

TESIS DE PREGRADO

**Función de Costos de las Inundaciones Urbanas Producidas por
Problemas en el Sistema de Drenaje**

John Kevin González Zárate

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
PREGRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
DICIEMBRE 2019**

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a mis padres Claudia Jacqueline y John Jamer por ser los grandes protagonistas en esta historia; los cuales siempre creyeron en mí y me brindaron todo su amor y guía hasta este punto. De igual forma, le agradezco a la Universidad de los Andes y a cada uno de los profesores con los cuales tuve la oportunidad de compartir ya que en ellos siempre encontré un alto nivel de profesionalismo y la exigencia para llevarme a mí y a todos los estudiantes dentro y fuera del aula de clase a ser los mejores profesionales posibles para nuestro país. Finalmente, también le agradezco al profesor Juan Saldarriaga por guiar este trabajo de investigación y por siempre incentivar la pasión y el sentido de responsabilidad al ejercer la profesión como ingenieros ambientales.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	4
1.1.1	Objetivo General	4
1.1.2	Objetivos Específicos	4
2	Marco teórico	5
2.1	Eventos de inundación en el mundo	5
2.1.1	Efectos del Cambio Climático en los eventos de inundación	5
2.1.2	Inundaciones urbanas en Colombia	8
2.1.3	Problemática de las inundaciones en la ciudad de Bogotá	12
2.2	Marco Teórico	17
2.2.1	Metodologías de evaluación de daños por inundaciones en el mundo	17
2.2.2	Antecedentes en la estimación de daños por inundaciones en la ciudad de Bogotá	23
3	Metodología	34
3.1	Factores a incluir en la estimación de daños por inundaciones en la ciudad de Bogotá ..	34
3.1.1	Factores de corrección de acuerdo al nivel de contaminación de las aguas y el nivel de precaución en la zona	34
3.1.2	Costos debido a la interrupción de los servicios públicos y el transporte	38
3.2	Procedimiento final para la estimación de daños por inundaciones en la ciudad de Bogotá	40
4	Análisis comparativo	42
4.1	Comparación con otras metodologías implementadas en América Latina	42
5	Conclusiones	48
6	Recomendaciones	50
7	Referencias	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Número de eventos de inundación entre 1970 y 2011 por países.....	7
Figura 2. Desarrollos recientes del IDEAM frente a la problemática de inundaciones en el país..	11
Figura 3. Metodología utilizada por el JRC de la Unión Europea para la estimación de las curvas de daño- profundidad por inundación a nivel global.....	21
Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología implementada en la evaluación del riesgo de inundación de la Quebrada Limas.....	24
Figura 5. Densidad de eventos de encharcamiento por Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA) en la ciudad de Bogotá (Eventos/Km ²) del 2005 al 2019..	36
Figura 6. Metodología implementada en el análisis de riesgo y costo total de inundación en Brasil.....	45
Figura 7. Metodología propuesta para la evaluación de los daños producidos por inundaciones en Ecuador	47

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Cambios en la temperatura global observada y el calentamiento antropogénico estimado para los siguientes años..	5
Gráfica 2. Número de eventos de inundación reportados entre 1950 y 2010 en el mundo.....	6
Gráfica 3. Pérdidas económicas y muertes por inundaciones entre 1950 y 2000 en el mundo..	8
Gráfica 4. Zonas Potencialmente Inundables (ZPI) por departamento en Colombia.....	11
Gráfica 5. Número de eventos de inundación según la pase de datos de la UNGRD para la ciudad de Bogotá.	14
Gráfica 6. Porcentaje de eventos de inundación de acuerdo a su detonante entre 2002 y 2015 en la ciudad de Bogotá.....	14
Gráfica 7. Relación entre el número de eventos y las precipitaciones medias anuales en la ciudad de Bogotá.	15
Gráfica 8. Número de eventos de inundación y sus costos entre 2002 y 2015 en la ciudad de Bogotá.	16
Gráfica 9. Factores de daño para estructuras residenciales, comerciales e industriales en Centro y Suramérica obtenidos por la JRC de la Unión Europea.....	22
Gráfica 10. Curva de vulnerabilidad para la estimación de daños directos en la Quebrada Limas.	26
Gráfica 11. Curva de vulnerabilidad para la estimación de afectación a los contenidos en la Quebrada Limas.	26
Gráfica 12. Curva de daños directos en función de la profundidad del agua en Bogotá.	28
Gráfica 13. Curva de afectación de contenidos en función de la profundidad del agua en Bogotá..	29
Gráfica 14. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 1..	29
Gráfica 15. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 2..	30
Gráfica 16. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 3..	30
Gráfica 17. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 4..	31
Gráfica 18. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 5..	31
Gráfica 19. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 6..	32
Gráfica 20. Curva de costo en función de la profundidad para Uso Comercial.....	32
Gráfica 21. Curva de costo en función de la profundidad para Uso Industrial.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Zonas Potencialmente Inundables (ZPI) por zona hidrográfica en Colombia	10
Tabla 2. Algunas de las metodologías para evaluación de daños por inundaciones utilizadas a nivel internacional.....	20
Tabla 3. Valor máximo promedio de afectación en Euros/m ² obtenidos por la JRC de la Unión Europea.	23
Tabla 4. Valor catastral por uso del suelo en Bogotá.	27
Tabla 5. Valor de los contenidos por uso del suelo en Bogotá.....	28
Tabla 6. Factores de corrección para diferentes niveles de contaminación y precaución.....	35
Tabla 7. Nivel de precaución de acuerdo al número de eventos de encharcamiento presentados entre el año 2005 y 2019.	36
Tabla 8. Factores de corrección para el nivel de media contaminación y los diferentes niveles de precaución en la ciudad de Bogotá.	37
Tabla 9. Porcentajes de afectación de contenidos y daños directos de acuerdo a la profundidad del agua para la ciudad de Bogotá..	37
Tabla 10. Subcategorías de los daños directos y tangibles utilizadas en el modelo de estimación de daños..	38
Tabla 11. Ecuaciones de los daños potenciales directos en zonas habitacionales de México	44

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Pérdidas económicas para daños directos y afectación a los contenidos.....	25
Ecuación 2. Costo en la interrupción en el servicio de cualquier sistema para un componente x.	38
Ecuación 3. Función de restauración total.	39
Ecuación 4. Costo por la interrupción en el transporte.....	39
Ecuación 5. Costo por la interrupción de un determinado servicio público para Bogotá.	40
Ecuación 6. Costo por la interrupción del transporte para Bogotá.	40

1 INTRODUCCIÓN

Las inundaciones urbanas en el mundo son cada vez más frecuentes debido a la modificación significativa en las últimas décadas de los parámetros climáticos globales, lo cual conocemos hoy en día como el cambio climático. A pesar de que existen aún posiciones encontradas dentro de la comunidad científica, a nivel general se conoce que las actividades del ser humano son la principal causa del cambio ambiental global en la actualidad. Nuestro impacto en el clima y los ecosistemas globales cada vez generan más efectos sobre el planeta.

Dentro de los impactos que las actividades del ser humano han generado sobre el medio ambiente, los fenómenos de inundación son cada vez más comunes y en muchos casos más dañinos que en el pasado. Solo entre 1985 y el 2003, ningún otro fenómeno natural provocó más pérdidas en vidas humanas, destruyó casas y terrenos fértiles, y provocó más pérdidas económicas que los fenómenos de inundación (Douben, 2006).

El informe *“Pérdidas económicas, pobreza y desastres 1998-2017”*, publicado en octubre del 2018 por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres describe la relación cada vez más evidente que existe entre el cambio climático y los desastres naturales. Según el informe, los impactos de estos fenómenos naturales perjudican principalmente a los países más pobres. Las pérdidas económicas a nivel mundial por desastres naturales entre 1998 y 2017 representaron 2,9 billones de dólares; esto corresponde a un incremento en el 151% en comparación con las pérdidas registradas entre 1978 y 1997 (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, 2017). Los fenómenos de inundación junto a las tormentas fueron los desastres naturales que se presentaron con mayor frecuencia durante el periodo estudiado, según el informe. Adicionalmente, los países que cuentan con economías medias y bajas fueron donde se encontraban las personas más vulnerables frente a los desastres naturales y las que más sufrían de forma desproporcionada las consecuencias de los mismos.

Según el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER), en el año 2010, las pérdidas económicas por los fenómenos de inundación en Colombia representaron aproximadamente el 2% del PIB. Los sectores que se vieron mayormente afectados corresponden al sector vivienda 39%, transporte 38% e infraestructura social con un 11% (IDIGER, 2019). Condiciones como la falta de ordenamiento territorial, la deforestación y la expansión de la frontera agrícola pueden ser algunas de las causas que están generando afectaciones cada vez mayores por las inundaciones en nuestro país.

Conocer de la forma más adecuada posible cuáles son los costos de inundación que puede generar un fenómeno de estos se ha convertido en una práctica recurrente a nivel internacional. Si bien

determinar los riesgos por inundación puede ser una tarea compleja debido a las variables que se involucran en el proceso, cuantificar los daños provocados por estos en Colombia puede facilitar los procesos de planeación urbana y mitigación de desastres. Por lo cual, construir una función que permita estimar los costos asociados a un fenómeno de inundación se hace fundamental hoy en día en nuestro país.

Debido a los crecientes efectos del cambio climático en el mundo, la evaluación económica de riesgos por inundación es cada día más importante para evaluar políticas de mitigación y emergencia. Los diferentes escenarios de cambio climático sumados al incremento de las densidades de población y la mayor concentración de propiedades y bienes generan que los centros urbanos sean cada vez más vulnerables frente a los eventos de inundación.

La incidencia del cambio climático a nivel global trae consigo consecuencias cada vez más graves frente a los efectos de los desastres naturales sobre los centros urbanos y rurales. Los episodios de lluvias intensas de la mano de inundaciones son cada vez más frecuentes en el mundo. Como el número de estos eventos se ha visto incrementado, son las áreas urbanas las que sufren en mayor medida el impacto negativo en el funcionamiento de sus comunidades, los servicios sociales, económicos y financieros y la disminución en la calidad de vida y la afectación de vidas humanas.

Es posible utilizar los análisis por pérdidas económicas frente a inundaciones con el fin de distribuir los recursos disponibles en función de la prevención, mitigación y recuperación de las áreas afectadas antes, durante y después del fenómeno de inundación (Baró-Suárez, Díaz-Delgado, & Esteller-Alberich, 2007). La estimación de estos daños potenciales permite la ejecución de medidas de control de inundaciones a largo plazo, medidas de emergencia y la planificación y gestión del uso del suelo en una cuenca.

El potencial de inundación es mayor en zonas llanas donde se ubican la mayoría de asentamientos urbanos que son altamente susceptibles a sufrir daños socioeconómicos durante la exposición al evento. Generalmente, estas inundaciones dependen de la intensidad de la lluvia, su distribución en la zona y las características de suelo y el sistema de drenaje y alcantarillado ubicado en la cuenca. Diferentes estudios a nivel internacional han tenido en cuenta lo anteriormente mencionado en sus metodologías para la estimación de costos por inundaciones urbanas.

De igual forma, los centros urbanos en todo el mundo son los que más incurren en daños económicos cuando presentan un fenómeno de inundación. Solo en Japón, se generan aproximadamente 1 billón de dólares estadounidenses anuales por daños ocasionados por inundaciones pluviales (Bhattarai R. , Yoshimura, Seto, Nakamura, & Oki, 2016). Los eventos de inundación causan cada año pérdidas físicas en el mundo y están continuamente creciendo los efectos de estos eventos. La importancia de las evaluaciones de pérdidas económicas por inundación en centros urbanos recae principalmente en dos factores:

- Las alternativas de mitigación de eventos de inundación requieren generalmente altas inversiones.
- La protección a la población de eventos de inundación es un deber del Estado y este requiere de información con el fin de mejorar los procesos de tomas de decisiones.

Finalmente, una función de costos es una forma de aproximación ante la gestión de riesgos por inundación que consiste en reducir el daño causado a las personas y bienes a niveles aceptables a través de la implementación de un análisis costo-beneficio. Estos tienen el fin de optimizar la decisión de diferentes alternativas desde el punto de vista financiero (Ballesteros-Cánovas, Sanchez Silva, Bodoque, & Díez-Herrero, 2013). La gestión de riesgos por inundación basada en este tipo de metodologías permite realizar un proceso acertado de toma de decisiones.

Dentro de los procesos de análisis de riesgo por inundación se ven envueltos una gran cantidad de parámetros junto a su incertidumbre. Eso se debe principalmente a la variabilidad de los datos de entrada que en muchos casos son insuficientes debido a los procesos de recopilación de información. En la mayoría de los casos, la comunidad científica manifiesta la elevada dificultad al momento de describir todos los procesos relacionados en un evento de inundación a través de los datos disponibles. Un aspecto fundamental en la construcción de estos análisis de riesgo y funciones de costos para las inundaciones de aquí en adelante debe ser la recolección y la gestión de información y datos experimentales, que le permitan al usuario implementar y construir modelos hidrológicos e hidráulicos de eventos de inundación más acordes a la realidad.

La importancia de determinar funciones de costos para inundaciones urbanas por problemas en los sistemas de drenaje radica en que los efectos del cambio climático en el país son cada vez más severos. La falta de implementación en medidas de prevención frente a fenómenos de inundación y la poca organización en los planes de ordenamiento territorial está incrementando el riesgo en Colombia de sufrir estos eventos y generar pérdidas económicas a gran escala todos los años. Al igual que otros territorios a nivel nacional, zonas dentro de la ciudad de Bogotá hoy en día se encuentran en alto riesgo de sufrir las consecuencias de fenómenos de inundación severos. Determinar una función de costos para las inundaciones en la ciudad de Bogotá, que refleje las condiciones y características únicas de la zona, facilitaría la implementación de medidas preventivas con el fin de proteger a las poblaciones más vulnerables y reducir en gran medida las pérdidas económicas que estos eventos generan.

El presente trabajo en primer lugar presentará las condiciones actuales de los eventos de inundación urbanos presentados en el mundo y en Colombia. En segundo lugar describirá la problemática actual de estos en la ciudad de Bogotá y los antecedentes en la estimación de los costos provocados para la capital del país. Finalmente, a través de una revisión de las metodologías a nivel internacional, se proponen diferentes parámetros a tener en cuenta en la construcción de una función de costos por inundaciones urbanas para la ciudad de Bogotá.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Complementar la metodología que tiene el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes cuyo objetivo es evitar inundaciones en las ciudades por los eventos de precipitación cada vez más frecuentes e intensos debido al cambio climático. Lo anterior a través de la determinación de una función de costos para inundaciones por problemas en los sistemas de drenaje de la ciudad de Bogotá.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar el estado del arte de las metodologías utilizadas a nivel internacional en la actualidad para estimar los costos por inundaciones pluviales urbanas.
- Identificar los parámetros a tener en cuenta en la construcción de la función de costos para inundaciones urbanas para la ciudad de Bogotá que permitan cuantificar de forma aproximada las pérdidas económicas provocadas por estos eventos.

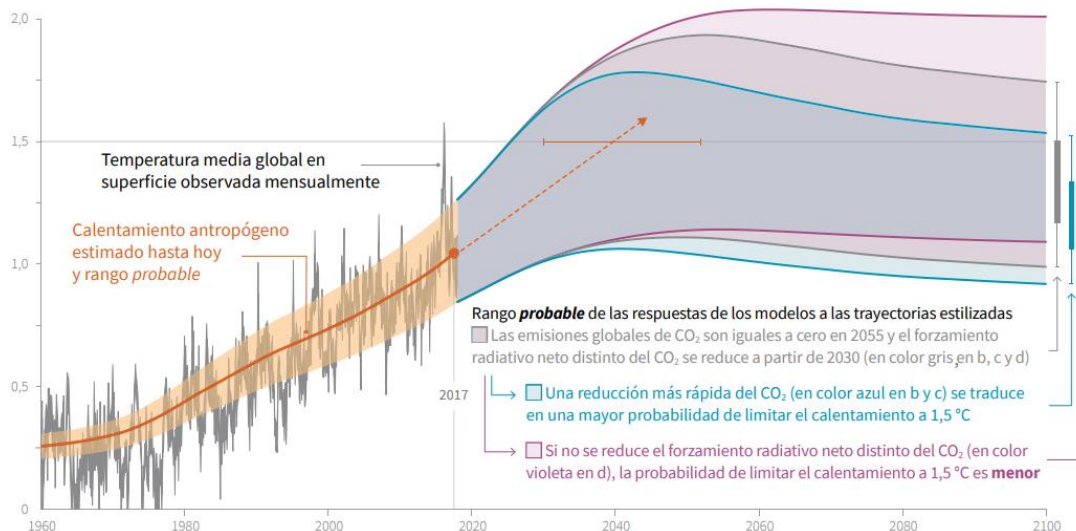
2 MARCO TEÓRICO

2.1 Eventos de inundación en el mundo

2.1.1 Efectos del Cambio Climático en los eventos de inundación

Para finales del año 2018, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) publicó el *Informe Especial del IPCC sobre los Impactos del Calentamiento Global de 1,5 °C*. Este buscó establecer las trayectorias que deberían seguir las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial con respecto a los niveles preindustriales; esto con el fin de frenar la amenaza del cambio climático, incentivar el desarrollo sostenible y consolidar los esfuerzos por erradicar la pobreza en el mundo.

En primer lugar, el informe estima que “las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente 1,0 °C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0,8 °C a 1,2 °C. Es probable que el calentamiento global llegue a 1,5 °C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual” (IPCC, 2018). Lo anterior es posible observarlo en la Gráfica 1 donde se muestran los cambios en la temperatura media global en la superficie a partir de diferentes conjuntos de datos y se muestra el calentamiento global antropogénico estimado.



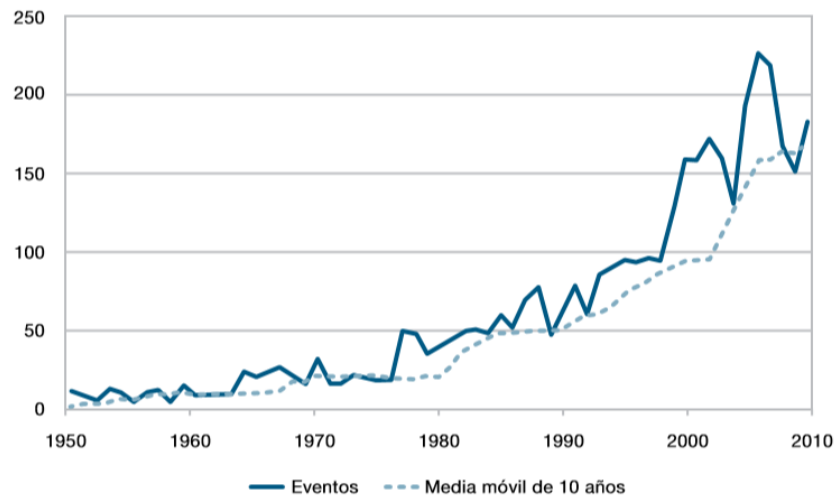
Gráfica 1. Cambios en la temperatura global observada y el calentamiento antropogénico estimado para los siguientes años. Tomado de (IPCC, 2018).

De igual forma, el IPCC resalta en su informe que el calentamiento global causado por las emisiones antropogénicas desde el periodo preindustrial hasta la actualidad seguirán causando cambios globales a largo plazo en el sistema climático; y que hoy en día ya se están observando

sus impactos en los sistemas naturales y humanos como consecuencia del calentamiento global. Muchos de los sistemas oceánicos y terrestres se han visto modificados en los servicios que ofrecen debido a esto (IPCC, 2018).

Con respecto a la frecuencia, la intensidad y la cantidad de precipitaciones intensas en varias regiones del mundo, el informe resalta que con un nivel de confianza alto se espera el aumento de estas en los próximos años. A su vez, se espera que las precipitaciones intensas a escala mundial sean mayores con un calentamiento global de 2 °C que con uno de 1,5 °C, y que como consecuencia de esto, el informe estima que la fracción de la superficie terrestre mundial afectada por los eventos de inundación será mayor (IPCC, 2018).

Para el año 2012, los eventos de inundación se consideraban como el desastre natural más frecuente en el mundo creciendo en número significativamente en los últimos 20 años (K. Jha, Bloch, & Lamond, 2012). A su vez, el número de personas afectadas por estos eventos y las pérdidas económicas que han generado también se ha visto en aumento. Según la *Guía para la Gestión Integrada del Riesgo por Inundaciones en Ciudades en el Siglo 21 del Banco Mundial* (2012), tan solo en el año 2010 se vieron afectadas 178 millones de personas en el mundo debido a eventos de inundación; y años como 1998 y 2010 registraron pérdidas económicas por encima de los 40 mil millones de dólares. En la Gráfica 2 es posible evidenciar el incremento de los eventos de inundación reportados en las últimas décadas.



Gráfica 2. Número de eventos de inundación reportados entre 1950 y 2010 en el mundo. Tomado de (K. Jha, Bloch, & Lamond, 2012).

Cabe resaltar que a pesar de que los eventos de inundación se han visto en aumento en los últimos años, el número de pérdidas humanas con relación a esto ha crecido más lentamente hasta decrecer en algunos casos (K. Jha, Bloch, & Lamond, 2012). A pesar de esto, en los países en vías de desarrollo el número de víctimas sigue siendo alto con respecto a otras regiones donde

estos eventos llegan a tener un mayor impacto sobre las personas de bajos recursos y grupos sociales en desventaja, particularmente mujeres y niños. La Figura 1 permite observar en qué países y regiones del mundo se han concentrado los eventos de inundación en los últimos años.

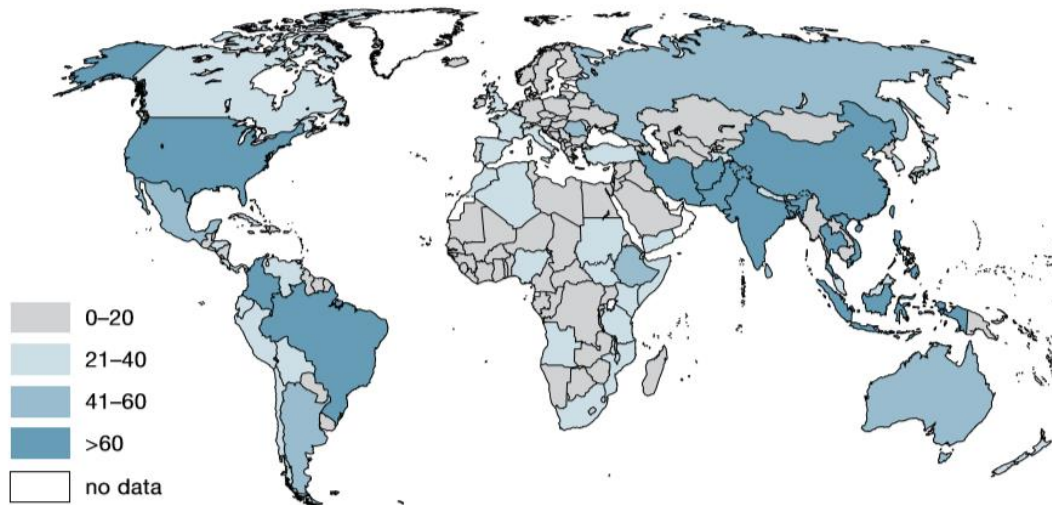


Figura 1. Número de eventos de inundación entre 1970 y 2011 por países. Tomado de (K. Jha, Bloch, & Lamond, 2012).

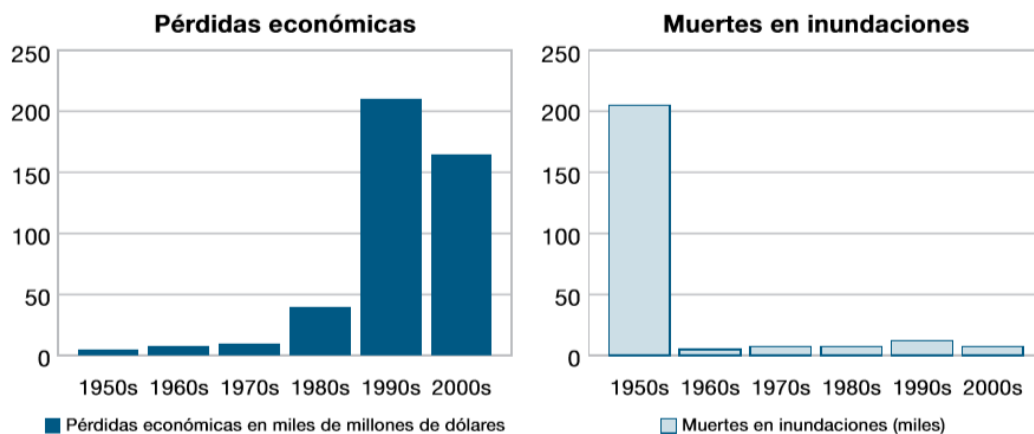
Hoy en día, los eventos de inundación generan impactos considerables en las áreas urbanas alrededor del mundo. Cada vez es más frecuente la implementación de planes de manejo de riesgo por inundaciones en centros urbanos a través de políticas públicas. El entendimiento de las causas y los impactos de los eventos de inundación, las medidas que se requieren para minimizarlos y cómo implementarlas son cada vez más parte en forma integral del desarrollo sostenible en el mundo (K. Jha, Bloch, & Lamond, 2012).

Como se mostró anteriormente, se conoce que los efectos del cambio climático representarán cada vez más un mayor impacto sobre las condiciones meteorológicas a nivel mundial. El riesgo por inundaciones en el mundo claramente se ve determinado por esto. Los cambios en los patrones del clima tienen un alto potencial de causar más eventos de inundación a nivel mundial y con ello, incrementar los impactos directos e indirectos de estos. La *Guía para la Gestión Integrada del Riesgo por Inundaciones en Ciudades en el Siglo 21 del Banco Mundial* (2012) describe que los efectos del cambio climático pueden incrementar el riesgo por inundaciones en el mundo de acuerdo a:

- Incrementar la tasa de elevación del nivel del mar.
- Modificar los patrones de lluvia locales siendo más frecuentes, repentinas e intensas.
- Aumentar la frecuencia y duración de los episodios de sequía que llevan a la extracción de agua subterránea causando hundimientos en la tierra.

- Incrementar la frecuencia de tormentas.

A nivel mundial, los eventos de inundación urbanos han mostrado ser mucho más costosos y complicados de manejar con respecto a los eventos rurales. Esto se debe a que los asentamientos urbanos llegan a contener la mayor cantidad de activos económicos y sociales de los países, llevando a que los impactos de las inundaciones en estas zonas generan consecuencias más graves al causar daños económicos y sociales que van más allá de la altura de la lámina de agua alcanzada (K. Jha, Bloch, & Lamond, 2012). Estos impactos directos a causa de las inundaciones han venido en incremento en los últimos años, lo cual puede ser observado en la Gráfica 3. Igualmente, los impactos indirectos a pesar de ser más difíciles de estimar y evaluar, llegan a representar un factor de gran importancia en los planes de desarrollo de las comunidades que los sufren.



Gráfica 3. Pérdidas económicas y muertes por inundaciones entre 1950 y 2000 en el mundo. Tomado de (K. Jha, Bloch, & Lamond, 2012).

Finalmente, se espera que las condiciones de cambio climático y sus efectos en los parámetros globales meteorológicos representen un aumento en el riesgo por eventos de inundación en el mundo. De igual forma, la creciente urbanización está generando presiones sobre los ecosistemas y generando escenarios más propensos a sufrir de inundaciones. La urbanización mal planificada contribuye de igual forma a la amenaza por inundaciones debido al cambio en los usos del suelo por asentamientos mal planificados en áreas inundables.

2.1.2 Inundaciones urbanas en Colombia

Si bien no se ha determinado a nivel gubernamental una función de costos de las inundaciones urbanas que represente las condiciones y variables particulares colombianas; entidades estatales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) cuentan con informes como el *Mapa de zonas inundadas en Colombia asociadas al fenómeno de la Niña 2010-2012*, el *Estudio Nacional del Agua 2014* y el *Estudio Nacional del Agua*

2018. De igual forma, el IDEAM ha definido a nivel nacional las áreas inundables con respecto al área de los cuerpos de agua y las coberturas geográficas de zonificación de amenaza por inundación para las cinco áreas hidrográficas asociadas a las principales vertientes del país (IDIGER, 2019): Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Pacífico y Amazonía. Este tipo de informes pueden facilitar en gran medida la aproximación de funciones de costo para inundaciones en el contexto nacional.

En el presente año el Instituto de Meteorología y Estudios Ambiental (IDEAM) presentó el *Estudio Nacional del Agua 2018*. Este es un documento que realiza la entidad cada cuatro años con el fin de proporcionar información sobre la oferta y la demanda, la calidad y el riesgo de las respuestas hidrológicas a la variabilidad climática. El informe consta de un capítulo dedicado a los fenómenos de inundación en Colombia; este los define como eventos que “se producen cuando las lluvias intensas o continuas sobrepasan la capacidad de retención e infiltración del suelo, o cuando la capacidad máxima de transporte del río o arroyo es superada y el cauce principal se desborda e inunda los terrenos cercanos a los propios cursos de agua” siendo eventos naturales y recurrentes en el país (IDEAM, 2019).

En términos generales, de acuerdo a la Ley 1523 del 2012 el IDEAM ha buscado a través del informe generar el conocimiento que permita llevar a cabo la gestión del riesgo de desastres como un proceso social de desarrollo que permita la minimización de los efectos por eventos de inundación. La institución ha determinado las Zonas Potencialmente Inundables (ZPI) a escala nacional con el fin de brindar la información necesaria para identificar las zonas que pueden ser afectadas por inundaciones de tipo lento, como ellos las denominan. Igualmente, presentan los avances que ha realizado el IDEAM en términos de información sobre amenazas de inundación en diferentes escalas a nivel regional y local.

A nivel nacional, el informe relaciona solamente las inundaciones de tipo fluvial al identificar las zonas que de acuerdo a sus características físicas y geomorfológicas cuentan con un potencial alto de inundación. Estas son determinadas como las Zonas Potencialmente Inundables (ZPI) y según el informe corresponden a “aquel terreno o espacio donde se pueden acumular y generar una lámina de agua como resultado del desborde de un cuerpo de agua o producto de lluvias localizadas” (IDEAM, 2019). Estas se caracterizan por presentar inundaciones de tipo lento, es decir, que se caracterizan por incrementos de nivel de manera paulatina y afectan elementos como los cultivos y la infraestructura. En la Tabla 1 se describen las ZPI de acuerdo a su zona hidrográfica en el país.

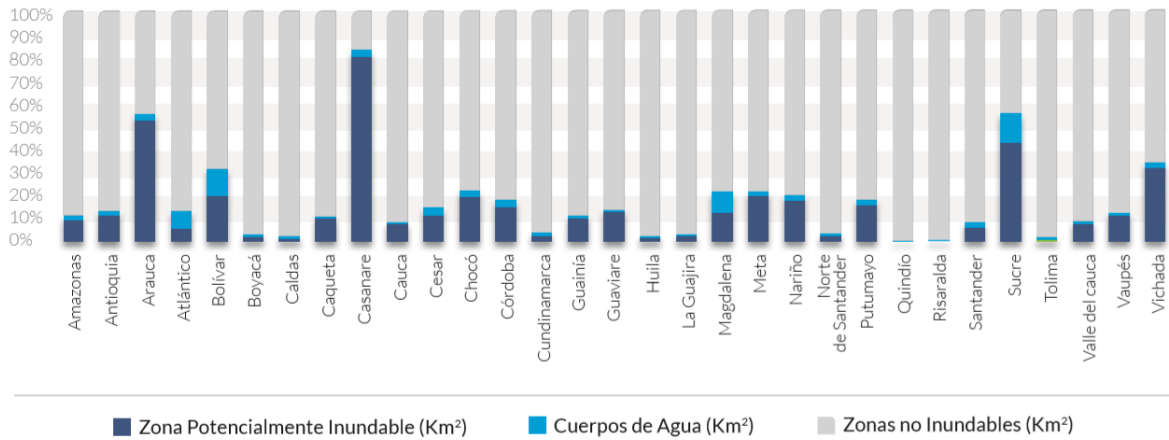
De acuerdo al *Estudio Nacional del Agua 2018*, se identificaron 190935 Km² como zonas con condiciones favorables para presentar inundaciones. La región de la Orinoquía en el país se determinó como el área hidrográfica con mayor superficie con potencial de inundación ya que

llega a abarcar casi el 31% del área total y cuenta con condiciones planas de terreno y presencia de pastos a lo largo de su extensión (IDEAM, 2019).

Área hidrográfica	Zona hidrográfica	ZPI (Km ²)	Área hidrográfica	Zona hidrográfica	ZPI (Km ²)
Amazonas	Amazonas	572	Orinoco	Apure	2
	Apaporía	6623		Arauca	1670
	Caguán	2245		Casanare	14725
	Caquetá	10620		Guaviare	18311
	Guanía	1206		Inírida	6368
	Napo	1		Meta	37367
	Putumayo	7348		Orinoco	15048
	Vaupés	2869		Tomo	6105
	Yarí	2696		Vichada	7940
Magdalena Cauda	Alto Magdalena	911	Pacífico	Baudó	777
	Bajo Magdalena	4809		Mira	841
	B. Magd. Cauce San Jorge	7986		Pacífico – Directos	552
	Cauca	1548		Patía	3773
	Cesar	1925		San Juan	2218
	Medio Magdalena	5551		Tapaje-Dagua-Dir.	2998
	Nechí	817	Caribe	Atrato-Darién	8877
	Saldaña	10		Caribe-Guajira	573
	Sogamoso	462		Caribe-Litoral	2507
Caribe	Islas del Caribe	2	Catatumbo	463	
			Sinú	1622	

Tabla 1. Zonas Potencialmente Inundables (ZPI) por zona hidrográfica en Colombia. Tomado de (IDEAM, 2019).

A nivel departamental, Casanare y Arauca son los departamentos en el país que cuentan con las áreas de superficie con mayor porcentaje de Zonas Potencialmente Inundables con un 79,7% y 51,9% respectivamente de acuerdo a su superficie total. Adicionalmente, el sistema cenagoso de la Mojana entre los ríos Cauca, San Jorge y Magdalena-Brazo de Loba, el cual cuenta con gran cantidad de ciénagas y caños de baja pendiente, cumple la función de ser un regulador de eventos de subidas de agua siendo unas de las zonas inundables más extensas del país; lo que se ve reflejado en las ZPI de los departamentos Sucre, Bolívar y Córdoba con un porcentaje de 42.7%, 19.7% y 15.1% respectivamente de acuerdo al total del área departamental. Es importante resaltar que este sistema cuenta con una gran variedad de servicios ecosistémico de regulación y provisión y se ha visto afectado por diferentes transformaciones antropogénicas debido al aprovechamiento de sus recursos.



Gráfica 4. Zonas Potencialmente Inundables (ZPI) por departamento en Colombia. Tomado de (IDEAM, 2019).

A nivel regional y local, el IDEAM ha avanzado en términos generales en el estudio y caracterización de estas zonas generando mapas de inundación con base en los procedimientos establecidos en la *Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación* (IDEAM, 2017). Esta guía sirve como referencia para la elaboración, revisión, aprobación, interpretación y orientación de las acciones reglamentarias de uso del suelo y ordenamiento territorial con respecto a estos fenómenos. En la Figura 2 se presentan los principales avances del IDEAM con respecto a este tema en los últimos años.

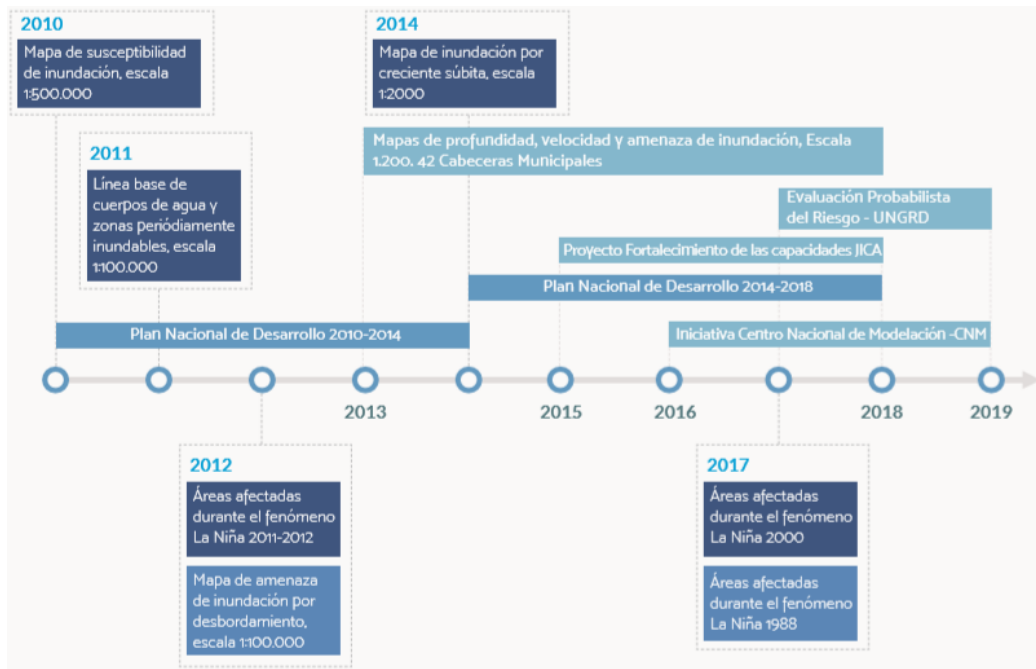


Figura 2. Desarrollos recientes del IDEAM frente a la problemática de inundaciones en el país. Tomado de (IDEAM, 2019).

Finalmente, a pesar de que internacionalmente se conocen diferentes metodologías, el Estado colombiano no implementa funciones de costos de inundaciones urbanas de forma preventiva. Estas podrían convertirse en una herramienta de política pública que le permita al gobierno mitigar los efectos de estos desastres naturales y estructurar en mejor forma el plan de desarrollo nacional y los planes de ordenamiento territorial.

A nivel nacional, la última ola invernal presentada entre 2010 y 2011 requirió una asignación de \$7 billones de pesos en recursos para atender las emergencias presentadas en los diferentes departamentos del país. Adicionalmente requirió de la inversión de \$5,7 billones de pesos adicionales con el fin de reconstruir vías, viviendas, y la implementación de programas de educación y reactivación económica en los siguientes años hasta el 2017 con el fin de recuperar los municipios afectados por el Fenómeno de la Niña en esa época (Dinero, 2019). El nivel de las pérdidas económicas por fenómenos de inundación en el país, está requiriendo año a año con mayor urgencia la implementación de herramientas preventivas que permitan mejores planeaciones de asentamientos urbanos y la estructuración de medidas preventivas frente a estos desastres.

2.1.3 Problemática de las inundaciones en la ciudad de Bogotá

Muchas ciudades alrededor del mundo sufren pérdidas económicas debido a los daños provocados por los diferentes eventos de inundación a los cuales se ven expuestas. Al igual que estas, la ciudad de Bogotá no es la excepción. Según el IDIGER, la ciudad se encuentra dividida en cuatro principales cuencas de drenaje que son las determinadas por los ríos Salitre, Fucha, Tunjuelo y Torca. Adicional a estas, también se encuentran las cuencas del humedal Jaboque y Tindal-Cundinamarca (IDIGER, 2019). Todas las cuencas mencionadas tienen al Río Bogotá como receptor principal.

El occidente de Bogotá, por ser una zona plana de poca pendiente y con baja capacidad para evacuar caudales, se ha convertido en una de las zonas de la ciudad más propensas a presentar fenómenos de inundación según el IDIGER. Por ejemplo, en junio de 2002 la localidad de Tunjuelito registró un evento de inundación que ocupó cerca de 18 manzanas, dejando 3000 damnificados y 420 predios inundados. La altura del nivel del agua en este evento llegó a alcanzar el segundo piso de las viviendas (IDIGER, 2019). Si bien este tipo de eventos son cada vez más frecuentes en la capital del país, las entidades distritales a hoy en día no han optado por implementar una metodología que les permita implementar alternativas de mitigación a eventos de inundación y protección de las poblaciones con mayor riesgo de sufrir estos eventos. La implementación de una función de costos de inundaciones urbanas para la ciudad de Bogotá les permitiría abordar estas medidas de forma preventiva.

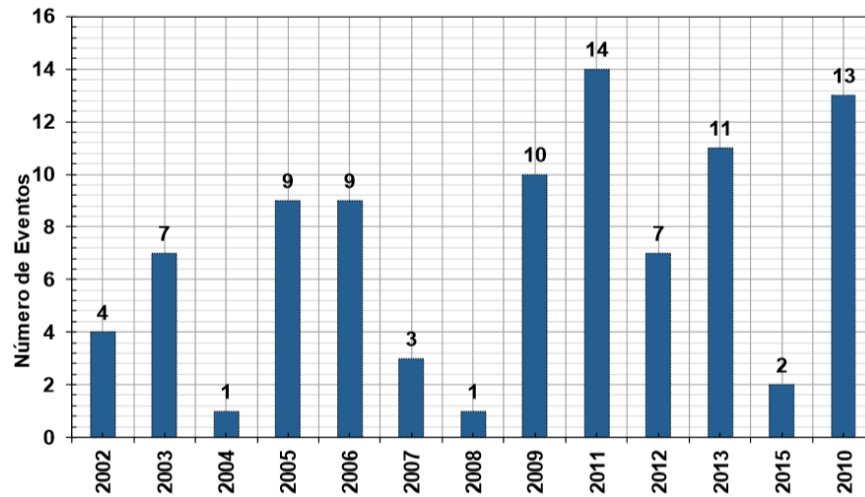
El Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) de la ciudad de Bogotá a través de su *Proyecto de Actualización de Componente de Gestión del Riesgo para la Revisión Ordinaria y Actualización del Plan de Ordenamiento Territorial* presentado en Junio de 2018 describe la metodología usada para la construcción de mapas de amenaza por inundación por desbordamiento en perspectiva del cambio climático para zona urbana, de expansión urbana y rural de la ciudad junto con los resultados obtenidos (IDIGER, 2018).

Según este informe, las inundaciones “son fenómenos meteorológicos e hidrológicos asociados a características climáticas, morfológicas e hidráulicas, clasificándola como una amenaza de gran impacto debido a las magnitudes en pérdidas económicas y de vidas humanas por ser el fenómeno más recurrente y con mayor número de registros, clasificándolo como un fenómeno hidrológico potencialmente destructivo, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente” (IDIGER, 2018). Adicionalmente, el informe describe que las pérdidas por inundaciones se han incrementado debido a factores antropogénicos como el incremento en las urbanizaciones, cambios de uso del suelo, ubicación de asentamientos en áreas de inundación y cambios en la distribución temporal y espacial de las lluvias debido al Cambio Climático.

Adicionalmente, el informe clasifica los eventos de inundación de acuerdo a su génesis y distribución espacial y el tiempo de generación. Para el primer caso, estas pueden ser pluviales, fluviales, costeras y por falla de estructuras. En el segundo caso se clasifican como lentas, repentinas o súbitas y torrenciales (IDIGER, 2018). El IDIGER se ha encargado de caracterizar estos eventos de inundación a través de diferentes bases de datos como EM-DAT, DesInventar, SIRE, y la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo y del Desastre (UNGRD).

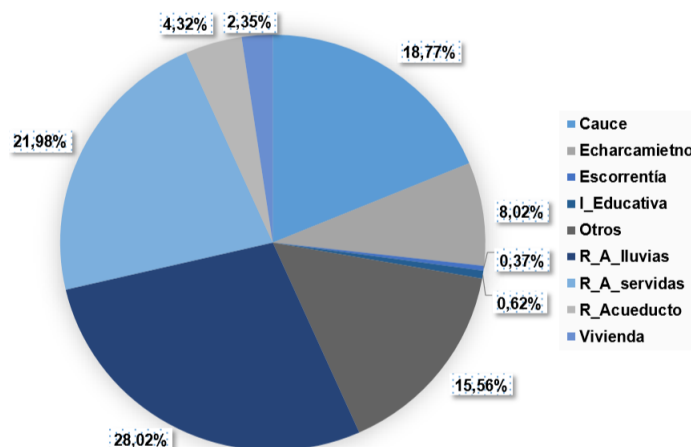
Como se ha mencionado anteriormente, realizar una evaluación detallada de las amenazas y los riesgos por inundaciones presenta diferentes dificultades, por lo cual, el IDIGER hace uso de estas bases de datos con el fin de organizar y almacenar la información y así poder generar más fácilmente interpretaciones acerca de la amenaza generada por diferentes eventos de emergencia, en este caso, los eventos de inundación.

En la Gráfica 5 es posible observar el número de eventos que se han registrado en la base de datos de la UNGRD en la ciudad de Bogotá. De acuerdo al informe, se ve un comportamiento generalizado en el número de eventos por año desde el 2002 hasta el 2010. Cabe resaltar, que este tipo de bases de datos se han basado en diferentes fuentes de información lo que puede terminar en la ausencia de datos de acuerdo al barrio o localidad al que pertenecen o el sistema de clasificación de los eventos de emergencia que cada una de ellas implementa.



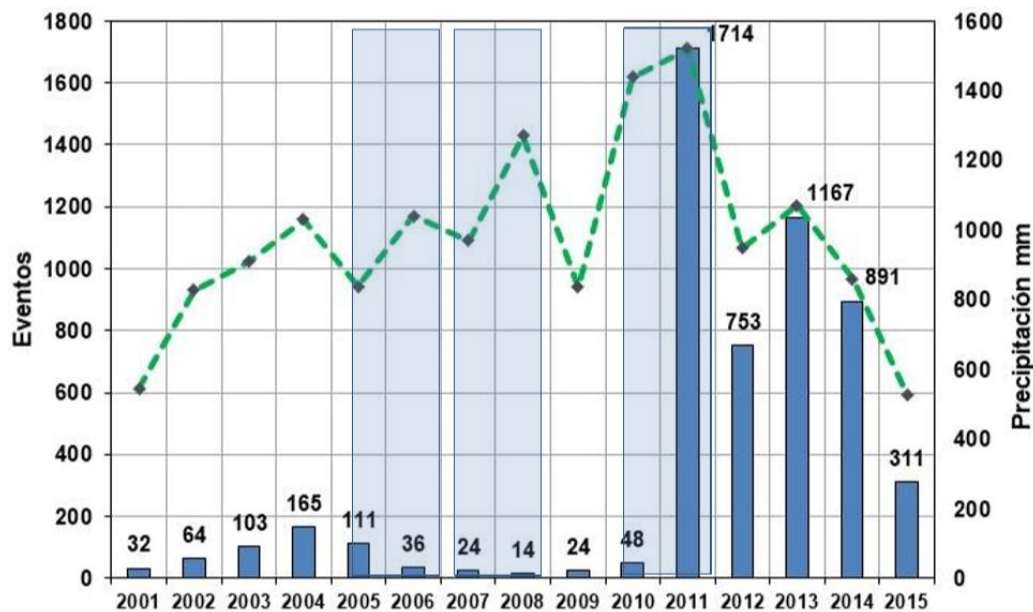
Gráfica 5. Número de eventos de inundación según la pase de datos de la UNGRD para la ciudad de Bogotá. Tomado de (IDIGER, 2018) .

De igual forma, los eventos de inundación en la ciudad de Bogotá han sido relacionados por parte del IDIGER en los últimos años de acuerdo a sus causas de origen. Estos pueden ser detonados por diferentes condiciones como lluvias persistentes, fallas en las estructuras hidráulicas o redes de abastecimiento y alcantarillado, errores humanos, malos manejos de desechos y escombros, capacidades hidráulicas insuficientes, entre otros (IDIGER, 2018). De acuerdo a esto, el IDIGER a través del informe mencionado ha discretizado desde el 2002 hasta el 2015 el número de eventos por año ocurridos en la ciudad de Bogotá de acuerdo al detonante principal, lo que puede ser observado en la Gráfica 6. Con base en esto, es posible observar que el desbordamiento de cauce y el fallo de redes de aguas lluvias y aguas servidas son los principales detonantes en los eventos de inundación en la capital del país.



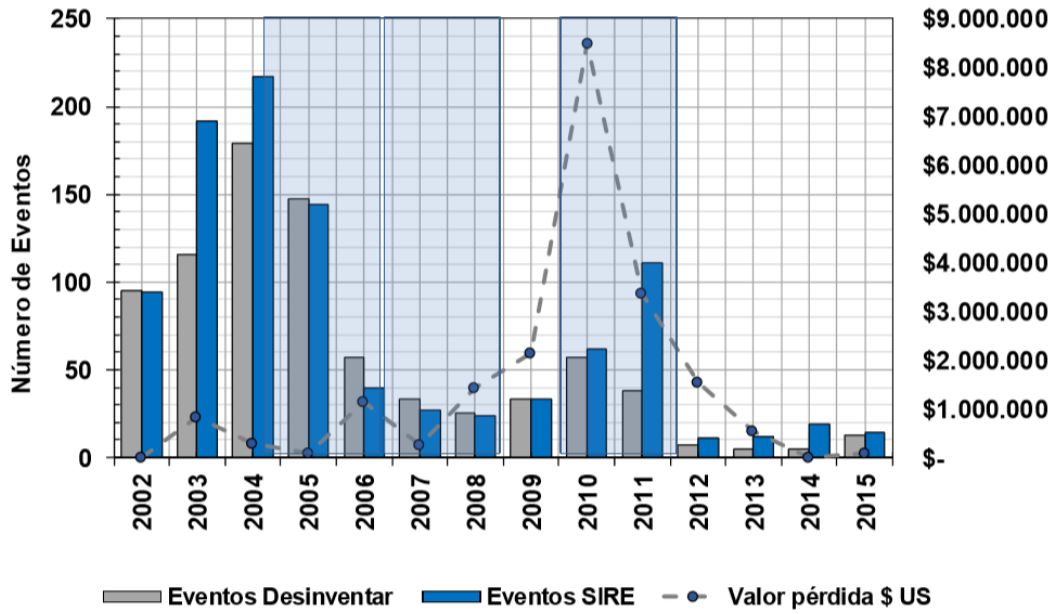
Gráfica 6. Porcentaje de eventos de inundación de acuerdo a su detonante entre 2002 y 2015 en la ciudad de Bogotá. Tomado de (IDIGER, 2018).

Adicionalmente, es posible evidenciar la relación existente entre las precipitaciones medias anuales en la ciudad de Bogotá y los eventos de inundación que se presentaron en esta. Esto es posible observarlo en la Gráfica 7, donde según el informe se han generado hasta 56 reportes por desbordamiento de cauces con niveles de agua entre los 40 y 80 cm. A su vez, ha sido posible encontrar que el 30.35% de los eventos de inundación se atribuyen a fallas de sistemas de aguas pluviales debido a la precipitación, daños en las viviendas por fallas en las redes internas (IDIGER, 2018).



Gráfica 7. Relación entre el número de eventos y las precipitaciones medias anuales en la ciudad de Bogotá. Tomado de (IDIGER, 2018).

En cuanto a las pérdidas económicas que han generado los eventos de inundación en la capital del país, para el 2003 fueron de \$815 mil en 2003, \$298 mil en 2004 y \$85 mil dólares en 2005 sin contar con un registro claro para el año 2002. Con respecto al periodo entre 2010 y 2012, los eventos de inundación y las pérdidas económicas que estos significaron estuvieron altamente influenciados por la época invernal que sufrió el país durante estos años. Los costos durante estos tres años llegaron a representar más de \$13 millones de dólares donde el pico máximo se encontró en el año 2010. Adicionalmente, es importante resaltar que de acuerdo a la distribución bimodal de lluvias en la ciudad, con picos de intensidad en los meses alrededor de mayo y octubre, existe una predisposición en estos meses a sufrir una mayor afectación por los efectos de los eventos de inundación (IDIGER, 2018). En la Gráfica 8 se relaciona el número de eventos de inundación en Bogotá y las pérdidas económicas que estos han ocasionados desde el 2002 hasta el año 2015 de acuerdo a dos bases de datos utilizadas por el IDIGER.



Gráfica 8. Número de eventos de inundación y sus costos entre 2002 y 2015 en la ciudad de Bogotá.
 Tomado de (IDIGER, 2018).

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Metodologías de evaluación de daños por inundaciones en el mundo

Como se ha explicado con anterioridad, los eventos de inundación representan uno de los desastres naturales con mayor impacto a nivel global generando pérdidas económicas y afectando a las comunidades que los sufren. En las últimas décadas se ha podido observar un desarrollo cada vez más destacable con respecto a la implementación de metodologías que permiten evaluar los riesgos por inundaciones. A pesar de esto, entre las metodologías extendidas a nivel internacional se presentan altas incertidumbres lo cual puede poner en duda que tan acertadas pueden ser bajo determinado contexto (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017). De igual forma, cada una de las metodologías que pueden ser encontradas en la literatura presentan una alta heterogeneidad contando con componentes y características que no necesariamente han sido validados en diferentes contextos.

En términos generales, todas las metodologías clasifican los daños en cuatro tipos diferentes (Merz, Kreibich, Schwarze, & H. Thieken, 2010):

- Daños directos: determinados por el contacto físico del agua con infraestructuras, personas, cultivos, entre otros.
- Daños indirectos: son inducidos por los impactos directos y ocurren fuera del evento de inundación para determinado lugar y tiempo.
- Daños tangibles: corresponden a aquellos que pueden ser determinados en términos monetarios.
- Daños intangibles: aquellos que no se negocian en los mercados o son difíciles de determinar en términos monetarios.

Adicionalmente, el factor principal bajo el cual la mayoría de las metodologías han sido construidas corresponde a la profundidad de inundación o la altura de la lámina de agua alcanzada durante el evento. De acuerdo a la metodología, este puede complementarse al tener en cuenta otras variables como la velocidad de flujo, la duración del evento de inundación, la contaminación que presenta el agua, las medidas de precaución que se tomaron antes del evento o el nivel de vulnerabilidad que presenta la comunidad en la zona afectada.

Lo anterior deriva principalmente en la estimación de funciones que relacionan la profundidad de la lámina de agua alcanzada con el porcentaje de afectación a las estructuras o los bienes contenidos en ellas. Estas funciones, denominadas funciones de profundidad-daño o curvas de daño (Messner, Penning-Rowse, Green, & Meyer, 2007), son las que se utilizan principalmente hoy en día a nivel internacional para la estimación de pérdidas económicas por eventos de inundación. Las diferencias entre las metodologías en la estimación de los daños por inundación provienen del marco o procedimiento implementado para su construcción como: la escala

espacial, la zona geográfica, tipo de función de daño (absoluta o relativa), el tipo de daño, bases de datos de los costos relacionados y/o las características hidráulicas tenidas en cuenta (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017). A su vez, las metodologías pueden diferir en gran medida dependiendo si parten de datos empíricos, la caracterización dada por expertos en el tema o la estimación a partir de escenarios evaluados previamente. La Tabla 2 que se presenta a continuación procede a enunciar diferentes metodologías desarrolladas a nivel internacional para la estimación de daños por inundaciones junto a una descripción general.

Artículo	Referencia	País	Tipo de modelo	Estructuras evaluadas	Análisis agregado
<i>Urban flood risk assessment using storm characteristic parameters sensitive to catchment-specific drainage system</i>	(Zhou, y otros, 2019)	China	Sintético	Residencial	No
<i>How much does an extreme rainfall event cost? material damage and relationships between insurance, rainfall, land cover and urban flooding</i>	(Leal, Boavida-Portugal, Fragoso, & Ramos, 2019)	Portugal	Empírico	Residencial	No
<i>Urban flood vulnerability assessments: the case of Dire Dawa city, Ethiopia</i>	(Haile Erena & Worku, 2019)	Etiopía	Empírico	Residencial	Sí
<i>A rapid urban flood inundation and damage assessment model</i>	(Jamali, y otros, 2018)	Australia	Sintético	Residencial	No
<i>Full Flood Cost: Insights from a risk Analysis Perspective</i>	(W. Fadel, Marques F., Goldenfum, Medellín-Azuara, & Tilmant, 2018)	Brasil	Sintético	Residencial	Sí
<i>Assessment of pluvial flood exposure and vulnerability of residential areas</i>	(Grahm & Nyberg, 2017)	Suecia	Empírico	Residencial	No
<i>Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac</i>	(Hernández-Uribe, Barrios-Piña, & I. Ramírez, 2016)	México	Sintético	Residencial	No

<i>Flood damage assessment of an urban area in Taiwan</i>	(Chen, Yeh, & Yu, 2016)	China	Sintético	Residencial	No
<i>Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China.</i>	(Yin, Yu, Yin, Liu, & He, 2016)	China	Sintético	Vías de transporte	No
<i>Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessments</i>	(Olsen, Zhou, Linde, & Arnbjerg-Nielsen, 2015)	Dinamarca	Sintético	Residencial	No
<i>Multivariate pluvial flood damage models</i>	(Ootegem, Verhofstadt, Van Herck, & Creten, 2015)	Bélgica	Empírico	Residencial	Sí
<i>Statistical model for economic damage from pluvial flood in Japan using rainfall data and socio-economic parameters</i>	(Bhattarai R. , Yoshimura, Seto, Nakamura, & Oki, 2015)	Japón	Empírico y Sintético	Residencial	Sí
<i>Small businesses and flood impacts: The case of the 2009 flood event in cockermouth</i>	(Wedawatta, Ingirige, & Proverbs, 2014)	Reino Unido	Empírico	Comercial	Sí
<i>An Integrated Approach to Flood Risk Management: A Case Study of Navaluenga (Central Spain)</i>	(Ballesteros-Canovas, Sanchez-Silva, Bodoque, & Díez-Herrero, 2013)	España	Sintético	Residencial	No
<i>How the choice of flood damage metrics influences urban flood risk assessment</i>	(Veldhuis, 2011)	-	Sintético	Residencial	Sí
<i>Assessment of economic flood damage</i>	(Merz, Kreibich, Schwarze, & H. Thieken, 2010)	Alemania	Sintético	Residencia, Industrial, Agricultura e Infraestructuras	Sí
<i>Development of FLEMOcs – a new model</i>	(Kreibich, Seifert-Dähnn,	Alemania	Empírico	Comercial	Sí

<i>for the estimation of flood losses in the commercial sector</i>	Merz, & Thieken, 2010)				
<i>Integrated urban flood risk assessment - Adapting a multicriteria approach to a city</i>	(C, Haase, V, & Scheuer, 2009)	Alemania	Sintético	Residencial	Sí
<i>Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses</i>	(Thieken, y otros, 2008)	Alemania	Empírico	Residencial y Comercial	Sí
<i>Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods</i>	(Messner, Penning-Rowsell, Green, & Meyer, 2007)	Reino Unido	Sintético	Residencial	Sí
<i>The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context</i>	(Nascimento, Machado, Baptista, & Silva, 2007)	Brasil	Empírico	Residencial	No
<i>An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin</i>	(Dutta, Herath, & Musiake, An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin, 2006)	Japón	Sintético	Residencial, Rural e Infraestructura	Sí
<i>A mathematical model for flood loss estimation</i>	(Dutta, Herath, & Musiake, A mathematical model for flood loss estimation, 2003)	Japón	Sintético	Residencial y otros	Sí

Tabla 2. Algunas de las metodologías para evaluación de daños por inundaciones utilizadas a nivel internacional.

Adicionalmente, la Comisión Europea a través de su servicio de ciencia y conocimiento denominado el *Joint Research Centre* (JRC) ha publicado en el 2017 un reporte técnico donde se agrupa una base de datos globalmente consistente de curvas de daño-profundidad para eventos de inundación, el cual han denominado *Globa Flood Depth-Damage Functions*. Esta metodología se ha basado en una extensa encuesta bibliográfica con el fin de normalizar los daños presentados para cada uno de los continentes, mientras que la diferenciación por países fue posible al determinar los valores máximos de daño obtenidos para cada uno. Estos fueron calculados gracias

a regresiones estadísticas con indicadores de desarrollo socioeconómico a nivel mundial. Finalmente, el reporte técnico también establece cómo las curvas de daño-profundidad se pueden ajustar para condiciones específicas permitiendo que los resultados obtenidos y las sugerencias que aquí se desarrollan faciliten la implementación de planes de prevención, mitigación, corrección y compensación ante los eventos de inundación en el mundo (Joint Research Centre, 2017).

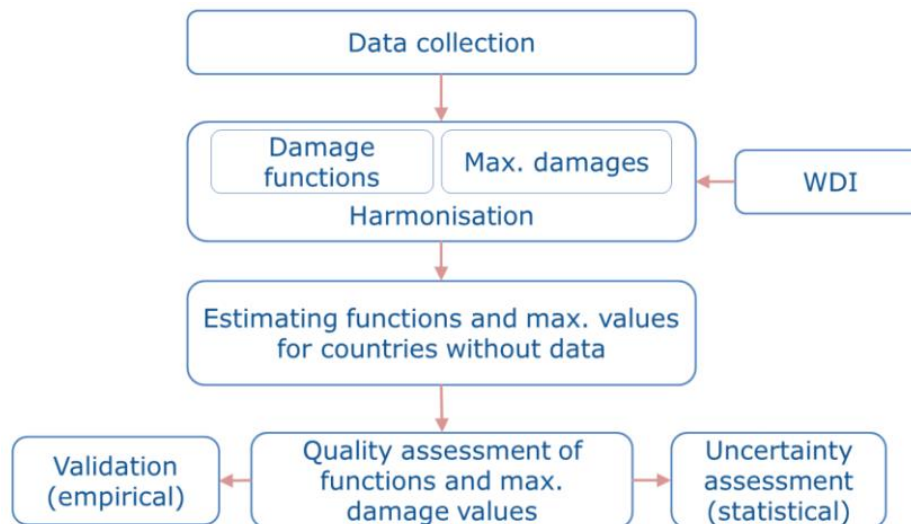


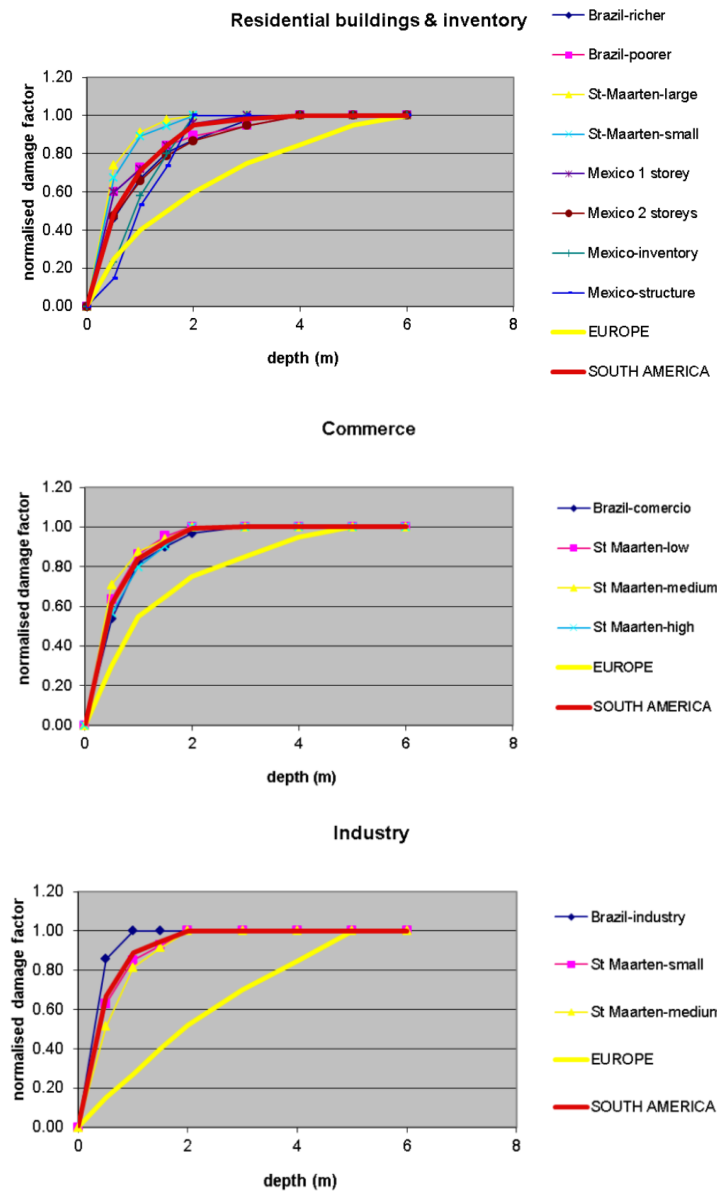
Figura 3. Metodología utilizada por el JRC de la Unión Europea para la estimación de las curvas de daño-profundidad por inundación a nivel global. Tomado de (Joint Research Centre, 2017).

En la Figura 3 se relaciona la metodología utilizada por el JRC de la Unión Europea con el fin de realizar la revisión bibliográfica y la recolección de datos relevantes y así poder derivar las curvas específicas de daño-profundidad para cada país. En términos generales, lo que implementó el reporte técnico fue lo siguiente:

1. Data collection: revisión en la literatura sobre funciones de daños para inundaciones y valores de daños máximo de acuerdo a los países.
2. Flood depth-damage functions: normalización (en los casos requeridos) de los factores de daño, derivación de las funciones de daño a nivel continental por tipo de uso del suelo, y la construcción de curvas de daño global para agricultura y vías debido a la información limitada sobre esto.
3. Maximum damage values: armonización de los valores de daño al nivel de precios del año 2010 y a la moneda de Euro, ajuste de los valores de daño máximo donde las funciones de daño fueron normalizadas, armonización de los costos de construcción de acuerdo a un análisis de regresión con el fin de extender los datos a países sin información sobre valores

de daño máximo para estructuras residenciales, comerciales e industriales, y el cálculo de los valores de daño máximo para agricultura e infraestructura.

4. Uncertainty and validation: estimación para las funciones de daños y los valores de daño máximo para estructuras residenciales, comerciales e industriales, y la comparación entre los daños registrados y los calculados para eventos de inundación en la ciudad de Nueva York (Estados Unidos) y Yakarta (Indonesia).



Gráfica 9. Factores de daño para estructuras residenciales, comerciales e industriales en Centro y Suramérica obtenidos por la JRC de la Unión Europea. Tomado de (Joint Research Centre, 2017).

La Gráfica 9 muestra los factores de daño para estructuras residenciales, comerciales e industriales encontrados para Centro y Suramérica en el reporte técnico de la Unión Europea. Estos fueron obtenidos a partir del análisis de la literatura encontrada en países como Brasil, México y las Islas de San Martín en el Caribe. De igual forma, el reporte técnico estima los valores máximos promedios de afectación por continente en Euros por metro cuadrado para el año 2010 (Joint Research Centre, 2017), los cuales pueden ser observados en la Tabla 3.

Tipo de Estructura	África	Asia	Oceanía	Norte América	Centro y Suramérica	Europa
Residencial	495	111	541	788	215	750
Comercial	-	138	506	1889	213	621
Industrial	120	114	-	1830	137	534
Transporte	-	209	-	-	-	751
Vías	267	4	7	39	-	24
Agricultura	0,12	0,03	4,85	662	-	0,77

Tabla 3. Valor máximo promedio de afectación en Euros/m² obtenidos por la JRC de la Unión Europea. Tomado de (Joint Research Centre, 2017).

Al igual que el reporte técnico de la JRC de la Unión Europea denominado *Global Flood Depth-Damage Functions* publicado en el 2017, alrededor del mundo se han desarrollado diversas metodologías para la evaluación de los daños y riesgos provocados por eventos de inundación tanto pluviales como fluviales. De igual forma, esto ha sido desarrollado para la ciudad de Bogotá previamente.

2.2.2 Antecedentes en la estimación de daños por inundaciones en la ciudad de Bogotá

En el año 2006 en la ciudad de Bogotá la Universidad de los Andes con el apoyo del Banco Mundial Fondo Japonés, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo llevaron a cabo un estudio con el fin de “proponer una metodología para la evaluación, zonificación y reducción de riesgos por inundaciones y avenidas torrenciales y su articulación con los Planes de Ordenamiento Territorial, aplicada a la Quebrada Limas” (Universidad de los Andes, 2006).

Este estudio presentó una metodología para la evaluación y zonificación de riesgos por inundaciones y avenidas potenciales teniendo en cuenta información asociada a costos y vulnerabilidad debido a la profundidad del agua alcanzada. En la Figura 4 se presenta el diagrama de flujo de la metodología utilizada en el estudio de la Quebrada Limas para la evaluación del riesgo por inundaciones.

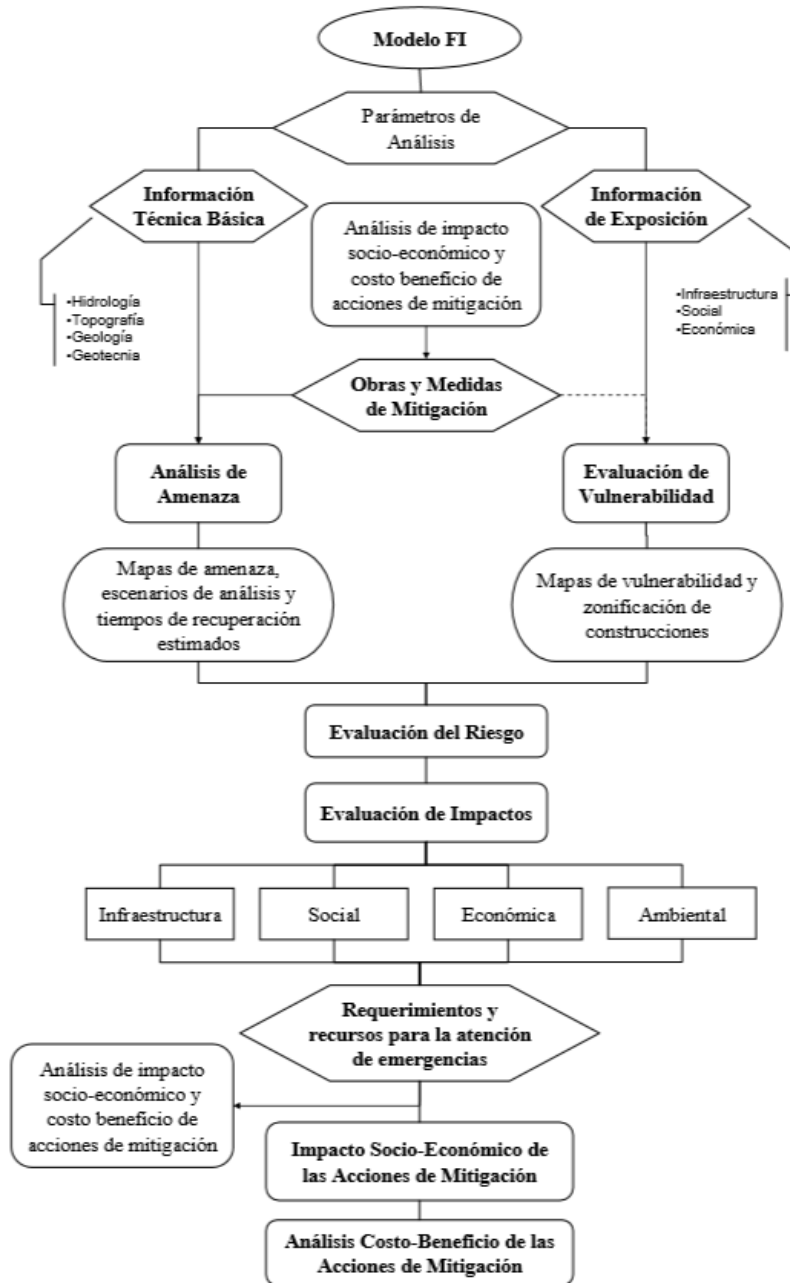


Figura 4. Diagrama de flujo de la metodología implementada en la evaluación del riesgo de inundación de la Quebrada Limas. Tomado de (Universidad de los Andes, 2006).

En términos generales, el caso de estudio de la Quebrada Limas en la ciudad de Bogotá desarrollado en el 2006 llevo a cabo los siguientes pasos:

1. A través de inspecciones de campo se construyó una base de datos de 29159 predios con el fin de caracterizar de forma general variables como: uso general, estrato

socioeconómico, número de manzanas y de predios, el área construida total, el valor catastral, y la ocupación diaria y nocturna en número de habitantes. Esta base de datos permitió caracterizar las áreas de afectación debido a diferentes fenómenos de inundación y evaluar la exposición a partir de mapas de amenaza teniendo en cuenta diferentes periodos de retorno.

2. Se realizó una valoración económica de las edificaciones y los bienes contenidos en ellas encontradas en el área de afectación. A partir de esto se obtuvieron los valores catastrales de reposición para los diferentes usos de suelo: en el uso residencial se tuvieron en cuenta los diferentes estratos socioeconómicos; y en los demás usos del suelo se tuvo en cuenta el nivel socioeconómico.
3. Se estableció el porcentaje de los bienes o contenidos de acuerdo a los diferentes usos de suelo. Estos fueron determinados de acuerdo al estrato socioeconómico gracias a especialistas consultados en este tema.
4. Se tuvo en cuenta diferentes factores que inciden en la vulnerabilidad con el fin de determinar curvas que relacionan la vulnerabilidad con la profundidad de inundación y los daños causados por esta. Algunos de estos factores fueron los siguientes:
 - Físicos: técnica y calidad de la construcción de casas y edificios, infraestructura, y crecimiento y densidad demográfica.
 - Económicos: situación socioeconómica, pobreza y situación alimentaria, sistemas operativos, estructura económica y de ingresos, acceso a recursos y servicios, reservas y financiamiento, sistemas de incentivos y sanciones para la prevención, y la investigación y desarrollo como indicador de la situación económica.
 - Sociales: sistemas de conocimiento tradicionales, percepción de riesgo, educación y formación, situación jurídica y derechos humanos, participación ciudadana, marco legal, y aspectos de género, minorías, jóvenes y ancianos.
 - Ambientales: superficies cultivables, aguas aprovechables, vegetación, biodiversidad y bosques, y la estabilidad de los ecosistemas.
5. Finalmente, fue posible determinar las pérdidas económicas por daños directos y afectación en los contenidos de acuerdo a la Ecuación 01 y Gráficas 10 y 11 como se muestra a continuación:

$$R_{DC} = \sum_i V_{DCi} * C_i * \text{Área}_i$$

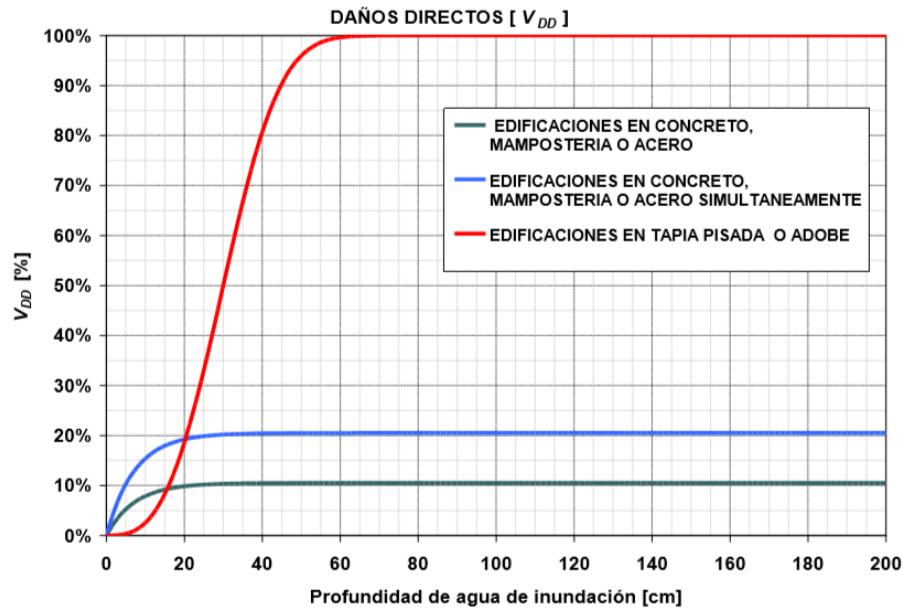
Ecuación 1. Pérdidas económicas para daños directos y afectación a los contenidos.

Donde:

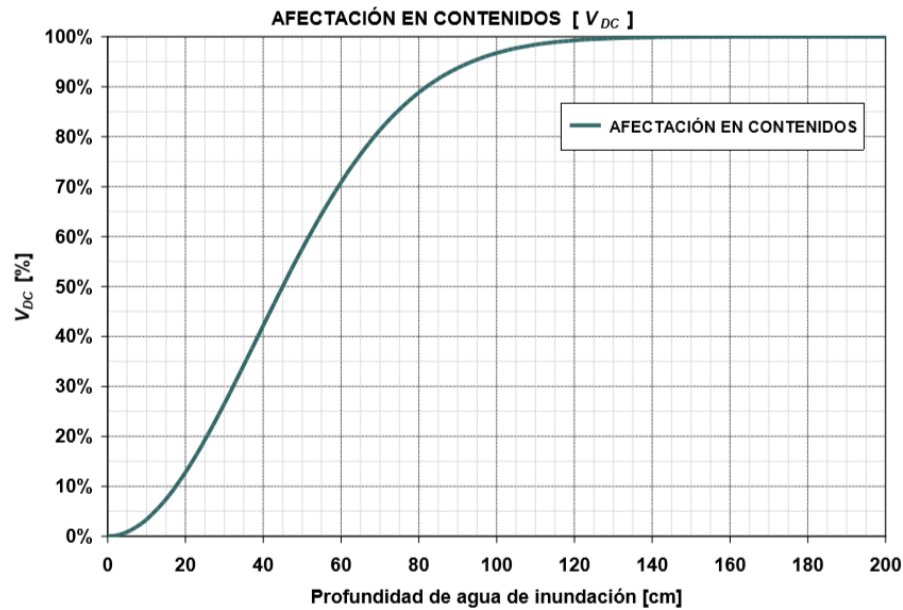
$$C_i = \text{Valor de contenidos para el componente } i \text{ (\$/m}^2\text{)}$$

$$\text{Área}_i = \text{Área construida del componente } i \text{ (m}^2\text{)}$$

V_{DCi} = Vulnerabilidad de los contenidos para el componente i



Gráfica 10. Curva de vulnerabilidad para la estimación de daños directos en la Quebrada Limas. Tomado de (Universidad de los Andes, 2006).



Gráfica 11. Curva de vulnerabilidad para la estimación de afectación a los contenidos en la Quebrada Limas. Tomado de (Universidad de los Andes, 2006).

Para el año 2015, el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y el Grupo de Investigación en Automatización para la Producción (GIAP) del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de los Andes estuvo a cargo del primer producto del proyecto “*Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de drenaje urbano del futuro*” Fase II. Este proyecto tenía como objetivo general el de “diseñar estrategias de control y gestión inteligente de redes de drenaje urbano, de manera que en tiempo real se minimice el riesgo de inundaciones y sus impactos altamente negativos sobre el medio ambiente, mientras que se opera este sistema de manera inteligente” (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).

De igual forma, este proyecto dentro de sus objetivos específicos buscó implementar un análisis de los costos que se generan por los fenómenos de inundación y de esta forma, poder determinar las curvas que permiten relacionar los costos con las profundidades de inundación. El análisis se basó en el caso de estudio presentado anteriormente de la Quebrada Limas en Bogotá por parte de la Universidad de los Andes.

En primer lugar, el proyecto realizó una búsqueda de los precios de usos del suelo teniendo en cuenta los diferentes estratos socioeconómicos de la ciudad de Bogotá. A su vez, la estimación de los precios del suelo por metro cuadrado para uso residencial se calculó a través de la implementación de una metodología de precios hedónicos. Esta permitió evaluar las viviendas como bienes complejos que dependen de las condiciones del mercado y la valoración o necesidad de los consumidores (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).

A partir del análisis realizado, el proyecto determinó los valores catastrales para cada uso del suelo en el año 2012 y haciendo uso del porcentaje de inflación acumulada anual determinó estos precios para el año 2015 teniendo en cuenta la variación de las condiciones económicas de los últimos años sobre el valor del suelo (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015). En la Tabla 4 se pueden observar los valores catastrales según el uso del suelo y el estrato socioeconómico en la ciudad de Bogotá para el año 2015.

Uso	Estrato	Valor catastral (\$/m ²)
Residencial	1	\$547,565.24
	2	\$921,140.73
	3	\$1,558,579.06
	4	\$3,546,307.44
	5	\$5,489,640.00
	6	\$8,783,424.00
Comercial	-	\$10,979,280.00
Industrial	-	\$4,391,712.00

Tabla 4. Valor catastral por uso del suelo en Bogotá. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).

Adicionalmente, partiendo de la metodología implementada en el estudio de la Quebrada Limas, se determinaron los valores para los contenidos según el uso del suelo y el estrato socioeconómico los cuales pueden observarse en la Tabla 5.

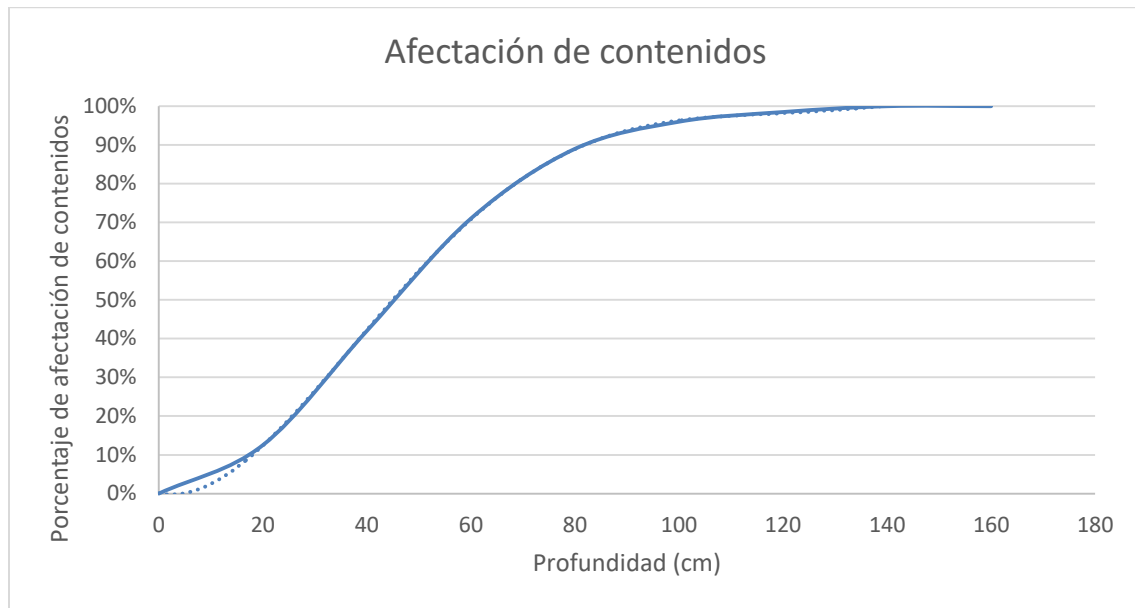
Uso	Estrato	Valor catastral (\$/m ²)	Valor de contenidos (%)	Valor de contenidos (\$/m ²)
Residencial	1	\$547,565.24	70%	\$383,295.67
	2	\$921,140.73	70%	\$644,798.51
	3	\$1,558,579.06	40%	\$623,431.63
	4	\$3,546,307.44	40%	\$1,418,522.98
	5	\$5,489,640.00	30%	\$1,646,892.00
	6	\$8,783,424.00	30%	\$2,635,027.20
Comercial	-	\$10,979,280.00	100%	\$10,979,280.00
Industrial	-	\$4,391,712.00	200%	\$8,783,424.00

Tabla 5. Valor de los contenidos por uso del suelo en Bogotá. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).

De igual forma, el proyecto determina las curvas de daños directos y afectación de los contenidos en función de la profundidad de la lámina de agua alcanzada para la ciudad de Bogotá. Esto se puede observar en las Gráficas 12 y 13.

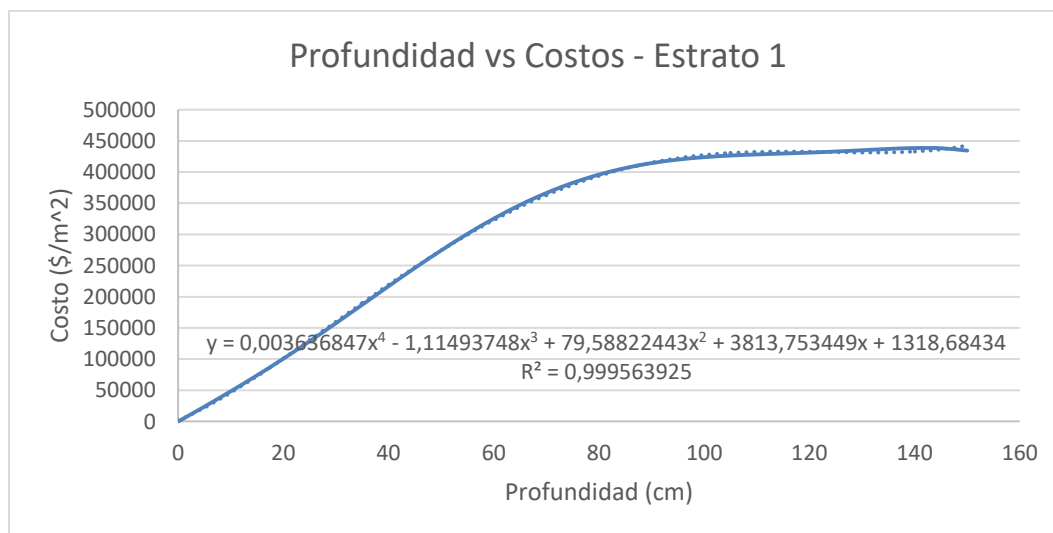


Gráfica 12. Curva de daños directos en función de la profundidad del agua en Bogotá. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).

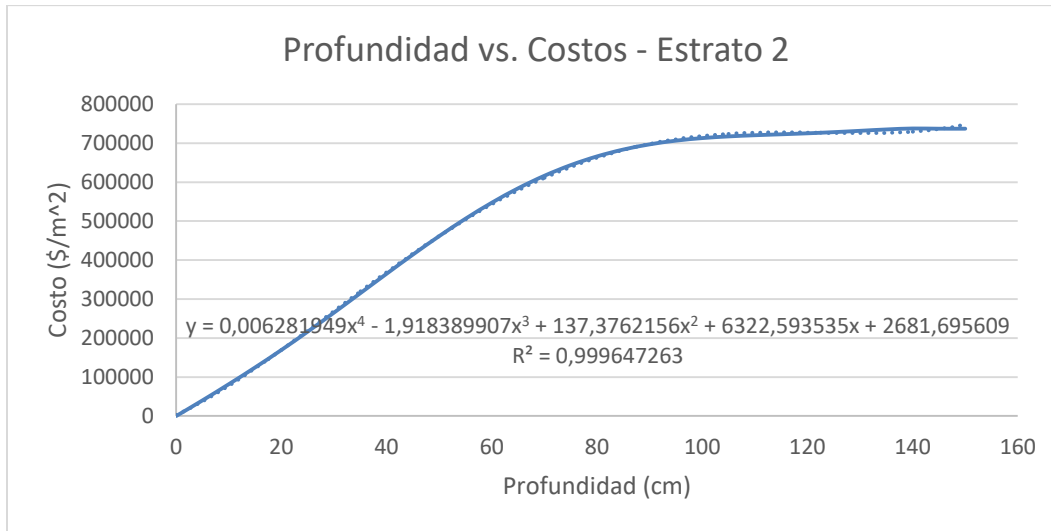


Gráfica 13. Curva de afectación de contenidos en función de la profundidad del agua en Bogotá. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).

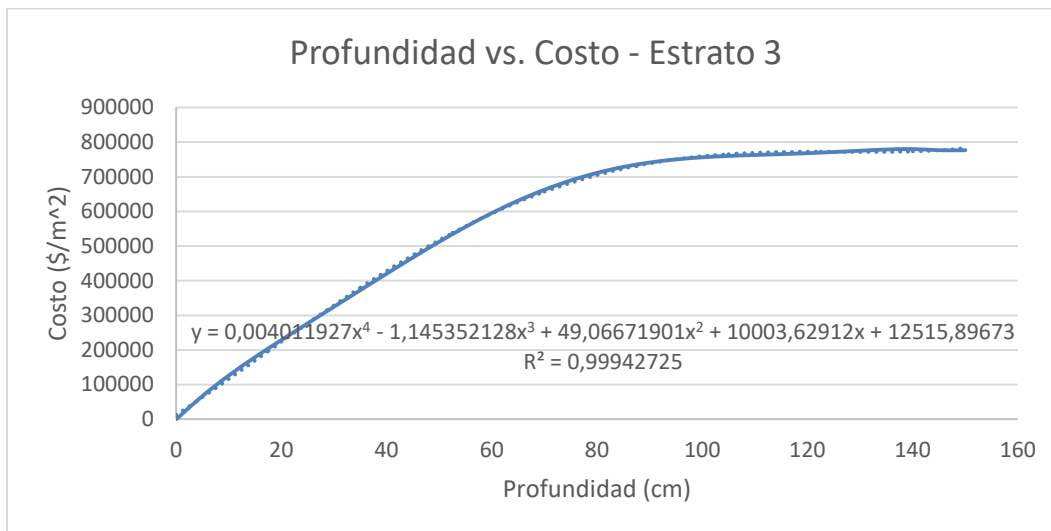
A partir de lo anterior, el proyecto determinó los daños totales como la suma de los daños directos y la afectación de los contenidos a una determinada profundidad de la lámina de agua alcanzada. En las siguientes gráficas es posible observar las curvas de costos en función de la profundidad de agua en Bogotá para los diferentes usos del suelo y los estratos socioeconómicos.



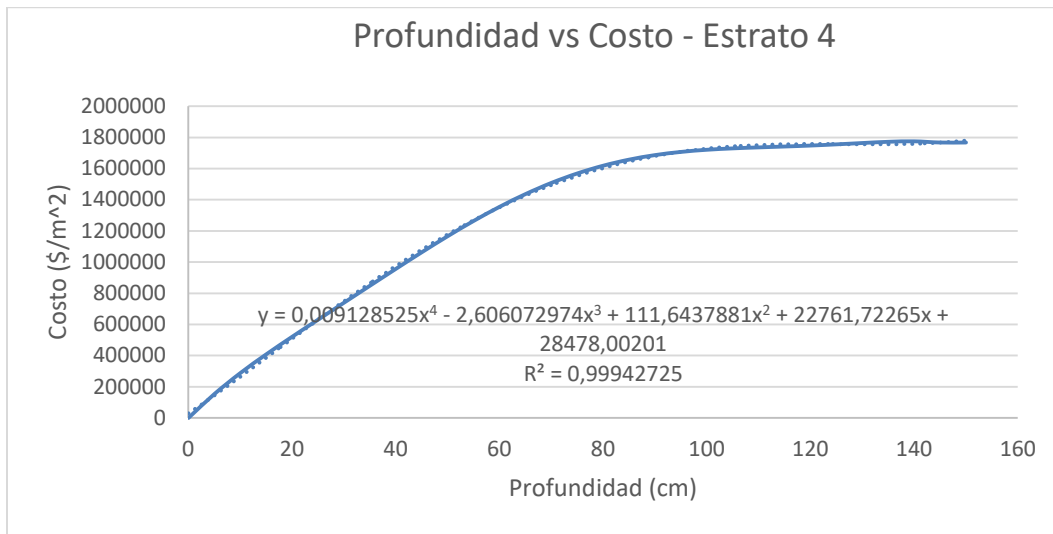
Gráfica 14. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 1. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).



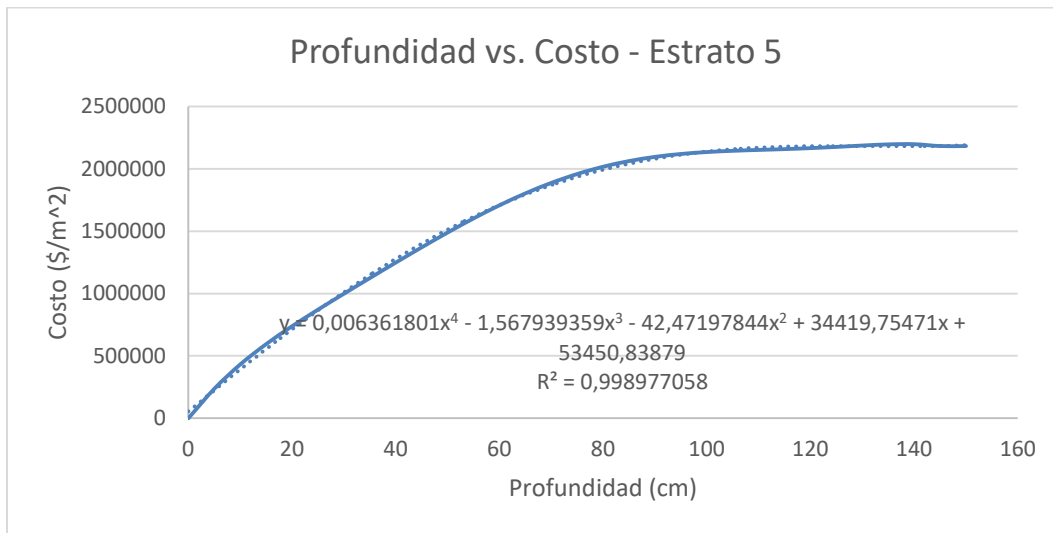
Gráfica 15. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 2. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).



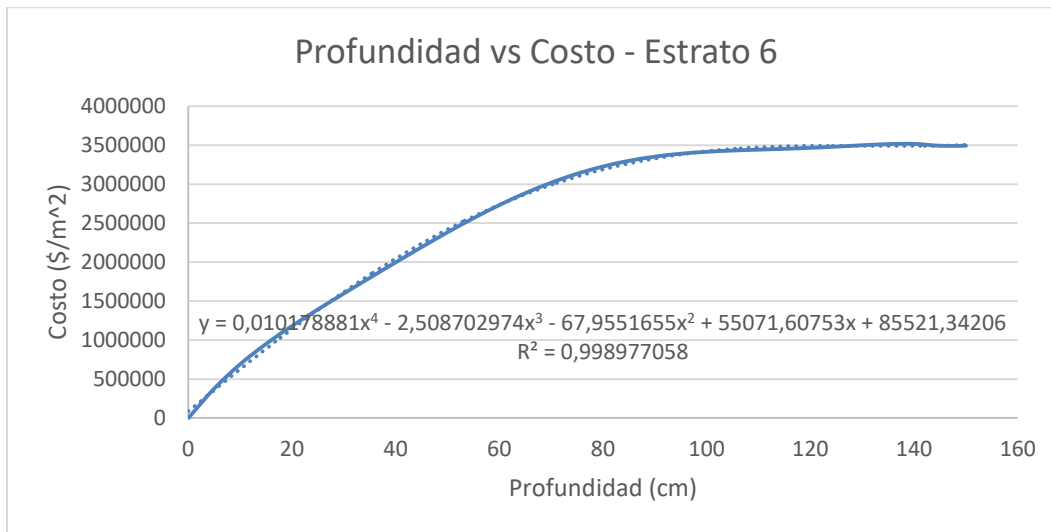
Gráfica 16. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 3. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).



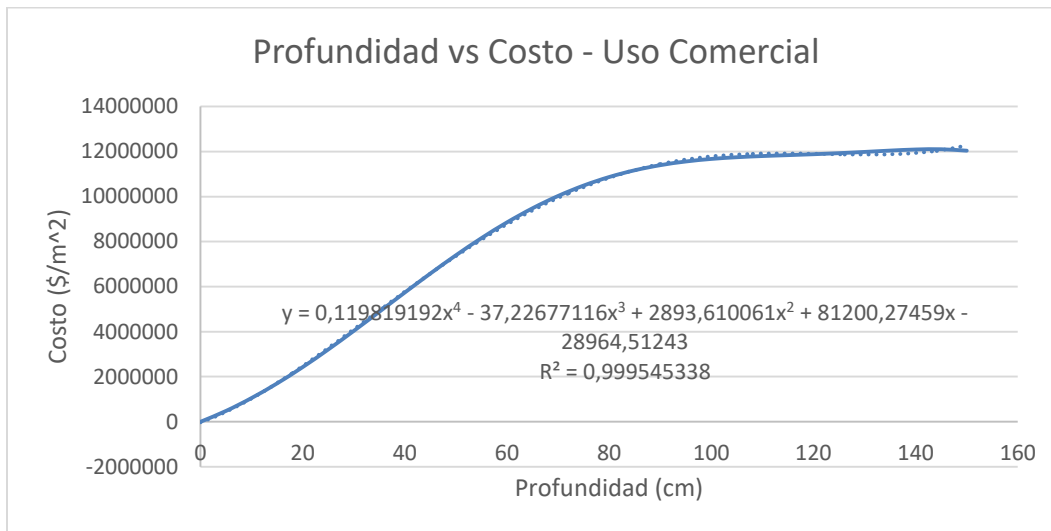
Gráfica 17. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 4. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).



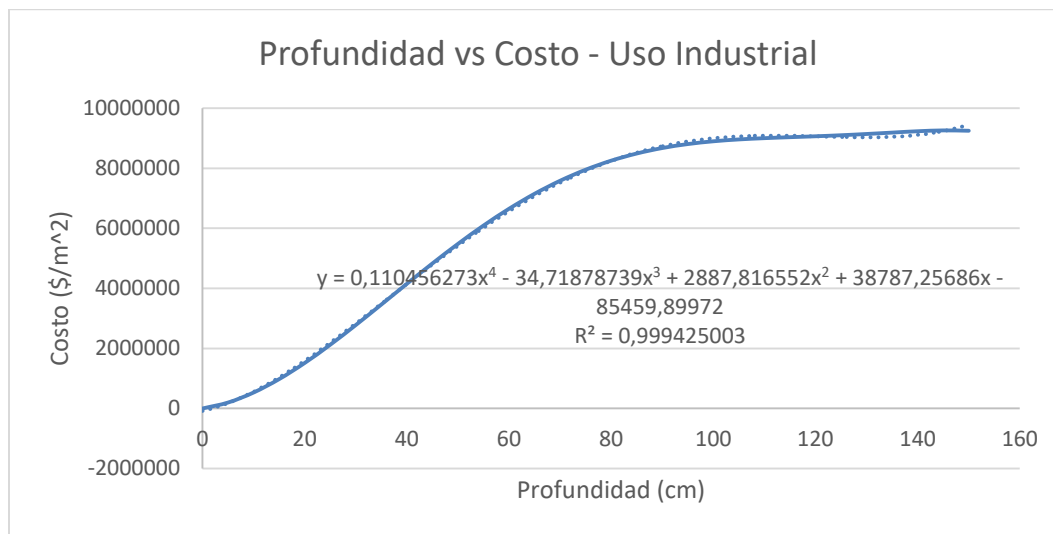
Gráfica 18. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 5. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).



Gráfica 19. Curva de costo en función de la profundidad para Estrato 6. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).



Gráfica 20. Curva de costo en función de la profundidad para Uso Comercial. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).



Gráfica 21. Curva de costo en función de la profundidad para Uso Industrial. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).

Finalmente, las curvas de costo en función de la profundidad determinadas por el proyecto permiten determinar los costos que generó determinado evento de inundación de acuerdo a la cuantificación y el conocimiento de las áreas afectadas. Esta información es de alta utilidad en los procesos de toma de decisiones distritales con el fin de enfocar los recursos disponibles en la disminución o prevención de las afectaciones determinadas por estos fenómenos (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).

3 METODOLOGÍA

3.1 Factores a incluir en la estimación de daños por inundaciones en la ciudad de Bogotá

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada a nivel internacional y el avance realizado en el proyecto de investigación, a continuación se presentan los diferentes factores que se recomiendan incluir en la estimación de los costos por inundaciones en la ciudad de Bogotá.

3.1.1 Factores de corrección de acuerdo al nivel de contaminación de las aguas y el nivel de precaución en la zona.

A través del artículo *Methods for the Evaluation of Direct and Indirect Flood Losses* (Thieken, y otros, 2008), los autores partieron de una extensa base de datos sobre eventos de inundación ocurridos durante diferentes meses y años con el fin de estimar las pérdidas económicas que estos representaron al afectar diferentes propiedades a lo largo de Alemania. El artículo hizo parte del programa *Risk Management of Extreme Flood Events* (RIMAX) donde el proyecto, lanzado en el 2005 y descrito por el artículo, se encontraba enfocado específicamente en:

- La evaluación de métodos para la recopilación de datos por inundaciones.
- La mejora en los modelos para la estimación de daños por inundaciones directas e indirectas.
- La aplicación y la validación de modelos de gestión del agua.
- La mejora en la transferencia de conocimiento y comunicación de riesgos.

Con el fin de evaluar y proponer nuevos modelos de daños por inundaciones para diferentes sectores, los autores realizaron entrevistas por teléfono asistidas por computadora en hogares privados y compañías siguiendo los eventos de inundación presentados en agosto del 2002, agosto del 2005 y abril del 2006 en Alemania, recolectando así una base de datos extensas acerca de las pérdidas económicas producidas y los factores que pudieron influenciar en estas.

A través de lo anterior, desarrollaron un modelo denominado *Flood Loss Estimation Model* que en su segunda versión *FLEMOps+* consideró los efectos de las medidas de precaución en los hogares y los niveles de contaminación de las aguas presentes en los eventos de inundación estimando diferentes factores de corrección. Por ejemplo, una muy buena medida de precaución puede reducir la afectación en un edificio en un 41%, mientras que un alto nivel de contaminación puede aumentarla en un 58% (Thieken, y otros, 2008). Estos factores de corrección pueden observarse en la Tabla 6 que se relaciona a continuación.

Factores de corrección de acuerdo a	Edificios privados	Edificios comerciales
No contaminación, no precaución	0.92	1.02
No contaminación, media precaución	0.64	0.82
No contaminación, muy buena precaución	0.41	0.67
Media contaminación, no precaución	1.20	1.28
Media contaminación, media precaución	0.86	1.03
Media contaminación, muy buena precaución	0.71	0.84
Alta contaminación, no precaución	1.58	1.28
Alta contaminación, media precaución	-	1.03
Alta contaminación, muy buena precaución	-	0.84

Tabla 6. Factores de corrección para diferentes niveles de contaminación y precaución. Tomado de (Thieken, y otros, 2008).

Con respecto a la utilización de estos factores de corrección en la estimación de los daños por inundaciones en la ciudad de Bogotá se propone complementarlos con la información contenida por el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) de la ciudad de Bogotá con respecto a la caracterización general del escenario de riesgo por inundación. De acuerdo a esta institución, las inundaciones son fenómenos producidos por excesos de agua que invaden áreas que en condiciones normales estarían secas (IDIGER, 2019). El IDIGER relaciona dos tipos de inundaciones:

- Por desbordamiento: son las inundaciones lentas o de tipo aluvial, debido a que estas se producen por el desbordamiento del cauce anegando áreas planas aledañas al mismo y suelen ser originadas por crecidas progresivas de larga duración (horas a días e inclusive meses en algunas zonas del país).
- Por encharcamiento: corresponden a inundaciones por fallas funcionales del sistema de alcantarillado. Generalmente se producen por fallas estructurales como desempates o fracturas, sub-dimensionamiento de redes de alcantarillado o disposición incorrecta a emisarios (reflujo), contaminación por basuras, manejo inadecuado del drenaje de vías, entre otras causas.

En cuanto a los fenómenos de encharcamiento presentados en la ciudad de Bogotá, el IDIGER a través de sus bases de datos ha recopilado la información de estos entre el año 2005 y 2019. A continuación se presenta el mapa desarrollado por el IDIGER donde se puede observar la densidad de eventos de encharcamiento por unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA) en la ciudad de Bogotá en número de eventos por Km² en la Figura 5.

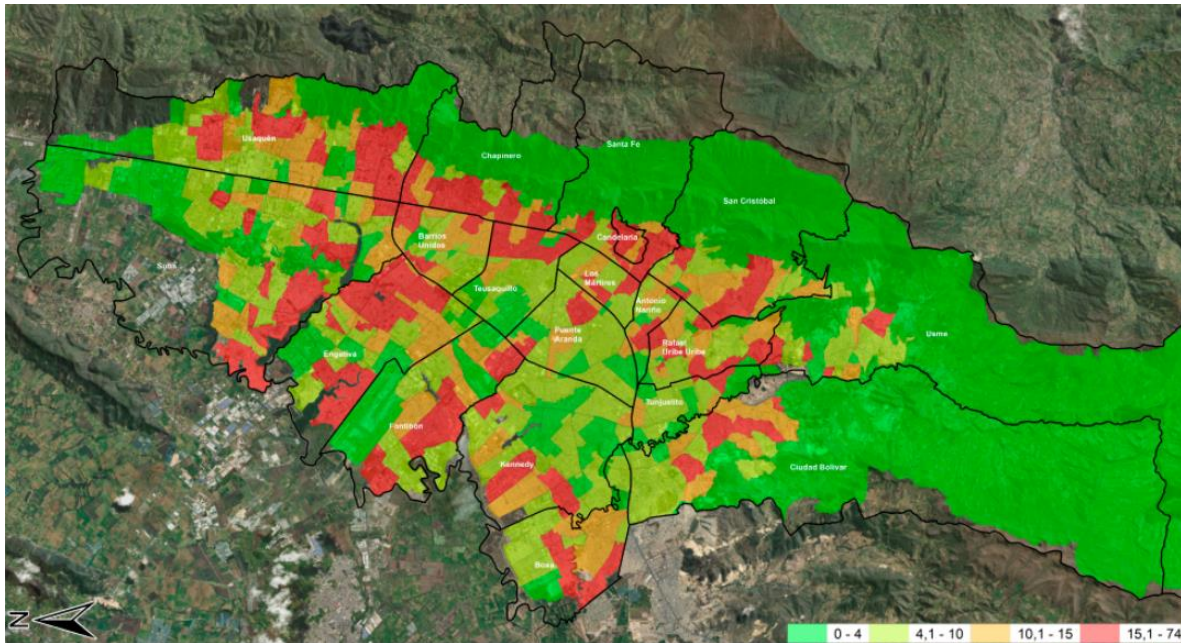


Figura 5. Densidad de eventos de encharcamiento por Unidades de Gestión de Alcantarillado (UGA) en la ciudad de Bogotá (Eventos/Km²) del 2005 al 2019. Tomado de (IDIGER, 2019).

Partiendo de lo anterior, lo que se propone a continuación es determinar los niveles de precaución de acuerdo al número de eventos de encharcamiento que presente la zona afectada por el fenómeno de inundación. Esto se debe a que un mayor número de eventos de encharcamiento refleja pocas o nulas medidas de precaución en la zona; o por el contrario, un menor número representa que las medidas de precaución son muy buenas o la zona no ha presentado este fenómeno. Lo anterior puede determinarse a través de la Tabla 7.

Nivel de precaución	Descripción
No precaución	Si ha presentado más de 15.1 eventos de encharcamiento entre el año 2005 y 2019.
Media precaución	Si ha presentado entre 4.1 y 15 eventos de encharcamiento entre el año 2005 y 2019.
Muy buena precaución	Si ha presentado menos de 4 eventos de encharcamiento entre el año 2005 y 2019.

Tabla 7. Nivel de precaución de acuerdo al número de eventos de encharcamiento presentados entre el año 2005 y 2019.

Con respecto a los niveles de contaminación, de acuerdo al artículo *Methods for the Evaluation of Direct and Indirect Flood Losses* (Thieken, y otros, 2008) un nivel de no contaminación corresponde a la presencia de ningún contaminante en el agua y un nivel de alta con contaminación a la

presencia de sustancias como el petróleo. Por lo cual, para el caso de la ciudad de Bogotá se procede a asumir un nivel de media contaminación con el fin de abarcar un escenario intermedio.

De acuerdo a lo explicado anteriormente, los factores de corrección para la estimación de los daños por inundaciones en la ciudad de Bogotá estarán determinados por un nivel de media contaminación para todos los casos y los diferentes niveles de precaución de acuerdo al número de eventos de encharcamiento que haya presentado la zona entre el año 2005 y 2019. En la Tabla 8 se relacionan los factores de corrección a utilizar.

Factores de corrección de acuerdo a	Edificios privados	Edificios comerciales
Media contaminación, no precaución	1.20	1.28
Media contaminación, media precaución	0.86	1.03
Media contaminación, muy buena precaución	0.71	0.84

Tabla 8. Factores de corrección para el nivel de media contaminación y los diferentes niveles de precaución en la ciudad de Bogotá. Tomado de (Thieken, y otros, 2008).

Estos factores de corrección se proceden a utilizar según corresponda en la modificación de los porcentajes de afectación de contenidos y daños directos estimados por el primer producto del proyecto *Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de drenaje urbano del futuro Fase II* desarrollado en el 2015, el cual fue explicado anteriormente. Los factores de corrección proceden a multiplicar los porcentajes de afectación de contenidos y daños directos generando un incremento o una disminución en estos de acuerdo a las condiciones de la zona de inundación. En la Tabla 9 se presentan los porcentajes determinados por el proyecto descrito y los cuales se modificarían a partir de los factores de corrección.

Profundidad (cm)	Porcentaje de afectación de contenidos	Profundidad (cm)	Porcentaje de daños directos
0	0%	0	0%
20	13%	5	4%
40	42%	10	7%
60	71%	15	9%
80	89%	20	10%
100	96%	30	10%
120	99%	40	10%
140	100%	60	10%
160	100%	80 – 140	10%

Tabla 9. Porcentajes de afectación de contenidos y daños directos de acuerdo a la profundidad del agua para la ciudad de Bogotá. Tomado de (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, 2015).

La modificación de los porcentajes de afectación de contenidos y daños directos a partir de los factores de corrección utilizados dará a lugar a nuevas curvas de costo en función de la

profundidad para los diferentes estratos socioeconómico y usos del suelo de acuerdo al valor catastral determinado para el año del evento de inundación.

3.1.2 Costos debido a la interrupción de los servicios públicos y el transporte

En el artículo *An Application of a Flood Risk Analysis System for Impact Analysis of a Flood Control Plan in a River Basin* (Dutta, Herath, & Musiake, 2006) dentro del modelo para la estimación de daños por inundaciones propuesto por los autores se consideran los daños directos y tangibles siendo categorizados en tres grupos principales: daño urbano, rural y a la infraestructura. A su vez, cada uno de estos grupos da lugar a unas subcategorías de acuerdo a las características provocadas por los daños de un evento de inundación.

Daño urbano		Daño a la infraestructura		Daño rural
Tipo	Subcategorías	Tipo	Subcategorías	Subcategorías
(a) Daño residencial.	(a) Estructuras. (b) Contenidos. (c) Propiedad exterior.	(a) Daño al sistema. (b) Pérdidas por interrupción.	(a) Suministro de agua. (b) Alcantarillado y drenaje. (c) Suministro de gas. (d) Suministro de energía. (e) Telecomunicaciones. (f) Transporte.	(a) Daño a los cultivos y vegetales. (b) Daños a las casas rurales. (c) Daño a la infraestructura rural.
(b) Daño a edificios no residenciales.	(d) Emergencia y limpieza.			

Tabla 10. Subcategorías de los daños directos y tangibles utilizadas en el modelo de estimación de daños. Tomado de (Dutta, Herath, & Musiake, 2006).

En la Tabla 10 se describen las subcategorías relacionadas a los daños directos y tangibles para los tres grupos mencionados. A partir de esto, los autores presentan los modelos matemáticos para las diferentes subcategorías, que en caso de requerirse la revisión al detalle pueden ser consultados en un artículo previo denominado *A Mathematical Model for Flood Loss Estimation* (Dutta, Herath, & Musiake, 2003). A continuación se presentan los modelos desarrollados para el tipo de pérdidas por interrupción en los diferentes servicios públicos y el transporte (Dutta, Herath, & Musiake, 2006):

- Interrupción en el servicio: interrupción en el servicio de cualquier sistema debido al daño de cualquier componente x .

$$SL_x = \sum_{i=1}^{nc} (RF_c SC)$$

Ecuación 2. Costo en la interrupción en el servicio de cualquier sistema para un componente x .

$$RF_c = \sum_{i=1}^n [RF_i P(dS_i)]$$

Ecuación 3. Función de restauración total.

Donde:

nc = número total de los componentes

$P(dS_i)$ = probabilidad de encontrarse en un estado de daño i

n = número total de estados de daño

SC = pérdida en el servicio por día debido a la interrupción

RF_c = función de restauración total

RF_i = restauración del estado del daño

- Interrupción en el transporte: costos por el retraso.

$$DC = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^m [E_l(i)v(i,j)D_c(i)T_v(i,j)td] \right\}$$

Ecuación 4. Costo por la interrupción en el transporte.

Donde:

n = número de vías inundadas

m = modo de transporte en cualquier vía

E_l = longitud adicional que debe cubrirse debido a la inundación en la vía i

T_v = volumen total de tráfico en la vía i por hora

t = duración total de la inundación

d = factor para considerar la variación del volumen de tráfico con respecto a los días entre semana y fines de semana

D_c = costo del retraso por unidad de tiempo para la vía i

Con el fin de adaptar lo anteriormente mencionado a la estimación de daños por inundaciones en la ciudad de Bogotá, se propone determinar las expresiones para conocer el total de pagos no percibidos por una empresa prestadora de servicios públicos y el total de los costos de la gasolina empleada en el recorrido adicional de los vehículos ante un evento de inundación. La Ecuación 05 y Ecuación 06 buscan adaptar los modelos presentados en el artículo (Dutta, Herath, & Musiake, 2006) a nuevas expresiones que podrían considerarse accesibles ante la información que se requiere para estimar los daños totales.

- Costo por interrupción para un determinado servicio público:

$$CIS = \sum_{i=1}^n VS_i t$$

Ecuación 5. Costo por la interrupción de un determinado servicio público para Bogotá.

Donde:

VS_i = promedio del valor pagado por servicio público para la edificación i por unidad de tiempo

t = duración total de la inundación

CIS = costo total de la interrupción de un determinado servicio público

- Costo de la interrupción del transporte:

$$CIT = VG * GK * DA * VD * t$$

Ecuación 6. Costo por la interrupción del transporte para Bogotá.

Donde:

VG = Costo de un galón de gasolina en Bogotá

GK = promedio de los galones empleados por kilómetro recorrido para cualquier vehículo

DA = distancia adicional recorrida en kilómetros a causa de la inundación

VD = número de vehículos por día que transitan la vía interrumpida por la inundación

t = duración total de la inundación

3.2 Procedimiento final para la estimación de daños por inundaciones en la ciudad de Bogotá

A continuación se describen los pasos a seguir de la metodología propuesta para la estimación de los daños por inundaciones urbanas en la ciudad de Bogotá:

1. Determinar la ubicación de la inundación en la ciudad de Bogotá.
2. Obtener el número de eventos de encharcamiento en la ubicación de la inundación de acuerdo al mapa presentado en la Figura 5.
3. Asignar el nivel de precaución de acuerdo a la Tabla 7.
4. Ajustar los porcentajes de afectación de contenidos y daños directos de la Tabla 9 multiplicándolos por el factor de corrección de la Tabla 8 según corresponda.
5. Determinar el valor catastral para uso residencial (estrato 1 al 6) y uso comercial e industrial.
6. Estimar las curvas de profundidad vs costo para uso residencial, comercial e industrial y determinar las ecuaciones para cada una.

7. Determinar el área de inundación y la profundidad de la lámina de agua alcanzada.
8. Calcular el costo de inundación por afectación de contenidos y daños directos.

Si se requiere incluir en el análisis el costo por la interrupción de un servicio público:

9. Determinar las viviendas, comercios e industrias afectadas y el valor promedio diario que estos pagaban para un determinado servicio público.
10. Estimar la duración total de la inundación.
11. Calcular el costo total por la interrupción de un servicio público en específico mediante la Ecuación 5.

Si se requiere incluir en el análisis el costo por la interrupción del transporte:

12. Determinar el valor del combustible, el consumo de este en promedio por distancia recorrida por un vehículo, el número de vehículos afectados y la distancia adicional que tuvieron que recorrer a causa de la inundación.
13. Estimar la duración total de la inundación.
14. Calcular el costo total por la interrupción del transporte mediante la Ecuación 06.

Finalmente, las pérdidas económicas en total para el evento de inundación presentado estarán determinadas por la suma de lo obtenido en el punto 8, 11 y 14.

4 ANÁLISIS COMPARATIVO

En la actualidad las metodologías implementadas para la estimación de los daños por inundaciones a nivel internacional se han visto extendidas por todo el mundo, inclusive en Latinoamérica. En la gran mayoría de estas parten de la profundidad de la lámina de agua alcanzada para estimar los niveles de afectación y estimar las pérdidas económicas. Adicionalmente, se presentan en mayor medida las metodologías para los sistemas fluviales que pluviales y tienden a evaluar mucho más los daños urbanos que rurales. A continuación se presentan diferentes metodologías relevantes en Latinoamérica que se han desarrollado en la actualidad y podrían aportar información con el fin de complementar la metodología propuesta para la ciudad de Bogotá.

4.1 Comparación con otras metodologías implementadas en América Latina

En Latinoamérica es posible evidenciar el desarrollo de diferentes metodologías en la estimación de daños por inundaciones en países como México, Brasil y Ecuador. Cada una de estas puede variar en su componente metodológico, las variables que tienen en cuenta y los supuestos que pueden plantear con el fin de representar de la mejor forma posible las pérdidas que se pueden presentar en un determinado evento de inundación. Las metodologías desarrolladas en la región hasta el día de hoy y las que se darán en el futuro requieren de la calibración y adaptación constante de los modelos de acuerdo al tipo de pérdidas que se desean estimar y el alcance territorial que se requiera.

Al igual que las metodologías desarrolladas en otras partes del mundo, los modelos para la estimación de daños por inundación para Latinoamérica coinciden en construir funciones que relacionan la profundidad de inundación con el daño que esto pueda causar a las estructuras o sus contenidos. A continuación se van a presentar de forma general las metodologías desarrolladas para México, Brasil y Ecuador con el fin de mostrar puntos en común o diferencias con el modelo propuesto para la ciudad de Bogotá en Colombia.

- Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México (Baro, Díaz Delgado, Calderon, Esteller, & Cadena, 2011):

El objetivo de este estudio consistió en presentar una propuesta metodológica con el fin de construir curvas que representaran las funciones de daño económico y profundidad de inundación; esto a partir de la valoración económica de los daños directos y tangibles en zonas habitacionales a través de la estimación del costo de inundación más probable a

partir de una función de distribución beta como modelo probabilístico. En términos generales, el desarrollo del estudio buscaba aportar al desarrollo de los métodos de evaluación directa estándar para la república mexicana.

La zona de estudio correspondió a la cuenca Lerma-Chapala en México la cual ha presentado eventos de inundación de gran importancia. Esta cuenta se encuentra en la parte central de México y se extiende desde el nacimiento del río Lerma hasta su desembocadura en el lago de Chapala en Jalisco. De acuerdo al estudio, la cuenca presenta inundaciones debido a la ocurrencia de huracanes que provienen tanto del Atlántico como del Pacífico las cuales son consideradas repentinas ya que la cuenca no tiene cómo responder de forma suficientemente rápida frente a estas. Algunas estimaciones de las inundaciones en la cuenca estiman que se presentaron pérdidas económicas de 996 y 227 millones de pesos mexicanos.

En términos generales, la metodología del estudio consistió en primer lugar en construir una base de datos con el fin de identificar los tipos, la localización y la severidad de los daños causados por las inundaciones teniendo en cuenta la información de las zonas habitacionales inundadas. En segundo lugar, se construyeron las curvas de daños potenciales que describían la relación entre la altura de la lámina de agua con los daños económicos alcanzados. Esto fue posible gracias a la inclusión de los índices de marginación urbana para México y el análisis de los porcentajes de afectación de los bienes en función de la altura de la lámina de agua. En tercer y último lugar, se estimaron las curvas de costo máximo, mínimo y más probable gracias a modelos matemáticos de tipo regresivo.

A partir de las diferentes curvas de costo máximo, mínimo y más probable se obtuvieron las ecuaciones para cada uno de los índices de marginación. Estas pueden observarse en la Tabla 11. Cabe resaltar que la obtención final de estas ecuaciones fue posible gracias a los procesos de recopilación de información llevados a cabo donde se identificaron el número de viviendas y el tipo y número de bienes contenidos en estas de acuerdo a los estratos socioeconómicos presentados en la zona de estudio. Para ello, hicieron uso de información estatal disponible gracias a que el Estado De México cuenta con un registro anual sobre los eventos de inundación presentados en cada municipio y localidad teniendo en cuenta la altura de la lámina de agua alcanzada y el número de viviendas afectadas para cada caso.

Índice de marginación	Ecuación	R ²
Muy alto	DDH _{máx} = 247.63 Ln(h) + 668.44	0.82
	DDH _{mín} = 141.36 Ln(h) + 382.45	0.72
	DDH _{mp} = 156.92 Ln(h) + 424.33	0.74
Alto	DDH _{máx} = 289.63 Ln(h) + 801.56	0.85
	DDH _{mín} = 228.58 Ln(h) + 637.93	0.80
	DDH _{mp} = 280.51 Ln(h) + 777.60	0.84
Medio, una planta	DDH _{máx} = 709.63 Ln(h) + 1976.04	0.88
	DDH _{mín} = 544.93 Ln(h) + 1546.60	0.83
	DDH _{mp} = 685.51 Ln(h) + 1913.15	0.87
Medio, dos plantas	DDH _{máx} = 549.55 Ln(h) + 1345.57	0.88
	DDH _{mín} = 405.03 Ln(h) + 965.27	0.80
	DDH _{mp} = 528.39 Ln(h) + 1289.88	0.87
Bajo, una planta	DDH _{máx} = 877.28 Ln(h) + 2479.23	0.88
	DDH _{mín} = 797.24 Ln(h) + 2233.19	0.85
	DDH _{mp} = 865.56 Ln(h) + 2443.20	0.87
Bajo, dos plantas	DDH _{máx} = 666.15 Ln(h) + 1632.94	0.85
	DDH _{mín} = 595.33 Ln(h) + 1409.03	0.82
	DDH _{mp} = 605.70 Ln(h) + 1441.82	0.82
Muy bajo, una planta	DDH _{máx} = 1521.80 Ln(h) + 4051.63	0.92
	DDH _{mín} = 1210.14 Ln(h) + 3321.20	0.87
	DDH _{mp} = 1255.78 Ln(h) + 3428.17	0.88
Muy bajo, dos plantas	DDH _{máx} = 1230.35 Ln(h) + 2850.34	0.92
	DDH _{mín} = 939.78 Ln(h) + 2221.33	0.87
	DDH _{mp} = 1187.79 Ln(h) + 2758.22	0.91

Tabla 11. Ecuaciones de los daños potenciales directos en zonas habitacionales de México. Tomado de (Baro, Díaz Delgado, Calderon, Esteller, & Cadena, 2011).

- Full Flood Cost: insights from a risk analysis perspective (W. Fadel, Marques F., Goldenfum, Medellín-Azuara, & Tilmant, 2018):

El objetivo del artículo es incorporar el concepto del riesgo en un análisis completo de daños por eventos de inundaciones; esto a través de una visión probabilística de las ventajas de implementar medidas de control ante estos fenómenos. De acuerdo a la revisión de los autores, las metodologías implementadas con anterioridad en la estimación de los daños por inundaciones buscan determinar las pérdidas económicas teniendo en cuenta la incertidumbre y la probabilidad de ocurrencia dejando hoy en día un espacio para la evaluación de la efectividad en la implementación de medidas de protección frente a estos eventos.

De forma general, el artículo presenta una perspectiva probabilística de los beneficios de implementar medidas de control de inundaciones incorporando el concepto de riesgo a un análisis de costos por inundación para una región en Brasil. Evalúa por qué y en qué medida la inclusión de la probabilidad de efectividad en una determinada medida de

protección contra inundaciones difiere de los métodos tradicionales basados en el beneficio bruto combinando un análisis sobre el daño esperado anual y las dos medidas de manejo de inundaciones propuestas.

El área de estudio corresponde a la ciudad de Lajeado en el sur de Brasil la cual entre 1980 y 2007 ha llegado a presentar hasta 24 eventos de inundación donde la mitad de ellos fueron catalogados como situación de emergencia. Esta ciudad se encuentra dentro de la cuenca del río Taquari-Antas el cual ha presentado hasta elevaciones de 13 metros, registradas en el año 2007. La cuenca presenta un patrón de eventos de inundación frecuentes lo cual evidencia una falta o ineficiencia en las medidas de control o adaptación frente a estas emergencias.

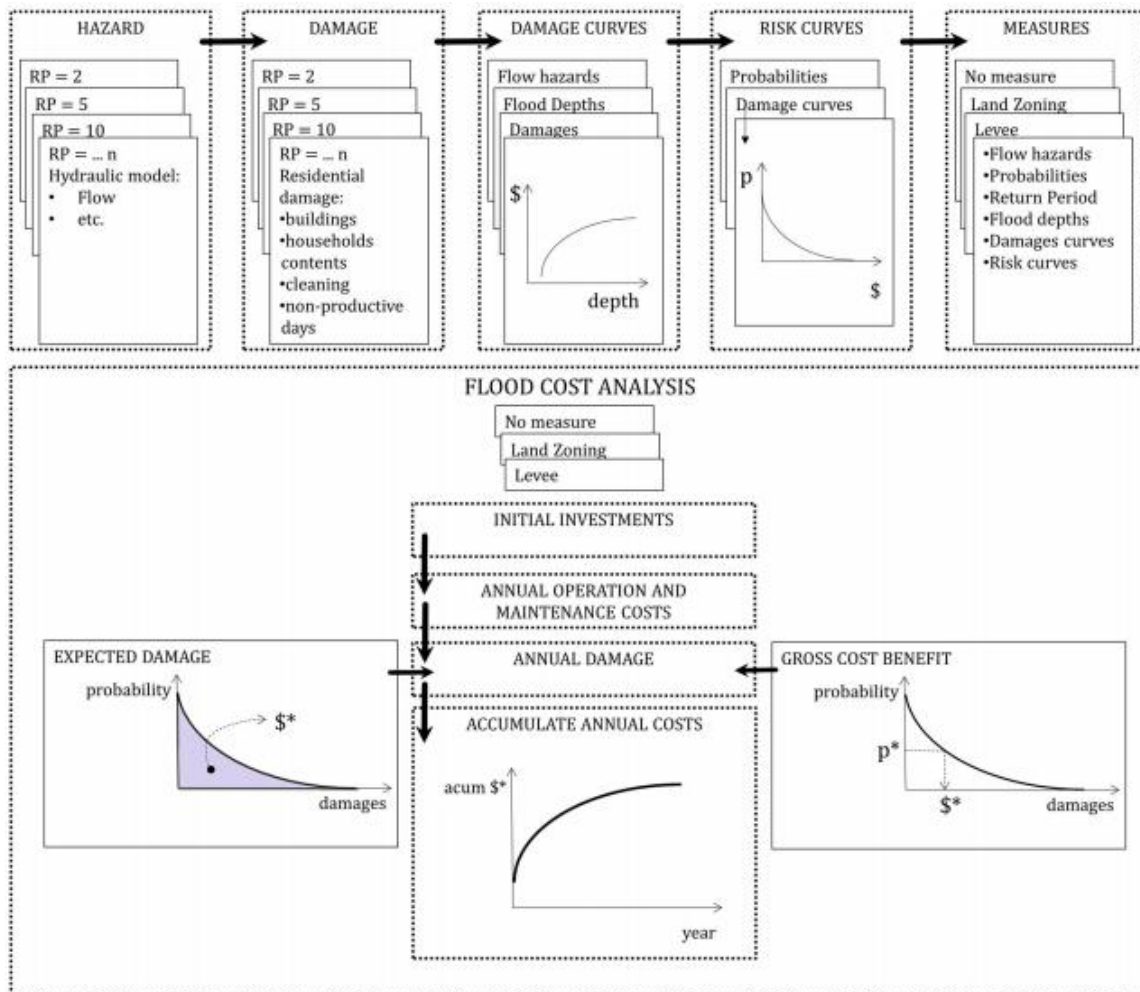


Figura 6. Metodología implementada en el análisis de riesgo y costo total de inundación en Brasil. Tomado de (W. Fadel, Marques F., Goldenfum, Medellín-Azuara, & Tilmant, 2018).

En la Figura 6 se ilustra la metodología implementada en el artículo. En primer lugar se determinó el peligro de inundación de acuerdo a las características del evento y los diferentes periodos de retorno. Seguido a esto, se estimaron los tipos de daño en la zona de inundación para cada uno de los periodos de retorno y se construyeron las curvas de daño con respecto a la profundidad de la lámina de agua. En segundo lugar, se llevó a cabo el análisis de riesgo de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia del evento y el uso de suelo y los niveles de ocupación de la zona de inundación. Por último y en tercer lugar, este análisis se realizó entre las diferentes medidas de protección propuestas en el artículo con el fin de estimar los daños esperados con respecto a cada una y comparar los resultados entre sí.

Dentro de las principales conclusiones que los autores resaltan dentro del artículo se encuentra que sin un análisis de probabilidad de distribución de la inundación, es posible que medidas estructurales puedan ser mal interpretadas como más costo efectivas que otras medidas. A su vez, recomiendan incluir evaluaciones de riesgo en los análisis de costos de inundaciones y análisis a largo plazo con el fin de identificar si reducir los costos de afectación compensa los costos acumulados de las medidas de protección. Finalmente, los autores indican que estimar el daño esperado facilita la determinación de sectores prioritarios a proteger porque incluye el análisis de la probabilidad de que determinado evento ocurra cada año.

- Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017):

A través del artículo los autores buscaron en primer lugar llevar a cabo una revisión de las metodologías a nivel internacional sobre la evaluación del riesgo y las pérdidas económicas en los eventos de inundación. A su vez, el principal enfoque que tuvo en cuenta el estudio fueron los eventos determinados por inundaciones fluviales. A partir de esto, los autores propusieron una metodología para la evaluación del riesgo y los daños por inundaciones para Ecuador y Latinoamérica en zonas urbanas y agrícolas.

De acuerdo a los autores, las metodologías revisadas presentan una alta heterogeneidad donde los modelos probabilísticos cada vez más están siendo utilizados a nivel internacional. En general, las metodologías evaluadas coinciden en el uso de la profundidad alcanzada por la lámina de agua y el daño por unidad de área para estimar los daños y las afectaciones producidas por un evento de inundación al tener en cuenta los diferentes usos del suelo, las estructuras y los bienes que se encuentran en estos.

En cuanto a la metodología que se propone en el estudio para Ecuador, los autores después de haber llevado a cabo un análisis multicriterio de los métodos a nivel internacional proponen el procedimiento descrito en la Figura 7 el cual se basa en un Sistema de Información Geográfica (SIG). A su vez, describen que este tiene en cuenta la facilidad en la adquisición de la información con el fin de que cualquier institución gubernamental pueda evaluar el riesgo ante un evento de fundación. De acuerdo a los autores, la metodología propuesta incorpora los componentes vistos a nivel internacional con un enfoque para el territorio ecuatoriano pero también con la capacidad de proyectarse en Latinoamérica.

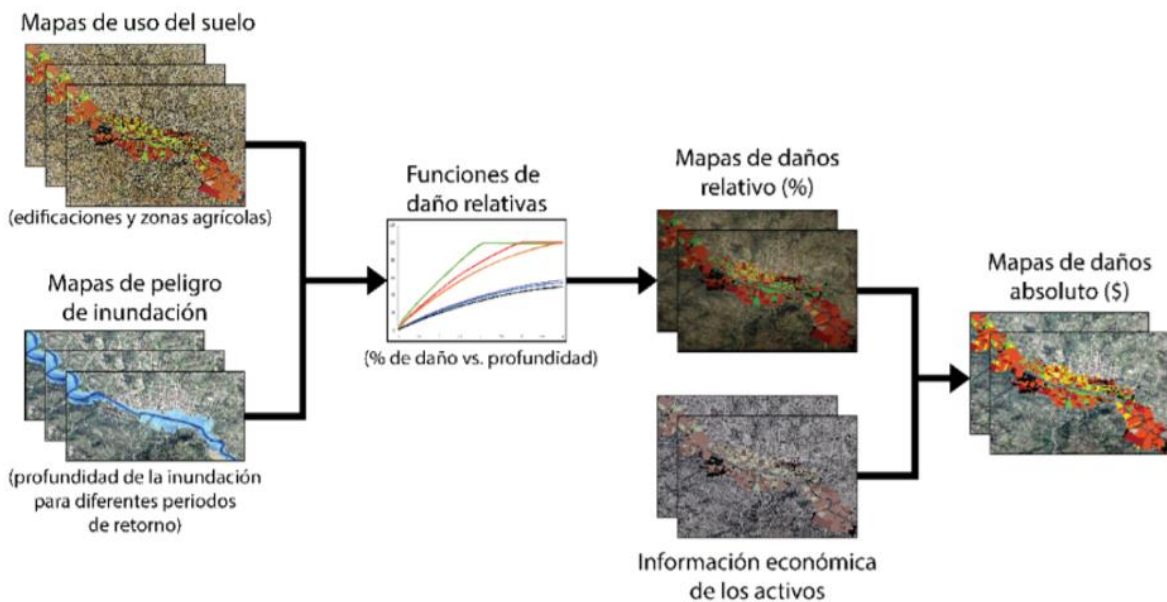


Figura 7. Metodología propuesta para la evaluación de los daños producidos por inundaciones en Ecuador. Tomado de (Pinos, Timbe, & Orellana, 2017).

Adicionalmente, los autores describen que la metodología propuesta hace uso de la menor información posible teniendo en cuenta que la disponibilidad de esta a nivel nacional y en diferentes contextos puede ser muy limitada. Por lo cual, es posible realizar una estimación de las pérdidas económicas a partir de los daños directos causados a edificaciones y zonas agrícolas sin comprometer los resultados de la metodología. Los autores determinaron las funciones de daño relativas teniendo en cuenta la profundidad de la lámina de agua y el porcentaje de daño causada por esta para diferentes usos del suelo. Finalmente, los resultados son vistos a través de una herramienta SIG relacionando el daño absoluto a lo largo de una determinada zona inundada para diferentes periodos de retorno.

5 CONCLUSIONES

Como se expuso a lo largo del presente trabajo, las causas del cambio climático y sus consecuencias son cada vez más significativas en el planeta. Estas generan escenarios de riesgo por las afectaciones que pueden ocasionar fenómenos naturales como los eventos de inundación. Adicionalmente, estos eventos generan los mayores impactos en los países más pobres y son los desastres naturales que se presentan con mayor frecuencia en el mundo. Ya que se ha evidenciado que estos eventos son cada vez más comunes y dañinos que en el pasado se hace cada vez más relevante su oportuna evaluación y gestión con el fin de prevenir y mitigar sus consecuencias.

De acuerdo al Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER), para el año 2010 los eventos de inundación en Colombia llegaron a presentar pérdidas económicas aproximadamente por el 2% del Producto Interno Bruto del país. Diferentes condiciones como las deficiencias en los planes de ordenamiento territorial, la deforestación y la expansión de la frontera agrícola son algunas de las causas que están incrementando el riesgo y los daños antes los eventos de inundación en el país.

Debido a lo anterior, a nivel internacional y nacional se ha hecho cada vez más relevante poder evaluar y estimar los daños por pérdidas económicas que pueden generar los eventos de inundación en una determinada zona. De acuerdo a las metodologías revisadas, determinar los riesgos ante un evento de inundación puede terminar siendo una tarea compleja teniendo en cuenta las diferentes variables y supuestos que se pueden involucrar en el proceso. Para el caso colombiano, la cuantificación de los daños por inundaciones tiene el potencial de facilitar los procesos de planeación urbana y mitigación de desastres; por lo cual, el presente trabajo buscó proponer una función para inundaciones urbanas aplicada a la ciudad de Bogotá.

En términos generales, las metodologías revisadas a nivel internacional buscan determinar los daños directos e indirectos en un evento de inundación, los cuales a su vez, pueden clasificarse como tangibles e intangibles. De igual forma, estas metodologías en su gran mayoría parten de la profundidad de inundación o la altura de la lámina de agua alcanzada durante el evento para determinar los porcentajes de daño y así estimar las pérdidas económicas.

Para la función de costos de inundaciones urbanas propuesta para la ciudad de Bogotá se partió de los avances realizados por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y el Grupo de Investigación en Automatización para la Producción (GIAP) del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de los Andes que para el año 2015 realizaron el primer producto del proyecto

Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de drenaje urbano del futuro Fase II. El cual, cuenta con una primera aproximación en la estimación de los daños para la ciudad de Bogotá, la cual a través de este trabajo se propone complementar.

A partir de la revisión metodológica a nivel internacional se encontró que es importante tener en cuenta los niveles de contaminación de las aguas de inundación y los niveles de precaución que pueda presentar la zona. De acuerdo a la determinación de esto, los porcentajes de afectación de los contenidos y los daños directos se pueden ver modificados considerablemente y de esta forma generar diferencias en la estimación de las pérdidas económicas a causa de la inundación. A su vez, se propuso tener en cuenta la interrupción de los servicios públicos y el transporte como daños directos e indirectos respectivamente. Esto debido a que las afectaciones y los riesgos presentados a causa de los eventos de inundación cada vez más están extendiendo el análisis más allá de los daños directos y tangibles.

Finalmente, otros países en Latinoamérica también han realizado estudios y determinado diferentes metodologías para la estimación de los daños y el riesgo a causa de los eventos de inundación. Cada una de estas metodologías se ha adaptado a su propia locación y ha decidido asumir diferentes supuestos de acuerdo a los procesos que se desean llevar a cabo y los resultados que quieren obtener. A partir de esto, es posible evidenciar que la determinación de los costos por inundaciones es más adecuada si la metodología es adaptada a las condiciones locales donde se presentan estos eventos. Se concluye finamente, que la función de costos propuesta es pertinente para la ciudad de Bogotá ya que tiene en cuenta tanto las condiciones locales como la información que estaría disponible para su determinación. Se espera que esta metodología sea de utilidad para la prevención y mitigación de estos eventos en la ciudad de Bogotá y permita evitar las consecuencias de las inundaciones y las pérdidas económicas que estas generan.

6 RECOMENDACIONES

A partir de la metodología propuesta, se recomienda la aplicación de esta en las evaluaciones de los eventos de inundación o encharcamientos que ha sufrido la ciudad de Bogotá en el pasado. La revisión de diferentes casos de estudio le permitiría tanto al evaluador como a las instituciones del estado empezar a tomar decisiones basados en cuáles son las mejores alternativas en términos de beneficio costo con el fin de mitigar estos eventos. Seguido a esto, es importante empezar a tener en cuenta los daños indirectos e intangibles que los eventos de inundación pueden llegar a presentar. A pesar de que este no es un campo muy desarrollado en las metodologías a nivel internacional, se empieza a evidenciar su importancia en la estimación de los daños causados por las inundaciones.

7 REFERENCIAS

- Ballesteros-Cánovas, J., Sanchez Silva, M., Bodoque, J., & Díez-Herrero, A. (2013). An Integrated Approach to Flood Risk Management: A Case Study of Navaluenga (Central Spain). *Water Resour Manage*, 27: 3051-3069.
- Ballesteros-Canovas, J., Sanchez-Silva, M., Bodoque, J., & Díez-Herrero, A. (2013). An Integrated Approach to Flood Risk Management: A Case Study of Navaluenga (Central Spain). *Water Resources Management*, 27.
- Baro, J., Díaz Delgado, C., Calderon, G., Esteller, M., & Cadena, E. (2011). Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA*, II. 201.
- Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., & Esteller-Alberich, M. V. (2007). Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México. Parte II: caso de estudio en la cuenca alta del río Lerma, México. *Ingeniería hidráulica en México*, 71-85.
- Bernal, Angel & Baro, Jose & Díaz Delgado, Carlos. (2016). Estimación de pérdidas económicas directas provocadas por inundación. Aplicación de las curvas inundación-daños en países en desarrollo. *Investigaciones Geográficas*.
- Bhattarai, R., Yoshimura, K., Seto, S., Nakamura, S., & Oki, T. (2015). Statistical model for economic damage from pluvial flood in Japan using rainfall data and socio-economic parameters. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 3. 6075-6116.
- Bhattarai, R., Yoshimura, K., Seto, S., Nakamura, S., & Oki, T. (2016). Statistical model for economic damage from pluvial floods in Japan using rainfall data and socioeconomic parameters. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1063-1077.
- C, K., Haase, D., V, M., & Scheuer, S. (2009). Integrated urban flood risk assessment - Adapting a multicriteria approach to a city. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9.
- Chang, Heejun & Lafrenz, Martin & Jung, Il Won & Figliozzi, Miguel & Platman, Deena & Pederson, Cindy. (2010). Potential Impacts of Climate Change on Flood-Induced Travel Disruptions: A Case Study of Portland, Oregon, USA. *Annals of The Association of American Geographers - ANN ASSN AMER GEOGR*. 100. 938-952.
- Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA. (2015). *Drenaje Urbano y Cambio Climático; hacia los sistemas de drenaje urbano del futuro. Fase II. Producto*

Intermedio. Cambio Climático y Variación Futura en la Intensidad de las Precipitaciones en las Ciudades Colombianas. Bogotá, D.C.: Universidad de los Andes.

Chen, Y., Yeh, C., & Yu, B. (2016). Flood damage assessment of an urban area in Taiwan. *Natural Hazards : Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 83 (2). 1045-1055.

De Risi, R., De Paola, F., Turpie, J., & Kroeger, T. (2018). Life cycle cost and return on investment as complementary decision variables for urban flood risk management in developing countries. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 88-106.

Dinero. (24 de Febrero de 2019). *¿Cuánto cuestan los desastres naturales?* Obtenido de <https://www.dinero.com/pais/articulo/cuanto-cuesta-un-desastres-natural/267559>

Douben, K.-J. (2006). Characteristics of river floods and flooding: A global overview, 1985-2003. *Irrigation and Drainage*, 55(S1): S9-S21.

Dutta, D., Herath, S., & Musiake, K. (2003). A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of Hydrology*, 277. 24-49.

Dutta, D., Herath, S., & Musiake, K. (2006). An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin. *Hydrological Processes*, 20. 1365-1384.

Escuder, Ignacio & Castillo, Jessica & Zechner, S. & Jöbstl, C. & Perales-Momparler, Sara & Petaccia, Gabriella. (2012). A quantitative flood risk analysis methodology for urban areas with integration of social research data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12. 2843-2863.

Grahn, T., & Nyberg, L. (2017). Assessment of pluvial flood exposure and vulnerability of residential areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 21.

Haile Erena, S., & Worku, H. (2019). Urban flood vulnerability assessments: the case of Dire Dawa city, Ethiopia. *Natural Hazards*, (97) 495-516.

Hernández-Uribe, E. R., Barrios-Piña, H., & I. Ramírez, A. (2016). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y ciencias del agua*, Vol. 8.

IDEAM. (2017). *Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación*. Bogotá: IDEAM.

IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM.

IDIGER. (2018). *Proyecto de Actualización de Componente de Gestión del Riesgo para la Revisión Ordinaria y Actualización del Plan de Ordenamiento Territorial*. Bogotá: IDIGER.

- IDIGER. (16 de Agosto de 2019). *Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático*.
Obtenido de <https://www.idiger.gov.co/rinundacion#inundaciones>
- IPCC. (2018). *Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C*.
Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Jamali, B., Löwe, R., Bach, P., Urich, C., Arnbjerg-Nielsen, K., & Deletic, A. (2018). A rapid urban flood inundation and damage assessment model. *Journal of Hydrology*, (564) 1085-1098.
- Joint Research Centre. (2017). *Global flood depth-damage functions*. Sevilla: European Union.
- Jongman, Brenden & Kreibich, Heidi & Apel, Heiko & Barredo, José & Bates, P & Feyen, L & Gericke, A & Neal, Jeffrey & Ward, Philip. (2012). Comparative flood damage model assessment: Towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12.
- Joseph, Rotimi & Proverbs, David & Lamond, Jessica & Wassell, Peter. (2014). Application of the concept of cost benefits analysis (CBA) to property level flood risk adaptation measures. *Structural Survey*. 32.
- K. Jha, A., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Ciudades e Inundaciones - Guía para la Gestión Integrada del Riesgo por Inundaciones en Ciudades en el Siglo 21*. Banco Mundial.
- Kreibich, H & Christenberger, Sophie & Schwarze, Reimund. (2011). Economic motivation of households to undertake private precautionary measures against floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- Kreibich, H., Seifert-Dähnn, I., Merz, B., & Thieken, A. (2010). Development of FLEMOcs - A new model for the estimation of flood losses in the commercial sector. *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques*, 55. 1302-1314.
- Leal, M., Boavida-Portugal, I., Fragoso, M., & Ramos, C. (2019). How much does an extreme rainfall event cost? material damage and relationships between insurance, rainfall, land cover and urban flooding. *Hydrological Sciences Journal*, 64 (6). 673-689.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & H. Thieken, A. (2010). Assessment of economic flood damage. *Natural Hazards Earth Systems Science*, 10 (8). 1697-1724.
- Messner, F., Penning-Rowsell, E. C., Green, C., & Meyer, V. (2007). Evaluating flood damage: guidance and recommendations on principles and methods. *FLOOD Site Project Report*.
- Nascimento, N., Machado, M., Baptista, M., & Silva, A. (2007). The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context. *Urban Water Journal*, 4. 195-210.

- Nguyen, P., Thorstensen, A., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Sanders, B., Smith, M. (2016). A high resolution coupled hydrologic-hydraulic model (hiresflood-uci) for flash flood modeling. *Journal of Hydrology: Part A*, 541, 401-420.
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. (2017). *Pérdidas económicas, pobreza y desastres 1998-2017*.
- Olsen, A., Zhou, Q., Linde, J., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2015). Comparing Methods of Calculating Expected Annual Damage in Urban Pluvial Flood Risk Assessments. *Water*, 7, 255-270.
- Ootegem, L., Verhofstadt, E., Van Herck, K., & Creten, T. (2015). Multivariate pluvial flood damage models. *Environmental Impact Assessment Review*, 54.
- Osberghaus, Daniel. (2015). The determinants of private flood mitigation measures in Germany — Evidence from a nationwide survey. *Ecological Economics*. 110. 36-50.
- Penning-Rowsell, E. (2015). A realistic assessment of fluvial and coastal flood risk in England and Wales. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 40(1), 44-61.
- Pinos, J., Timbe, L., & Orellana, D. (2017). Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador. *MASKANA*, Vol. 8, No 2, 2017.
- Piperno, A., & Sierra, P. (2013). Estrategias de intervención en áreas urbanas inundables: El caso bella unión, uruguay. *Eure (santiago)*, 39(116), 250-241.
- Poussin, J.K.. (2014). Factors of Influence on Flood Damage Mitigation Behaviour by Households. *Environmental Science & Policy*. 40.
- Poussin, J.K. & Aerts, Jeroen. (2018). Effectiveness of flood damage mitigation measures: Empirical evidence from French flood disasters. *Global Environmental Change*.
- Qi, Wei & Liu, Junguo. (2017). A non-stationary cost-benefit based bivariate extreme flood estimation approach. *Journal of Hydrology*. 557.
- Remo, Jonathan & Carlson, Megan & Pinter, Nicholas. (2012). Hydraulic and Flood Loss Modeling of levee, floodplain, and river management strategies, Middle Mississippi River, USA. *Natural Hazards*. 61.
- Sedano-Cruz, Karime & Escobar, Yesid & Avila, Alvaro. (2013). Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia. 219-238.

- Singh, Prasoon & Sinha, Vinay & Vijhani, Ayushi & Pahuja, Neha. (2018). Vulnerability Assessment of urban road network from urban flood. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28.
- Thieken, A., Piroth, K., Schwarz, J., Schwarze, R., Seifert-Dähnn, I., Seifert, J., Müller, M. (2008). Methods for the evaluation of direct and indirect flood losses.
- Universidad de los Andes. (2006). *Estudio para proponer la metodología para la evaluación, zonificación y reducción de riesgos por inundaciones y avenidas torrenciales y su articulación con los POT, aplicación de zonificación de amenazas a un caso piloto del Distrito de Bogotá*. Bogotá, D.C.
- Veldhuis, J. (2011). How the choice of flood damage metrics influences urban flood risk assessment. *Journal of Flood Risk Management*, 4(4), 281-287.
- W. Fadel, A., Marques F., G., Goldenfum, J. A., Medellín-Azuara, J., & Tilmant, A. (2018). Full Flood Cost: Insights from a risk Analysis Perspective. *Journal of Environmental Engineering*, 144 (9).
- Wedawatta, G., Ingirige, B., & Proverbs, D. (2014). Small businesses and flood impacts: The case of the 2009 flood event in cockermouth. *Journal of Flood Risk Management*, 7 (1) 42-53.
- Wu, I. (1975). Design on Drip Irrigation Main Lines. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*.
- Yan, Kun & Di Baldassarre, Giuliano & Solomatine, Dimitri & Schumann, Guy. (2015). A review of low-cost space-born data for flood modelling: topography, flood extent and water level. *Hydrological Processes*, 29.
- Yin, J., Yu, D., Yin, Z., Liu, M., & He, Q. (2016). Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China. *Journal of Hydrology*, 537.
- Zhou, Y., Shen, D., Huang, N., Guo, Y., Zhang, T., & Zhang, Y. (2019). Urban flood risk assessment using storm characteristic parameters sensitive to catchment-specific drainage system. *The Science of the Total Environment*, (659) 1362-1369.