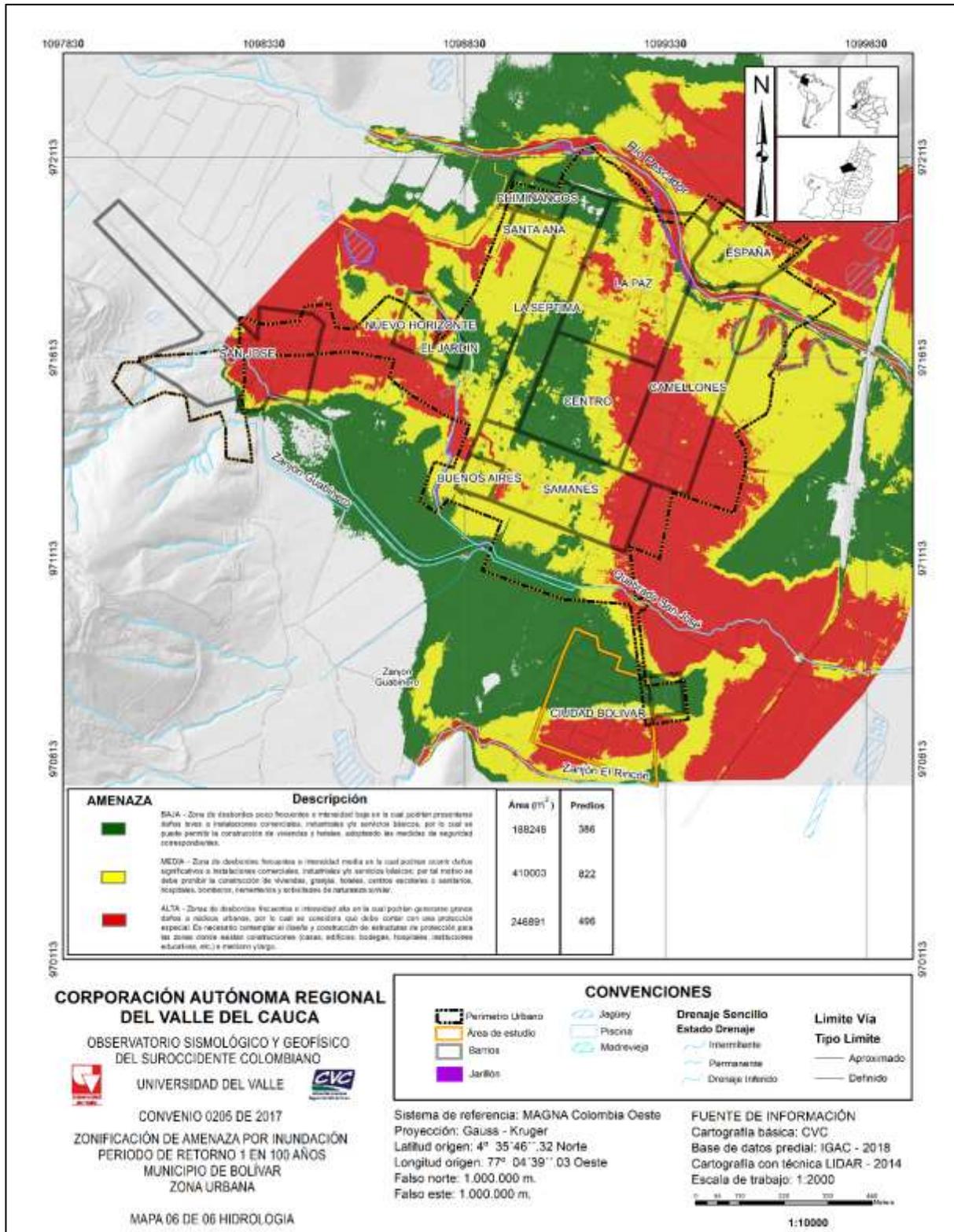
## **7.4. GENERACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE AMENAZA GLOBAL POR INUNDACIONES**

Para el fenómeno de inundaciones se determinó el mapa de amenaza global, considerando en cada espacio del territorio (o celda de la malla computacional) la situación o nivel de amenaza más crítico establecido para los tres periodos de retorno evaluados (100 años).

El mapa de amenaza por inundación finalmente obtenido para el municipio de Bolívar se presentan en la Figura 7.1. En estos mapas se indica la zonificación de los diferentes niveles de amenaza por inundaciones.

#### **7.4.1. Integración de los mapas de amenaza global por inundaciones**

Con base en los mapas de amenaza global por inundaciones y por avenidas torrenciales se determinó finalmente un mapa único de amenaza para el municipio de Bolívar que integra estos dos mapas, adoptando los niveles de amenaza más críticos establecidos en cada una de las celdas del área de estudio. Este mapa establece el nivel de amenaza más crítico hallado en cada celda de la zona de estudio considerando los dos fenómenos evaluados. El mapa integrado de amenaza por inundaciones se presenta en la Figura 7.1.



**Figura 7.1.** Mapa de inundaciones – Periodo de retorno de 100 años.

**Fuente:** elaboración propia

## CONCLUSIONES

En el presente estudio inicialmente se establecieron los mapas de inundaciones originadas por las crecientes del río Pescador y los zanjones Guabinero y el Rincón para periodos de retorno de 10, 30 y 100 años y posteriormente se generó la cartografía de amenaza por inundaciones en la zona urbana y de expansión urbana del municipio de Bolívar.

Analizando la información de la estación climática más cercana al municipio de Bolívar se puede considerar lo siguiente: La temperatura media mensual en el Municipio de Bolívar varía entre 23,8 °C (en los meses de octubre y noviembre) y 24,8 °C (mes de marzo), presentando un valor promedio mensual multianual de 24,4 °C. Las temperaturas máximas registran valores que oscilan entre 32,2°C y 34,4°C, siendo el valor medio mensual de temperatura máxima de 33,3°C. Los valores de temperatura mínima oscilan entre 16,2°C y 17,4°C, teniendo un valor medio mensual de temperatura mínima de 16,9°C.

El promedio mensual de horas de brillo solar en el Municipio de Bolívar oscila entre 149 horas y 209 horas; los valores más altos de horas de brillo solar se presentan en el mes de julio, mientras que los valores más bajos de horas de brillo solar se presentan en el mes de abril. En el Municipio de Roldanillo se presenta un valor promedio mensual de brillo solar de 172 horas.

La humedad relativa media mensual en el Municipio de Bolívar oscilan entre 71% y 76 %, y presenta un valor promedio mensual de 73%. En los meses de febrero, marzo, julio y agosto se presentan los registros más bajos, y en los meses de mayo, octubre y noviembre se registran los valores más altos.

El valor más alto de evaporación media mensual se presenta en el mes de agosto con un valor de 155 mm/mes, mientras que los valores más bajos se presentan en el mes de noviembre con un valor medio de 120 mm/mes; presentando un valor promedio mensual de 137 mm/mes.

El municipio de Bolívar presenta un régimen de precipitaciones de tipo bimodal, registrando las mayores precipitaciones en los periodos comprendidos por los meses de marzo a mayo y por los meses de septiembre a noviembre, siendo el mes de octubre el de mayor precipitación con un valor de 163,09 mm/mes. Las precipitaciones más bajas se registran en el periodo comprendido entre los meses de junio a agosto y entre los meses de enero a febrero incluyendo el mes de diciembre, siendo el mes de enero el de menor precipitación con un valor de 64,73 mm/mes. El Municipio de Bolívar presenta un valor promedio mensual de precipitación de 106,33 mm/mes y una precipitación anual de 1276 mm/año.

Para la estimación de las máximas precipitaciones para 24 horas, 48 horas y 72 horas se consideró toda la serie de registros diaria de las estaciones localizadas en la zona de estudio, los valores de P24h, P48h y P72h que se obtuvieron en el municipio de Bolívar fueron de: 146.85 mm, 168.13 mm y 186.42 mm respectivamente, mientras que para la zona urbana se obtuvieron los siguientes valores: 116.40 mm, 119.72 mm y 142.32 mm.

Con la información de precipitación máxima anual de 3 estaciones localizadas en el municipio de Bolívar, estaciones: Bolívar, Betania y El Retiro, se calcularon las precipitaciones máximas para periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, en donde gráficamente se puede observar que la función de probabilidad que mejor se ajusta a los datos de precipitaciones máximas reportados en la estación es la Log Normal, a continuación, se presentan los resultados obtenidos: los valores de precipitación máxima para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años obtenidos con la información de la estación Bolívar presentaron los siguientes resultados: 57.09 mm (Tr = 2 Años), 74.91 mm (Tr = 5 Años), 86.36 mm (Tr = 10 Años), 100.48 mm (Tr = 25 Años), 110.81 mm (Tr = 50 Años), 121.01 mm (Tr = 100 Años) y 131,16 mm (Tr = 200 Años), los valores de precipitación máxima para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años obtenidos con la información de la estación Betania presentaron los siguientes resultados: 63.65 mm, 92.06 mm, 111.66 mm, 137.18 mm, 156.68 mm, 176.57 mm y 196.98 mm. Finalmente, los valores de precipitación máxima para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años obtenidos con la información de la estación El Retiro presentaron los siguientes resultados: 56.63 mm, 73.32 mm, 83.94 mm, 96.95 mm, 106.41 mm, 115.70 mm y 124.91 mm.

Los caudales máximos correspondiente a periodos de retorno de 2 años, 5 años, 10 años, 25 años, 50 años y 100 años del Zanjón Guabinero y Zanjón El Rincón, cauces que pasan por el casco urbano del municipio de Bolívar, se estimaron mediante modelación hidrológica utilizando el programa Hec Hms, obteniendo los siguientes resultados: los caudales máximos obtenidos en El Zanjón Guabinero para periodos de retorno de 2 años, 5 años, 10 años, 25 años, 50 años y 100 años fueron de: 5.5 m<sup>3</sup>/s, 10.9 m<sup>3</sup>/s, 15.3 m<sup>3</sup>/s, 21.5 m<sup>3</sup>/s, 26.5 m<sup>3</sup>/s y 31.5 m<sup>3</sup>/s respectivamente y los caudales máximos obtenidos en El Zanjón El Rincón para periodos de retorno de 2 años, 5 años, 10 años, 25 años, 50 años y 100 años fueron de: 0.5 m<sup>3</sup>/s, 1.9 m<sup>3</sup>/s, 3.3 m<sup>3</sup>/s, 5.6 m<sup>3</sup>/s, 7.5 m<sup>3</sup>/s y 9.3 m<sup>3</sup>/s.

La cartografía de amenaza por inundaciones fue determinada aplicando la metodología propuesta mediante la cual se realiza la zonificación de las áreas inundadas de acuerdo con los niveles de intensidad y frecuencia de cada uno de los fenómenos, con base en los resultados de la modelación hidrodinámica y generando los mapas con el software ArcGIS.

La metodología establece tres niveles de amenaza según los rangos de frecuencia del fenómeno (representada en el periodo de retorno de la creciente) y el rango de magnitud o intensidad (representada por la profundidad de agua en las áreas inundadas, la velocidad de la corriente y el valor del producto de la profundidad por la velocidad, es decir, el caudal unitario).

La cartografía de amenaza por inundaciones se constituye en una importante herramienta de apoyo que puede ser utilizada para la optimización de los planes de ordenamiento territorial del municipio de Bolívar, la optimización de los sistemas de alerta y emergencia, el diseño y construcción de obras de protección y, en general, la gestión del riesgo. La cartografía de amenaza generada representa una medida no estructural para el control de estos fenómenos naturales.

Los mapas de amenaza por inundaciones constituyen una importante herramienta de apoyo que puede ser utilizada para diferentes propósitos, tales como:

- Optimización de los planes de ordenamiento territorial del municipio, de acuerdo con los niveles de amenaza. Los mapas permiten identificar las zonas que presentan un mayor grado de amenaza, en las cuales se deben establecer fuertes restricciones de uso del suelo.
- Implementación y optimización de los sistemas de alerta y emergencia ante la ocurrencia de inundaciones. La predicción de la profundidad que alcanzaría el agua en la planicie de inundación, así como la velocidad del flujo y el producto de la profundidad por la velocidad, permiten estimar el posible impacto generado por una creciente y, en consecuencia, establecer prioridades en las actividades a implementar (medidas no estructurales) antes, durante y después de los desbordamientos.
- Diseño de obras de protección, mitigación y/o control. Los mapas de amenaza indican las zonas potencialmente inundables y las características de los flujos en dichas zonas en caso de presentarse un evento extremo, por lo cual permiten plantear y analizar diferentes alternativas de obras (medidas estructurales) que conduzcan a la prevención, mitigación y/o control del fenómeno y definir finalmente la alternativa más apropiada considerando los diferentes aspectos sociales, ambientales, técnicos y económicos.
- La cartografía de inundaciones generada constituye una herramienta útil para el análisis de la amenaza asociada a inundaciones y avenidas torrenciales que resulta indispensable para la determinación de la vulnerabilidad y la cuantificación del riesgo (escenarios de afectación) por estos fenómenos. Esta cuantificación representa el paso inicial para la evaluación del riesgo.

## RECOMENDACIONES

Los mapas de amenaza generados debido a la posible ocurrencia de los fenómenos de inundaciones deben ser empleados para la determinación de la vulnerabilidad y la cuantificación y evaluación del riesgo, y finalmente para el reordenamiento del territorio del municipio de Bolívar teniendo en cuenta los diferentes grados o niveles de amenaza establecidos, así:

- **Nivel de amenaza alto:** zonas de desbordes frecuentes e intensidad alta en la cual podrían generarse graves daños a núcleos urbanos, por lo cual se considera que debe contar con una protección especial. Es necesario contemplar el diseño y construcción de estructuras de protección para las zonas donde existan construcciones (casas, edificios, bodegas, hospitales, instituciones educativas, etc.) a mediano y largo.

- **Nivel de amenaza medio:** zona de desbordes frecuentes e intensidad media en la cual podrían ocurrir daños significativos a instalaciones comerciales, industriales y/o servicios básicos; por tal motivo se debe prohibir la construcción de viviendas, granjas, hoteles, centros escolares o sanitarios, hospitales, bomberos, cementerios y actividades de naturaleza similar. Se debe considerar a largo plazo el cambio de uso del suelo en cuanto a las construcciones existentes en esta zona, si no se contempla el diseño y construcción de estructuras de protección (con el fin de minimizar los daños que se puedan ocasionar por las inundaciones)

- **Nivel de amenaza bajo:** zona de desbordes poco frecuentes e intensidad baja en la cual podrían presentarse daños leves a instalaciones comerciales, industriales y/o servicios básicos, por lo cual se puede permitir la construcción de viviendas y hoteles, adoptando las medidas de seguridad correspondientes.

## MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Las medidas no estructurales, solas o en conjunto con las estructurales, pueden minimizar significativamente las afectaciones de los elementos expuestos en las áreas amenazadas y, por ende, disminuir los costos de los posibles daños. Entre las principales medidas estructurales recomendadas se tienen las siguientes:

- **Sistemas de pronóstico y alerta temprana:** tienen la finalidad de anticiparse a la ocurrencia de la inundación, avisando a la población para la oportuna evacuación de las áreas potencialmente afectadas por el fenómeno y tomando las medidas necesarias para reducir los perjuicios resultantes de la inundación. Para el sistema de pronóstico se requiere de un sistema de monitoreo (registro continuo y permanente de precipitaciones y niveles de agua en la parte alta de la cuenca del río Pescador y transmisión telemétrica a un centro de pronósticos.

- **Elaboración y desarrollo de programas de prevención, educación y alerta,** dirigidos a toda la población, incluyendo hospitales, escuelas, instituciones públicas y privadas, industrias, infraestructura.

- **Realizar una zonificación técnica de las áreas sometidas a diferentes niveles o grados de amenaza,** así:

**(I) Zona de amenaza alta:** cualquier construcción que exista en esta área reduce el área de escurrimiento, elevando los niveles de aguas arriba de esta sección; esta zona debe quedar libre para evitar daños importantes y represamientos; no se debe permitir ninguna nueva construcción en esta zona y el municipio podrá, paulatinamente, trasladar las construcciones existentes; esta área puede ser usada para la agricultura u otro uso similar; adicionalmente, se puede permitir la instalación de líneas de transmisión y conductos hidráulicos o cualquier tipo de obra que no produzca obstrucción al escurrimiento, como por ejemplo, estacionamientos, campos de deportes, entre otros.

**(II) Zona de amenaza media:** las áreas expuestas a este nivel de amenaza pueden tener los siguientes usos: (a) parques, actividades de recreación y deportivas cuyo mantenimiento, después de cada crecida, sea simple y de bajo costo; normalmente una simple limpieza restablece rápidamente su condición de uso; (b) agropecuario; (c) viviendas con más de un piso, donde el piso superior quedará por lo menos en el nivel del límite de la crecida y estructuralmente protegida contra crecidas; (d) industrial y comercial, como áreas de cargas, estacionamiento, áreas de almacenamiento de equipos o maquinaria fácilmente removible o que no estén sujetos a los daños que genera una crecida; en este caso no se debe permitir el almacenamiento de artículos perecederos y principalmente tóxicos; (e) servicios básicos, líneas de transmisión, calles y puentes, siempre y cuando estén correctamente proyectados.

**(III) Zona de amenaza baja:** teniendo en cuenta la baja probabilidad de ocurrencia y las pequeñas láminas de agua y bajas velocidades de las inundaciones que pueden presentarse en esta zona no se requiere una reglamentación especial debido a que los posibles daños se considera pueden ser de menor cuantía.

Se recomienda diseñar e implementar un programa de mediciones de campo orientado a la recolección de información durante la ocurrencia del fenómeno de inundación en el municipio de Bolívar: El programa debe permitir la toma de datos e información sobre las características más importantes de los eventos catastróficos, tales como, registro de niveles de agua, duración de las crecientes, límites de áreas inundadas o afectadas, profundidades de agua y lodos en las diferentes zonas afectadas, toma y análisis de muestras de lodos para determinar sus propiedades sedimentológicas (granulometrías, concentraciones, etc.) y reológicas (esfuerzos cortantes, viscosidad). El análisis de la información recolectada permitirá la optimización y actualización de los modelos hidrodinámico y de lodos implementados en el presente estudio.

## REFERENCIAS

- Agencia Catalana del Agua. (2003). Recomendaciones técnicas para los estudios de inundabilidad locales. Guía técnica. Cataluña.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. M., Saldarriaga, L. W., y Juan, G. (1994). Hidrología aplicada (No. 551.48 C4H5). Páginas 584.
- Chow, V. T. (1959). Open-channel hydraulics. McGraw-Hill
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca– CVC-Universidad del Valle, Convenio 168 de 2003 (2005). Formulación de Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas en el Valle del Cauca.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC-Universidad del Valle, (2007). Metodología implementada para la generación de mapas de inundación en la llanura aluvial del río Cauca. Proyecto de modelación río Cauca – Proyecto PMC.
- Cunge, J.A, Holly, F.M., Verwey A. (1980). Practical Aspects of Computational River Hydraulics, Pitman Publishing Limited. Londres.
- Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones de España, (1995).
- Einstein, H. A. (1934). The Hydraulic Cross Section Radius, Schweizerische Bauzeitung, Vol. 103, No. 8, pp. 89-91. 8.
- Einstein, H. A., y Banks, R. B. (1950) Fluid Resistance of Composite Roughness, Transactions of American Geophysical Union, Vol. 31, No. 4, August. pp. 603-610.
- García, R., Rodríguez, J.J. y O'Brien, J.S. (2001). Metodología para delimitación de mapas de amenaza propuesta. Proyecto PREVENE
- Gobierno de Aragón – Iberinsa, (2005). Metodología propuesta en el Plan Medioambiental del río Ebro y tramo bajo del río Cinca.
- Horton, R. E. (1933). Separate Roughness Coefficients for Channel Bottom and Sides, Engineering New Record, Vol 111, No 22, Nov. 30, pp. 652- 653. 7.
- Instituto de Estudios Ambientales y Meteorológicos - (IDEAM) y Universidad Nacional de Colombia (2013). Zonificación de amenazas por inundaciones a escala 1:2000 y 1:5000 en áreas urbanas para 10 municipios del territorio colombiano. Bogotá DC. Colombia
- Instituto de Estudios Ambientales y Meteorológicos - (IDEAM) (2016). Subdirección de Hidrología Curvas IDF para 110 estaciones. En línea. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC y Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC (2004). "Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del departamento del Valle del Cauca, Tomo I y Tomo II.". Valle del Cauca, Colombia
- Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales y Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (2005). Proyecto MET-ALARN INETER/COSUDE “INUNDACIONES FLUVIALES MAPAS DE AMENAZA”. Recomendaciones técnicas para su elaboración. Managua, Nicaragua.
- Jarrett, RD. (1984). “Hydraulics of high-gradient streams”. Journal of Hydraulic Engineering. Capítulo.11 Páginas. 1519-1539.
- Lavell, A. 1996. Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. *In Ciudades en Riesgo*. Comp.MA, Fernández. Peru, La Red. p. 21-59.

- López, R. (2005). Resistencia al flujo de ríos de montaña: desarrollo de ecuaciones de predicción. España.
- Lotter, G. K., (1932). Considerations on Hydraulic Design of Channels with Different Roughness of Walls, Transactions of All-Union Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering, Vol. 7, pp. 55-88.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS. (2012). Guía para el acotamiento de las rondas hídricas de los cuerpos agua. Bogotá D.C, Colombia.
- Ministerio para la Transición Ecológica Secretaria de Estado de Interior de España (1995). Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones. España.
- Muhlhofer, R. (1933). Investigations in a Shaft with Concrete Bottom and Unlined Walls, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Vol. 28, No. 8, pp. 85-88.
- PATRICOVA, (2002). Metodología planteada por el Plan de Acción Territorial de Carácter Sectorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana.
- Pavlovskii, N. N. (1931). On a Design Formula for Uniform Movement in Channel with Nonhomogeneous Walls, Transactions of AllUnion Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering, Vol. 3, pp. 157-164. 9.
- Secretaria de Estado de Interior de España. (1995). Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones. España.
- Universidad del Valle-Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. (1999). Informe de la campaña de seccionamiento del río Cauca. Agosto - Octubre 1998. Cali.
- Universidad del Valle-Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. (2000). Caracterización del río Cauca. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.
- Universidad del Valle-Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. (2000). Caracterización de ríos tributarios del río Cauca. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.
- Universidad del Valle-Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. (2001). Modelación matemática del río Cauca. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.
- Universidad del Valle-Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. (2001). Levantamiento batimétrico del río Cauca. Octubre – Diciembre 2000. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.
- Universidad del Valle-Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. (2004). Red geodésica de alta precisión. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.
- Universidad del Valle-Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. (2004). Estudio topobatimétrico de los principales ríos tributarios del río Cauca. Tramo Salvajina – La Virginia. Cali.
- Universidad del Valle-Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. (2005). Optimización y aplicaciones de los modelos hidrodinámico, sedimentológico y morfológico del río Cauca. Tramo La Balsa – La Virginia. Cali.