



LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA EL DESARROLLO DE ESTUDIOS DE RIESGO POR INUNDACIÓN LENTA

Subdirección para el Conocimiento del Riesgo

Ortofotomosaico de la región de la Mojana,
sector San Marcos (Sucre)
Fuente: IDEAM, 2015

Juan Manuel Santos
Presidente de la República

Carlos Iván Márquez Pérez
Director
Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de
Desastres (UNGRD)

Graciela María Ustariz Manjarrés
Subdirectora General
Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de
Desastres (UNGRD)

Lina Dorado González
Subdirectora para el Conocimiento de Riesgo
(UNGRD)

Nelson Omar Vargas Martínez
Subdirector de Hidrología del Instituto de
Hidrología, Meteorología y Estudios
Ambientales (IDEAM)

Fabio Andrés Bernal
Director del Centro Nacional de Modelación
del Instituto de Hidrología, Meteorología y
Estudios Ambientales (IDEAM)

Equipo técnico Subdirección para el Conocimiento del Riesgo

Grupo de trabajo de campo

Franluid Posada
Wilson R. Sepúlveda
Anuar Aguas
Devis A. Pérez
Duván Durango

Modelación de amenaza por inundación

Julián D. Arbeláez
José Ville Triana
Fabián Caicedo (IDEAM – Centro Nacional de
Modelación CNM).

Modelo de exposición

Jairo Andrés Valcárcel Torres

Evaluación y análisis de vulnerabilidad física

Juan Pablo Forero Acevedo

Diagnóstico y evaluación de la vulnerabilidad social

Paula Andrea Villegas González
Maykel Yiseth Gutiérrez

Evaluación, análisis y cálculo de riesgo

Juan Camilo Olaya González.

Corrección de estilo

Carolina Giraldo González – Subdirección
General

Diagramación y fotografía

Subdirección para el Conocimiento del Riesgo -
UNGRD

Agradecimientos a las entidades que colaboraron

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Departamento Administrativo Nacional de
Estadística (DANE).

Universidad de Cartagena.

Comités Departamentales y Municipales de
Gestión del Riesgo.

Líderes de Juntas de Acción Comunal.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo
de Desastres - 2018

© Derechos reservados

Está prohibida la reproducción total o parcial de
esta publicación con fines comerciales

Contenido

Lista de figuras.....	v
Lista de fotografías.....	vi
Lista de mapas.....	vi
Lista de tablas.....	vi
Abreviaciones y siglas.....	viii
Prólogo	1
Introducción.....	3
Antecedentes.....	5
Motivación.....	5
Objetivos	7
Alcance, uso y aplicación de los lineamientos.....	7
Público Objetivo.....	9
Documentos de referencia para la ampliación de la información	10
Contexto nacional de afectación por inundación	12
Historia de eventos de inundación en el país	12
Principales afectaciones en la historia reciente	19
Normatividad en los procesos de incorporación de las evaluaciones de riesgo en la planificación territorial	30
Metodología General	33
Componentes para el análisis del riesgo por inundación.....	37
Amenaza por inundación lenta	38
Introducción	38
Objetivos	38
Alcance	39
Detalles metodológicos.....	39
Información básica.....	41
Análisis Hidrológico.....	44
Análisis hidráulico	48
Salidas gráficas.....	56
Conclusiones sobre la metodología.....	60
Modelo de Exposición	61
Introducción	61
Objetivos.....	62
Alcance	62
Detalles metodológicos.....	64
Localización de los elementos expuestos.....	66
Valor de los elementos expuestos.....	67
Características físicas de los elementos expuestos y su distribución geográfica	69
Resultados esperados del modelo de exposición	78

Conclusiones sobre la metodología.....	80
Evaluación y análisis de vulnerabilidad Física	82
Introducción	82
Objetivos.....	83
Alcance	83
Detalles metodológicos.....	85
Evaluación de la vulnerabilidad en el rubro contenidos.....	87
Evaluación de la vulnerabilidad en el rubro edificaciones.....	92
Conclusiones sobre la metodología.....	103
Evaluación y análisis de vulnerabilidad Social	104
Introducción	104
Objetivos	106
Detalles metodológicos.....	106
Condiciones iniciales	107
Contextualización	111
Acercamiento inicial a los actores e instituciones.....	112
Caracterización de hogares y territorial	114
Caracterización de indicadores socioeconómicos	116
Coproducción.....	118
Consolidación	121
Difusión.....	125
Conclusiones sobre la metodología.....	126
Evaluación y análisis de Riesgo.....	128
Introducción	128
Objetivos.....	129
Detalles metodológicos.....	130
Representación de la amenaza por inundación como insumo para la EPR por inundación.....	135
Cálculo de frecuencia anual de ocurrencia a partir de período de retorno (o su inverso, la frecuencia anual de excedencia)	137
Evaluación Probabilista del Riesgo por inundación.....	140
Categorización y zonificación del riesgo por inundación.....	144
Conclusiones sobre la metodología.....	148
Especificaciones técnicas.....	150
Términos de referencia estándar para contratación.....	150
Objeto	150
Alcance del objeto	150
Obligaciones específicas en el proyecto	150
Equipo de trabajo	155
Productos esperados.....	157
Recomendaciones generales	159
Referencias	160
Glosario.....	168
Anexo 1. Formatos para la recopilación de información en campo	174

Anexo 2. Formato encuesta contenidos	183
Anexo 3. Detalle metodológico modelo de riesgo	188

Lista de figuras

Figura 1. Público objetivo para el uso y aplicación de los Lineamientos propuestos.....	9
Figura 2. Esquema conceptual de análisis de riesgo por inundación.....	37
Figura 3. Diagrama de flujo e información necesaria para la elaboración de los mapas de inundación.....	40
Figura 4. Metodología análisis de inundaciones.....	43
Figura 5. Ajuste de funciones de probabilidad a serie de cotas de lámina de agua máxima (msnm) registrada para el conjunto estadístico del mes de octubre en la estación San Marcos.....	47
Figura 6. Gráfico de isopercentiles de caudales máximos para diversos periodos de retorno (Tr), estación Magangué (25027680).	48
Figura 7. Ajustes de FDP teóricas a caudales máximos estación Magangué (25027680).....	48
Figura 8 Diagrama de flujo metodología de modelación hidráulica de inundaciones.....	52
Figura 9. Ortofotomosaico de la región de La Mojana, sector San Marcos (Sucre).....	56
Figura 10. Componentes de un modelo de exposición.....	64
Figura 11. Procedimiento para la clasificación de edificios y asignación de tipologías estructurales....	70
Figura 12. Ejemplos de tipologías a partir de la combinación de propiedades estructurales.....	74
Figura 13. Ejemplo: número de pisos identificado en las bases de datos catastrales para una construcción dada	75
Figura 14. Clasificación de funciones de vulnerabilidad física.	86
Figura 15 Procedimiento para evaluar la vulnerabilidad en contenidos.....	87
Figura 16. Función de vulnerabilidad para contenidos.	90
Figura 17. Procedimiento para evaluar la vulnerabilidad de edificaciones.....	92
Figura 18 Fuerzas hidrostáticas.....	95
Figura 19. Presión hidrodinámica	96
Figura 20 Procedimiento para definición de estados de daño.....	99
Figura 21. Valor esperado del daño (Vista 3D).	102
Figura 22. Documento guía para el análisis de la vulnerabilidad social.....	107
Figura 23. Esquema metodológico para el análisis de la vulnerabilidad social.....	109
Figura 24. Elementos de análisis en las preguntas orientadoras del contexto nacional, departamental y municipal.	112
Figura 25. Ejemplos de mapeo de actores de los municipios de Magangué y Mompox (Talleres de participación octubre 2017).	113
Figura 26. Ejemplos de identificación de zonas de inundación (Talleres de participación octubre 2017).	114
Figura 27. Elementos de análisis en las preguntas orientadoras del contexto hogares, individuos o comunidades.....	116
Figura 28. Contenido propuesto para presentar el diagnóstico y análisis del componente de vulnerabilidad social.	121
Figura 29. Esquema metodológico general de EPR por inundación propuesto.....	134
Figura 30. Proceso de caracterización del set de escenarios por inundación.....	137
Figura 31 Construcción de la curva de amenaza para tirante hídrico vs. Período de retorno.....	138
Figura 32. Frecuencia anual de ocurrencia a partir de frecuencias anuales de excedencia. Izq.: Discretización para la intensidad Th_i . Der.: Discretización para todo el rango de intensidad de Th de la curva de amenaza.....	139

Figura 33. Proceso de simulación de Montecarlo para generación de n realizaciones de magnitud de amenaza.....	141
Figura. 34 Componentes para la categorización del riesgo. Adaptado de: (DNP, 2018)	145
Figura 35 Ejemplo de ficha de descripción de propiedades estructurales.....	181
Figura 36 Ejemplo de ficha de descripción de contenidos.....	182

Lista de fotografías

Fotografía 1 Mapa de integración del componente amenaza y vulnerabilidad social en el municipio de Magangué (Bolívar).	120
Fotografía 2. Espacios de participación en el municipio de San Marcos (Sucre).	120

Lista de mapas

Mapa 1. Resumen departamental de número de muertos por inundación para el período 1914-2015.....	14
Mapa 2. Resumen departamental de número de damnificados por inundación para el período 1914-2015.....	15
Mapa 3. Resumen departamental de número de viviendas afectadas por inundación para el período 1914-2015.....	16
Mapa 4. Resumen departamental de número de viviendas destruidas por inundación para el período 1914-2015.....	17
Mapa 5 Porcentaje de hogares registrados afectados por inundación	21
Mapa 6 Daños como porcentaje del PIB departamental.	22
Mapa 7 Daños en bienes muebles en porcentaje.	23
Mapa 8 Número de viviendas a reparar.	24
Mapa 9. Tirante hídrico de la zona inundable, para un periodo de retorno de 50 años en el municipio de Montelíbano (Córdoba)	58
Mapa 10. Velocidad media de flujo de la zona inundable, para un periodo de retorno de 50 años en el municipio de Montelíbano (Córdoba).....	59
Mapa 11. Zonas de amenaza por inundación en San Marcos. Periodo de retorno de 100 años. Distribución geográfica de construcciones en el municipio.....	66
Mapa 12. Ejemplo de resultados de zonificación de la vulnerabilidad social y su relación con la amenaza por inundación para el municipio de Magangué.....	124

Lista de tablas

Tabla 1. Documentos, proyectos y/o experiencias en las cuales se puede consultar y ampliar la información presentada en los lineamientos.....	10
---	----

Tabla 2. Bases de datos como fuente de información para la caracterización del contexto histórico de inundación en el país.....	13
Tabla 3. Afectaciones por tipo de inundación.	18
Tabla 4. Comparación de número de muertos y total de afectados para cada fuente de información.	18
Tabla 5. Marco normativo relativo a la incorporación de la GRD por inundación al ordenamiento territorial.....	30
Tabla 6. Revisión de características principales de ER por inundación a diferentes escalas de análisis.	33
Tabla 7. Incertidumbres involucradas en la metodología propuesta para la amenaza por inundación.	40
Tabla 8. Descripción general de tipos de modelos hidráulicos.....	54
Tabla 9. Rangos de tirante hídrico de la inundación.....	57
Tabla 10. Rangos de velocidades de inundación	57
Tabla 11 Información recomendada para el desarrollo del modelo de exposición según categorías de municipios.....	63
Tabla 12. Incertidumbres en el modelo de exposición y fuentes de información	65
Tabla 13. Información relevante para identificar condiciones económicas de los hogares.....	68
Tabla 14. Información relevante para la caracterización de las propiedades estructurales de edificios.	72
Tabla 15. Herramientas útiles para la recolección de información en campo.	73
Tabla 16. Ejemplo de un esquema de clasificación para una zona homogénea.....	75
Tabla 17. Ejemplo: esquema de clasificación del sector al que pertenece una construcción dada.....	76
Tabla 18. Ejemplo: porcentajes de participación de tipologías asignadas a una construcción dada conociendo el número de plantas.	76
Tabla 19 Ejemplos de propiedades de sistema resistentes a cargas, tipos de cubiertas y usos.....	77
Tabla 20. Información mínima que debe contener el modelo de exposición.	79
Tabla 21. Información auxiliar para el modelo de exposición.	79
Tabla 22. Usos potenciales del modelo de exposición en la gestión del riesgo por inundaciones.....	81
Tabla 23. Alcance recomendado según categoría de los municipios y el grupo de uso de las edificaciones.....	83
Tabla 24. Incertidumbres involucradas en la metodología propuesta para la evaluación de la vulnerabilidad física.....	85
Tabla 25. Parámetros para definición de tipologías en términos de contenidos.	88
Tabla 26. Funciones de daño para contenidos de una edificación residencial.....	91
Tabla 27. Parámetros para definición de tipologías de edificaciones.....	93
Tabla 28. Coeficiente de arrastre para relación (b/Th).	97

Tabla 29. Costos de reparación en relación con los costos de reposición para cada estado de daño en muros.....	100
Tabla 30. Líderes del proyecto a nivel nacional, regional y local. Ejemplo de proyectos liderados desde la UNGRD.....	108
Tabla 31. Preguntas orientadoras para el acercamiento inicial a los actores e instituciones.....	114
Tabla 32. Preguntas orientadoras para el componente de inundaciones.....	115
Tabla 33. Indicadores socioeconómicos.....	116
Tabla 34. Indicadores socioeconómicos.....	118
Tabla 35. Indicadores socioeconómicos.....	124
Tabla 36. Fuentes de incertidumbre en la EPR por inundación para cada componente.....	132
Tabla 37. Dimensiones y variables para estimar el índice de capacidad.....	146
Tabla 38. Descripción de las categorías de riesgo total.....	146
Tabla 39. Actividades, personal requerido y duración estimada para el desarrollo de estudios de evaluación probabilista de riesgo por inundación lenta.....	155
Tabla 40. Conceptos y definiciones relevantes para la aplicación de EPR por inundación como insumo para el ordenamiento territorial.....	168
Tabla 41. Uso y estrato de las construcciones.....	174
Tabla 42. Características de la tenencia y avalúo de la construcción.....	174
Tabla 43. Propiedades del sistema estructural.....	175
Tabla 44. Propiedades para describir los pisos.....	176
Tabla 45. Propiedades de la cubierta.....	177
Tabla 46. Características de las fachadas (muros exteriores).....	178
Tabla 47. propiedades respecto a la altura de las construcciones.....	180

Abreviaciones y siglas

SIGLA	EXPLICACIÓN
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CAR	Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible
CEP	Curva de Excedencia de Pérdidas
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DNP	Departamento Nacional de Planeación

Amenaza por inundación lenta

Introducción

Los presentes lineamientos contienen enfoques metodológicos para el análisis de amenaza por inundación. Se pretende en primera instancia exponer herramientas de análisis hidrológicos e hidráulicos necesarias para elaborar una modelación hidrodinámica a escala detallada. Al igual que orientar la presentación de los resultados de la amenaza, a nivel de salida gráfica. La elaboración de los mapas de amenaza por inundación requiere de procesos sistemáticos en los cuales se deben especificar los conjuntos de datos en que se basarán los mapas y la metodología que se implementará. Dado lo anterior, en este documento se incluyen métodos y/o modelos para la generación de la amenaza por inundación, de tal manera que dichos resultados sean herramientas fundamentales para los usuarios en la toma de decisiones en cuanto a medidas predictivas, preventivas y correctivas de sus territorios. Adicionalmente provee los insumos necesarios para integrar los resultados de la amenaza, al proceso de Evaluación Probabilista del Riesgo (EPR) por inundación.

Con los resultados de la modelación en cuanto a magnitudes de intensidades de tirante hídrico (T_h) – velocidad de flujo (V), se pueden construir los mapas de zonificación de amenaza por inundación, considerando las especificaciones del Decreto 1807, en el análisis detallado de amenaza por inundación, con los cuales las diferentes entidades territoriales pueden iniciar el proceso de generación del análisis de riesgo y atención de emergencias frente a la ocurrencia de un evento, y/o la inclusión en el ordenamiento territorial del municipio. Los mapas de amenaza de inundación hacen parte de las medidas preventivas de tipo no estructural para la gestión integral del riesgo de inundaciones a través de la Evaluación Probabilista del Riesgo.

Objetivos

El objetivo principal de este capítulo es servir de referencia para la elaboración, revisión, aprobación, o interpretación de estudios de la amenaza por inundación, como insumo fundamental para la EPR por inundación lenta. Los objetivos específicos son:

- Obtener la amenaza por inundación específicamente en los cascos urbanos seleccionados, representada principalmente por magnitudes de intensidades como; velocidad de flujo (V) y el tirante hídrico (TH) para diversos escenarios de caudales, es decir, magnitudes que igualen o excedan un intervalo de recurrencia dado (p. ej. Periodos de retorno de 2.33, 25, 100 años, entre otros) y tiempos de permanencia de la inundación para eventos continuos, es decir, series de caudales que correspondan a periodos de ocurrencia de eventos extremos (ENSO La Niña) y recurrentes de inundaciones.

- Orientar técnicamente a las autoridades regionales y locales en cuanto a la elaboración de estudios detallados de amenaza por inundación en sus áreas de jurisdicción.
- Identificar las herramientas conceptuales y metodológicas apropiadas para los estudios de amenaza por inundación, en aras de garantizar que éstos cumplan con un rigor técnico enmarcado en los avances que ofrece la academia y la institucionalidad.

Alcance

El alcance del componente hidrológico es determinar las probabilidades de ocurrencia de determinados eventos, expresados como caudales para periodos de retorno (T_r) con base en el análisis de frecuencia de eventos extremos. Adicionalmente se toma en consideración la caracterización de series continuas de eventos históricos en los cuales se refleje la variabilidad del régimen hidrológico del sistema hídrico con la presencia de eventos ENSO. Igualmente se presentan estrategias metodológicas que permiten abordar este componente en condiciones de información escasa.

De otro lado, a partir de la modelación hidráulica, proveer información gráfica de la inundación ocurrida y esperada, tal como, alturas de la lámina de agua, profundidades, velocidades del flujo, extensión de la inundación y tiempo de permanencia, ya sea para un evento de una probabilidad dada o varias probabilidades determinadas a partir del tránsito de los caudales determinados en el análisis hidrológico de la inundación.

Cabe aclarar que estos lineamientos pretenden ser una guía con una recopilación de las mejores metodologías disponibles y aplicadas en la actualidad en Colombia, tanto para la modelación hidrológica, hidráulica y espacial. Por lo tanto, es claro que el criterio profesional siempre será la base fundamental para el análisis de las inundaciones.

Detalles metodológicos

La metodología para la elaboración del componente de amenaza por inundación de los lineamientos propuestos se basa en la “Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación” (IDEAM, 2017), la cual contiene algunos enfoques metodológicos para el análisis de inundaciones y la elaboración de distintos mapas de inundación en función de la escala y su respectiva aplicación.

En la Figura 3 se presenta de manera resumida los diferentes tipos de mapas de inundación que se pueden elaborar en función del objetivo del análisis de la inundación. Lo primero que se debe definir es dicho objetivo teniendo en cuenta el uso y los usuarios de dicho mapa de inundación, e identificar la información básica necesaria para su elaboración, la metodología o metodologías por las que se puede elaborar dicho mapa y los respectivos productos que se pueden obtener.

Teniendo en cuenta lo anterior y el objetivo de los presentes lineamientos, el tipo de mapa de inundación a elaborar es el de amenaza, el cual provee información de las magnitudes de intensidad como tirante hídrico (TH), velocidad de flujo (V) y la permanencia de la inundación, principalmente.

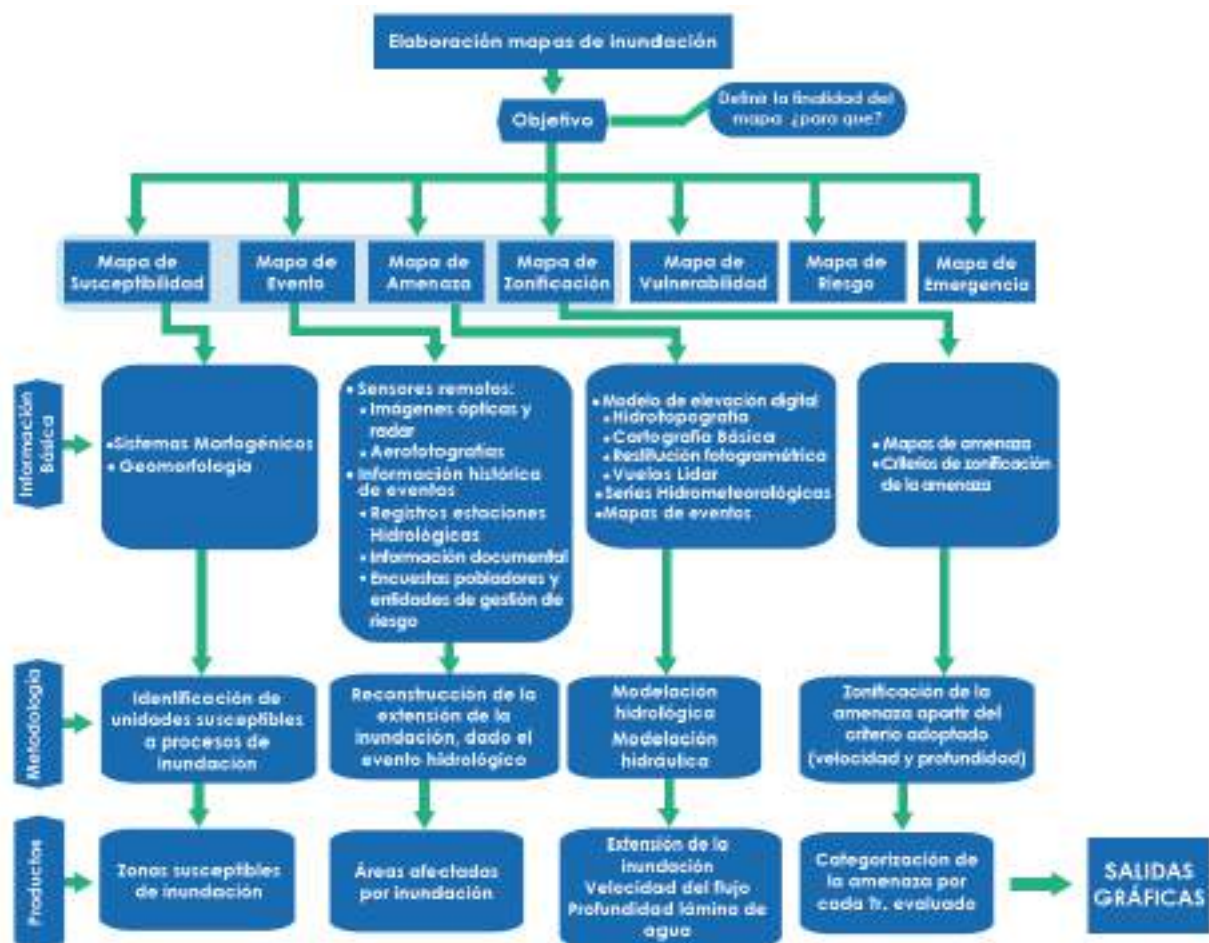


Figura 3. Diagrama de flujo e información necesaria para la elaboración de los mapas de inundación.

Fuente: (IDEAM, 2017)

Algunas de las fuentes de incertidumbre involucradas en el proceso metodológico para la elaboración de los mapas de amenaza por inundación se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Incertidumbres involucradas en la metodología propuesta para la amenaza por inundación.

Fuentes de incertidumbre	Propuesta metodológica
a. Incertidumbre debida a errores de medición:	Esta incertidumbre se aborda con el análisis de consistencia de la información hidrométrica, en la que se evalúan, datos dudosos, homogeneidades y tendencias de la serie de tiempo.
1. Lecturas de niveles en miras por el observador	La información de topobatemetrías y datos Lidar, se validan con el proceso de modelación hidrodinámica ya que se pueden comparar datos de cotas de lámina de agua modelada con información de eventos ocurridos. Así
2. Lecturas de niveles por sensor automático	

3. Medición de caudales (Aforos: badeo, suspensión, ADCP)	también con la realización de visitas de campo por parte del modelador hidráulico para verificar profundidades del cauce en algunos puntos, localización exacta de estaciones hidrológicas y observar las formas y alturas aproximadas del terreno.
4. Levantamientos topobatimétricos	
5. Amarre de cota cero al sistema de referencia nacional	
6. Levantamientos LIDAR	
b. Incertidumbre en procesos:	La incertidumbre en los procesos u obtención de la información de entrada para el modelamiento, se aborda en primera medida conociendo la dinámica de las inundaciones de los sistemas hídricos de los tramos de estudio. Al tener noción de los órdenes de magnitud de los eventos, se logra disminuir la incertidumbre de un dato estimado.
Transcripción de datos de campo	
Elaboración de curvas Nivel – Caudal	Realización de visitas de campo para localización de estructuras hidráulicas que puedan ser un control hidráulico para el flujo del agua para los eventos de caudales máximos analizados.
Extrapolación de datos extremos	
Interpolación para la obtención del DTM	
Acople entre batimetrías e información LIDAR	
Inclusión de estructuras hidráulicas de protección contra inundaciones	
c. Incertidumbre en modelos:	Se aborda a partir del análisis de frecuencia de caudales máximos anuales e intra anuales, para diferentes períodos de retorno.
1. Ajuste de funciones de probabilidad	Se aborda a partir del proceso de validación del modelo hidrodinámico a partir de miras de medición de tirante hídrico para eventos ocurridos en la zona de análisis.
2. Parametrización en modelos hidrológicos: coeficientes de escorrentía, coberturas de la tierra, entradas meteorológicas	Se aborda a partir del proceso de calibración hidrométrica y validación del modelo hidrodinámico a partir de la variación de la rugosidad del lecho y la planicie de inundación con el fin de obtener las mismas cotas de lámina de agua y la misma extensión de inundación de eventos ocurridos.
3. Parametrización en modelos hidráulicos: rugosidad, condiciones de frontera	Se aborda a partir de la inclusión dentro del modelo hidrodinámico, de alineamientos y características geométricas de las obras de control de inundaciones existentes en la zona de análisis.

Información básica

Dentro de la información básica es necesario contar con un Modelo Digital del Elevación (DEM por sus siglas en inglés) detallado (1 metro de resolución espacial como mínimo) con el cual se realizará la modelación hidráulica de las inundaciones, así como las series hidrometeorológicas e información gráfica georreferenciada de los eventos ocurridos en el pasado, con los cuales se puede comparar y validar los resultados de la modelación realizada. Adicionalmente se debe contar con información de estructuras hidráulicas para el control de las inundaciones tipo box couvert, muros de contención,

jarillones, etc, la caracterización de dichas obras debe ser incorporada en la topología del modelo hidráulico que tiene como base el MDE.

1. Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) se definen como un conjunto de datos numéricos que describen la distribución espacial de la altitud en una zona determinada. Se puede considerar que un DEM contiene información de dos formas. La primera es explícita mediante los propios datos contenidos en el modelo y la segunda es una información implícita, en el sentido de que intervienen las relaciones espaciales entre los objetos o datos, relaciones que pueden considerarse incluidas en el modelo, del mismo modo que los propios datos (Felicísimo, 1994).

Existen DEM disponibles de forma gratuita para casi todo el globo terráqueo, sin embargo, para la EPR a nivel urbano (detallado), es importante contar con un DEM de resolución espacial de 1 metro (pixel = 1x1 m), para obtener cartografía a escala 1: 2.000, como se especifica en el Decreto 1807, para estudios detallados, donde la unidad mínima de mapeo es 100 m².

Existen varias tecnologías y procesos para el levantamiento de esta información: el levantamiento topográfico, fotogrametría, Lidar (actualmente en aviones y drones), Radar (usando interferometría), entre otros.

Es importante la integración de la topografía (DEM) con la topobatimetría, la cual consiste en la construcción de la superficie subacuática del tramo en estudio. Para esta labor se pueden utilizar técnicas como: badeo, suspensión, perfiladores de corriente acústico doppler (ADCP por sus siglas en inglés), entre otros. La cartografía básica del área de estudio (existente), aporta no solo información del relieve, sino de los elementos artificiales, los cuales son importantes al momento de analizar los resultados obtenidos de la modelación.

2. Series hidrometeorológicas

Registros históricos de precipitación, niveles y caudales, del área de estudio, resultado del monitoreo hidrológico del IDEAM u otras entidades que sigan los estándares de medición establecidos por la OMM (OMM, 1994).

3. Mapas de eventos

Se obtienen mediante la integración de información de sensores remotos, con la cual se identifica la extensión de la inundación, y las mediciones realizadas en campo para establecer la altura de la lámina de agua (TH) en los sectores afectados por la inundación.

También se pueden reconstruir eventos históricos a partir de la consolidación de imágenes de soporte para el periodo de análisis y establecer la extensión de la inundación asociada, aunque en estos casos es un poco más difícil caracterizar

otros atributos del flujo. Se pueden analizar los registros de las series de nivel y caudal con el ánimo de asociarlos en zonas que cuenten con información de las planicies de desborde y su relación con los sitios de medición existentes.

Metodología modelación de la amenaza por inundación

En la Figura 4 se presenta el proceso metodológico específico a seguir para elaborar el mapa de amenaza por inundación por medio de modelación de tipo hidrológica, hidráulica y espacial. Para lograr lo anterior se hace necesario la ejecución de cinco pasos secuenciales, los cuales son:

1. Obtención de información gráfica de un evento ocurrido.
2. Modelación hidrológica.
3. Elaboración de un modelo digital de terreno lo suficientemente detallado.
4. Modelación hidráulica con su respectiva calibración y validación.
5. Generación de mapas de tirante hídrico (TH), velocidad de flujo (V), permanencia y en general cualquier otra variable que se requiera analizar en términos de amenaza.



Figura 4. Metodología análisis de inundaciones

Fuente: (IDEAM, 2017)

Análisis Hidrológico

El estudio o análisis de datos hidrológicos es el punto de partida para todo proceso de modelamiento hidrodinámico hídrico, por tal motivo, es indispensable contar con series de caudales y niveles consistentes (Haan, 2002) de los ríos objeto de modelación.

Los mapas de amenaza por inundación pueden elaborarse para eventos continuos en el tiempo o eventos singulares como caudales asignados a periodos de retorno. Si el tramo a modelar no cuenta con series hidrológicas consistentes para el análisis de frecuencia de caudales máximos, se debe hacer uso de modelos hidrológicos. En la *Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación del IDEAM* (IDEAM, 2017) se pueden consultar algunos métodos propuestos para diversas condiciones de disponibilidad de información, estos son: transposición de datos de caudal en la misma corriente pero no en el sitio de interés, análisis regionales de caudales máximos instantáneos anuales, modelos de transformación lluvia en escorrentía que son utilizados cuando no existe la posibilidad de obtener medidas directas de caudales de drenaje en las cuencas hidrográficas (método de hidrograma unitario, modelos computacionales).

El componente hidrológico puede ser desarrollado de la siguiente manera: inicialmente se identifica la información disponible en cuanto a caudales y niveles de las estaciones hidrométricas existentes, se plantea un modelo conceptual de las condiciones de contorno del sistema hidrodinámico con base en la información hidrológica disponible y teniendo en cuenta el alcance del proyecto. Finalmente se realiza el tratamiento estadístico correspondiente de aleatoriedad de series temporales (conjuntos estadísticamente válidos) y de consistencia de información para el análisis de frecuencia.

Según Chow et al. (Chow, Maidment, & Mays, 1994), la magnitud de un evento extremo está inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos muy severos ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados. Por lo anterior el objetivo del análisis de frecuencia de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad.

En los procesos estocásticos las series hidrológicas se analizan como variables aleatorias, aplicando pruebas de aleatoriedad que permitan identificar conjuntos estadísticos válidos que operan como variables aleatorias, es decir, que no responden a ningún patrón (Domínguez, 2007). Existen varias pruebas de aleatoriedad para demostrar que una serie de caudales constituye un conjunto estadístico válido. Estas pruebas se diferencian por su nivel de complejidad. En hidrología han encontrado amplia aplicación la prueba de las rachas y la prueba del número de inversiones (Bendot & Piersol, 2010).

La prueba de las rachas (o las series) se basa en el conteo de rachas en alguna característica de la serie de caudales anuales y/o mensuales. En calidad de hipótesis nula se plantea que H_0 : La muestra es aleatoria y como hipótesis alternativa que H' : La muestra no es aleatoria. Para aplicar esta prueba es

necesario clasificar cada dato de la serie de caudales anuales en una de dos clases. Cada clase puede ser representada con un símbolo (+ y – por ejemplo) de esta forma cada valor de la serie de caudales anuales que cumpla $Q_i \geq \bar{Q}$ se reemplaza por un signo "+" y de lo contrario (si $Q_i < \bar{Q}$) el valor se reemplaza por un signo "-". La cantidad total de rachas "R" en las secuencias de "+" alternados con "-" es igual al número de rachas de signos "+" más el número de rachas de signos "-", dada la Ecuación 2.

$$R = (r_a + r_b)$$

Ecuación 2.

Donde:

R: rachas empíricas

ra: secuencia de rachas positivas en la serie estadística

rb: secuencia de rachas negativas en la serie estadística

Para las secuencias aleatorias R tiene una distribución normal con media:

$$\bar{R} = \frac{n + 1}{2}$$

Ecuación 3.

Y desviación:

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{n - 1}}{2}$$

Ecuación 4.

Al definir un nivel de significación α el intervalo de confianza para R es:

$$\bar{R} - t_{1-\alpha}\sigma_R < R \leq \bar{R} + t_{1-\alpha}\sigma_R$$

Ecuación 5.

Donde $t_{1-\alpha}$ es un percentil de la distribución estándar normal. Si el valor empírico de R cae dentro de este intervalo, la hipótesis nula, que asevera la aleatoriedad de la serie de caudales, no se rechaza, de lo contrario se acepta la hipótesis alternativa sobre la no aleatoriedad de la serie de datos.

La estacionariedad o no estacionariedad de las series hidrológicas, hace referencia a la conservación de los momentos estadísticos de una variable aleatoria. Por tal motivo un proceso estocástico es definido estacionario en el sentido estricto, si al evolucionar la función de distribución que la caracteriza (p. ej. Series mensuales), esta no cambia en el tiempo (Ruíz-Abellón, 2017).

El procedimiento para el análisis de frecuencia caracterizando las series como variables aleatorias es el siguiente:

- Seleccionar el conjunto estadístico: Se listan los periodos mensuales incluido el anual como muestras del universo estadístico, revisar axiomática de Kolmogorov (Kolmogorov, 1931).
- Realizar pruebas de aleatoriedad: Como fue descrito se demuestra la aleatoriedad de los conjuntos estadísticos mediante la prueba de las rachas (Bendot & Piersol, 2010).
- Realizar el ajuste de las funciones de distribución de probabilidad teórica (FDP) (Haan, 2002): Se recomienda el uso de funciones tales como: Normal, LogNormal, Exponencial, Gamma, LogGamma, GenGamma, Gumbel_L (sesgada a la izquierda), Gumbel_R (sesgada a la derecha), PowerLaw, GenExtreme, Weibull_max y Weibull_min

Para validar el ajuste de la distribución teórica a los datos empíricos se deben tomar en cuenta los siguientes criterios:

Los criterios de selección de la FDP (Función de Distribución de Probabilidad):

- El error medio absoluto relativo.
- Error máximo absoluto relativo.
- Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov (ω^2).

En la Figura 5 se presenta un ejemplo de salida gráfica de ajuste de funciones con los respectivos criterios de selección.

La línea punteada (azul) representa la función empírica de probabilidad de la serie en estudio, la línea continua (roja) representa el ajuste de cada función teórica. El encabezado de cada figura lo compone: el nombre de la FDP, el error medio y máximo de ajuste y la prueba de bondad de Kolmogorov, $K=0$ se rechaza el ajuste, $K=1$ se aprueba el ajuste. La FDP que se escoge es la que presente menor error medio y menor error máximo en el ajuste y que la prueba de bondad sea $k=1$. Para el ejemplo presentado, esta condición la cumple la FDP=GenGamma (Distribución Generalizada Gamma).

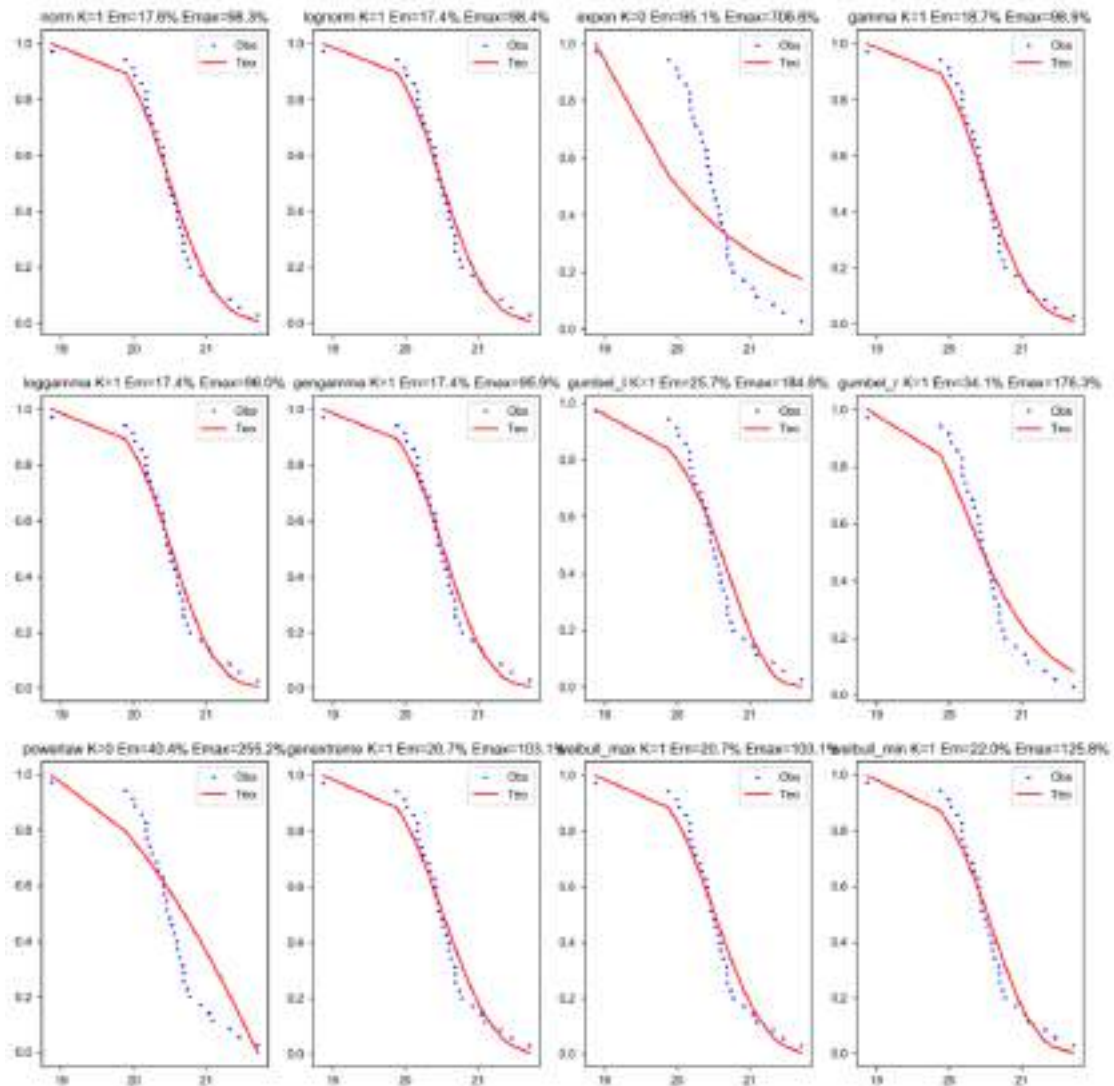


Figura 5. Ajuste de funciones de probabilidad a serie de cotas de lámina de agua máxima (msnm) registrada para el conjunto estadístico del mes de octubre en la estación San Marcos

Finalmente se procede con la obtención de valores esperados para diversos periodos de retorno (T_r): los percentiles asociados a probabilidades de excedencia se deben graficar como isopercentiles (ver Figura 6) entendidos como gráficas de dispersión que unen los percentiles mensuales que presentan el mismo valor de probabilidad de excedencia, en los que se puede visualizar la variabilidad hidrológica del hidrosistema en estudio, así como la gráfica de cada función de probabilidad teórica a nivel mensual incluyendo el ajuste de máximos anuales (ver Figura 7).

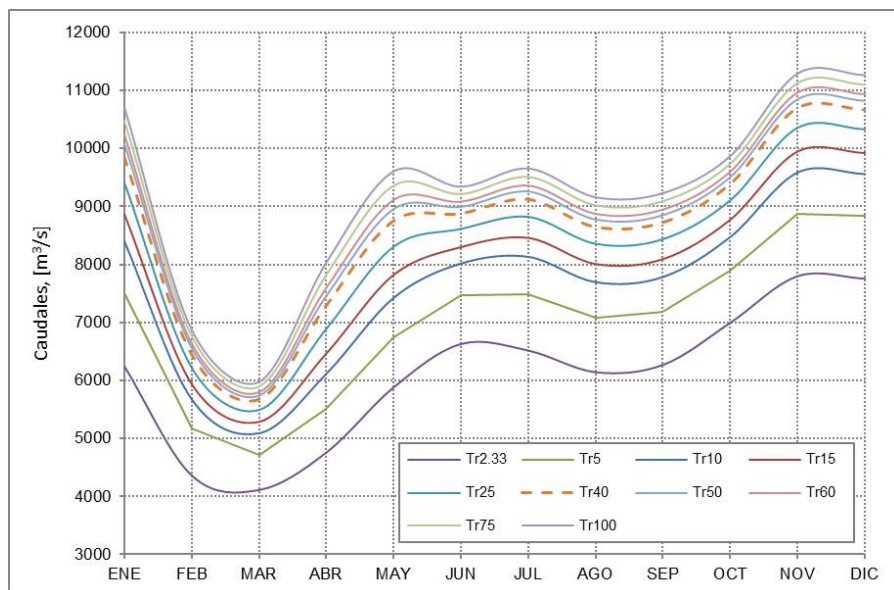


Figura 6. Gráfico de isopercentiles de caudales máximos para diversos periodos de retorno (Tr), estación Magangué (25027680).

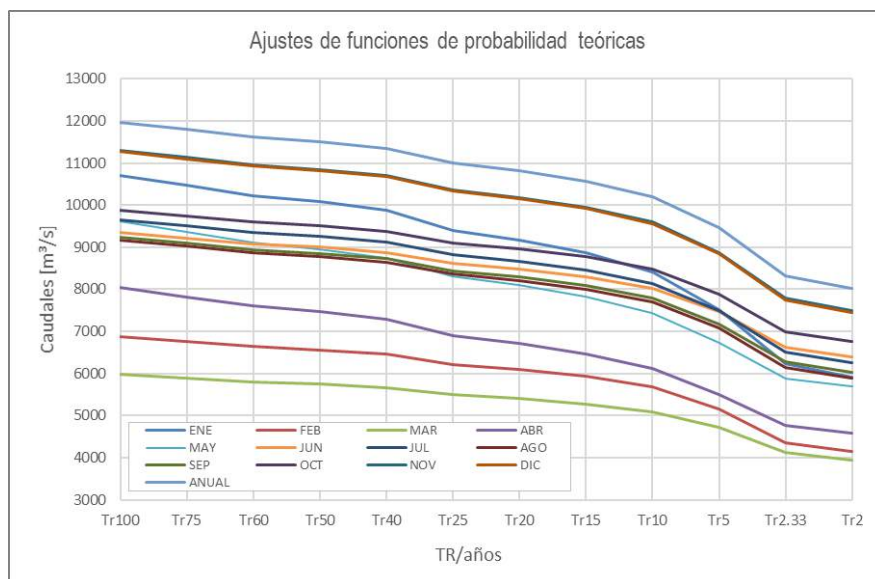


Figura 7. Ajustes de FDP teóricas a caudales máximos estación Magangué (25027680).

Análisis hidráulico

La modelación hidráulica parte de diferentes aproximaciones al flujo de agua en la naturaleza (unifásico, bifásico, unidimensional, bidimensional, tridimensional, permanente, no permanente), que simplifican las ecuaciones físicas que lo modelan, cuya resolución permite estimar parámetros tales como tirante hídrico, velocidad media de flujo y energía (Instituto Geológico y Minero de España, 2008).