



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE ARRASTRE DE PERSONAS  
POR INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
JULIO CÉSAR SORIANO MONZALVO

TUTOR  
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. OCTUBRE 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO**

<b>Cargo</b>	<b>Grado / Nombre</b>
Presidente:	Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles
Secretario:	Dr. Fernando J. González Villareal
1er. Vocal:	Dr. Adrián Pedrozo Acuña
2do. Vocal:	Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez
3er. Vocal:	Dr. José Agustín Breña Naranjo

La presente tesis fue desarrollada en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

TUTOR DE TESIS:  
Dr. Adrián Pedrozo Acuña

---

FIRMA

## DEDICATORIA

*Este trabajo de investigación es el resultado de un esfuerzo que ha sido motivado por un gran número de personas, que a lo largo de mi vida han sido parte fundamental de mi vida y formación profesional, a quienes estaré eternamente agradecido.*

*A Dios, por la vida, la salud y su guía en cada momento de mi vida.*

*A mi madre y mi padre, por su amor, apoyo incondicional y su motivación para continuar cumpliendo mis sueños.*

*A mis hermanas, por ser ejemplos para seguir, sus palabras de aliento y consejos.*

*A mi tía Isabel, por su apoyo incondicional.*

*A Stephanie Mendoza, por su amor, apoyo y comprensión.*

*A mis profesores por el conocimiento, experiencia y enseñanzas compartidas.*

*A mis amigos de la carrera, maestría y del II-UNAM, por su camaradería y amistad.*

*A todas las personas que en algún momento me brindaron su afecto y apoyo.*

## AGRADECIMIENTOS

“El que da, no debe volver a acordarse; pero el que recibe nunca debe olvidar”  
(Proverbio hebreo)

A mi Alma Máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, la máxima casa de estudios de país, por la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura y maestría, así como por el privilegio de formar parte de una gran comunidad universitaria.

Al Instituto de ingeniería de la UNAM por permitirme ser becario, aprender con el desarrollo de proyectos de gran relevancia nacional y darme acceso a las herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado a través del sistema de becas de posgrado de calidad, sin el cual esto no hubiera sido posible.

Al proyecto de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación (SECITI): “Agua inteligente, ciudad inteligente SECITI/113/2017”.

Mi sincero agradecimiento al Dr. Adrián Pedrozo Acuña por permitirme trabajar en su equipo de trabajo, creer en mí, su apoyo, consejos y ser el soporte técnico para la elaboración de esta tesis, así como por ser un ejemplo para superarme día a día.

A los demás miembros de comité tutorial: Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez, Dr. Fernando J. González Villareal, Dr. Agustín Breña Naranjo y el Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles; por sus enseñanzas compartidas en cada una de sus clases; por sus sugerencias, y el asesoramiento recibido durante el desarrollo de esta tesis.

A todos mis demás profesores que, sin ser debidamente reconocidos en su labor docente, han sido parte fundamental en mi formación profesional, educación y siempre un ejemplo de inspiración.

A mis amigos incondicionales de la carrera en Ingeniería Civil, Juan Manuel Lomelín, Diego Martínez, Paola E. Ocampo y César Paniagua, gracias por todo el apoyo, su cariño y amistad.

A mis amigos de la maestría Omar Cenobio, David Paniagua y Marco Jiménez, gracias por todo su apoyo, compañerismo y lealtad. En la Coordinación de Hidráulica del Instituto de

Ingeniería de la UNAM: Juan Pablo, Laurent y Saúl, por ayudarme a resolver mis dudas e instruirme en el uso de software especializado., Roberto, Marco, Roberta, Diana, Úrsula, Jorge, Jorge B., Juan por su apoyo y gran compañerismo. Y especialmente a ustedes: Alejandra, Roxana, Omar y Eliel, grandes amigos y colegas, con quienes compartí risas, tristezas, triunfos, fracasos, stress y momentos inolvidables en aquel cubículo 307.

A mi madre, Teresa Monzalvo Maya; a mi padre, Genaro Soriano Herrera, por todo su amor, cariño y el apoyo incondicional que me han brindado desde el primer instante de vida, por guiarme por el camino correcto y motivarme continuamente a cumplir mis metas.

A mis hermanas Fabiola, Claudia y Teresita por apoyarme siempre en todos los aspectos de mi vida y ser esa guía que me impulsa seguir superándome cada día.

A Stephanie I. Mendoza por haber compartido esta etapa de mi vida y brindarme tu amor, comprensión y el apoyo necesario para poder continuar adelante.

A todas las excelentes personas que conocí, me brindaron su apoyo y me acompañaron a lo largo de este viaje... ¡Gracias!

## CONTENIDO

JURADO ASIGNADO.....	1
DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS .....	3
CONTENIDO .....	5
LISTA DE FIGURAS .....	7
LISTA DE TABLAS .....	13
RESUMEN.....	15
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	18
1.1    Objetivo.....	20
1.2    Estructura de la tesis .....	21
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	23
2.1    Perspectiva de las inundaciones.....	27
2.1.1    Concepto, causas y efectos de las inundaciones .....	27
2.1.2    Clasificación de las inundaciones.....	34
2.1.3    Panorama global de las inundaciones .....	41
2.1.4    Panorama nacional de las inundaciones .....	49
2.2    Antecedentes de la determinación del peligro por inundaciones a personas .....	57
2.2.1    Desarrollo de los criterios de arrastre de personas .....	58
2.2.2    Evaluación del peligro por inundaciones en México.....	64
CAPÍTULO 3. ZONAS DE ESTUDIO .....	70
3.1    Ciudad Río Bravo, Tamaulipas.....	71
3.1.1    Descripción.....	71
3.1.1.1    Geología, orografía y edafología.....	73
3.1.1.2    Uso de suelo y vegetación .....	76
3.1.1.3    Clima.....	77
3.1.1.4    Hidrografía .....	81
3.1.2    Inundaciones históricas .....	82

3.1.3	Población.....	86
3.1.3.1	Patrones de la ocupación territorial y desarrollo urbano.....	88
3.2	León, Guanajuato .....	90
3.2.1	Descripción.....	91
3.2.1.1	Geología, orografía y edafología.....	92
3.2.1.2	Uso de suelo y vegetación .....	96
3.2.1.3	Clima.....	97
3.2.1.4	Hidrografía .....	101
3.2.2	Inundaciones históricas .....	103
3.2.3	Población.....	107
3.2.3.1	Patrones de la ocupación territorial y desarrollo urbano.....	110
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA .....		113
4.1	Modelo hidrológico e hidrodinámico Itz'í.....	116
4.1.1	Descripción.....	117
4.1.2	Forzamientos .....	121
4.1.3	Calibración y validación.....	131
4.2	Criterios de arrastre de personas por inundaciones en zonas urbanas .....	137
4.2.1	Criterio de DEFRA (de base empírica o cuasi – teórica) .....	138
4.2.2	Criterio de Xia (base teórica y experimentalmente calibrado).....	142
4.2.3	Criterio de Milanesi (de base teórica y experimentalmente calibrado).....	151
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		163
5.1	Resultados de la modelación hidrológico-hidrodinámica.....	164
5.1.1.	Escenario de inundación asociado a un Tr de 2 años .....	164
5.1.2	Escenario de inundación asociado a un Tr de 5 años .....	167
5.1.3	Escenario de inundación asociado a un Tr de 10 años.....	170
5.2	Resultados de la aplicación de los criterios de arrastre de personas.....	173
5.2.1	Ciudad Río Bravo, Tamaulipas.....	173
5.2.2	Ciudad de León, Guanajuato .....	179
5.3	Comparación numérica de los resultados .....	183
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES .....		187
REFERENCIAS.....		192



## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2-1. Frecuencia en la ocurrencia de fenómenos naturales por su tipo.</i>	24
<i>Figura 2-2. Número de personas afectadas por tipo de fenómeno natural.</i>	24
<i>Figura 2-3. Cambio en la precipitación media sobre la base de las proyecciones de la media multimodal para 2081-2100 en relación con 1986-2005 bajo los escenarios RCP2,6 (A) y RCP8,5 (B).</i>	25
<i>Figura 2-4. Distribución de la población mundial, urbana y rural en 1970, 2000 y 2030 (pronóstico).</i>	26
<i>Figura 2-5 Daños directos ocurridos por un evento de inundación en A) Coapa, ciudad de México, mayo de 2017, daños en el menaje de viviendas por lluvias intensas, y B) Fresnillo, Zacatecas, septiembre de 2013, daños en automóviles por remanentes de los ciclones Ingrid y Manuel.</i>	32
<i>Figura 2-6. Daños indirectos ocurridos por un evento de inundación en A) Valle de Chalco, Estado de México, febrero de 2010, trabajos de limpieza y desinfección, y B) Iztapalapa, ciudad de México, septiembre de 2016, daños en el tránsito de la Calzada Ignacio Zaragoza. Ambos eventos, resultado de precipitaciones intensas.</i>	32
<i>Figura 2-7. Consecuencias sociales provocadas por eventos de inundación a largo plazo, ciudadanos refugiados continuamente en albergues por inundaciones en el Estado de Tabasco.</i>	33
<i>Figura 2-8. Mecanismos generadores de precipitación en México.</i>	35
<i>Figura 2-9. Número de eventos de inundación, tormentas, terremotos y sequías reportados en la base de datos del EM-DAT.</i>	43
<i>Figura 2-10. Número de personas fallecidas por inundaciones y tormentas en el mundo reportadas en los últimos cuatro periodos de 15 años.</i>	44
<i>Figura 2-11. Número de personas afectadas por inundaciones y tormentas en el mundo reportadas en los últimos cuatro periodos de 15 años.</i>	45
<i>Figura 2-12. Impacto económico en dólares de los eventos de inundación y tormentas en el mundo reportados en los últimos cuatro periodos de 15 años.</i>	46
<i>Figura 2-13. Número de eventos de inundación y tormentas por continente entre 1950 y 2016.</i>	48
<i>Figura 2-14. Numero de eventos de inundación por país entre 1986 y 2015.</i>	49
<i>Figura 2-15. Distribución de la precipitación media anual en México.</i>	50
<i>Figura 2-16. Frecuencia de A) los principales desastres naturales. Eventos de B) Inundación y C) tormenta en México para el periodo de 1950-2016, según la base de datos del EM-DAT.</i>	51

---

---

<i>Figura 2-17. Número de eventos de inundación y tormentas en México reportados en la base de datos del EM-DAT.</i>	52
<i>Figura 2-18. Número de personas fallecidas por inundaciones y tormentas en México reportadas en los últimos cuatro periodos de 15 años.</i>	53
<i>Figura 2-19. Número de personas afectadas por inundaciones y tormentas en México reportadas en los últimos cuatro periodos de 15 años.</i>	54
<i>Figura 2-20. Impacto económico en dólares de los eventos de inundación y tormenta en México reportados en los últimos cuatro periodos de 15 años.</i>	55
<i>Figura 2-21. Grado de riesgo por inundaciones a nivel municipal con la ubicación de los principales eventos de inundación y tormenta que mayor impacto han generado en México</i>	57
<i>Figura 2-22. Pruebas experimentales realizadas en A) Abt et al., 1989 y B) Karvonen et al., 2000.</i>	58
<i>Figura 2-23. Pruebas experimentales en (Russo et al., 2013) de la estabilidad de una persona simulando el cruce de una calle con presencia del flujo de agua.</i>	59
<i>Figura 2-24. Modelo del cuerpo humano considerado en (Lind et al., 2004).</i>	61
<i>Figura 2-25. A) Pruebas experimentales realizadas en una persona al cruzar una corriente de agua. B. 1) y B.2) muestran los modelos de cuerpo humano y las fuerzas consideradas en los mecanismos de inestabilidad por derribe y deslizamiento, respectivamente.</i>	61
<i>Figura 2-26. Pruebas experimentales realizadas en modelos humanos a escala.</i>	62
<i>Figura 2-27. Persona en peligro de ahogarse en Haití tras el paso del huracán Hanna.</i>	63
<i>Figura 2-28. Índices de severidad del nomograma de Dorrigo</i>	66
<i>Figura 2-29. Niveles de peligro por inundación según el criterio de la OFEE del Francia.</i>	67
<i>Figura 2-30. Niveles de peligro por inundación según el criterio de la FEMA de Estados Unidos.</i>	67
<i>Figura 3-1. Localización de la zona urbana y cuenca de aportación de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	72
<i>Figura 3-2. Distribución de los diferentes tipos de rocas en la cuenca de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	73
<i>Figura 3-3. Modelo digital de elevaciones LiDAR (5m), en la cuenca de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	74
<i>Figura 3-4. Edafología en la cuenca de la zona urbana de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	75
<i>Figura 3-5. Uso de suelo y vegetación en la zona urbana de ciudad Río Bravo, Tamaulipas.</i>	77
<i>Figura 3-6. Clima en la cuenca de la zona urbana de ciudad Río Bravo, Tamaulipas.</i>	78
<i>Figura 3-7. Temperaturas: media (verde), máxima promedio (rojo) y mínima promedio (azul) mensuales en la zona de ciudad Río Bravo, Tamaulipas.</i>	79
<i>Figura 3-8. Precipitación media anual en la cuenca de la zona urbana de ciudad Río Bravo, Tamaulipas.</i>	80
<i>Figura 3-9. Distribución temporal de la precipitación media anual en la zona de ciudad Río Bravo.</i>	80

---

<i>Figura 3-10. Hidrografía en la cuenca de la zona urbana de ciudad Río Bravo, Tamaulipas.</i>	82
<i>Figura 3-11. Fotografías de algunos de los eventos de inundación en la ciudad de río Bravo, Tamaulipas.</i>	86
<i>Figura 3-12. Distribución de la población por rangos quinquenales de edad en la ciudad de Río Bravo.</i>	87
<i>Figura 3-13. Proyección de la población en la ciudad de Río Bravo (2015-2030).</i>	88
<i>Figura 3-14. Evolución de la mancha urbana en la ciudad de Río Bravo en los últimos 30 años.</i>	90
<i>Figura 3-15. Localización de la zona urbana y cuenca de aportación de León, Guanajuato.</i>	91
<i>Figura 3-16. Distribución de los diferentes tipos de rocas en la cuenca de la ciudad de León, Guanajuato.</i>	93
<i>Figura 3-17. Modelo digital de elevaciones LiDAR (15m), en la cuenca de la ciudad de León, Guanajuato.</i>	94
<i>Figura 3-18. Edafología en la cuenca de la zona urbana de León, Guanajuato.</i>	95
<i>Figura 3-19. Uso de suelo y vegetación en la zona urbana de León, Guanajuato.</i>	97
<i>Figura 3-20. Clima en la cuenca de la zona urbana de León, Guanajuato.</i>	98
<i>Figura 3-21. Temperaturas: media (verde), máxima promedio (rojo) y mínima promedio (azul) mensuales en la zona de estudio – León, Guanajuato.</i>	99
<i>Figura 3-22. Precipitación media anual en la cuenca de la zona urbana de León, Guanajuato.</i>	100
<i>Figura 3-23. Distribución temporal de la precipitación media anual en la ciudad de León.</i>	101
<i>Figura 3-24. Hidrografía en la cuenca de la zona urbana de León, Guanajuato.</i>	102
<i>Figura 3-25. Fotografías de algunos de los eventos de inundación en León, Guanajuato.</i>	107
<i>Figura 3-26. Distribución de la población por rangos quinquenales de edad en León, Guanajuato.</i>	109
<i>Figura 3-27. Proyección de la población en la ciudad de León (2015-2030).</i>	109
<i>Figura 3-28. Evolución de la mancha urbana en León, Guanajuato.</i>	111
<i>Figura 3-29. Imágenes de la situación actual de los ríos y arroyos en León, Guanajuato. a) Arroyo Los Mariachis al poniente de la ciudad, b) Río de los Gómez al centro de la zona urbana, c) Cauce del arroyo Alfaro y d) Arroyo las liebres, al oriente de la ciudad.</i>	112
<i>Figura 4-1. Esquema de la metodología aplicada para la evaluación de los criterios de arrastre de personas por inundaciones en zonas urbanas.</i>	115
<i>Figura 4-2. A) Variables utilizadas y B) mallado utilizado en el esquema numérico del modelo Itzi.</i>	118
<i>Figura 4-3. Componentes generales de un modelo de lluvia-escurrimiento basado en raster</i>	120
<i>Figura 4-4. Estaciones climatológicas utilizadas en la generación del mapa de precipitación nacional.</i>	121
<i>Figura 4-5. Mapas de precipitación máxima diaria para una tormenta de diseño de A) Tr=2 años, B) Tr=5 años y C) Tr=10 años en todo el territorio nacional.</i>	122

<i>Figura 4-6. Tiempo de concentración para la cuenca de la zona urbana de A) ciudad río Bravo, Tamaulipas Y B) León, Guanajuato.</i>	123
<i>Figura 4-7. Regionalización del factor de convectividad R</i>	124
<i>Figura 4-8. Hietogramas de diseño para diferentes periodos de retorno y una tormenta de duración de un día, estimado a partir del mapa de precipitación nacional elaborado por el CENAPRED para la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	125
<i>Figura 4-9. Hietogramas de diseño para diferentes periodos de retorno y una tormenta de duración de un día, estimado a partir del mapa de precipitación nacional elaborado por el CENAPRED para la ciudad de León, Guanajuato.</i>	125
<i>Figura 4-10. Gastos máximos instantáneos de diseño en el río Bravo. Según los datos de la estación hidrométrica 24296 "Salidas Presa Falcón".</i>	126
<i>Figura 4-11. Hidrogramas triangulares construidos tras el análisis estadístico de los caudales medidos por la estación hidrométrica 24296 "Salidas Presa Falcón".</i>	127
<i>Figura 4-12. Texturas de suelo identificadas en A) Río Bravo, Tamaulipas y B) León, Guanajuato, de acuerdo con la basa de datos del SoilGrids1km de ISRIC.</i>	128
<i>Figura 4-13. Variación espacial de los parámetros de infiltración en la zona de estudio de Río Bravo, Tamaulipas: A) Conductividad hidráulica, B) Porosidad, C) Presión capilar.</i>	129
<i>Figura 4-14. Variación espacial de los parámetros de infiltración en la zona de estudio de León, Guanajuato: A) Conductividad hidráulica, B) Porosidad, C) Presión capilar.</i>	130
<i>Figura 4-15. Cuenca hidrológica y ubicación de estaciones hidrométricas utilizadas en la calibración y validación del modelo Itzi en el cauce del río Bravo.</i>	132
<i>Figura 4-16. Hidrograma de entrada al modelo Itzi, registrado en la estación 24318 del BANDAS.</i>	133
<i>Figura 4-17. Comparación entre los hidrogramas medido (línea azul) y calculado (línea roja) en el río Bravo. La línea negra representa la diferencia entre ambos.</i>	133
<i>Figura 4-18. Cuenca hidrológica y ubicación de estaciones climatológicas e hidrométrica utilizadas en la calibración y validación del modelo Itzi en el cauce del arroyo Los Castillos, León, Guanajuato.</i>	135
<i>Figura 4-19. Hietograma medio de entrada al modelo Itzi en la ciudad de León, Guanajuato.</i>	135
<i>Figura 4-20. Comparación entre los hidrogramas medido (línea azul) y calculado (línea roja) en el arroyo Los Castillos, Guanajuato. La línea negra representa la diferencia entre ambos.</i>	136
<i>Figura 4-21. Fuerzas que actúan sobre el cuerpo humano en un flujo de agua mostrando los mecanismos de inestabilidad para (a) deslizamiento o fricción y (b) derribe o momento.</i>	137
<i>Figura 4-22. Comparación de los umbrales de estabilidad de (Ramsbottom et al., 2006b) con datos experimentales.</i>	140
<i>Figura 4-23. Esquema de un cuerpo humano que se encuentra en una corriente de agua implementado en (Milanesi et al., 2015).</i>	152

<i>Figura 4-24. Esquemas de las fuerzas involucradas en los fenómenos y sus puntos de aplicación.</i>	157
<i>Figura 5-1. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 2 años para la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	165
<i>Figura 5-2. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 2 años para la ciudad de León, Guanajuato.</i>	166
<i>Figura 5-3. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 5 años para la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	168
<i>Figura 5-4. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 5 años para la ciudad de León, Guanajuato.</i>	169
<i>Figura 5-5. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 10 años para la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	171
<i>Figura 5-6. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 10 años para la ciudad de León, Guanajuato.</i>	172
<i>Figura 5-7. Mapas de peligro de arrastre de niños en la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas. Los mapas de la columna (A) corresponden al criterio de DEFRA, (B) al criterio de Xia, y (C) al criterio de Milanesi. Por su parte los mapas de la primera fila (1), segunda fila (2), y tercera fila (3), corresponden a los resultados de la simulación de un evento de inundación con un periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, respectivamente.</i>	176
<i>Figura 5-8. Mapas de peligro de arrastre de adultos en la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas. Los mapas de la columna (A) corresponden al criterio de DEFRA, (B) al criterio de Xia, y (C) al criterio de Milanesi. Por su parte los mapas de la primera fila (1), segunda fila (2), y tercera fila (3), corresponden a los resultados de la simulación de un evento de inundación con un periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, respectivamente.</i>	177
<i>Figura 5-9. Comparación de los mapas de peligro de arrastre de infantes para un evento de inundación de 5 años de periodo de retorno en la zona urbana de Río Bravo: 1) Criterio de DEFRA, 2) Criterio de Xia y 3) Criterio de Milanesi.</i>	178
<i>Figura 5-10. Mapas de peligro de arrastre de niños en la ciudad de León Guanajuato. Los mapas de la columna (A) corresponden al criterio de DEFRA, (B) al criterio de Xia, y (C) al criterio de Milanesi. Por su parte los mapas de la primera fila (1), segunda fila (2), y tercera fila (3), corresponden a los resultados de la simulación de un evento de inundación con un periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, respectivamente.</i>	180
<i>Figura 5-11. Mapas de peligro de arrastre de adultos en la ciudad de León, Guanajuato. Los mapas de la columna (A) corresponden al criterio de DEFRA, (B) al criterio de Xia, y (C) al criterio de Milanesi. Por su parte los mapas de la primera fila (1), segunda fila (2), y tercera fila (3), corresponden a los resultados de la simulación de un evento de inundación con un periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, respectivamente.</i>	181
<i>Figura 5-12. Comparación de los mapas de peligro de arrastre de infantes para un evento de inundación de 5 años de periodo de retorno en la zona urbana de León: 1) Criterio de DEFRA, 2) Criterio de Xia y 3) Criterio de Milanesi.</i>	182

---

- Figura 5-13. Comparación de las áreas correspondientes a los diferentes niveles de peligro identificados por cada criterio, periodo de retorno y modelos humanos considerados en el análisis de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.* \_\_\_\_\_ 184
- Figura 5-14. Comparación de las áreas correspondientes a los diferentes niveles de peligro identificados por cada criterio, periodo de retorno y modelos humanos considerados en el análisis de la ciudad de León, Guanajuato.* \_\_\_\_\_ 185

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 2-1. Diferentes aspectos de los daños ocasionados por inundaciones.</i>	34
<i>Tabla 2-2. Tipos, causas y tiempos de inundaciones.</i>	40
<i>Tabla 2-3. Eventos de inundación y tormenta que mayor impacto han generado en México.</i>	55
<i>Tabla 2-4. Comparación de los niveles de peligro propuestos en los criterios Dorrigo, FEMA y OFFE.</i>	68
<i>Tabla 2-5. Criterios de volcamiento y deslizamiento para la generación de mapas de peligro por inundación.</i>	69
<i>Tabla 3-1. Geomorfología general de la zona de estudio - Río Bravo.</i>	74
<i>Tabla 3-2. Vegetación y uso de suelo en la cuenca de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	76
<i>Tabla 3-3. Características de las estaciones climatológicas en la zona de estudio – ciudad Río Bravo, Tamaulipas.</i>	78
<i>Tabla 3-4. Inundaciones históricas en la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	83
<i>Tabla 3-5. Histórico poblacional de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.</i>	87
<i>Tabla 3-6. Geomorfología general de la zona de estudio – León.</i>	93
<i>Tabla 3-7. Vegetación y uso de suelo en la cuenca de la zona urbana de León, Guanajuato.</i>	96
<i>Tabla 3-8. Características de las estaciones climatológicas en la zona de estudio – León, Guanajuato.</i>	98
<i>Tabla 3-9. Inundaciones históricas en la ciudad de León, Guanajuato.</i>	104
<i>Tabla 3-10. Histórico poblacional de la ciudad de León, Guanajuato.</i>	108
<i>Tabla 4-1. Publicaciones del modelo hidrológico e hidrodinámico bidimensional Itzi.</i>	114
<i>Tabla 4-2. Rango de valores asignados al coeficiente de rugosidad <math>n</math> de Manning.</i>	131
<i>Tabla 4-3. Parámetros del modelo Itzi</i>	134
<i>Tabla 4-4. Parámetros calibrados de rugosidad y del modelo Itzi, para el caso de la ciudad de León.</i>	136
<i>Tabla 4-5. Factores de escombros para diferentes profundidades, velocidades y usos de suelo</i>	139
<i>Tabla 4-6. Umbrales de peligro por inundación a personas (criterio DEFRA).</i>	139
<i>Tabla 4-7. Matriz de peligro de arrastre por inundación.</i>	141
<i>Tabla 4-8. Valor de los coeficientes adimensionales <math>a_2</math> y <math>b_2</math> para los sitios en estudio.</i>	144
<i>Tabla 4-9. Valor de los coeficientes <math>\alpha</math> y <math>\beta</math> en relación con el tipo de pruebas experimentales consideradas en su determinación.</i>	148
<i>Tabla 4-10. Promedios de pesos y tallas de los principales grupos poblacionales en las zonas de estudio.</i>	149

---

<i>Tabla 4-11. Umbrales de peligro por inundación a personas (criterio de Xia).</i>	150
<i>Tabla 4-12. Umbrales de profundidad del agua en la que se puede presentar el ahogamiento en los principales grupos poblacionales de las zonas de estudio.</i>	160
<i>Tabla 4-13. Umbrales de peligro por inundación a personas (criterio de Milanesi).</i>	161
<i>Tabla 5-1. Simbología de los mapas de arrastre de personas por inundaciones.</i>	173



## RESUMEN

En los últimos años el cambio climático ha dado lugar a un aumento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos. Esto a su vez, ha provocado que las inundaciones urbanas se conviertan en uno de los fenómenos meteorológicos más comunes y que más daños produce, pues su ocurrencia a nivel global provoca inmediatamente una devastación generalizada, daños económicos, sociales, materiales, culturales, el deterioro en la salud de los afectados y, sobre todo, la pérdida invaluable de vidas humanas desde el instante en que se presentan. Es por esto por lo que, en ciudades, resulta de gran importancia la identificación anticipada de zonas de peligro para personas, de manera que, a través de la difusión de la información mediante de mapas de peligro, así como la implementación de medidas de prevención y mitigación, se llegue a disminuir el número de víctimas mortales causadas por este tipo de fenómenos.

Estudios recientes sobre este tema hacen hincapié en que la determinación del peligro por inundaciones a personas, no solo es dependiente de una combinación de factores hidrodinámicos como: el nivel del agua alcanzado por la inundación y la velocidad máxima del flujo, sino que, además, depende de otros como: las capacidades físicas y psicológicas de las personas, la presencia de residuos o escombros en el flujo, así como la variación espacial y temporal de todos estos factores en el momento en que ocurre un evento de inundación. Bajo este panorama, hay una necesidad creciente de mejorar nuestro conocimiento sobre este tipo de fenómenos, sus procesos, las herramientas de modelación numérica existentes, así como los sistemas de evaluación de riesgo; con el fin de que sean eficientes y precisos, sobre todo cuando son aplicados en zonas propensas a inundaciones.

Esta tesis muestra la evaluación de los tres principales criterios de arrastre de personas por inundaciones a saber: (1) un método derivado de pruebas empíricas o cuasi – teóricas, que es el más utilizado en la práctica; (2) una reciente y novedosa metodología que considera la derivación de umbrales de peligro para niños y adultos por separado, a partir de un análisis teórico-conceptual y calibrado de experimentos de laboratorio con modelos y/o humanos reales y; (3) un metodología muy similar a la anterior, también reciente y novedosa, pero que aborda de manera diferente el análisis físico del fenómeno y que además, incorpora los efectos de la pendiente, así como la definición de un umbral de peligro de manera conjunta para niños y adultos. Posteriormente, se desarrollará su aplicación en dos diferentes casos de estudio en México, las ciudades de Río bravo, Tamaulipas y León, Guanajuato., que son constantemente afectadas por la ocurrencia de inundaciones. Y finalmente, la identificación de las zonas donde se desarrolle un alto potencial de arrastre de personas a través de la elaboración de mapas de peligro, para cada caso.

Los resultados y conclusiones de esta tesis constituyen un primer esfuerzo por integrar en los ejercicios de análisis de inundaciones, una variable que permita determinar el grado de peligro a las personas por flujos de inundación. Lo cual, es altamente relevante, pues ante eventos de esta naturaleza la integridad de las personas debe ser la prioridad número uno dentro de la evaluación del riesgo por inundación en zonas urbanas.

*“El agua, con el agua a la cintura,  
dejaba a sus adioses nuevas piedras de olvido,  
y era como el rumor de una escultura  
que tapó con las manos sus aéreos oídos...”*

*...Y el agua crece y habla y participa.  
Sácala del torrente animador,  
tiempo que la tormenta fertiliza;  
el agua pide espacio agricultor...*

*...Empieza a llover  
en el tablado de la tempestad  
y la anchura del agua abandonada  
disminuye la nave de su seguridad...*

*...Después fueron los paisajes sumergidos  
y el sagrado maíz se pudrió.  
Y en las ciudades desalojadas,  
el reinado de las orquídeas se inició.  
Así, cuando llueve socavando sobre el Usumacinta,  
aun en la corteza de los viejos árboles  
se encoge el terror.  
El hombre abandonado que ahora lo puebla  
fulgurará otra vez poderoso entre la muerte y el amor...”*

Fragmentos de *“El canto del Usumacinta”*

Carlos Pellicer (1897-1977)

9 de mayo de 1947

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

---

“Hablar del futuro solo es útil cuando se conduce a la acción, ahora”  
E.F. Schumacher (1911-1977)

En todo el mundo, el observado incremento en la densidad de población ubicada en zonas bajas o llanuras de inundación, junto con la intensificación del ciclo hidrológico que resulta de las alteraciones en el clima, han dado pie a un incremento considerable en los costos y devastación que resultan de estos fenómenos. Ejemplos de su poder destructivo y de la propagación rápida de estos fenómenos, sea por inundaciones súbitas o por roturas de presa, han sido documentados en diversos estudios (Golding, Clark, & May, 2005; Milanese, Pilotti, & Ranzi, 2015).

De forma tradicional, científicos interesados en cuantificar estos daños, hacen uso del concepto de riesgo para representar de forma numérica las pérdidas económicas esperadas (ej. pérdida anual esperada en pesos) por la incidencia de un fenómeno de esta naturaleza. Este se define como la combinación de amenaza, vulnerabilidad y exposición. Donde la amenaza, representa la probabilidad de ocurrencia de un evento en un sitio dado, la vulnerabilidad se expresa por medio de una función del daño potencial a un bien debido a la ocurrencia de la amenaza; y finalmente la exposición cuantifica la presencia del bien.

Una fuente de información que cobra mucho mayor relevancia en la predicción de inundaciones consiste en los mapas de inundación, su importancia es clara ya que permiten planear decisiones, sistemas de alerta, evaluar daños y diseñar defensas (Rodríguez-Rincón, 2016). Sin embargo, existen heterogeneidades muy grandes entre los criterios utilizados en diversos países para su generación (Moel, Alphen, & Aerts, 2009). En general y México no es la excepción, los mapas de amenaza de inundación están asociados a varios periodos de

retorno y se producen sobre la base de una o más variables de flujo, como son la extensión de la inundación, o la representación separada de velocidades y tirantes máximos esperados (Rodríguez-Rincón, Pedrozo-Acuña, & Breña-Naranjo, 2015). A partir de esto, se produce una combinación de ambas variables (tirante y velocidad), con curvas de fragilidad o vulnerabilidad para representar los efectos potenciales del flujo sobre los bienes que se encuentran en el área de estudio. Como resultado de este procedimiento, los mapas de inundación consideran los efectos del flujo sobre los bienes expuestos, tomando en cuenta su exposición y la frecuencia del fenómeno. Esto limita la atención de la metodología a la cuantificación de las pérdidas directas proporcionando un valor económico (Thieken, Müller, Kreibich, & Merz, 2005). Si bien es cierto, que las pérdidas económicas son dominantes en los casos de inundaciones lentas y de gran extensión, típicas en cuencas muy grandes (ej. ríos Pánuco o Usumacinta), en el caso de respuestas hidrológicas más rápidas (como son las roturas de presas o los procesos de lluvias torrenciales) se agrega una variable cuya estimación no es comúnmente calculada y cuyo valor es incalculable: la vida de las personas.

El primer estudio del que se tiene referencia, abocado a la estimación de la seguridad de las personas expuestas a condiciones de flujo fue presentado por (Foster & Cox, 1973), quienes probaron la estabilidad de niños de diversas tallas y alturas en un canal de laboratorio, reportando que la estabilidad del cuerpo humano se ve afectada por un amplio rango de factores físicos, emocionales y dinámicos. Posteriormente, un sin número de análisis experimentales han sido reportados en adultos y niños (Karvonen, Hepojoki, Huhta, & Louhio, 2000; Keller & Mitsch, 1993; Russo, Gómez, & Macchione, 2013; Takahashi, Endoh, & Muro, 1992; Yee, 2003), considerando diversos criterios de estabilidad, condiciones ambientales y vestimenta. A partir de estos estudios, se desarrolló una ecuación que representa la estabilidad como una relación inversamente proporcional entre velocidad y profundidad de flujo e. g. (Cox, Shand, & Blacka, 2010). Todas estas funciones tienen una base empírica, que se fundamenta en la regresión lineal del nivel de amenaza y estabilidad de personas sin hacer distinción entre niños y adultos.

Con el propósito de mejorar este marco de trabajo, durante las últimas dos décadas se han propuesto modelos conceptuales que describen la estabilidad del cuerpo humano como una función de la velocidad y profundidad del flujo. Estos modelos, tienen su base en diferentes hipótesis que consideran la forma del cuerpo, las fuerzas involucradas y los mecanismos de falla. Fue así como (Lind, Hartford, & Assaf, 2004) al probar los diversos criterios experimentales, desarrolló una expresión que tiene su base en el producto de la velocidad y el tirante de flujo ( $U \cdot h$ ). (Walder, Watts, & Waythomas, 2006) utilizaron una metodología alternativa que consideraba la fuerza de flotación del cuerpo humano, identificando umbrales de arrastre para hombres, mujeres y niños. Por su parte, (Ishigaki, Onishi, Asai, Toda, & Shimada, 2008) utilizó el concepto de tirante máximo admisible para la evacuación de espacios subterráneos por la presencia de agua en las puertas de salida. (S. N. Jonkman & Penning-Rowse, 2008) utilizaron un maniquí para sus pruebas bajo condiciones de flujo reales, considerando profundidades pequeñas y altas velocidades de flujo, típicas de ciudades con pendientes pronunciadas en sus calles. Más recientemente, (Xia, Falconer,

Wang, & Xiao, 2014) y (Milanesi et al., 2015) realizaron por separado experimentos en un modelo del cuerpo humano, desarrollando un marco de trabajo paramétrico que considera la fuerza de flotación, la desestabilización del cuerpo por empuje y deslizamiento, utilizando para la calibración de su modelo datos experimentales de otros estudios.

La premisa fundamental de esta tesis consiste en extender el marco de trabajo que se utiliza en México para valorar el riesgo por inundación. Incorporando, además de los costos económicos, la evaluación de una variable muy importante dentro de zonas urbanas, como es el peligro de arrastre a personas por el flujo de agua dentro de la inundación cuando tiene una velocidad importante.

La estimación apropiada del riesgo por inundaciones continúa siendo un gran reto hasta nuestros días. Durante años, las estrategias mundiales para prevenir los efectos de las inundaciones se orientaron a la protección y mitigación. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que las inundaciones son casi imposibles de erradicar, por lo que las estrategias han sido reorientadas a la Gestión Integral del Riesgo, donde deben aplicarse de manera integral y continua las estrategias, políticas y medidas destinadas fundamentalmente a mejorar del bienestar, la seguridad humana, la calidad de vida, la resiliencia y el desarrollo sostenible (Mostert, E & Junier, 2009).

Los resultados obtenidos de las metodologías aplicadas en esta tesis, serán de gran utilidad para el futuro, ya que su implementación y difusión en las diferentes ciudades del país repercutirá directamente sobre la base de dos ejes principales: (1) la identificación de zonas de alto peligro a nivel de calles, lo cual repercute en la seguridad de la población, haciendo distinción de los dos principales grupos (niños y adultos), (2) coadyuvar en la planificación urbana de las ciudades de manera que se identifiquen las zonas en las que no pueden desarrollarse asentamientos humanos, como prevención a la generación de daños económicos y la pérdida de vidas humanas.

## **1.1 Objetivo**

El objetivo de esta tesis consiste en la aplicación de metodologías que permitan el mapeo e identificación del peligro de arrastre a personas, a un nivel de calle dentro de zonas urbanas de México. Para ello, se hace distinción entre dos grupos principales de población (niños y adultos), de tal manera que la información sea útil para labores de protección civil. Por otro lado, los resultados de este trabajo se pueden utilizar para la definición de los planes de gestión urbana de las ciudades.

Para ello, se emplean tres criterios de estimación de peligro a personas recientemente desarrolladas y se aplican al caso de dos ciudades dentro de la República Mexicana (Río Bravo, Tamaulipas y León, Guanajuato). Usando para ello nuevas metodologías y herramientas computacionales.

El enfoque considerado en este trabajo permitirá la identificación del peligro (bajo, medio y alto) de arrastre a personas por medio de mapas a nivel de calle, lo que redundará en la posibilidad de implementar acciones de prevención y mitigación de estos eventos. El producir un mapa de esta naturaleza nos dotará de la capacidad necesaria para disminuir el número de víctimas mortales asociadas a este tipo de fenómenos, por medio de la difusión de la información de las calles o zonas más peligrosas dentro de cada ciudad, mismos que serán de gran ayuda en la planificación de emergencias, así como en el aporte de elementos para la planeación urbana.

## **1.2 Estructura de la tesis**

La presente tesis se encuentra estructurada en el desarrollo de seis capítulos, los cuales se resumen a continuación:

### ***Capítulo 1. Introducción.***

---

El capítulo proporciona un breve resumen sobre la problemática de las inundaciones en zonas urbanas con énfasis en el análisis del arrastre de personas por el flujo del agua, así como el objetivo y el capitulo del presente trabajo de investigación.

### ***Capítulo 2. Antecedentes.***

---

El segundo capítulo menciona los conceptos básicos de las inundaciones, su clasificación, causas, efectos, el panorama global y nacional del fenómeno, así como el marco teórico necesario para su estudio aplicado al análisis del arrastre de personas. Por otra parte, se muestra el desarrollo de los criterios que determinan la estabilidad del cuerpo humano en un flujo de agua y como se ha llevado su análisis en el ámbito nacional e internacional.

### ***Capítulo 3. Zonas de estudio.***

---

En el tercer capítulo se desarrollan las características orográficas, geológicas, edafológicas, usos de suelo, vegetación, climáticas, hidrológicas y poblacionales de las zonas de estudio definidas: Río Bravo, Tamaulipas y León, Guanajuato. Ambas zonas definidas por presentar diferencias físicas importantes y por el presentar eventos de inundación frecuentes.

### ***Capítulo 4. Metodología.***

---

El cuarto capítulo se centra en la presentación de la metodología empleada para cumplir con el objetivo de este trabajo de investigación. En primer lugar, se muestra un nuevo modelo hidrológico-hidrodinámico denominado: Itzi, desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, mencionando su descripción general, forzamientos, ventajas, desventajas y el procedimiento que se llevó a cabo para su calibración y validación en los

sitios de estudio analizados. En la segunda parte, se desarrolla el marco teórico de los tres criterios de arrastre de personas por inundaciones implementados y evaluados, a saber: el criterio de DEFRA, Xia y Milanesi.

### ***Capítulo 5. Resultados y Discusión.***

---

El quinto capítulo muestra los resultados de la modelación hidrológica-hidrodinámica en ambos sitios de estudio para 2, 5 y 10 años de periodo de retorno (mapa de máximos tirantes y máximas velocidades) y, además los mapas asociados a la determinación del peligro de arrastre de personas por el flujo del agua en cada criterio, tanto para niños y adultos, así como el análisis de la comparación gráfica y numérica de los resultados.

### ***Capítulo 6. Conclusiones.***

---

Finalmente, este capítulo menciona las conclusiones y comentarios asociados a los resultados presentados en este trabajo de investigación, así como las posibles líneas de investigación hacia el futuro, con el fin de contribuir en la prevención de las víctimas mortales causadas por las inundaciones en zonas urbanas.



## **CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES**

---

Dentro de los desastres naturales, las inundaciones son consideradas como uno de los fenómenos naturales e hidrometeorológicos más frecuentes y de mayor afectación y/o devastación alrededor del mundo (Alfieri, Burek, Feyen, & Forzieri, 2015; Guha-Sapir, 2015b; Sebastiaan N Jonkman, 2005; Rusu, Gavrioloaie, & Giurgiu, 2011; Torres et al., 2013; Wright, 2016), debido a los impactos inmediatos que provocan en grandes extensiones territoriales y en sectores sociales y económicos, como son: la población, las propiedades y bienes, los cultivos, la flora y fauna, entre otros.

Sin subestimar los grandes impactos económicos causados por las inundaciones, estas constituyen especialmente un peligro potencial para la seguridad y bienestar de las personas que habitan en la cercanía de cuerpos de agua. En este sentido y destacando la importancia de las inundaciones se sabe, según los datos a nivel global reportados por el Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED, por sus siglas en inglés) en su Base de Datos de Eventos de Emergencia (EM-DAT), que dentro de los fenómenos relacionados con el clima, es decir, eventos hidrológicos, meteorológicos y climatológicos, las inundaciones por si solas representan el 43% del total de los desastres naturales ocurridos entre el periodo de 1994 y 2013, seguido por las tormentas, que representan el 28% del total (Ver figura 2-1). Por otra parte, teniendo en cuenta las afectaciones provocadas, se tiene que en el mismo periodo de 25 años el 55 % del total de personas afectadas por desastres naturales es causado solo por las inundaciones, lo que representa un total de más de 2,400 millones de personas (Guha-Sapir, 2015b) (Ver Figura 2-2). Con estas estadísticas que queda demostrada la supremacía de las inundaciones en frecuencia y afectación en comparación con otros desastres naturales.

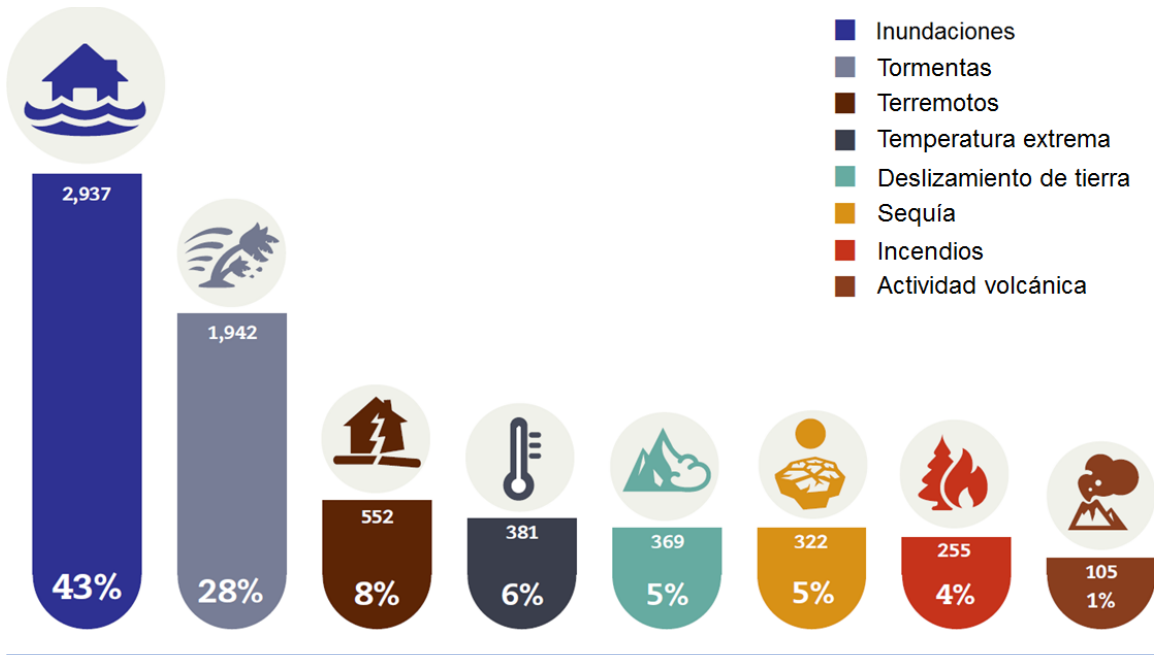


Figura 2-1. Frecuencia en la ocurrencia de fenómenos naturales por su tipo.  
Adaptado de (Guha-Sapir, 2015b).

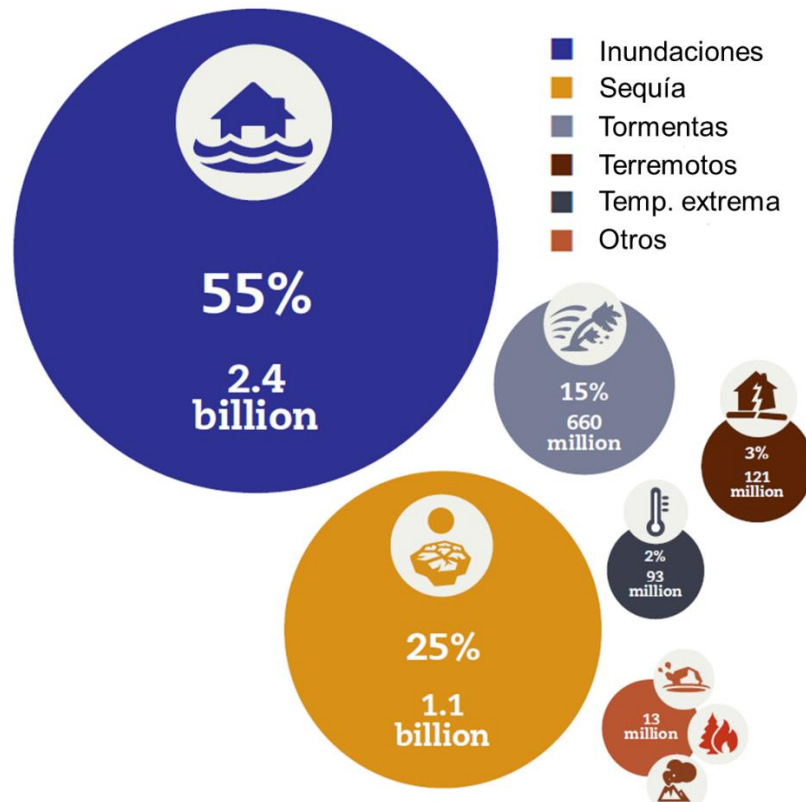


Figura 2-2. Número de personas afectadas por tipo de fenómeno natural.  
Adaptado de (Guha-Sapir, 2015b) Nota: Billion anglosajón.

Teniendo en cuenta las pérdidas económicas causadas solo por inundaciones a nivel mundial, se sabe que representan alrededor del 40% del total de las pérdidas causadas entre los diferentes desastres naturales (Xia, Guo, Falconer, & Chen, 2016). Adicionalmente los datos del EM -DAT reportan, que las inundaciones no son la causa principal de la muerte de personas por desastres naturales, ya que representan solo el 12% del total de ellas, sin embargo, estas cifras no tienen en cuenta los efectos ocasionados por las inundaciones a largo plazo, como la transmisión de enfermedades infecciosas y respiratorias, que se ven agravadas por las condiciones insalubres y de hacinamiento que se viven en los refugios temporales, como la diarrea, la fiebre tifoidea, la sarna, el cólera y la malaria.

Uno de los factores que ha detonado estas estadísticas generales es el cambio climático generado por el aumento de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero desde la era preindustrial y resultado de crecimiento económico y demográfico, han provocado impactos mundiales en el balance hídrico, en los sistemas naturales y directa e indirectamente sobre los seres humanos. En este sentido, dichas afectaciones, así como las proyecciones de los futuros cambios climáticos se encuentran documentados en (IPCC, 2014), donde se ha demostrado que sobre las superficies continentales de latitudes medias del hemisferio norte, las precipitaciones han aumentado desde el año 1901 (con un nivel de confianza medio antes de 1951, y alto después) efecto que se espera continúe intensificándose. De hecho, esta información ha sido documentada y replicada en los estudios de diversos investigadores, los cuales hacen constar la existencia de una tendencia hacia el aumento de la ocurrencia de lluvias intensas, y en consecuencia también de inundaciones, por efecto del cambio climático (Bruwier, Erpicum, Piroton, Archambeau, & Dewals, 2015; Lenderink & Meijgaard, 2008; Min, Zhang, Zwiers, & Hegerl, 2011; Rojas, Feyen, & Watkiss, 2013). Ver figura 2-3.

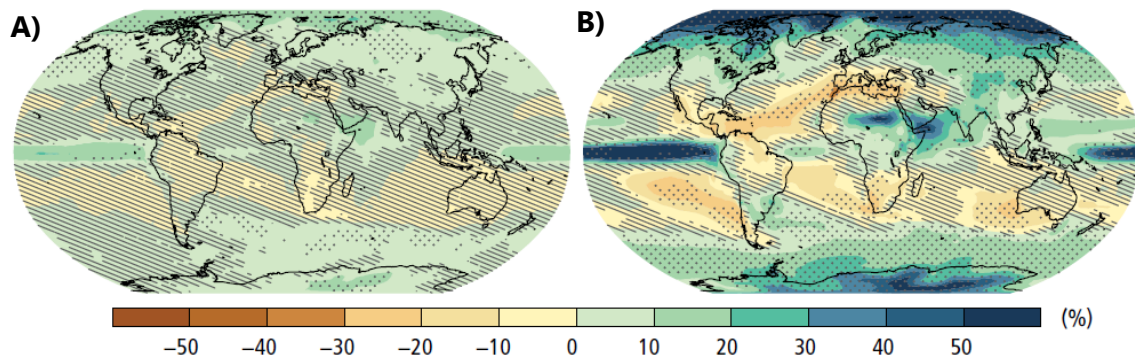
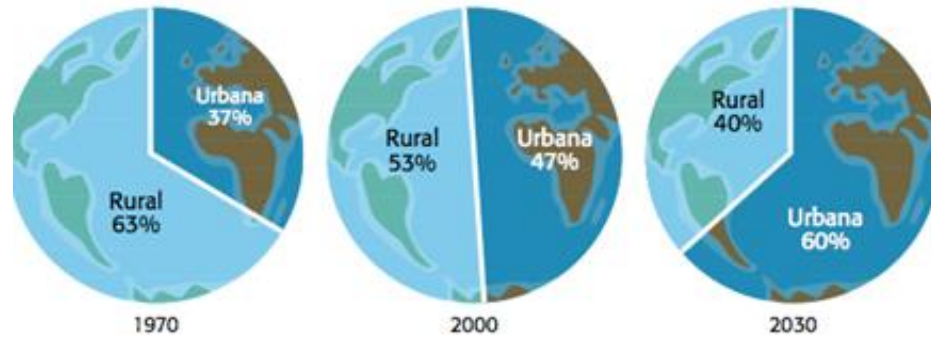


Figura 2-3. Cambio en la precipitación media sobre la base de las proyecciones de la media multimodal para 2081-2100 en relación con 1986-2005 bajo los escenarios RCP2,6 (A) y RCP8,5 (B). Fuente: (IPCC, 2014).

A pesar de que las inundaciones también ocurren en zonas rurales, es en las ciudades donde se presenta la mayor problemática, consecuencia de que en ellas se concentra un gran número de personas, bienes e infraestructura en riesgo (Aragón-Durand, 2014). Teniendo en cuenta esto, el segundo factor que detono las estadísticas antes mencionadas queda

representado por el rápido crecimiento poblacional y la expansión continua de las ciudades urbanas. En este sentido, según datos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) se espera un aumento de la población mundial de 7.43 mil millones en 2017 a 9.7 mil millones de personas en el 2050 (ONU, 2015) de las cuales, se prevé que alrededor del 60% de la población mundial vivirá en zonas urbanas hacia el año 2030 (ONU, 2014). Ver figura 2-4.



*Figura 2-4. Distribución de la población mundial, urbana y rural en 1970, 2000 y 2030 (pronóstico).  
Modificado de (UN-HABITAT, 2012).*

El aumento de la densidad poblacional en áreas propensas a inundaciones y la intensificación del ciclo hidrológico, consecuencia del cambio climático, han contribuido principalmente a que las inundaciones se conviertan en el desastre natural más devastador, frecuente y costoso en todo el mundo (Milanesi et al., 2015). Sin embargo, teniendo en cuenta lo ya expuesto en los párrafos anteriores, y si comparamos los efectos del crecimiento poblacional en ciudades con los efectos del cambio climático y las variaciones climáticas temporales, es claro que los primeros tienen una mayor relevancia como causa del incremento en la frecuencia de la mayoría de los desastres naturales. Y esto se demuestra en que hoy en día muchas más personas se encuentran expuestas en zonas de peligro de lo que hace 30 años atrás, a causa de que los asentamientos humanos se desarrollan sin alguna planificación e invadiendo zonas de peligro, como lo son: las llanuras de inundación.

La estimación apropiada del riesgo por inundaciones continúa siendo un gran reto hasta nuestros días. Durante años, las estrategias mundiales para prevenir los efectos de las inundaciones se orientaron a la protección y mitigación. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que las inundaciones son casi imposibles de erradicar, por lo que las estrategias han sido reorientadas a la Gestión Integral del Riesgo, donde deben aplicarse de manera integral y continua las estrategias, políticas y medidas destinadas fundamentalmente a mejorar del bienestar, la seguridad humana, la calidad de vida, la resiliencia y el desarrollo sostenible (Mostert, E & Junier, 2009), lo cual destaca la importancia de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

El desarrollo del segundo capítulo muestra el marco teórico de la investigación que se llevó a cabo de acuerdo con la temática de la presente tesis: "la evaluación de los criterios de

arrastre de personas por inundaciones urbanas". Para ello, este se divide en dos principales partes:

- En primer lugar, se aborda la perspectiva de las inundaciones teniendo en cuenta los conceptos básicos y la teoría sobre la que se basa su análisis y estudio, así como un panorama desde un enfoque global y nacional.
- La segunda parte, muestra el desarrollo de la determinación del peligro por inundaciones a personas, desde sus inicios sustentados en la base de numerosos experimentos realizados en laboratorio, donde se llevaban a cabo pruebas de la estabilidad del cuerpo humano en el flujo del agua; hasta la concepción de complejas metodologías basadas en la física del fenómeno, las propiedades del flujo del agua y las características propias del cuerpo humano, según la región que se trate.

## **2.1 Perspectiva de las inundaciones**

El agua como recurso natural es indispensable y tiene suma importancia al ser uno de los elementos más abundantes en todo el planeta, de tal modo que incluso todos los seres vivos estamos compuestos de ella y la necesitamos para sobrevivir.

Desde la antigüedad, el agua ha estado relacionada estrechamente con el desarrollo de las comunidades humanas, ya que no hay proceso de producción que directa o indirectamente no tenga relación con el agua (CEMDA, FEA, & PCM, 2006), y por ello, es considerada como un elemento de vida y ha sido un factor muy importante en la toma de decisiones que influyen en el crecimiento económico y el desarrollo social de una región. Asimismo, el agua es considerada como uno de los recursos más preciados en el planeta, debido a los diversos beneficios y servicios sociales, económicos y ambientales que ofrece (CONABIO, 2006; Salas & Jiménez, 2014).

A diferencia de lo mencionado anteriormente, cuando el agua se encuentra en exceso constituye un gran problema, ya que al combinarse con otros factores regionales como: el clima, la orografía, geología, el tipo de suelo, la infraestructura y la población misma, da lugar a la ocurrencia de daños significativos, consecuencia de desastres naturales como lo son las inundaciones.

### **2.1.1 Concepto, causas y efectos de las inundaciones**

#### **Conceptos**

Para la definición del peligro asociado a un evento de inundación es necesario definir al fenómeno, sus tipos, las causas que lo provocan y los efectos que produce. Lo cual, es

esencial para la definición de medidas de prevención y reducción del peligro como: la planificación del crecimiento urbano, planes de evacuación y sistemas de alerta temprana.

Bajo esta premisa, las inundaciones son consideradas como un fenómeno hidrometeorológico, siendo este definido según la Ley General de Protección Civil, en su artículo 2, fracción XXIII como:

*“Un fenómeno hidrometeorológico es un agente perturbador que se genera por la acción de agentes atmosféricos, tales como: ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad fluviales, costeras y lacustres, tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas, sequías; ondas de calor y gélidas; y tornados” (LGPC, 2017).*

Por su parte, una inundación, según el diccionario completo de Webster “es el aumento y desbordamiento de un cuerpo de agua sobre tierra normalmente seca” (Merriam-Webster, 2017). La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés) en los Estados Unidos, define a una inundación con base en el área que invade el cuerpo de agua como sigue: “una inundación es una condición general y temporal de anegación parcial o completa de dos o más acres (0.405 ha) de terreno normalmente seco o de dos o más propiedades”, es decir, producto del desbordamiento de aguas interiores (marea), la acumulación o el escurrimiento de aguas superficiales de cualquier fuente inusual y rápida o flujos de lodo, similares a una corriente de agua, que fluyen sobre terreno normalmente seco (FEMA, 2009). De acuerdo con el glosario hidrológico internacional de la Organización Meteorológica mundial (OMM) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés), la definición oficial de inundación es el desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua (OMM & UNESCO, 2012). Entendiéndose por “confines normales” como aquel espacio ocupado por el agua que no causa daños, es decir, el nivel del agua que alcanza el cauce definido y que, por tanto, no genera daños y pérdidas.

Como se observa, a pesar de la falta de definiciones más específicas para términos como “normalmente seco” o “normalmente cubierto por el agua” todas las definiciones anteriores coinciden en que una inundación es la ocupación temporal, parcial o total de zonas de la superficie terrestre por el agua, las cuales habitualmente están libres de ésta. Asimismo, concluyendo la definición de inundaciones, en este trabajo se acepta la definición realizada por el CENAPRED en su Fascículo de Inundaciones, donde además de lo ya comentado, hace mención de las causas y consecuencias que provocan las inundaciones.

*“Una inundación es aquel evento que, debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta o falla de alguna estructura hidráulica, provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración del agua en sitios donde usualmente no la hay y que provoca, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura” (Salas & Jiménez, 2014).*

## **Causas**

En el análisis del origen y la causalidad de las inundaciones, se sabe que este tipo de eventos tuvieron su origen desde el establecimiento de los seres humanos en zonas cercanas a los cuerpos de agua, con el fin de aprovecharlos como fuentes de abastecimiento para el consumo y el cultivo de cosechas. Después, y paralelamente al desarrollo de comunidades y ciudades, se desarrolló una mayor intervención humana en los ecosistemas, que fue caracterizada por la degradación del medio ambiente y la modificación de la respuesta hidrológica de las cuencas. Acciones que han traído consigo inherentemente problemas de inundaciones. Bajo este contexto, el origen de los problemas ocasionados por inundaciones radica en la falta de planeación en la acción humana, lo que ha provocado alteraciones en el entorno y con ello, el establecimiento frecuente de condiciones que dan lugar a la ocurrencia de inundaciones cada vez más severas (Arganis Juárez, Dominguez Mora, Jiménez Espinosa, & Guichard Romero, 2010; Salas & Jiménez, 2014).

Si bien, en lo mencionado anteriormente se destacan a las acciones humanas como único origen de los eventos de inundación, las cuales para efectos del presente trabajo pueden ser clasificadas como causas de origen antropogénico, también deben considerarse aquellas causas que son resultado de una combinación de fenómenos meteorológicos e hidrológicos extremos los cuales, aun sin la intervención del hombre, se han presentado de manera natural en el planeta desde su conformación, estos pueden ser identificados como causas de origen natural. Adicionalmente, también debe tomarse en cuenta que los efectos ocasionado por una inundación también dependerán del grado de exposición (de las personas o bienes), así como de la vulnerabilidad de la población expuesta. Teniendo en cuenta esto, múltiples causas pueden llegar a presentarse de manera conjunta y contribuir en la ocurrencia de un evento de inundación dado.

Entre las causas de origen natural se pueden mencionar:

- Ocurrencia de lluvias intensas de larga duración.
- Desarrollo de ciclones tropicales.
- Mareas de tormenta.
- Concentración y acumulación de escurrimientos en zonas planas o de baja permeabilidad.

- Modificación de los ecosistemas (deforestación e incendios forestales que ocurren de manera natural, erosión, etc.).

Teniendo en cuenta las causas de origen antropogénico se tienen:

- Crecimiento demográfico no planificado.
- Falta de mecanismos de protección contra inundaciones.
- Invasión de llanuras de inundación.
- Ruptura de una estructura hidráulica de contención o regulación (presas, muros, bordes, terraplenes, diques, etc.).
- Incapacidad de los sistemas de drenaje actuales y su escaso mantenimiento.
- Acción negligente de las personas (deforestación, erosión, disposición de residuos en lugares no destinados a tal fin, etc.).

Finalmente, la determinación de una causa concreta es compleja: nosotros mismos cambiamos y hacemos cambiar nuestro entorno, han variado los fenómenos hidrometeorológicos extremos siendo cada vez más frecuentes e intensos y nuestra percepción de la forma en que nos preparamos y evitamos los efectos de un evento de inundación no ha cambiado, ya que seguimos en una lucha constante basada en la construcción de infraestructura de protección.

## **Efectos**

A lo largo de la historia, las inundaciones han sido generalmente vistas como un problema que trae en su mayoría consecuencias negativas en los sitios en los que se presenta. La acción de la fuerza del agua, generada por un evento de inundación, puede llegar a tener consecuencias devastadoras, pues ocasiona a su paso la modificación instantánea del entorno, numerosos daños materiales, así como la pérdida de vidas humanas, flora y fauna. A continuación, se mencionan algunos de las afectaciones más importantes que se presentan cotidianamente en una inundación:

- Daño físico o pérdida invaluable de vidas humanas.
- Arrastre de sedimentos y residuos sólidos de las zonas más elevadas de la cuenca.
- Deterioro y destrucción de bienes materiales (menaje).
- Daños estructurales en edificaciones.
- Interrupciones en vías de comunicación.
- Interrupción de servicios (eléctrico, telefónico, de agua potable y drenaje).
- Pérdida de flora y fauna.
- Destrucción de cultivos.
- Disminución de la capacidad productiva y adquisitiva.
- Propagación de enfermedades transmitidas por vectores e infecciosas (como la diarrea, la fiebre tifoidea, la sarna, el cólera y la malaria).



A pesar de que los efectos de las inundaciones puedan parecer negativos en todos los sentidos, En (Folch I. Guillen, 1993; Maza Álvarez & Franco, 1997) se describen los beneficios de la ocurrencia regular de este tipo de fenómenos, por ejemplo:

- El humedecimiento y fertilización del suelo en áreas inundadas debido al transporte de grandes cantidades de materia orgánica, limos y arcillas.
- Recarga de acuíferos, dependiendo de la permeabilidad y de la pendiente propia de la región que se trate.
- Dispersión de contaminantes.
- Contribución a la supervivencia y extensión de flora y fauna que utiliza el agua almacenada para consumo.

### **Impacto de las inundaciones en zonas urbanas**

Cuando una inundación ocurre en zonas urbanas se generan diversos daños materiales y a la población misma. Siendo uno de los objetivos principales de esta tesis la identificación de las afectaciones causadas a las personas por inundaciones urbanas. Algunos autores como (Haraguchi & Lall, 2015; S. N. Jonkman, Bočkarjova, Kok, & Bernardini, 2008; König, Sægrov, & Schilling, 2002) coinciden en la implementación de una clasificación en tres tipos de daños que permite realizar un registro completo de los mismos, a saber: daños directos, indirectos y consecuencias sociales.

- **Daños directos:**

La característica de este tipo de daños es que ocurren únicamente dentro de las zonas inundadas e incluyen todos los daños materiales que han sido causados por el agua o el flujo de esta y sus características: profundidad y velocidad. Por ejemplo, daños en: personas, edificaciones, menaje, vías terrestres, vehículos, deslizamiento de laderas o daños en la infraestructura urbana de servicios como: la electricidad, la telefonía, el abastecimiento de agua, los gaseoductos, y el sistema de drenaje, etc. Ver figura (2-5).

Estos daños pueden ser reparados o reemplazados en su totalidad, con excepción de aquellos que sean invaluable como la pérdida de vidas humanas de flora y fauna o valores únicos como pinturas u objetos culturales.

- **Daños Indirectos:**

La característica de este segundo tipo de daños es que la población afectada por ellos no necesariamente es dañada por el evento de inundación como tal, y que los daños provocados generalmente no ocurren simultáneamente al evento, es decir, esta segunda categoría incluye los daños consecutivos y efectos secundarios ocasionados por la inundación. Estos pueden ocurrir por fuera de las áreas

inundadas durante la inundación y posteriormente dentro de las mismas a consecuencia de las afectaciones causadas por el evento.

Como ejemplo de los daños indirectos se puede mencionar: el desvío del tránsito causado por áreas anegadas intransitables, lo que conduce a viajes largos, una menor eficiencia y el aumento de tránsito y contaminación en otras zonas. Las pérdidas de producción industrial y comercial en la región. Todos los trabajos de limpieza y desinfección que no se encuentren ligados a los daños directos. Y finalmente, todos los costos administrativos relacionados con la gestión de la inundación, las actividades para el restablecimiento y compensación de los daños. Ver Figura 2-6.



*Figura 2-5 Daños directos ocurridos por un evento de inundación en A) Coapa, ciudad de México, mayo de 2017, daños en el menaje de viviendas por lluvias intensas, y B) Fresnillo, Zacatecas, septiembre de 2013, daños en automóviles por remanentes de los ciclones Ingrid y Manuel. Fuentes: A) (Durán, 2017), B) (Mejía, 2013).*



*Figura 2-6. Daños indirectos ocurridos por un evento de inundación en A) Valle de Chalco, Estado de México, febrero de 2010, trabajos de limpieza y desinfección, y B) Iztapalapa, ciudad de México, septiembre de 2016, daños en el tránsito de la Calzada Ignacio Zaragoza. Ambos eventos, resultado de precipitaciones intensas. Fuentes: A) (Vilchis Gil de Arévalo, 2010), B) (Economía Hoy, 2016).*

- **Consecuencias sociales:**

Investigaciones han demostrado que la recurrencia de eventos de inundación tiene graves efectos a largo plazo sobre el bienestar, la salud y los medios de subsistencia, particularmente en las regiones más pobres dependientes de la agricultura (Guha-Sapir, 2015b).

Las consecuencias sociales pueden definirse como todas aquellas afectaciones negativas, generalmente a largo plazo, que son ocasionadas por la frecuencia e intensidad de los eventos de inundación en una región determinada. Tales consecuencias tienden a ser de tipo psicológico y regularmente se combinan con otros aspectos, por lo que son difíciles de identificar explícitamente. Sin embargo, su importancia es crucial particularmente en zonas donde ocurren frecuentemente estos eventos, ya que el desarrollo económico puede verse disminuido y el bienestar social afectado, al reducirse la calidad de vida de las personas que habitan estos lugares Ver figura 2-7.

Mientras que el primer tipo de la clasificación (daños directos) es fácil de entender y, hasta cierto punto, de evaluar debido a las dificultades inherentes de valoración de los bienes materiales; el segundo y tercer tipo identificado (daños indirectos y consecuencias sociales) son más difíciles de estimar y aún más complejos de evaluar (König et al., 2002).

En (S. N. Jonkman et al., 2008) adicionalmente se hace una distinción para los daños característicos de inundaciones urbanas en tangibles e intangibles, los primeros son aquellos que pueden ser valuados en términos monetarios, mientras que los segundos no, debido que para ellos no existe un valor de mercado. La tabla 2-1 muestra una clasificación general que incluye ambas distinciones, así como ejemplos que ayudan en su comprensión.



---

*Figura 2-7. Consecuencias sociales provocadas por eventos de inundación a largo plazo, ciudadanos refugiados continuamente en albergues por inundaciones en el Estado de Tabasco.*

*Fuente: (Alonso, 2007)*

---

Tabla 2-1. Diferentes aspectos de los daños ocasionados por inundaciones.

Fuente: (S. N. Jonkman et al., 2008).

	Tangibles y con valor	Intangibles y sin valor
<b>Daños directos en:</b>	Residencias	Muertes
	Bienes de capital e inventarios	Lesiones
	Interrupción de negocios (dentro del área inundada)	Molestias y daños morales
	Vehículos	Utilidades y comunicación
	Terrenos y propiedades agrícola	Pérdidas históricas y culturales
	Carreteras, servicios públicos e infraestructura de comunicaciones en general	Pérdidas ambientales
	Operaciones de evacuación y rescate	
	Reconstrucción de las defesas contra inundaciones	
	Costos de limpieza	
<b>Daños indirectos en:</b>	Empresas localizadas en la zona inundada	Disturbios sociales
	Ajustes en los patrones de producción y consumo	Traumas psicológicos
	Alojamiento temporal de evacuados	Baja credibilidad de las autoridades publicas

## 2.1.2 Clasificación de las inundaciones

Las clasificación y descripción de las inundaciones variada y se basa en una compleja interacción de fuentes, causas e impactos. Teniendo en cuenta esto, muchas clasificaciones han sido realizadas con respecto a estas combinaciones. Con respecto a su origen, las inundaciones pueden ser clasificadas como: pluviales, fluviales, costeras y por fallas en sistemas estructurales (Arganis Juárez et al., 2010; Escuder Bueno, Morales Torres, Castillo Rodríguez, & Perales Momparler, 2010; Jha, Bloch, & Lamond, 2012; Salas & Jiménez, 2014), como sigue:

### Inundaciones pluviales

Las inundaciones pluviales, como su nombre lo indica, son consecuencia de la precipitación y ocurren cuando el suelo es saturado a causa de esta en el lugar donde se presenta, lo cual genera que el agua de lluvia excedente comience a acumularse, pudiendo

permanecer por un tiempo de horas o días. La principal característica de este tipo de inundaciones es que el agua de la inundación corresponde a la precipitada en el lugar y que no proviene de otras partes.

En el caso de las zonas urbanas, este tipo de inundación es muy frecuente debido a la poca permeabilidad del suelo característico de las ciudades, lo que provoca que el agua de lluvia no pueda infiltrarse rápidamente, teniendo efectos peligrosos particularmente en aquellas que cuenten con un sistema de drenaje ineficaz o que ha sido mal dimensionado.

Nuestro país es regularmente afectado por este tipo de inundaciones debido a que la lluvia es originada a partir de diversos mecanismos generadores de precipitación, donde se destacan los siguientes:



### Ciclones tropicales

Los ciclones tropicales son sistemas de baja presión atmosférica formados en los trópicos, que ocurren entre los meses de mayo y noviembre y se caracterizan por ser generadores de intensas precipitaciones, vientos de altas velocidades, fuerte oleaje y mareas de tormenta.



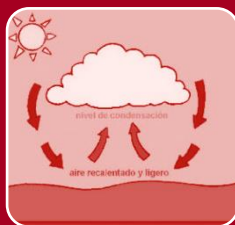
### Lluvias orográficas

Son precipitaciones originadas por corrientes de aire húmedo provenientes de océano que chocan con la orografía montañosa, provocando lluvias del lado del barlovento.



### Lluvias invernales

Son provocadas por el desplazamiento de masas de aire frío procedentes de latitudes menores, las cuales al encontrarse con temperaturas mayores generan lluvias intensas. En México, estas lluvias se presentan en la zona norte del país, la vertiente del Golfo y la Península de Yucatán.



### Lluvias convectivas

Son precipitaciones locales que se originan debido al calentamiento de la superficie terrestre provocado por la radiación solar, con lo cual que el aire que se encuentra en contacto con ella llega a calentarse más que en sus alrededores ocasionando corrientes ascendentes de aire caliente húmedo.

*Figura 2-8. Mecanismos generadores de precipitación en México.  
Fuente: Elaboración propia.*

### **Inundaciones fluviales**

Este tipo de inundaciones ocurren cuando el caudal conducido por un canal natural (río) o artificial excede su capacidad, provocando su desbordamiento sobre la superficie de terreno cercano a ellos, comúnmente llamadas "llanuras de inundación". A diferencia de las anteriores, la principal característica de este tipo de inundación es que el agua que se desborda corresponde a la precipitación de cuencas tributarias o por el desvío de otras cuencas y no necesariamente de la precipitación en la zona afectada.

Si bien, la causa de desbordamiento de los ríos y canales artificiales se puede atribuir a un excedente de flujo de agua, pueden existir otros factores físicos, como las características hidráulicas del río o del canal artificial y su capacidad para conducir el agua; factores naturales, como la ocurrencia de deslizamientos de tierra, la cantidad y el momento de la lluvia; así como de factores humanos, como la presencia de residuos sólidos y escombros que obstruyan el paso del agua, provocando que este tipo de inundación se presente aguas arriba de la obstrucción.

La peligrosidad de las inundaciones fluviales sobre una zona urbana se verá incrementada a medida que aumente el área de aportación de la cuenca, si la ciudad se localiza en la porción final de un río, y de igual forma, si las llanuras de inundación se encuentran invadidas por establecimientos humanos.

### **Inundaciones costeras**

Las inundaciones costeras surgen de la invasión del océano o del agua de mar en grandes extensiones territoriales a consecuencia de un inesperado aumento del nivel medio del mar, el cual es causado generalmente mediante dos mecanismos principalmente:

*Marea de tormenta:* generada por la acción de un ciclón tropical y la combinación de dos de sus efectos. En primer lugar, fuertes vientos que provocan el desplazamiento y apilamiento de masas de agua en sus alrededores y; en segundo lugar, la succión generada por la baja presión dentro de la tormenta que crea una cúpula de agua. A medida que el ciclón tropical se acerca a la costa, de sus efectos el aumento del nivel de suelo marino hace que la cúpula de agua formada sea forzada hacia la tierra creando una ola y generando este tipo de inundación. Este fenómeno suele hacer que el nivel medio de mar aumente durante un periodo de tiempo relativamente corto (4 a 8 horas), aunque este tiempo y la peligrosidad del fenómeno puede resultar mucho mayor en el caso de que las condiciones topográficas impidan el desalojo del agua de forma natural.

*Tsunami o maremoto:* generado por actividad sísmica, los tsunamis son menos frecuentes que las mareas de tormenta, sin embargo, cuando se presentan resultan ser aún más peligrosos y destructivos. Ejemplo de esto fue el tsunami del Océano Índico de diciembre del 2004, causado por uno de los terremotos más fuertes jamás registrados, que resultó en

la afectación de las costas alrededor del epicentro, afectaciones en catorce países y la pérdida de cientos de miles de personas (Jha et al., 2012).

Finalmente, la peligrosidad de este tipo de inundaciones en zonas urbanas dependerá de la cercanía de estas a la costa, así como de las medidas de protección estructurales con las que se cuente para contener la acción del oleaje.

### **Inundaciones por fallas en estructuras hidráulicas**

Las estructuras hidráulicas creadas por el hombre que almacenan agua tienen probabilidad de fallar, cuando esto ocurre, el agua contenida por ellas es expulsada generando este tipo de inundación. Una inundación generada por el fallo de una estructura hidráulica, aunque poco frecuente, puede llegar a generar mayores afectaciones de las que se obtendrían si no existiera.

Por otra parte, este tipo de inundaciones no solo es característica de sitios considerados en riesgo por inundación, sino que pueden ocurrir en cualquier sitio que cuente con alguna infraestructura hidráulica importante, particularmente en aquellas zonas urbanas que se encuentren en zonas de baja elevación o detrás de las defensas de una obra de ingeniería.

Una de las características más importantes de este tipo de inundación es que se desarrolla de manera rápida, debido a que el fallo de una estructura hidráulica generalmente conduce a la expulsión de un gran volumen de agua a una alta presión y velocidad.

Las causas de este tipo de inundaciones pueden deberse al diseño escaso, la mala operación, la falta de mantenimiento o el término de la vida útil de las siguientes infraestructuras hidráulicas:

- Una presa.
- Terraplenes de contención o diques.
- Grandes tuberías de agua a presión.
- Sistemas de bombeo.
- Defensas estructurales contra inundaciones.

De acuerdo con el tiempo de respuesta hidrológica de la cuenca, las inundaciones pueden clasificarse en lentas y rápidas (Arganis Juárez et al., 2010; Jha et al., 2012; Pacheco Contreras, 2009; Rodríguez Vázquez, 2013; Salas & Jiménez, 2014). La respuesta hidrológica de una cuenca depende de las características fisiográficas de ella e inciden en la velocidad del flujo del agua provocando que el desarrollo de un evento de inundación sea rápido o lento.

### **Inundaciones lentas**

Como su nombre lo indica, este tipo de inundaciones se desarrollan en cuencas cuya respuesta hidrológica es lenta, siendo del orden de varias horas a días, generalmente se presentan en extensas zonas de baja elevación y escasa pendiente, donde las características antes mencionadas provocan la acumulación de grandes volúmenes de agua que no puede ser fácilmente desalojado provocando la inundación. Otra de las causas que generan inundaciones lentas es la presencia de cubierta vegetal en el suelo de la cuenca, dado que esta influye directamente en la infiltración y retención del agua modificando su movimiento.

En zonas urbanas, dado que el tiempo de permanencia de la inundación es grande, las afectaciones no son causantes de la pérdida de vidas humanas, salvo por posibles situaciones de infraestructura alterada, como es la falta de tapas de alcantarillas, pero sí de cuantiosos daños materiales. Un ejemplo de ello constituyó la gran inundación de Villahermosa, Tabasco en el año 2007.

Para los fines de este trabajo de investigación las inundaciones lentas y las ciudades donde se presentan este tipo de inundaciones no tienen importancia relevante.

### **Inundaciones rápidas**

También denominadas inundaciones súbitas (*flash floods*). La administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés) define a una inundación rápida como aquella en la que el gasto pico ocasionado por la tormenta aparece seis horas después del inicio de una lluvia torrencial (Jha et al., 2012).

Este tipo de inundaciones se desarrolla en cuencas cuya respuesta hidrológica es rápida, siendo del orden de minutos a un par de horas, generalmente se generan a causa de tormentas convectivas locales de gran intensidad, así como por la liberación repentina del agua contenida en el embalse de una presa, la ocurrencia de un deslizamiento de tierra o el deshielo de montañas aguas arriba de una cuenca, lo que origina que se desarrollen grandes avenidas en poco tiempo con la ocurrencia de cuantiosos daños a su paso. A estas corrientes también se les conoce como avenidas súbitas.

Las inundaciones rápidas generalmente ocurren en zonas cercanas al curso de ríos pequeños, sin embargo, pueden llegar a ser muy peligrosas debido a que ocurren repentinamente y son difíciles e imposibles de predecir tomando a la gente de un determinado lugar desprevenida y sin posibilidad de actuar para mitigar sus efectos. Por lo general, este tipo de inundaciones afecta áreas más pequeñas en comparación con las inundaciones lentas, empero, la forma repentina en la que puede llegar a formarse una gran avenida, aun sin la presencia de precipitación en el lugar, puede llegar a causar graves daños materiales, y aún más importante, la pérdida de numerosas vidas humanas.



Debido a lo anterior, las zonas urbanas son especialmente susceptibles a este tipo de inundación, ya que un alto porcentaje del suelo contenido en ellas está compuesto de calles y techos impermeables, lo que provoca que algunas veces el escurrimiento del agua se presente rápidamente a gran velocidad y con un alto contenido de escombros que incluyen: rocas, árboles y hasta automóviles; con lo cual la vida e integridad de las personas del lugar puede verse severamente afectada. Por lo que, para el logro del objetivo de este trabajo de investigación es necesario contar con ciudades que sirvan de ejemplo en las que se presenten eventos de este tipo, con la finalidad de identificar con anticipación aquellas zonas peligrosas para la población.

Finalmente, como se destaca cada uno de los tipos de inundaciones que fueron descritos en los párrafos anteriores, cada tipo de inundación puede llegar a tener consecuencias devastadoras particularmente en zonas urbanas y, por tanto, también pueden ser clasificadas como inundaciones urbanas, las cuales se describen a continuación.

### **Inundaciones urbanas**

Las inundaciones urbanas se han convertido en años recientes en un tema cada vez más preocupante tanto para países desarrollados como para aquellos en desarrollo, debido al aumento en la recurrencia de eventos de esta naturaleza, así como los daños materiales y la pérdida de vidas humanas.

Aunque las causas e impactos de este tipo de fenómenos ya han sido mencionados en el subcapítulo anterior, haciendo la distinción entre factores naturales y antropogénicos, cabe destacar en esta sección el mecanismo mediante el cual este tipo de inundaciones se desarrollan dentro de las zonas urbanas. Si bien, toda la precipitación y otros flujos son transportados superficialmente hacia los sistemas de drenaje que suelen ser artificiales y restringidos por las descargas sanitarias propias de la ciudad, cuando llegan a presentarse precipitaciones de alta intensidad pueden llegar a causar inundaciones cuando los sistemas de drenaje no tienen la capacidad necesaria para conducir esos flujos e incluso el agua que entra por una alcantarilla específica puede volver a salir en otras, haciendo aún más complicado el proceso de modelación de este tipo de eventos en zonas urbanas.

La tabla 2-2 muestra un resumen de causas, el tiempo y la duración de los diferentes tipos de inundaciones considerados en este trabajo de investigación.

La descripción de los diferentes tipos de inundaciones, descritos en los párrafos anteriores, destaca su importancia en la identificación de aquellas inundaciones que son más comunes o destructivas en las zonas de estudio propuestas en este trabajo de investigación, lo cual constituye uno de los primeros pasos a seguir antes de llevar a cabo la evaluación del peligro por inundaciones.

Tabla 2-2. Tipos, causas y tiempos de inundaciones.

Tipos de inundaciones	Causas naturales	Causas antropogénicas	Tiempo de inicio	Duración
<b>Por su origen</b>				
<b>Inundación pluvial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tormentas tropicales.</li> <li>- Tormentas orográficas.</li> <li>- Tormentas invernales.</li> <li>- Tormentas convectivas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambios en el uso de suelo.</li> <li>- Urbanización</li> <li>- Aumento del escurrimiento superficial natural</li> </ul>	Varía	Varía según las condiciones aguas arriba
<b>Inundación fluvial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Precipitación en cuencas tributarias.</li> <li>- Deslizamientos de tierra.</li> <li>- Derretimiento de nieve.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Residuos sólidos y escombros en el flujo de agua.</li> <li>- Invasión de llanuras de inundación.</li> <li>- Desviación de cauces a otras cuencas.</li> </ul>	Varía	Varía según las condiciones del río o canal artificial.
<b>Inundación costera</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tormentas tropicales.</li> <li>- Terremotos.</li> <li>- Erupciones volcánicas submarinas.</li> <li>- Hundimiento</li> <li>- Erosión costera</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Urbanización en zonas costeras.</li> <li>- Destrucción de la flora natural costera (manglares).</li> </ul>	Varía, pero usualmente rápido	Varía, pero por lo general son de corto tiempo.
<b>Inundación por falla en estructuras hidráulicas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sismos.</li> <li>- Erupciones volcánicas.</li> <li>- Eventos de precipitación extremos, según se trate.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falta de mantenimiento.</li> <li>- Mala operación.</li> <li>- Diseño escaso.</li> </ul>	Rápido	Varía según las condiciones de la cuenca.

<b>Por el tiempo de respuesta de la cuenca</b>				
<b>Inundación rápida</b>	Puede ser causado por eventos pluviales, fluviales costeros o tormentas convectivas intensas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Falla de una estructura hidráulica de retención de agua.</li> <li>- Infraestructura de drenaje inadecuada.</li> </ul>	Rápido	Usualmente corto, solo unas horas
<b>Inundación lenta</b>	Puede ser causado por eventos pluviales, fluviales costeros o por el fallo de una estructura hidráulica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Infraestructura de drenaje inadecuada.</li> <li>- Modificación de los usos de suelo, urbanización.</li> </ul>	Varía, aunque usualmente lento.	Usualmente lento, hasta de varios días.
<b>Inundación urbana</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inundación pluvial.</li> <li>- Inundación fluvial.</li> <li>- Inundación costera.</li> <li>- Inundación por falla de estructuras hidráulicas.</li> <li>- Inundación rápida.</li> <li>- Inundación lenta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Saturación de la capacidad de drenaje y falta de mantenimiento.</li> <li>- Falta de permeabilidad debido a urbanización.</li> <li>- Invasión de llanuras de inundación.</li> </ul>	Varía según la causa	Desde pocas horas a días

Fuente: Adaptado de (Jha et al., 2012)

### 2.1.3 Panorama global de las inundaciones

Los eventos de inundación se han presentado en la Tierra incluso antes de la presencia de hombre en ella. El establecimiento de las primeras comunidades y su posterior desarrollo en civilizaciones y grandes ciudades fue gracias a que estas siempre buscaron ubicarse en la cercanía de ríos y cuerpos de agua, los cuales fueron empleados como medios de transporte, fuentes de abastecimiento de agua y para la satisfacción de las necesidades básicas de la población. Sin embargo, también han tenido que sufrir las consecuencias de la falta de agua a consecuencia de eventos de sequía o de escases provocada por su mala administración y además en el extremo opuesto, como se analiza en este subcapítulo, de las consecuencias de eventos de inundación generados por la presencia de agua en exceso.

Como se describió en la introducción de este capítulo, a nivel mundial la frecuencia e impacto de los eventos de inundación está aumentando más rápidamente que cualquier otro

desastre natural (Alfieri et al., 2015; EM-DAT, 2017; Guha-Sapir, 2015b; Sebastiaan N Jonkman, 2005; Rusu et al., 2011; Torres et al., 2013; Wright, 2016).

Con el fin de proveer de datos objetivos de la evaluación de la vulnerabilidad por desastres naturales en el mundo y mejorar la toma de decisiones a favor de mitigar los efectos ocasionados por ellos, el Centro de Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED, por sus siglas en inglés) desde el año 1988 y hasta la fecha, ha construido una Base de Datos de Eventos de Emergencia (EM-DAT); es decir, eventos de emergencia ocasionados por desastres naturales a nivel internacional. Para que un desastre natural sea considerado como tal, dentro de la base del EM-DAT, un evento debe de cumplir al menos uno de los siguientes criterios:

- 10 o más personas reportadas fallecidas.
- 100 o más personas reportadas afectadas.
- Declaración de estado de emergencia.
- Llamada de asistencia internacional.

Los datos del EM-DAT muestran que entre el periodo de 1988 y 2016 fueron registrados 12,653 desastres naturales (geofísicos, climatológicos, hidrológicos y meteorológicos) en todo el mundo (EM-DAT, 2017), los cuales provocaron la pérdida de más de 1.35 millones de vidas, con un promedio de 68,000 de decesos cada año y un estimado de 218 millones de personas afectadas por este tipo de desastres naturales en promedio cada año (Guha-Sapir, 2015b).

Los fenómenos hidrológicos, meteorológicos y climatológicos constituyen la absoluta mayoría de los desastres naturales registrados en la base de datos del EM-DAT, representando el 91% del total global. De entre ellos, cabe destacar a los fenómenos hidrometeorológicos (principalmente inundaciones y tormentas) que representan el 71% de la ocurrencia de desastres naturales y en particular los eventos de inundación, que por sí solos constituyen el 43 % de los desastres naturales registrados en dicha base. De hecho, realizando un análisis de la ocurrencia de eventos de inundación y uno de sus más importantes generadores, las tormentas, ambos han reportado un aumento significativo en su ocurrencia alrededor del mundo, en comparación de otros que tienen relevancia como las sequías y los terremotos.

La figura 2-9 muestra la comparación entre la ocurrencia de los más importantes desastres naturales (inundaciones, tormentas, sequías y terremotos) y además es posible observar el aumento sostenido de la ocurrencia de inundaciones y tormentas. Si bien desde el año 2000 el EM-DAT ha registrado en promedio 137 desastres por año relacionados con dichos fenómenos, esta cifra se encuentra un 40% arriba de la media reportada en el periodo de 1990 a 2000 (85 desastres) y por arriba del doble de la media reportada en la década de 1980's (52 desastres). Con lo cual se explica el por qué se ha generado gran preocupación entre los gobiernos de diversos países alrededor del mundo.

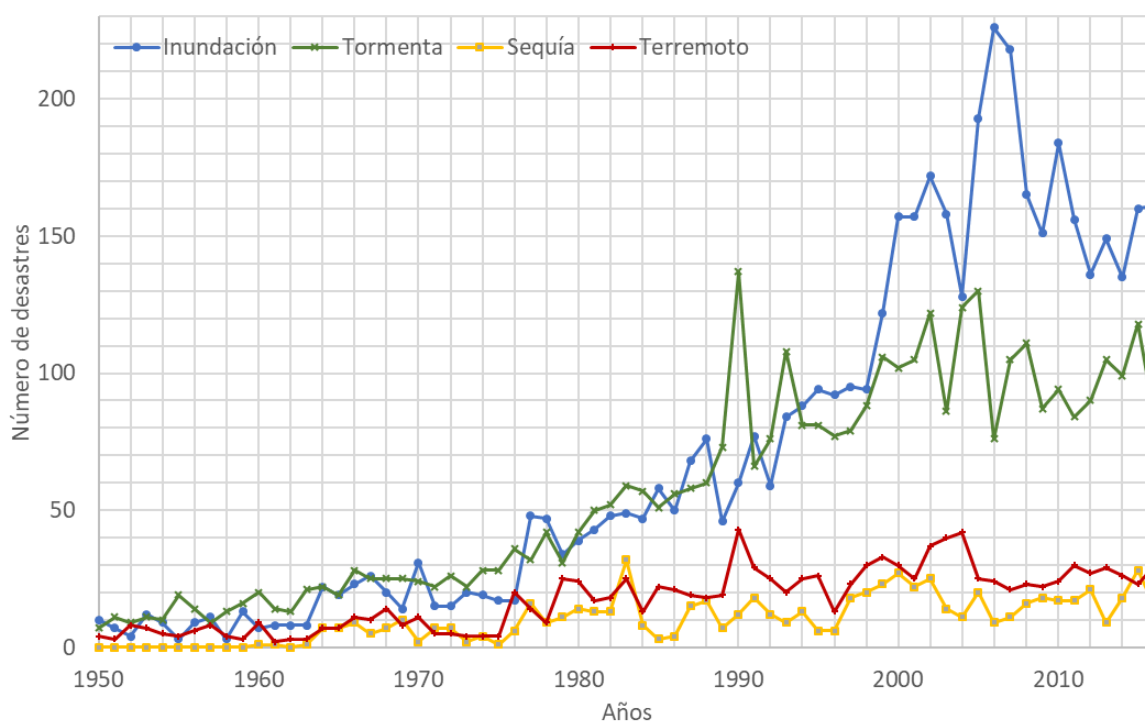


Figura 2-9. Número de eventos de inundación, tormentas, terremotos y sequías reportados en la base de datos del EM-DAT.

Fuente: Elaboración propia con datos del (EM-DAT, 2017).

Las inundaciones y las tormentas<sup>1</sup> resultaron ser aún menos mortales a diferencia de otros desastres naturales, debido a que se reportó un promedio anual de 5,509 muertes entre los años 2000 y 2016 en comparación con los 42,046 fallecimientos de personas en promedio anual provocados por terremotos.

La figura 2-10 muestra la tendencia de las muertes ocasionadas por eventos de inundación y tormentas reportados en el mundo de los últimos cuatro periodos de 15 años, en donde es posible apreciar una disminución considerable en la pérdida de vidas humanas a pesar del rápido crecimiento poblacional. Sin embargo, la naturaleza de las inundaciones ha cambiado en los últimos años, a consecuencia de la urbanización, el cambio climático y la combinación de otros factores que han propiciado el aumento en la ocurrencia de inundaciones rápidas en zonas urbanas y, como resultado, el aumento en el peligro de las personas que las habitan.

<sup>1</sup> En adelante para el análisis del número de víctimas mortales, el número de personas afectadas y la cuantificación de los impactos económicos de las inundaciones, se hará la inclusión de los eventos de tormenta, ya que en la conceptualización de la base de datos del EM-DAT no se toman en cuenta como generadores de inundaciones. De esta manera se descarta la posibilidad de que este tipo de fenómenos hayan causado también eventos de inundación y estos no se hayan clasificado de tal forma.

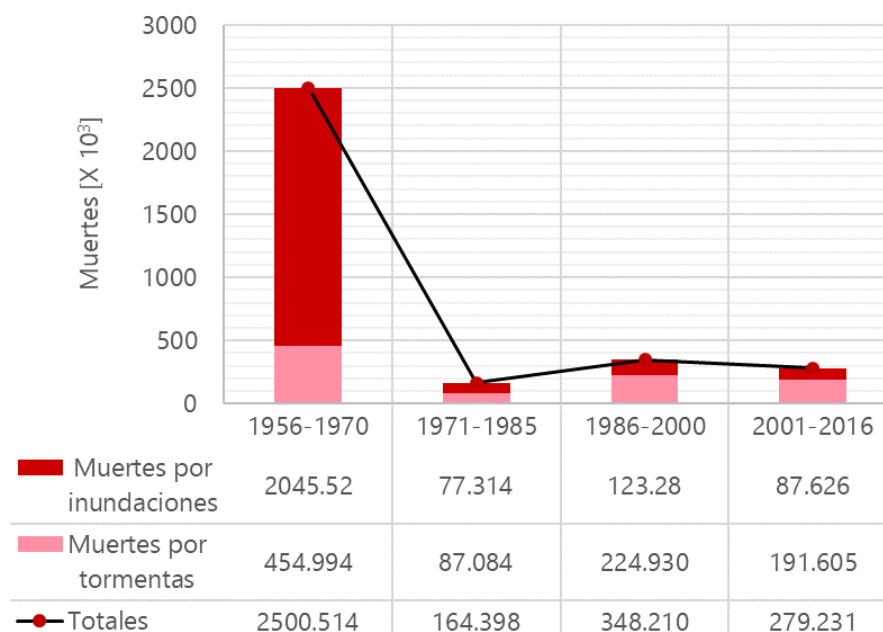


Figura 2-10. Número de personas fallecidas por inundaciones y tormentas en el mundo reportadas en los últimos cuatro periodos de 15 años.

Fuente: Elaboración propia con datos del (EM-DAT, 2017)

Por ejemplo, realizando un análisis a un nivel regional, en el año 2007 severas inundaciones ocasionaron la muerte de más de 3,200 personas en la India y Bangladesh. Posteriormente en 2010, provocaron la muerte de 2,200 y 1,900 personas en Pakistán y China, respectivamente. Y en 2013, 6,500 personas murieron debido a eventos de inundación reportados en India (Guha-Sapir, 2015b). Con lo cual queda demostrado una tendencia hacia el aumento de las víctimas de este tipo de fenómenos en dicha región, que se contrapone a la tendencia de las estadísticas globales.

De manera similar a su frecuencia, los eventos de inundación destacan por ser el desastre natural que afecta a un mayor número de personas. En este sentido, según los datos reportados en (Guha-Sapir, 2015a) las inundaciones provocaron afectaciones en poco más de la mitad (55%) del total de personas afectadas reportadas en la base de datos del EM-DAT por los demás desastres naturales en conjunto para el periodo comprendido entre 1994 y 2013, con un promedio anual de 500,000 personas y una cifra total de más de 2,400 millones de personas afectadas en dicho periodo de 20 años.

La figura 2-11 muestra la tendencia del número de personas afectadas por eventos de inundación reportados en el mundo de los últimos cuatro periodos de 15 años, donde es posible apreciar un aumento considerable entre el penúltimo y antepenúltimo periodo con un número de 2,117 millones de personas afectadas en el periodo de 1986 al 2000, cifra 4.5 y 19.4 veces mayor del número de personas afectadas en el periodo de 1971 a 1985 y de 1956 a 1970, respectivamente. Cabe destacar que en el último periodo se presentó una ligera

reducción del 2%, a pesar del aumento en la frecuencia de inundaciones y del aumento de las personas afectadas por tormentas.

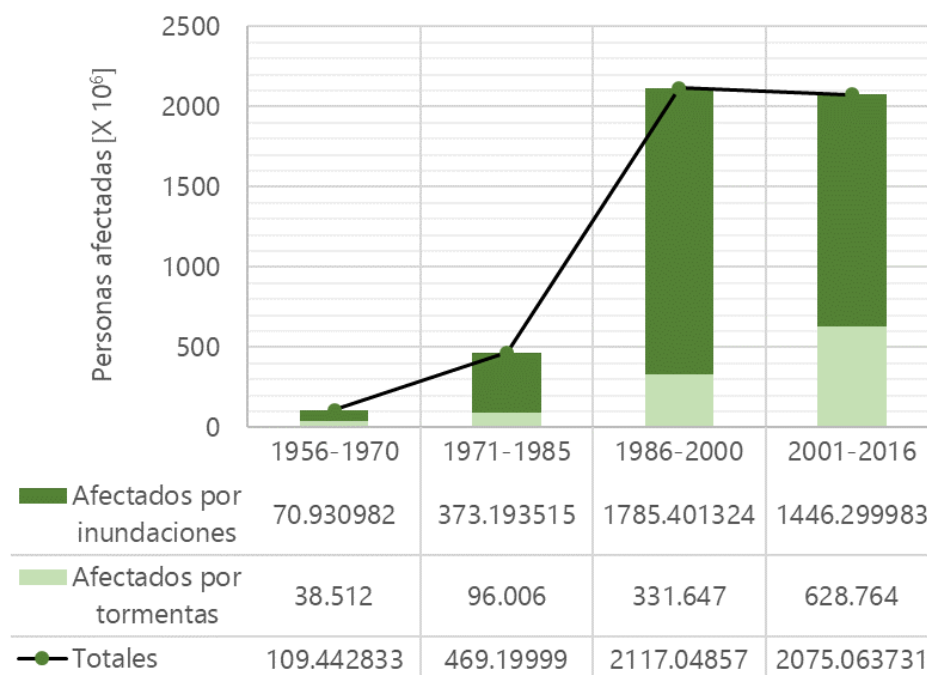


Figura 2-11. Número de personas afectadas por inundaciones y tormentas en el mundo reportadas en los últimos cuatro periodos de 15 años.

Fuente: Elaboración propia con datos del (EM-DAT, 2017)

En contraste a la disminución de víctimas humanas, los impactos económicos de las inundaciones a nivel mundial han tenido una tendencia a incrementarse de manera significativa, lo cual puede explicarse debido al desmedido crecimiento demográfico de las principales ciudades alrededor de mundo, así como por la migración cada vez mayor de personas de zonas rurales a urbanas y su establecimiento en regiones vulnerables a inundaciones (Aragón-Durand, 2014; Ferradas, 2013).

La figura 2-12 muestra la tendencia de los impactos económicos generados por eventos de inundación y tormentas reportados en el mundo de los últimos cuatro periodos de 15 años, donde es posible observar el desarrollo de un aumento exponencial en los impactos económicos generados por estos fenómenos naturales, si bien en el periodo de 2001 a 2016 fueron calculados daños económicos por 1,245 billones de dólares americanos, dicha cifra fue más del doble de la que fue reportada en el periodo anterior de 1986 al 2000 con 514 billones de dólares; y casi 18 veces más grande del impacto económico generado en el periodo de 1971 a 1985 con un valor estimado de 70 billones de dólares. Dicho crecimiento únicamente puede explicarse por el acelerado crecimiento poblacional y a la invasión zonas vulnerables a inundaciones y tormentas. Desgraciadamente, es común observar, en comunidades cercanas a algún río, que las personas cambian su lugar de residencia para

ubicarse en zonas de mayor elevación después de la ocurrencia de un evento de inundación; en cambio, los nuevos residentes de dichos lugares generalmente se asientan en los sitios más bajos y de mayor peligro por no tener conocimiento sobre la historia de la ocurrencia de inundaciones. (Salas & Jiménez, 2014).

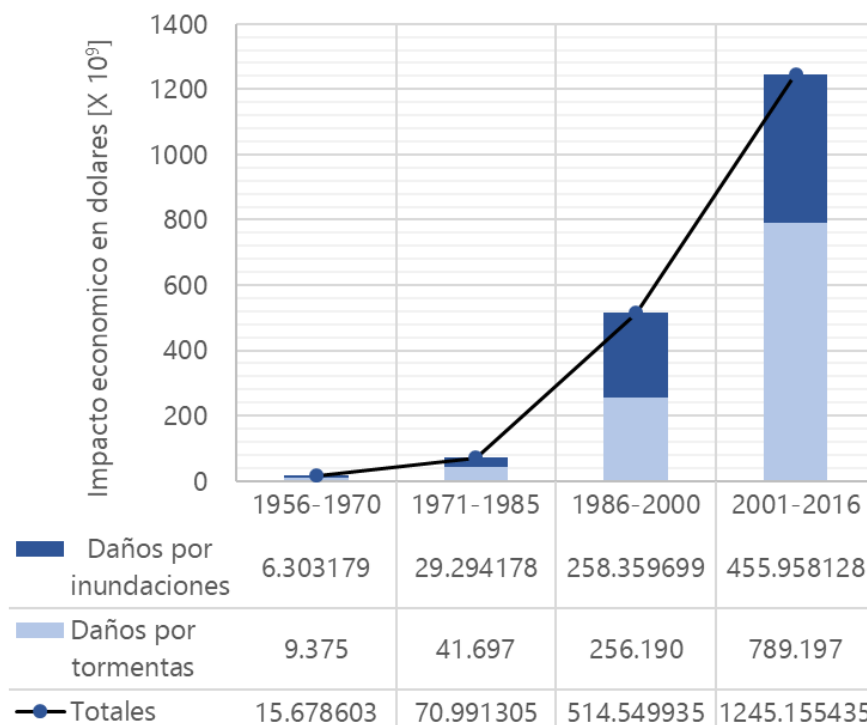


Figura 2-12. Impacto económico en dólares de los eventos de inundación y tormentas en el mundo reportados en los últimos cuatro periodos de 15 años.

Fuente: Elaboración propia con datos del (EM-DAT, 2017).

Teniendo en cuenta la distribución espacial de las inundaciones en el mundo, según los datos reportados en (EM-DAT, 2017) es China es el país donde se han presentado las inundaciones más devastadoras de la historia a consecuencia de las periódicas avenidas del río Yangtsé y del río Amarillo, que han causado la pérdida de un gran número de vidas humanas, sin contar los miles de muertos ocasionados por el brote de enfermedades posteriores a la ocurrencia de eventos de inundación. De hecho, entre las principales causas de tales problemas es la sobrepoblación y la gran urbanización que experimenta dicho país.

En general, las inundaciones que se presentan en la región asiática son consideradas como las peores de la historia reciente debido a los tifones generados en el Océano Pacífico, así como por la recurrencia año tras año de lluvias monzónicas. Sin embargo, los daños ocasionados por estos fenómenos se han intensificado a consecuencia del rápido desarrollo económico y la urbanización. Ejemplo de esto es que los eventos de inundación que se desarrollaron en países como la India, Bangladesh, Pakistán, Tailandia, Corea del Sur y principalmente China, se encuentren dentro de los 10 primeros lugares en el ranking de las



inundaciones que más fallecidos, afectados y daños económicos han causado en la base de datos del EM-DAT.

Ubicándose por debajo de los números reportados en Asia, el continente americano ocupa el segundo lugar en la ocurrencia de eventos de inundación, los cuales han mostrado una tendencia al aumento desde 1950, así como del número de fallecimientos y personas afectadas en consecuencia, ver figura 2-13, (EM-DAT, 2017; Fernandez & Sanahuja, 2012; Guha-Sapir, 2015a). Particularmente, en la región de América Latina y el Caribe se han presentado los peores eventos, por ejemplo: el huracán Mitch en 1998, que dejó a su paso alrededor de 11,000 muertos en Honduras, Nicaragua, El Salvador, Guatemala y México; la tragedia de Vargas en 1999, que consistió en fuertes precipitaciones en Venezuela que dejaron alrededor de 20,000 muertos; el huracán Jeanne en 2004, que ocasionó alrededor de 3,000 muertes en Haití; y el huracán Stan en 2005, que ocasionó más de 2,000 fallecimientos en Guatemala y El Salvador. Por mencionar algunos de los eventos más mortíferos. Debido a que México se encuentra dentro de esta región cabe señalar, según lo expuesto en (Mansilla, 2010), que las zonas urbanas de América Latina son las que más sufren en embate de inundaciones en comparación con las rurales, ya que el 86% de los eventos de inundación ocurridos en la región entre 1980 y 2009 se observaron en zonas urbanas y periurbanas, mientras que el 14% restante ocurrió en zonas rurales. Estos números demuestran que es en zonas urbanas donde deben enfocarse los esfuerzos con el fin de mitigar los efectos de las inundaciones, pero principalmente para salvaguardar la vida de las personas que las habitan. Estados Unidos también es un país que sufre frecuentemente las consecuencias de las inundaciones, las cuales son generadas por el embate de huracanes con mayor frecuencia en la costa este con una ocurrencia promedio de 4 huracanes por temporada, donde las inundaciones fluviales del río Mississippi afectan de manera cotidiana a dicha región. Por ejemplo: Recientemente el huracán Katrina en 2005, que arrasó la zona de Nueva Orleans y otras ciudades costeras de los Estados de Luisiana y Mississippi con un saldo estimado de 1600 muertos.

En África, según los datos del (EM-DAT, 2017), se observó un aumento en la frecuencia de inundaciones y tormentas a partir de 1994 pasando de 10 a 55 eventos en promedio por año en el 2011. Siento la parte este del continente la más afectada por los constantes desbordamientos del río Nilo.

La región europea, aunque en menor medida que las anteriores, también padece de las consecuencias de las inundaciones. Entre los eventos que se destacan se encuentran las inundaciones costeras en Holanda en 1953, provocadas por fuertes vientos y el oleaje que causaron la muerte de alrededor de 1,800 y el daño a 200,000 hectáreas de cultivo; así como las graves inundaciones en Bélgica, Francia, Alemania, España y Países Bajos de 1993. La figura 2-13 muestra el desarrollo de la frecuencia de inundaciones en esta región en donde se observa un aumento ligero entre 1996 y el 2006 con un máximo de 23 eventos en promedio por año.

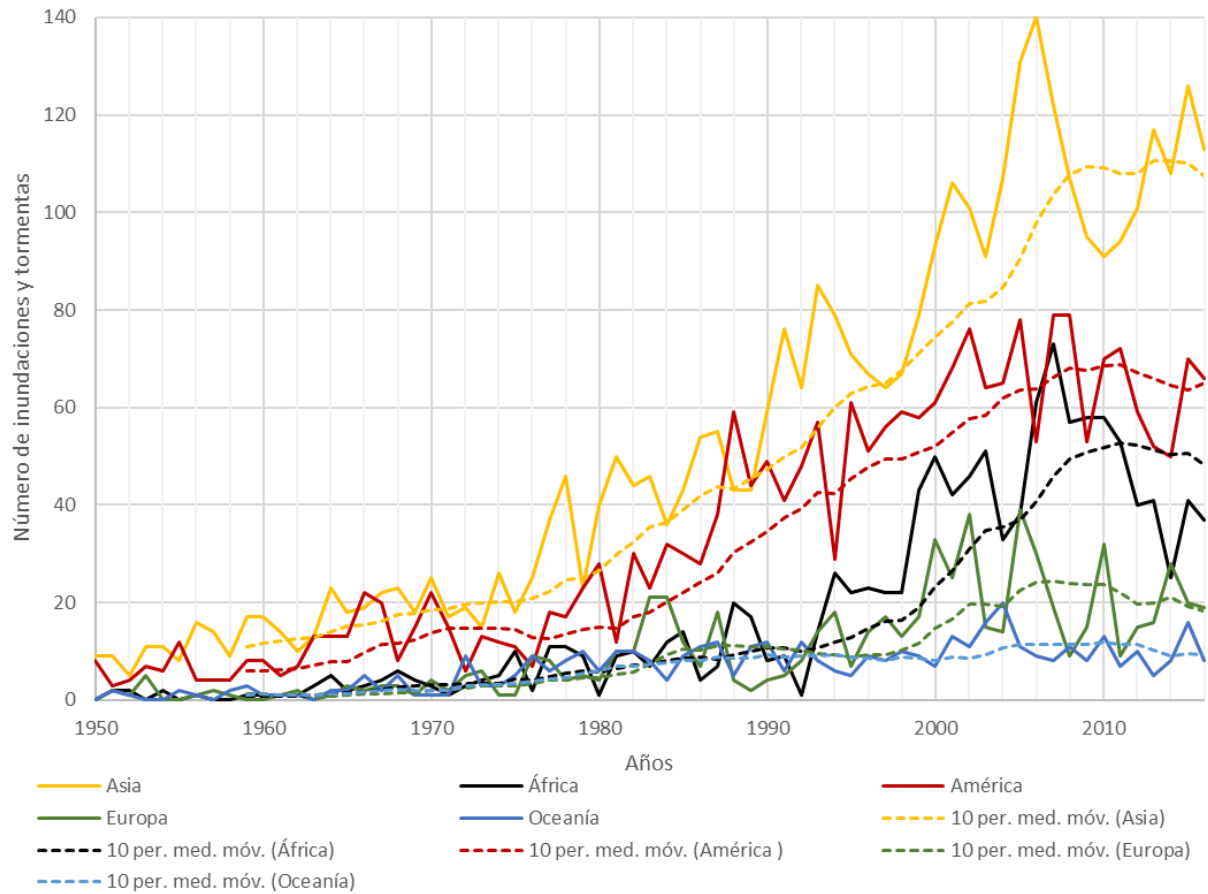


Figura 2-13. Número de eventos de inundación y tormentas por continente entre 1950 y 2016.  
 Fuente: Elaboración propia con datos del (EM-DAT, 2017).

Debido a su posición geográfica y su estable desarrollo urbano, Oceanía se ha mantenido estable con un promedio anual de 10 eventos de inundación y tormentas al año, siendo en su mayoría las afectaciones provocadas por ciclones generados en la región.

Finalmente, la figura 2-14 muestra los eventos de inundación reportados en la base de datos del EM-DAT entre 1986 y 2015 por país, en donde es posible apreciar una distribución espacial de la ocurrencia de estos fenómenos.

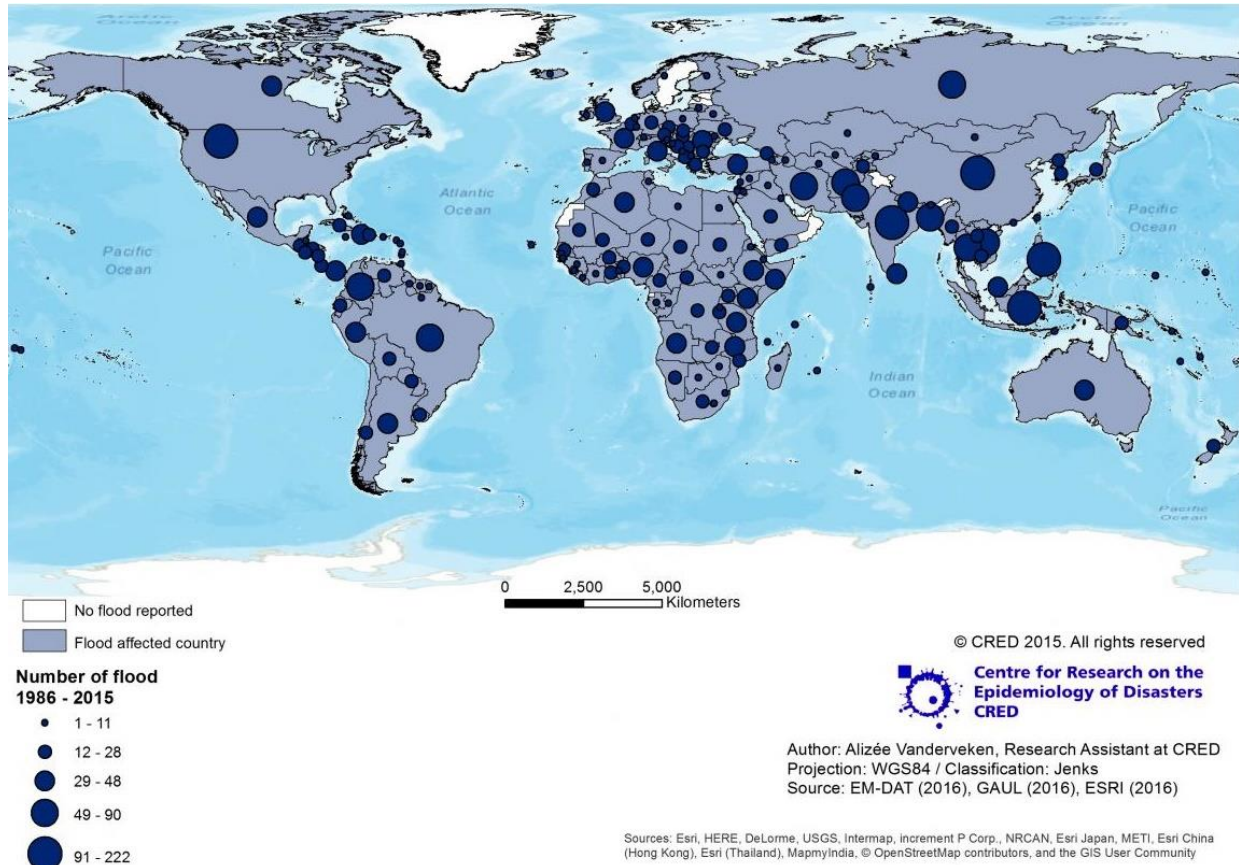


Figura 2-14. Numero de eventos de inundación por país entre 1986 y 2015.  
Fuente: (EM-DAT, 2017).

## 2.1.4 Panorama nacional de las inundaciones

México constituye uno de los países más propensos a la ocurrencia de fenómenos hidrológicos, meteorológicos y climáticos que producen precipitaciones extremas y en consecuencia graves eventos de inundación (Mansilla, 2008; Vergara, Ellis, Cruz, Alarcón, & Galván del Moral, 2011). Tanto por su ubicación geográfica, sus características orográficas e hidrográficas se encuentra expuesto a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos a lo largo del territorio nacional.

A manera de introducción al panorama nacional de las inundaciones, es preciso conocer el comportamiento hidrometeorológico de nuestro país bajo condiciones normales. En este sentido, México presenta un promedio de precipitación de 740 mm por año calculado entre el periodo de 1981 a 2010 por (CONAGUA, 2016). Teniendo en cuenta la distribución temporal de la lluvia, alrededor del 68% de ella ocurre entre los meses de junio y septiembre, las precipitaciones más intensas se encuentran asociadas a la acción de eventos ciclónicos que tienen influencia en más del 60% de territorio nacional (Mansilla, 1993) con una

frecuencia en promedio mayor a las diez tormentas por temporada, de las cuales cuatro o cinco se desarrollan en huracanes que impactan en las costas del Océano Pacífico, así como en el Atlántico (Arganis Juárez et al., 2010). Adicionalmente se incorporan las precipitaciones de tipo orográfico y convectivo, que ocasionan tormentas de poca duración y extensión, pero muy intensas. Durante los meses restantes, correspondientes al invierno, se desarrollan las tormentas invernales y frentes polares que constituyen la principal fuente de precipitación en dicho periodo. En cuanto a su distribución espacial, la figura 2-15 muestra un mapa de la precipitación promedio anual en el territorio nacional, donde es posible apreciar la irregularidad de dicha variable tanto en el norte con la presencia de factores climáticos y atmosféricos que favorecen su generación y en el sur, donde los efectos de las masas de aire continental seco impiden la generación de lluvia, demostrando el marcado contraste entre ambas regiones.

Finalmente, estas condiciones provocan que los ríos presenten regímenes hidrológicos irregulares que se ven caracterizados por la presencia de estiajes duraderos y por otra parte, grandes avenidas en tiempos particularmente cortos que provocan la generación repentina de eventos de inundación (Salas Salinas, 2014).

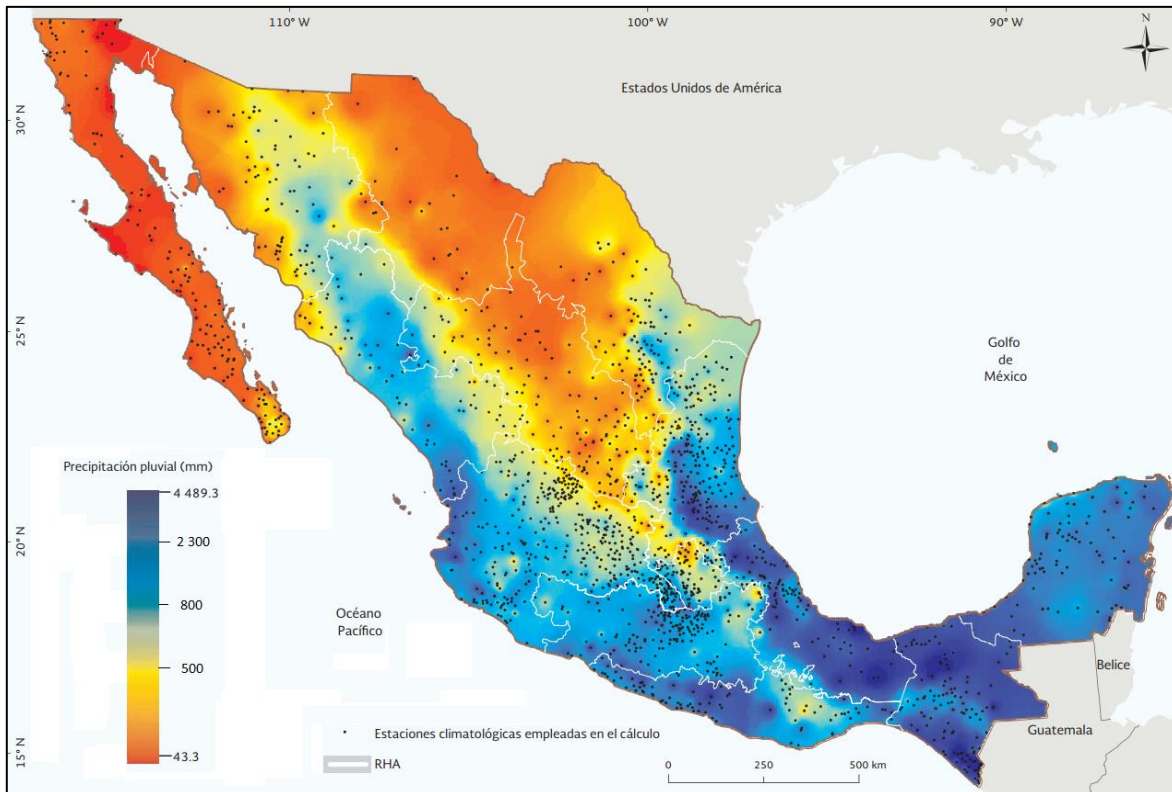


Figura 2-15. Distribución de la precipitación media anual en México.

Fuente: (CONAGUA, 2016).

Según lo expuesto anteriormente, es claro que nuestro país no está exento de los daños, afectaciones y muertes provocadas por las inundaciones, de hecho, cada año es común observar el desbordamiento del agua en las planicies de grandes ríos, particularmente en climas templados y húmedos característicos de la región centro, sur y sureste del país. En cambio, la zona norte caracterizada por un clima cálido y seco, los eventos de inundación suelen ser olvidados debido a la poca frecuencia con la que se presentan, empero, causan graves afectaciones e incluso la pérdida de vidas humanas cuando llegan a presentarse.

Según la base de datos del EM-DAT, las inundaciones ocupan el segundo lugar con respecto su frecuencia, al tener un 29% (67 eventos) del total (229 eventos) de la ocurrencia entre los principales desastres naturales que han afectado nuestro país en el periodo de 1950 al 2016 (a saber: tormentas, inundaciones, terremotos, sequías, deslaves, erupciones volcánicas e incendios forestales). Las tormentas, generadoras también de inundaciones, tienen el primer lugar con un 44% (100 eventos) del total. Estos datos demuestran la importancia de ambos desastres como la causa de graves pérdidas económicas, de afectación y perdida de un gran número de personas en México, ver figura 2-16.

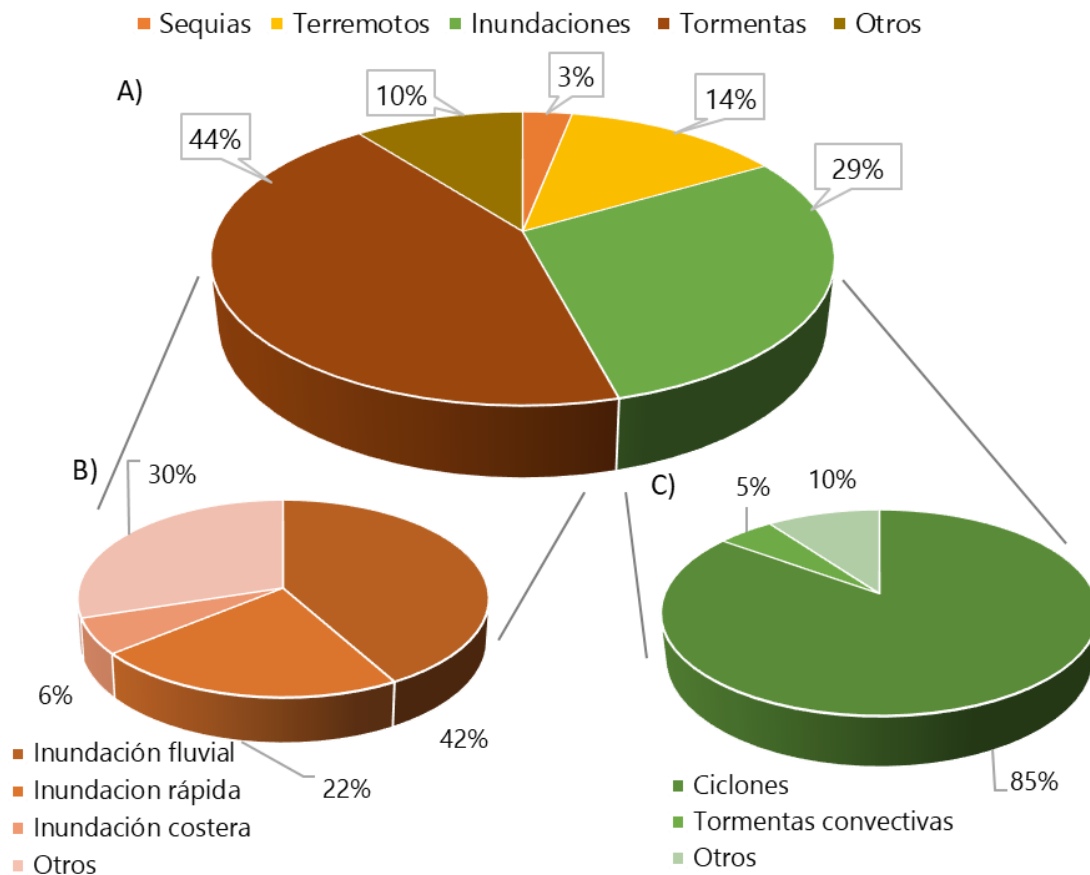


Figura 2-16. Frecuencia de A) los principales desastres naturales. Eventos de B) Inundación y C) tormenta en México para el periodo de 1950-2016, según la base de datos del EM-DAT. Fuente: Elaboración propia con datos del (EM-DAT, 2017).

Además, en la figura 2-16 se muestra la subdivisión de la frecuencia de eventos de inundación y tormentas según su tipo. Para las inundaciones, el 42% (28 eventos), el 22% (15 eventos) y el 6% (4 eventos) corresponden a inundaciones fluviales<sup>2</sup>, rápidas y costeras, respectivamente. En el caso de los eventos de tormenta la gran mayoría, 85% (85 eventos), corresponde a ciclones tropicales, mientras que el 5% (5 eventos) y 10 % (10 eventos) restantes, corresponden a tormentas convectivas y otros eventos de tormenta que causan precipitaciones de gran intensidad.

La figura 2-17 muestra la evolución temporal de la frecuencia de eventos de inundación y tormenta que han sido registrados en la base de datos del EM-DAT año con año entre el periodo de 1950 y 2016 en México. La línea negra continua muestra el número de eventos que ocurrieron según el año, mientras que la línea roja discontinua representa la media móvil que considera 10 años consecutivos. Es posible apreciar una estabilidad entre el periodo de 1960 a 1980 con una media de un evento al año, un aumento exponencial en la frecuencia a partir de 1980 a 2002 pasando de una media de 5 eventos por año y su establecimiento en dicha cantidad hasta la fecha.

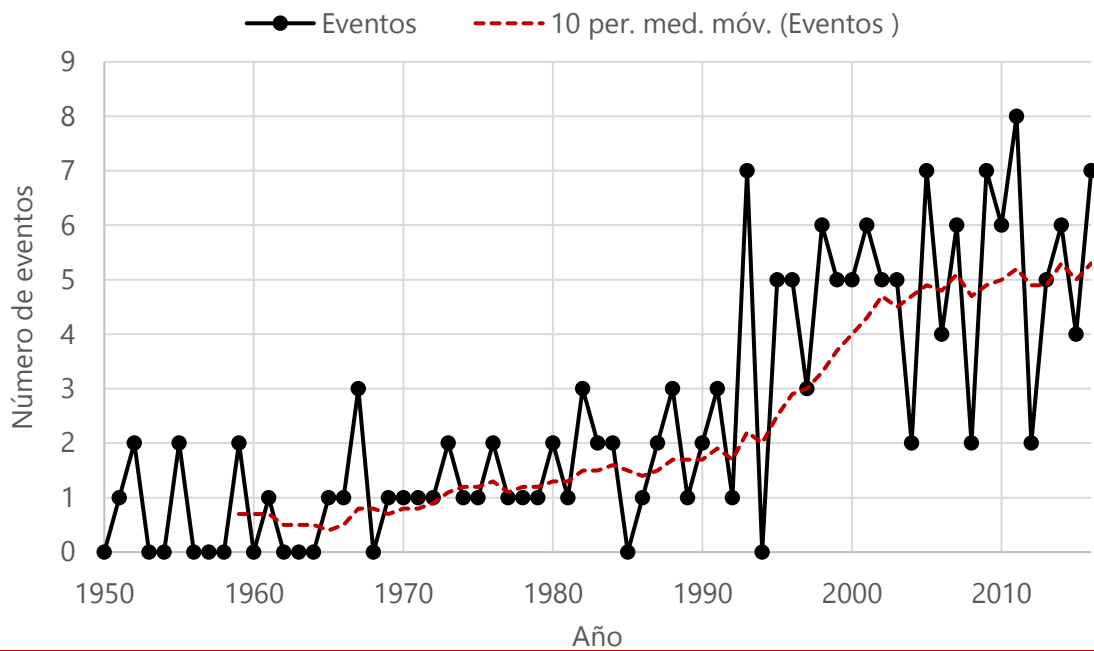


Figura 2-17. Número de eventos de inundación y tormentas en México reportados en la base de datos del EM-DAT.

Fuente: Elaboración propia con datos del (EM-DAT, 2017).

<sup>2</sup> Según los datos del EM-DAT se incluye también a las inundaciones pluviales dentro de esta clasificación debido a la falta de información en el reporte de dichos eventos de inundación.

La figura 2-18 muestra la evolución del número de fallecimientos provocados por eventos de inundación y tormentas en México de los últimos cuatro periodos de 15 años, que han sido registrados en la base de datos del EM-DAT. En donde es posible apreciar una ligera tendencia a la disminución en la pérdida de vidas humanas pasando en los dos últimos periodos de 2,537 a 939 fallecimientos. Sin embargo, es muy probable que esta tendencia se invierta en consecuencia al aumento poblacional y de la urbanización en las ciudades de nuestro país, y los efectos del cambio climático, como se describió en la introducción. Además, sabiendo que las zonas urbanas y periurbanas de nuestro país son las que más son afectadas por eventos de inundación, en comparación con las rurales con el 83.6% de la frecuencia de eventos contra el 16.4% restante en zonas rurales, según los datos reportados en (Mansilla, 2010) en un estudio realizado entre 1980 y 2009.

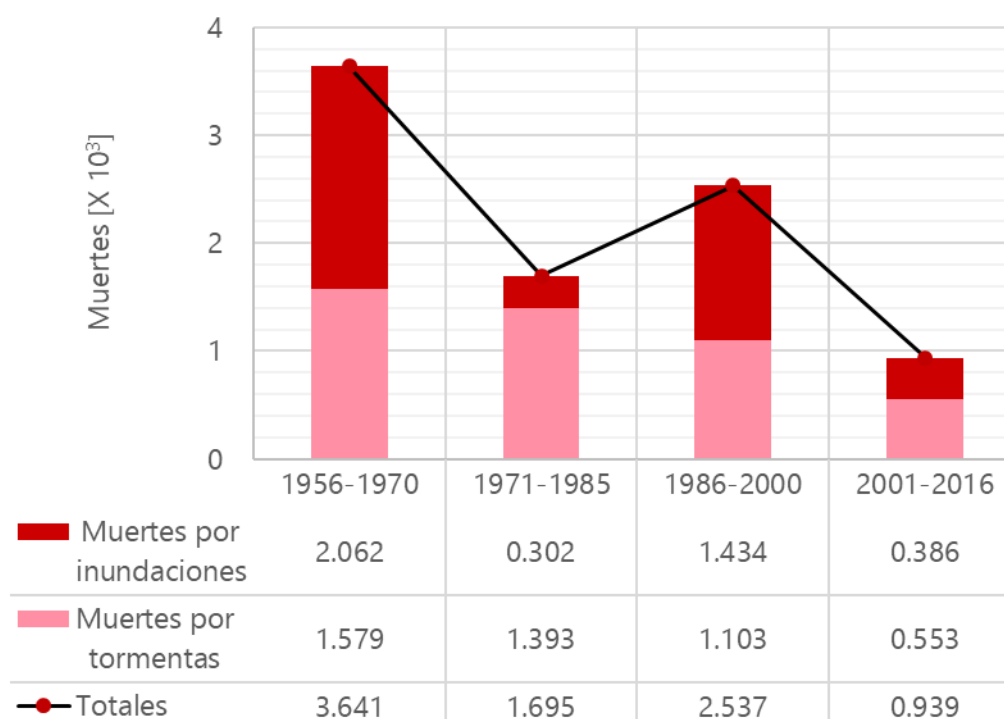


Figura 2-18. Número de personas fallecidas por inundaciones y tormentas en México reportadas en los últimos cuatro periodos de 15 años.

Fuente: Elaboración propia con datos del (EM-DAT, 2017)

La figura 2-19 muestra la tendencia del número de personas afectadas por eventos de inundación reportados en México de los últimos cuatro periodos de 15 años, donde es posible apreciar un aumento constante en el número de personas afectadas por este tipo de fenómenos entre 1956 y el 2000. Sin embargo, dicha tendencia se ha vuelto significativa entre el último y penúltimo periodo, con un estimado de 9.58 millones de personas en el periodo de 2001 al 2016, cifra que es casi 4.5 veces mayor del número de personas afectadas en el periodo de 1986 a 2000. De manera opuesta a la tendencia global, en México los eventos de

tormenta resultan ser generadores de un mayor número de personas afectadas en cada uno de los periodos analizados, en comparación con los de inundación.

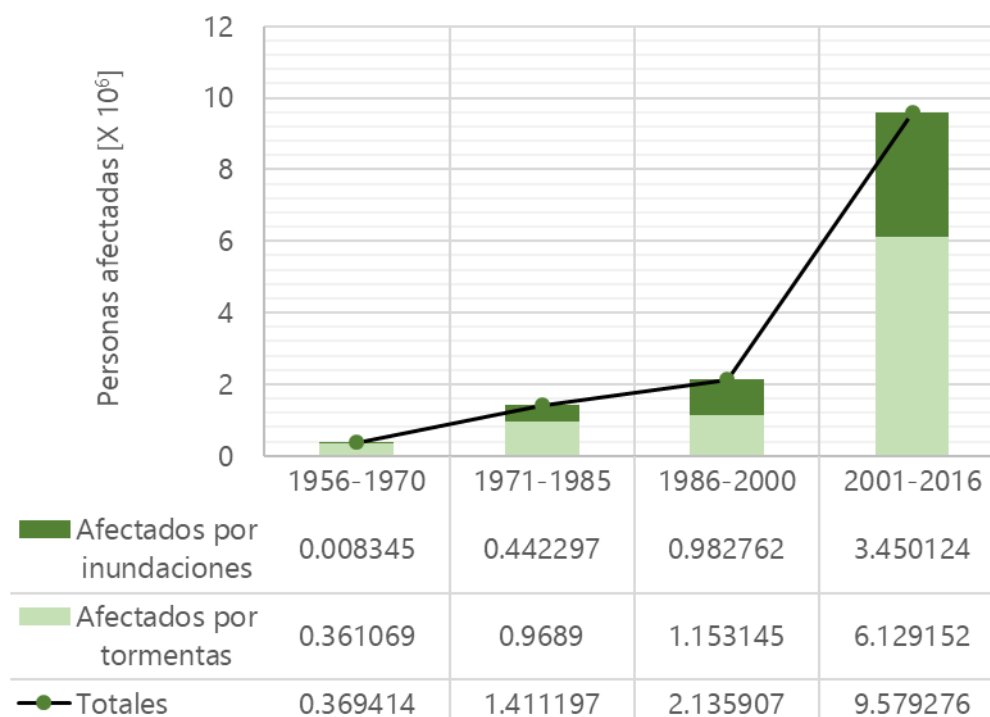


Figura 2-19. Número de personas afectadas por inundaciones y tormentas en México reportadas en los últimos cuatro periodos de 15 años.

Fuente: Elaboración propia con datos del (EM-DAT, 2017).

De manera similar a la tendencia global, los impactos económicos de las inundaciones y tormentas en México han tenido una tendencia a incrementarse de manera exponencial en las últimas décadas. La figura 2-20 muestra la tendencia de los impactos económicos generados por eventos de inundación y tormentas en México de los últimos cuatro periodos de 15 años, que han sido registrados en la base de datos del EM-DAT. En ella es posible observar que, en su comparación con los eventos de inundación, los eventos de tormenta son los que mayor impacto económico han generado en los dos últimos periodos principalmente, si bien en el periodo de 2001 a 2016 fueron calculados daños económicos por 29 billones de dólares americanos, dicha cifra fue casi cinco veces más alta que la reportada en el periodo anterior de 1986 al 2000 con 6 billones de dólares; y casi 53 veces más grande del impacto económico generado en el periodo de 1971 a 1985, con un valor estimado de 548 millones de dólares. Dicho crecimiento únicamente puede explicarse por la acelerada urbanización de las ciudades, el fenómeno de la migración de personas de zonas rurales a urbanas y a la cada vez más frecuente invasión de zonas vulnerables a inundaciones y tormentas (Aragón-Durand, 2014; Ferradas, 2013).

Los resultados de la estadística antes mencionada no son absolutas, ya que no deben olvidarse las condiciones que desastre natural debe de cumplir para que sea registrado en la



base de datos del EM-DAT. En este sentido, muchos de los eventos de inundación que se han presentado en la historia y extensión del país, que no han cumplido con alguna de esas condiciones no han sido contabilizados, empero, no por ello deja de ser una valiosa fuente de información solo por realizar una discriminación más estricta de dichos eventos.

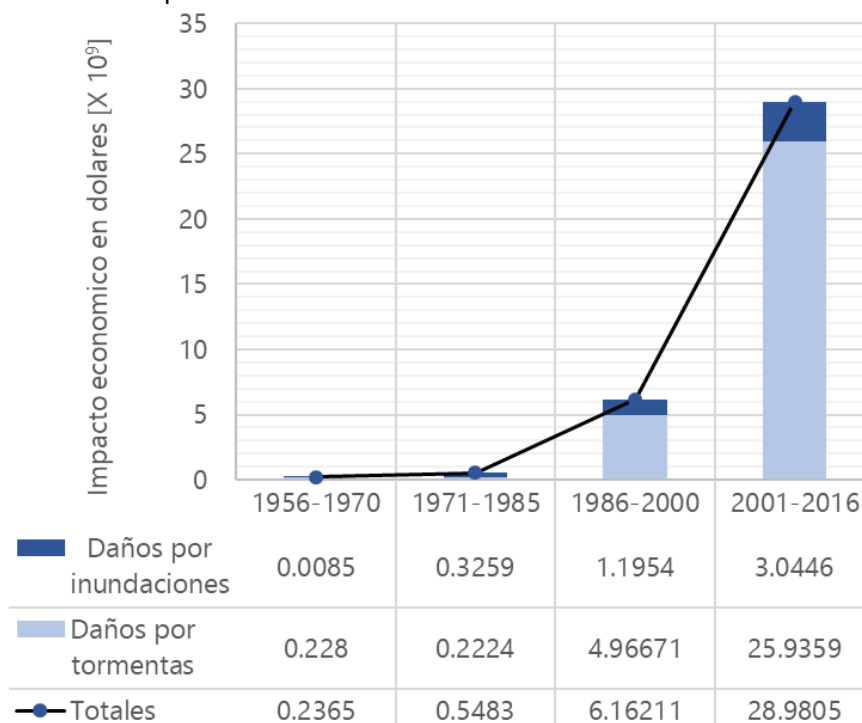


Figura 2-20. Impacto económico en dólares de los eventos de inundación y tormenta en México reportados en los últimos cuatro periodos de 15 años.

Fuente: Elaboración propia con datos del (EM-DAT, 2017).

Finalmente, la figura 2-21 y su complemento en la tabla 2-3 muestran la distribución espacial, así como la descripción general de los principales eventos de inundación y tormentas que se han presentado en México, donde es posible observar que este tipo de fenómenos no es exclusivo de la región sur y sureste del país, donde generalmente se supone que al presentarse las mayores precipitaciones forzosamente se generan fuertes eventos de inundación. Además, la misma figura muestra el grado de riesgo por inundaciones a nivel municipal según la clasificación hecha por CENAPRED.

Tabla 2-3. Eventos de inundación y tormenta que mayor impacto han generado en México.

ID	Fecha	Descripción del evento
1	14/09/1988	Ciclón tropical Gilberto en el Estado de Yucatán y las costas del Golfo, deja a su paso severas inundaciones y alrededor de 240 fallecidos y más de 100,000 afectados.
2	22/09/1990	Inundación fluvial en el Rio Sacramento deja alrededor de 200 fallecidos y 7,000 personas afectadas en la capital del Estado de Chihuahua.

<b>3</b>	08/08/1990	Ciclón tropical Diana en los Estados de Veracruz, Hidalgo y Puebla deja severas inundaciones y alrededor de 139 fallecidos y más de 75,000 personas afectadas.
<b>4</b>	05/10/1997	Ciclón tropical Paulina en el Estado de Guerrero deja severas inundaciones, alrededor de 320 fallecidos y 300,000 personas afectadas.
<b>5</b>	03/09/1998	Lluvias torrenciales provocan inundaciones en el Estado de Chiapas, dejando alrededor de 229 fallecidos y 25,000 afectados.
<b>6</b>	12/09/1999	Lluvias intensas provocan inundaciones en los Estados de Puebla y Veracruz dejando alrededor de 387 personas muertas y 368,000 afectadas.
<b>7</b>	20/09/2002	Ciclón tropical Isidoro en el Estado de Yucatán, aunque no se caracteriza por ser causante de la pérdida de vidas humanas (4 muertos), lo hace por el impacto económico que dejó siendo de 919 MDD US.
<b>8</b>	01/10/2005	Embate del ciclón tropical Stan en los Estados de Chiapas y Oaxaca provocó alrededor de 30 muertos, con un impacto económico significativo, valuado en 1,934 MDD US.
<b>9</b>	15/10/2005	Ciclón tropical Wilma en el Estado de Quintana Roo, considerado como uno de los ciclones más intensos y costosos del Atlántico. Ocasionó alrededor de 47 decesos y un impacto económico valuado en 1,724 MDD US.
<b>10</b>	27/10/2007	Intensas lluvias provocan el desbordamiento de río Grijalva-Usumacinta ocasionando severas inundaciones en los Estados de Tabasco y Chiapas, provocando alrededor de 40 muertos por deslizamiento de tierra (aunque se estima que muchos más por la inundación) y un impacto económico valuado en 2,919 MDD US.
<b>11</b>	21/08/2007	Ciclón tropical Dean en los Estados de Quintana Roo, Campeche y Veracruz, provocó alrededor de 14 fallecimientos y un impacto económico valuado en 878 MDD US.
<b>12</b>	30/06/2010	Ciclón tropical Alex en los Estados de Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila, ocasionó el fallecimiento de 22 personas, alrededor de 170,000 personas afectadas y un impacto económico valuado en 2,000 MDD US.
<b>13</b>	20/09/2010	Embate del ciclón tropical Karl en Los Estados de Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Tabasco y Veracruz, ocasionó el fallecimiento de 15 personas, alrededor de 230,000 personas afectadas y daños por 1,973 MDD US.
<b>14</b>	13/09/2013	Ciclones tropicales simultáneos Ingrid y Manuel ha sido el evento hidrometeorológico más costoso del país con un impacto económico valuado en 3,040 MDD US a causa de las severas inundaciones. Se estimaron alrededor de 157 fallecidos y más de 155,000 personas afectadas en alrededor de 21 Estados del país.
<b>15</b>	10/09/2014	Ciclón tropical Odile en el Estado de Baja California Sur ocasionó el fallecimiento de 18 personas, más de 50,000 afectados y un impacto económico valuado en 2,477 MDD US.

<b>16</b>	22/10/2015	Ciclón tropical Patricia, que constituye el evento de tormenta más intenso que se ha registrado en el hemisferio occidental. Afecto los Estados de Colima, Jalisco y Nayarit ocasionando el fallecimiento de 14 personas, alrededor de 15,000 persona afectadas y un impacto económico valuado en 823 MDD US.
-----------	------------	---

Fuente: (CENAPRED, 2015; Desinventar.org, 2017; EM-DAT, 2017; Salas & Jiménez, 2014)

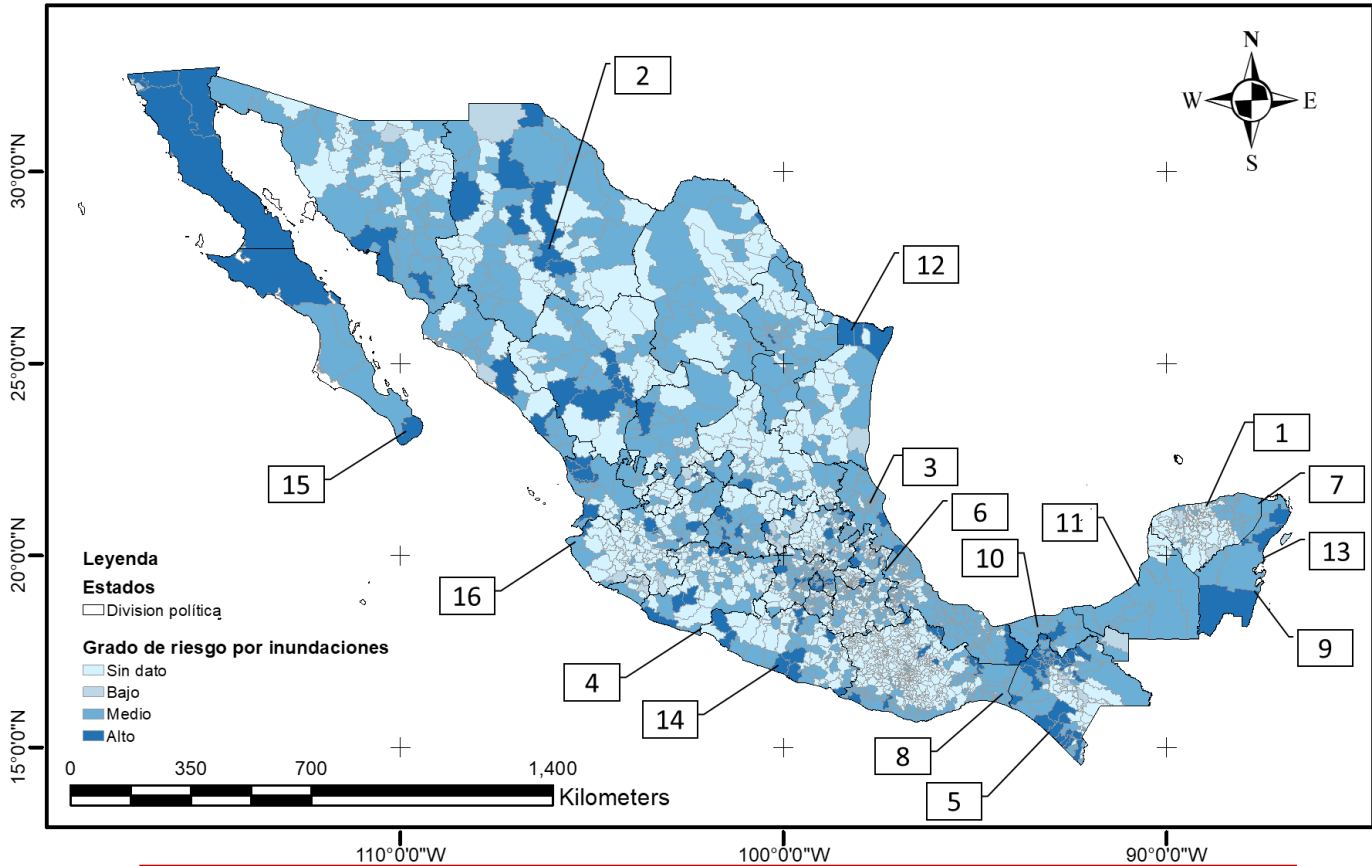


Figura 2-21. Grado de riesgo por inundaciones a nivel municipal con la ubicación de los principales eventos de inundación y tormenta que mayor impacto han generado en México

## 2.2 Antecedentes de la determinación del peligro por inundaciones a personas

Una vez definido y expuesto el problema de los eventos de inundación y sus generadores (eventos de tormenta) en el mundo y particularmente en nuestro país, es posible darnos cuenta de la magnitud de la problemática que enfrentamos. Siendo las zonas urbanas las mayormente afectadas por este tipo de fenómenos y dado que la seguridad de las personas que las habitan, son la prioridad número uno en la determinación del peligro por inundaciones este subcapítulo aborda una reseña del desarrollo de los criterios de arrastre

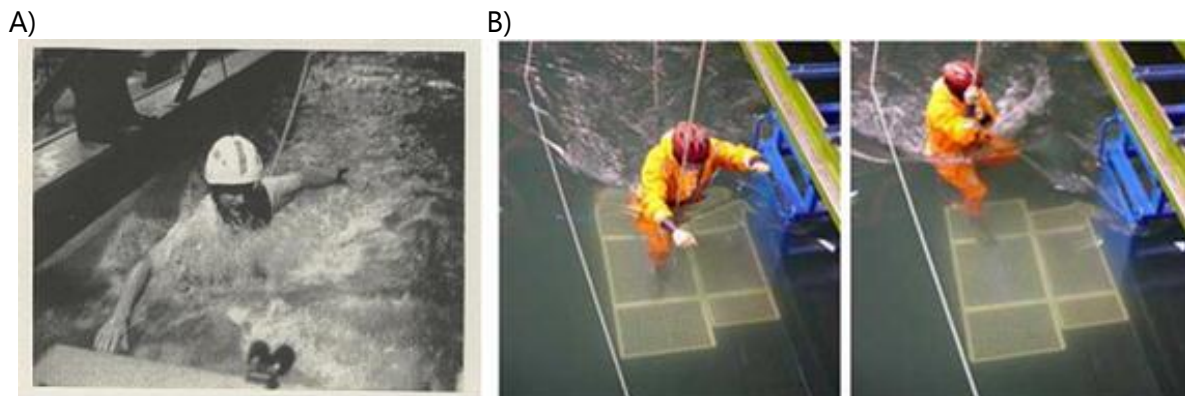
de personas ante flujos de inundación, así como las acciones que toman en cuenta la evaluación del grado de riesgo por inundación y que han sido implementadas en México.

### 2.2.1 Desarrollo de los criterios de arrastre de personas

La seguridad de las personas ante una inundación puede verse comprometida cuando se exponen a flujos de agua que exceden su la capacidad de permanecer de pie o en movimiento, es decir su estabilidad, misma que se convirtió en un motivo de investigación para la gestión del riesgo en zonas propensa a inundaciones.

La estabilidad humana en un flujo de agua fue estudiada por primera vez y de manera experimental por (Foster & Cox, 1973) donde se evaluó la estabilidad de niños con diferentes combinaciones de pesos y estaturas en un canal de laboratorio con el fin de encontrar alguna relación, sin embargo, se encontraron con que la estabilidad del cuerpo humano en el agua era afectada por un amplio conjunto de factores físicos, emocionales y dinámicos y además, se identificó que el mecanismo de inestabilidad se daba por deslizamiento o fricción.

Años más tarde las pruebas experimentales realizadas en (Abt, Wittier, Taylor, & Love, 1989) con 20 adultos sanos de diferentes características en un canal de 61 m de largo con diferentes superficies de suelo, demostraron que existía un segundo mecanismo de inestabilidad que fue denominado: inestabilidad por derribe o momento. Además, con los resultados de las pruebas realizadas fue encontrada, por medio de una regresión lineal de datos experimentales y por primera vez, una ecuación que definía el umbral de estabilidad de una persona en un flujo de agua en función de la estatura y masa del cuerpo humano. De manera similar en (Karvonen et al., 2000) se encontró que la estabilidad de una persona se encontraba estrechamente relacionada con su altura, peso y la velocidad media del flujo a través de estudios experimentales realizados con 7 personas comprendidas entre los 17 y 60 años.



---

*Figura 2-22. Pruebas experimentales realizadas en A) Abt et al., 1989 y B) Karvonen et al., 2000. Fuentes: (Abt et al., 1989; Karvonen et al., 2000).*

En (Ramsbottom, Floyd, & Penning-Rowell, 2003) se desarrolló una metodología empírica para la evaluación y el mapeo del riesgo de arrastre de personas causado por eventos de inundación por orden del el Departamento del Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (DEFRA, por sus siglas en ingles) de la Agencia del Medio Ambiente del Reino Unido. Dicha metodología se basó en el establecimiento de una relación entre el nivel de riesgo, la profundidad, la velocidad y un factor de escombros que depende de las condiciones del lugar donde ocurra la inundación. Tres años más tarde, en una segunda fase de esta investigación (Ramsbottom, Floyd, & Penning-Rowell, 2006a), la ecuación empírica obtenida fue calibrada con los datos experimentales obtenidos por (Abt et al., 1989) y (Karvonen et al., 2000) con lo cual mejoro y se difundió su aplicación a pesar de las deficiencias que la caracterizan, la cuales se analizan en el capítulo 5.

Otras investigaciones como (Cox et al., 2010; Ishigaki, Baba, Toda, & Inoue, 2005; Ishigaki et al., 2008; Russo et al., 2013; Takahashi et al., 1992; Wallingford, 2006; Yee, 2003) realizaron análisis experimentales sobre adultos y niños reales llegando a obtener diferentes definiciones de la estabilidad del cuerpo humano en un flujo de agua, las cuales variaron en función de las condiciones experimentales implementadas en cada uno de ellos, a saber: variaciones en las condiciones ambientales, en el entrenamiento y vestido de los sujetos a prueba, etc.



---

*Figura 2-23. Pruebas experimentales en (Russo et al., 2013) de la estabilidad de una persona simulando el cruce de una calle con presencia del flujo de agua.  
Fuente: (Russo et al., 2013).*

Una gran base de datos experimentales fue generada debido a las diferencias en las capacidades físicas y psicológicas de las personas que fueron empleadas en los experimentos de los estudios mencionados hasta ahora en este trabajo de investigación. Lo cual, repercutió en la generación de diferentes criterios de estabilidad o de arrastre de personas que se encuentran basados fundamentalmente en las características hidrodinámicas del flujo de agua (profundidades y velocidades) e indirectamente en los atributos del cuerpo humano, siendo este último aspecto logrado a través de la calibración de las ecuaciones empíricas deducidas con las pruebas experimentales realizadas con seres humanos reales (niños y adultos). Este tipo de criterios tiene como una de sus principales ventajas la facilidad de su implementación y la posibilidad de llegar a obtener un mapa que permitiera la identificación de las zonas potencialmente peligrosas dentro de una mancha de inundación. Sin embargo,

las funciones de aproximación empíricas generadas resultaron ser incluso regresivas, puesto que no fue establecido un vínculo entre la definición de riesgo asociado al arrastre de personas en un flujo de inundación y el mecanismo físico o teórico mediante el cual una persona (adulto o niño) pierde la estabilidad en él. Con el fin de subsanar la grave limitación que presentaban los estudios basados en pruebas experimentales, algunos otros investigadores dirigieron sus esfuerzos sobre una línea diferente, creando los medios necesarios para la creación de un marco teórico-conceptual que permitiera la descripción de la estabilidad del ser humano en función a la velocidad del flujo de agua, a la profundidad, así como en los atributos del cuerpo humano.

De manera similar a los criterios de base experimental, los criterios de base teórica-conceptual obtuvieron su diversidad a consecuencia de las diferentes suposiciones con las que se abordaba la compleja forma del cuerpo humano, las fuerzas involucradas en el fenómeno, así como los mecanismos causantes de la inestabilidad de las personas en un flujo de agua.

La primera investigación que tomó en cuenta un marco teórico-conceptual para la determinación de un criterio de arrastre de personas por un flujo de inundación fue (Love, McGuire, Taylor, & Birch, 1988), que realizó sus experimentos tomando como modelo un monolito rectangular teniendo como conclusiones el reconocimiento de la importancia de la fuerza de flotación y de la inestabilidad.

Años más tarde, en (Keller & Mitsch, 1993) realizó una investigación puramente teórica sobre la estabilidad de cuerpo humano en el agua, al realizar un análisis mecánico de las fuerzas que actuaban en un cilindro vertical (a manera de asemejar un cuerpo humano) expuesto a un flujo de agua de velocidad uniforme. En este trabajo fueron representados los dos mecanismos de inestabilidad del cuerpo humano: por deslizamiento o fricción y por momento o derribe.

En el 2004 (Lind et al., 2004) consideraron un cuerpo compuesto de una forma cilíndrica vertical como modelo del cuerpo humano (ver figura 2-24), a partir del cual fueron generadas sus propias ecuaciones conceptuales y empíricas basadas en el producto de la velocidad media y la profundidad del flujo. Mismas que fueron calibradas con los datos experimentales de (Abt et al., 1989) y (Karvonen et al., 2000).

En (Walder et al., 2006) se estudiaron los efectos del flujo de escombros generado por un tsunami, en donde se utilizó un enfoque simplificado para representar el mecanismo de inestabilidad por deslizamiento. Además, fueron propuestos los umbrales de ahogamiento máximos para hombres, mujeres y niños en función de la profundidad del agua.

A partir de la investigación hecha por (S. N. Jonkman & Penning-Rowsell, 2008) se tuvieron en cuenta enfoques más avanzados dentro del marco teórico-conceptual de los criterios de arrastre de personas, en comparación con los trabajos mencionados

anteriormente. Sebastián N. Jonkman y su equipo realizaron pruebas con un especialista de acción en un canal real con condiciones de baja profundidad y altas velocidades, generando sus propias ecuaciones para ambos mecanismos de inestabilidad (deslizamiento y derribe) por separado. A pesar de que estas ecuación fueron calibradas con los datos experimentales de (Abt et al., 1989) y (Karvonen et al., 2000) mostrando un buen ajuste, una simplificación excesiva del cuerpo humano provocó el cálculo incorrecto de la fuerza de flotación y en consecuencia la desconfianza de su aplicación.

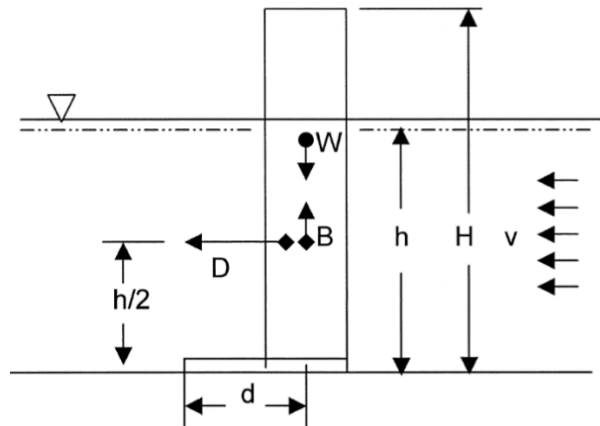


Figura 2-24. Modelo del cuerpo humano considerado en (Lind et al., 2004).

Fuente: (Lind et al., 2004).

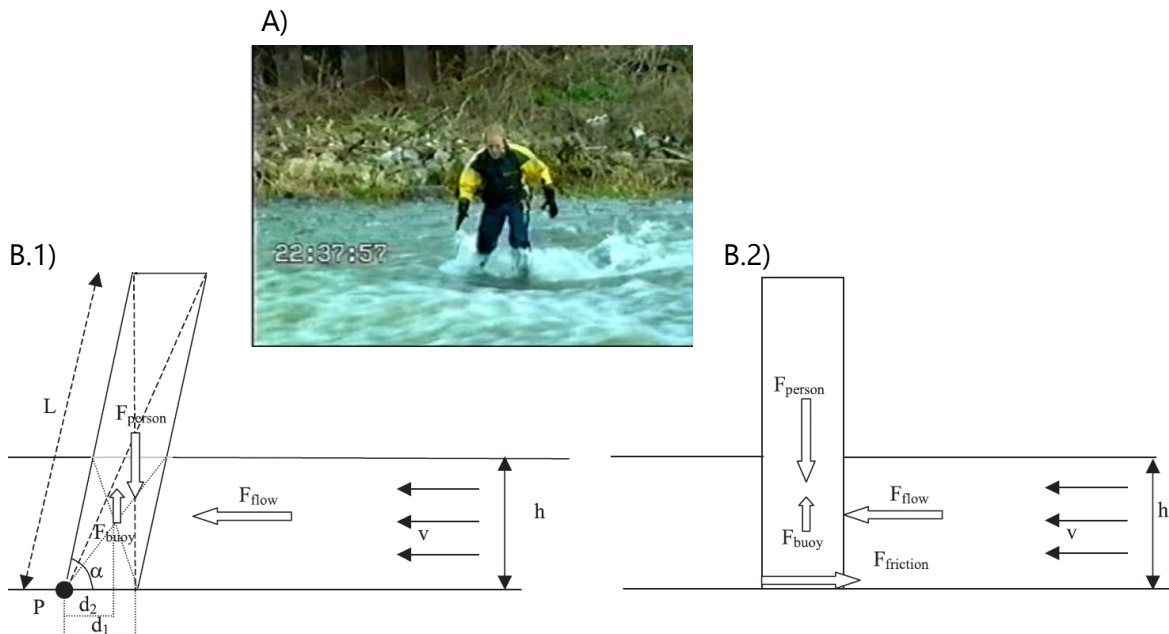


Figura 2-25. A) Pruebas experimentales realizadas en una persona al cruzar una corriente de agua. B.1) y B.2) muestran los modelos de cuerpo humano y las fuerzas consideradas en los mecanismos de inestabilidad por derribe y deslizamiento, respectivamente.

Fuente: (S. N. Jonkman & Penning-Rowsell, 2008).

Teniendo en cuenta el error de las ecuaciones generadas por Jonkman en 2008 y la gran variabilidad de criterios existentes, que dependían de las diferentes características físicas y psicológicas de los sujetos de prueba, así como de las consideraciones y simplificaciones tomadas en cuenta en la definición de la estructura del cuerpo humano, la investigación realizada por (Xia et al., 2014) centro sus esfuerzos en la unificación de los criterios de arrastre existentes, en una sola metodología más completa, que tuviera como resultado la creación de dos ecuaciones generales para cada uno de los mecanismos de inestabilidad, y no solo eso, sino que estas contemplaran en su calibración la unión de los análisis experimentales y teóricos propios realizados con modelos humanos a escala como novedad (ver figura 2-26), así como los realizados en trabajos de investigación previos. Posteriormente, en (Xia et al., 2016) se mostraron nuevas aplicaciones de esta metodología y su complemento en la estimación del daño en vehículos, edificios y cultivos de manera simplificada.



*Figura 2-26. Pruebas experimentales realizadas en modelos humanos a escala.*

*Fuente: (Xia et al., 2014).*

Una año más tarde, en (Milanesi et al., 2015) fue desarrollado un nuevo criterio basado en un análisis teórico-conceptual similar al mostrado en (Xia et al., 2014), pero que desarrollaba de manera diferente las ecuaciones de los mecanismos de inestabilidad al retomar en su estudio el uso de formas geométricas para la representación del cuerpo humano en el análisis físico de las fuerzas que actúan en un cuerpo humano sometido en una corriente de agua, aunque en este caso, con menores simplificaciones en comparación con estudios desarrollados con anterioridad. Entre las novedades que se incluyeron en esta metodología se encuentran:

- La incorporación del efecto de la pendiente local del suelo en la estabilidad del cuerpo humano, variable que únicamente fue tomada en cuenta por (Abt et al., 1989) y (S. N. Jonkman & Penning-Rowsell, 2008) con un valor limitado por debajo del 1.5%. La pendiente local constituye una de las consideraciones más importantes en los criterios de arrastre de personas, ya que se encuentra estrechamente relacionada con la estabilidad de un individuo y la forma en que se desarrolla el análisis físico de las fuerzas que actúan en un cuerpo humano dentro de una corriente de agua (Russo et al., 2013).



- La definición de un nuevo mecanismo de inestabilidad, denominado ahogamiento, que se basa en la definición de un umbral máximo de profundidad en el cual la vida de una persona puede verse comprometida. Aunque propiamente no deba ser considerado como uno de los mecanismos de inestabilidad. Ver figura 2-27.



---

*Figura 2-27. Persona en peligro de ahogarse en Haití tras el paso del huracán Hanna.*  
*Fuente: <http://www.elobservador.com.uy/cuales-fueron-los-huracanes-mas-mortiferos-america-n981450>*

Dos años después de la publicación de la metodología desarrollada por Xia en 2014 fue elaborado un artículo en el que se llevó a cabo una evaluación entre este criterio y el criterio de arrastre de personas obtenido empíricamente de Ramsbottom en 2006, mediante su implementación en dos casos de estudio reales en Eslovenia, con el fin de determinar el tipo de metodología que debería ser utilizado para la determinación del peligro a personas causado por inundaciones extremas. El trabajo realizado en (Kvočka, Falconer, & Bray, 2016) básicamente consistió en la comparación de los resultados de la implementación del método empírico de Ramsbottom con el método de base teórico-conceptual de Xia. Tras la realización de este trabajo se obtuvieron las conclusiones, mismas que determinarían las futuras líneas de investigación sobre este tema:

- Se demuestra la eficacia de los criterios de arrastre de personas desarrollados en formulas derivadas de un análisis basado en la física que considera todas las fuerzas que actúan en el fenómeno, sobre aquellos basados en estudios empíricos o cuasi-teóricos. Con lo cual queda evidenciada la importancia de la interpretación física y de la representación cada vez más realista de los procesos que influyen en la estabilidad del cuerpo humano en el agua en futuras investigaciones.
- Se comprueba la confiabilidad en la implementación de la metodología teórico-conceptual desarrollada por Xia. Sin embargo, las ecuaciones implementadas para ambos mecanismos de inestabilidad deben ser preferentemente calibrados con datos experimentales de pruebas realizadas en modelos humanos y no en personas

reales. Esto debido, en primer lugar, a la imposibilidad de llegar a un consenso común que tome en cuenta la influencia de las características físicas y psicológicas de las personas ante el peligro inherente de una inundación y, en segundo lugar, debido a que los resultados obtenidos de las ecuaciones calibradas con modelos humanos resultaron ser más conservadores en términos de riesgo, dado que un modelo humano no puede aprender a modificar su posición para resistirse al arrastre de la corriente de agua con el paso de la pruebas realizadas.

- Finalmente, se hace notar a importancia de las características psicológicas de las personas en el mantenimiento o la pérdida de la estabilidad humana en un flujo de agua, las cuales toman relevancia en la manera en que una persona se enfrenta al peligro asociado a un evento de inundación, siendo incluso estas, aún más influyentes que los atributos físicos.

Es preciso mencionar que en años recientes la consideración del peligro de arrastre a personas por un flujo de agua durante un evento de inundación ha comenzado a cobrar relevancia en diversos lugares del mundo, a partir de los avances de la investigación de este fenómeno. En este sentido, el DEFRA de la Agencia del Medio Ambiente del Reino Unido, describió los componentes de un evento de inundación, que influyen en el aumento de la susceptibilidad de una persona para ser arrastrada por una corriente de agua, siendo estas a saber : (1) el tirante o profundidad del agua, (2) la velocidad media del flujo, (3) la presencia de residuos o escombros en el flujo, y (4) la dinámica temporal y espacial de estos parámetros (Wallingford, 2006). Sin embargo, no debe ser olvidado que no únicamente las características hidrodinámicas del flujo deben ser consideradas ya que, en la historia del desarrollo de los criterios de arrastre de personas por inundaciones, se ha hecho hincapié en la necesidad de tomar en cuenta características adicionales que tienen que ver con los atributos físicos de las personas, mismos que resultan ser aún más importantes que las hidráulicas al momento de evaluar el peligro (Kvočka et al., 2016). Además, debe considerarse a la estabilidad del cuerpo humano cuando se encuentra dentro de una corriente de agua, como una propiedad que de manera similar varía en el tiempo y espacio, debido a los cambios en los procesos hidrodinámicos de un evento de inundación, a la dinámica de las características propias del lugar donde se genera este tipo de fenómenos (pendiente, tipo de suelo, presencia de escombros, etc.) y principalmente a las diferentes características físicas y atributos del cuerpo del cuerpo humano, tales como el peso, la talla, el volumen y densidad en las diferentes regiones del planeta.

### **2.2.2 Evaluación del peligro por inundaciones en México**

A pesar de que en nuestro país la problemática causada por inundaciones es recurrente, la inexistencia de programas de planificación o prevención, así como de acciones que permitan mitigar la problemática asociada a las inundaciones continúa presentándose incluso hasta nuestros días (Rodríguez Varela, Alcocer Yamanaka, Albornoz Góngora, Llaguno Guilberto, & Maldonado Silvestre, 2014). Bajo esta premisa, en los últimos años es común

observar el desarrollo de eventos de inundación generados por la ocurrencia de cualquier evento de tormenta clasificado como atípico. Estos eventos ocasionan de manera recurrente daños en la infraestructura urbana y la propiedad privada, así como afectaciones en las actividades diarias de las personas, llegando incluso al punto de poner en riesgo la seguridad e integridad física de la población.

Instituciones gubernamentales como la CONAGUA, CENAPRED, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y no gubernamentales como Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM) han dedicado sus esfuerzos al desarrollo de metodologías reconocidas para la generación de mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo asociado a eventos de inundación, los cuales son generados a partir de un análisis hidrodinámico en dos dimensiones.

La elaboración de estos mapas tiene como finalidad la identificación de zonas en riesgo por inundación dentro de una ciudad, y su utilización como base para la estimación de los costos ocasionados por daños estructurales y en el menaje de las viviendas (Alcocer-Yamanaka, Rodríguez-Varela, Bourguett-Ortiz, Llaguno-Guilberto, & Albornoz-Góngora, 2016). Distintos criterios han sido implementados en México para la definición del peligro asociado a eventos de inundación, de entre los que se encuentran:

- A) El criterio del Gobierno de Nueva Gales del Sur, Australia, (conocido como criterio de Dorrigo).

El criterio de Dorrigo ha sido implementado y ampliamente aceptado internacionalmente desde diciembre de 2006, cuando el gobierno de Nueva Gales del Sur, en Australia, solicitó realizar un estudio de riesgo por inundaciones del río Bielsdown, que atraviesa una localidad llamada Dorrigo. Este estudio tuvo como objetivo fundamental la construcción de un mapa, con el cual pudiesen ser identificadas las zonas más peligrosas en la ciudad, y de esta forma determinar una adecuada gestión del riesgo por inundaciones en dicho lugar. Entre los resultados de este estudio se encuentra la construcción del nomograma mostrado en la figura 2-28 que define umbrales de peligro o severidad en función de la combinación de tirantes y velocidades presentados en una inundación.

En este estudio se definió como severidad a la resistencia al vuelco de las paredes de las viviendas y se estableció un índice de severidad por colores para definir la resistencia al flujo de las mismas (CONAGUA, 2007). Un nivel de severidad muy alto equivale al potencial daño estructural de las edificaciones; un índice alto, especifica que la evacuación por medio de vehículos o caminando es inseguro; un nivel de severidad medio, indica el comienzo de la inestabilidad de las personas al intentar atravesar la corriente, y finalmente un índice bajo establece que, en caso necesario, los vehículos

pueden ser utilizados para evacuar a las personas y sus pertenencias, sin embargo, la seguridad de adultos mayores, niños y discapacitados puede verse afectada.

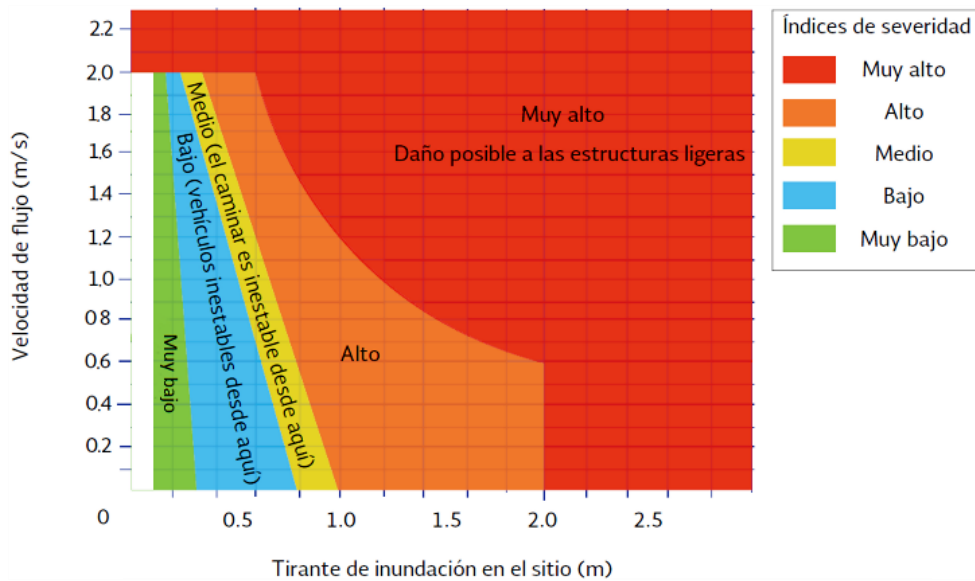


Figura 2-28. Índices de severidad del nomograma de Dorrigo

Fuente: Elaboración propia con datos del Programa Nacional de prevención Contra Contingencias Hidráulicas (PRONACCH), (CONAGUA, 2013)

- B) Criterio de la Oficina Federal de la Economía de las Aguas del Gobierno Francés (OFFE, por sus siglas en francés).

La OFFE de Francia desarrollo un criterio para evaluar el peligro ocasionado por un evento de inundación que ocurre en una zona urbana, el cual tiene su base teórica desarrollada en (Loat & Petrascheck, 1997) y se basa en las combinaciones de profundidades y velocidades mostradas en la figura 2-29. Teniendo en cuenta este criterio, un nivel bajo indica que las edificaciones y su menaje pueden sufrir daños leves por el arrastre de sedimentos y el agua, respectivamente; un nivel medio, indica que la seguridad de las personas puede verse afectada si se encuentran fuera de sus viviendas, y finalmente; un nivel alto, significa que la población se encuentra en riesgo dentro y fuera de sus viviendas ya que estas pueden sufrir daño y colapsar.

- C) Criterio de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA, por sus siglas en ingles).

La FEMA de los Estados Unidos desarrolló una metodología para la generación de mapas de peligro por inundaciones que, de manera similar a las dos anteriores, se basa en la combinación de las profundidades y velocidades que se desarrollan en el flujo de agua en un evento de inundación. La figura 2-30 muestra el nomograma creado por FEMA donde se establecen tres niveles de peligro. Un nivel bajo de peligro no representa una afectación a la población, pero las edificaciones pueden sufrir daños

ligeros; un nivel de peligro medio, indica que pueden presentarse daños en la integridad de las personas y afectaciones en las edificaciones; finalmente en un nivel de peligro alto, la vida de las personas se encuentra amenazada y se pueden presentar daños estructurales en las edificaciones.

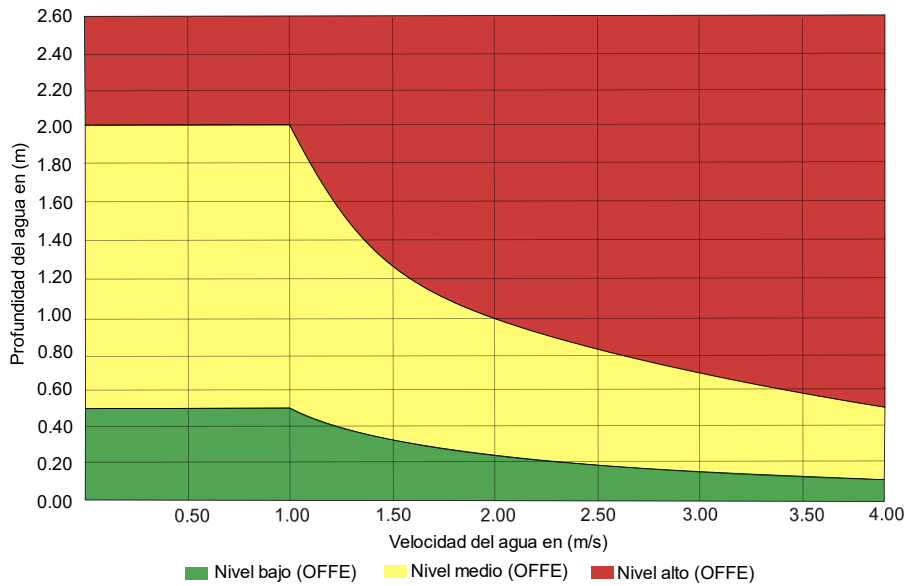


Figura 2-29. Niveles de peligro por inundación según el criterio de la OFEE de Francia. Elaboración propia de (Loat & Petrascheck, 1997).

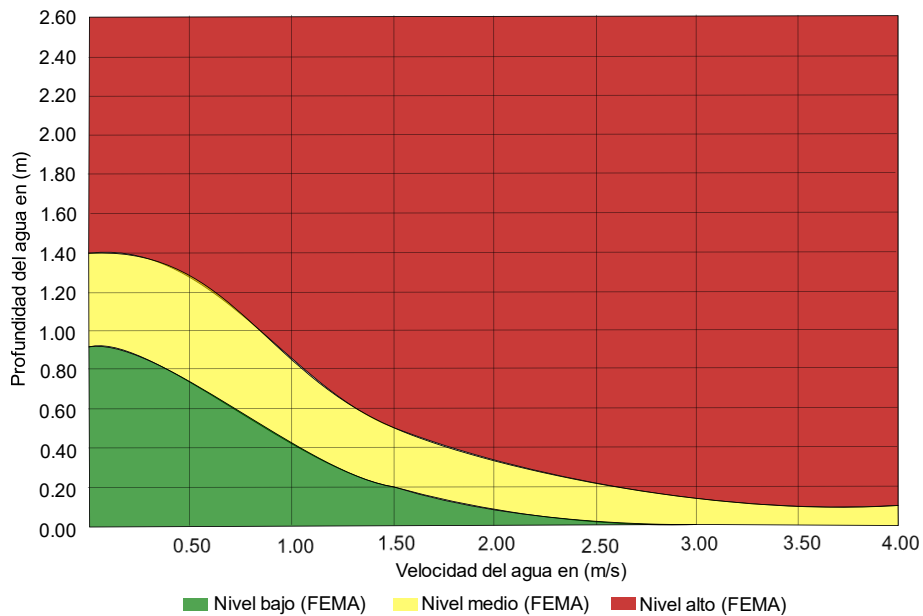


Figura 2-30. Niveles de peligro por inundación según el criterio de la FEMA de Estados Unidos. Elaboración propia de (FEMA, 2009).

La tabla 2-4 muestra una comparación de los criterios implementados en México, que han sido mencionados hasta ahora, mediante la suposición de cinco combinaciones diferentes de profundidades y tirantes. En ella es posible observar que el criterio de Dorrigo es el más conservador de los tres, dado que en las combinaciones consideradas los niveles de peligro por inundación identificados son mayores en comparación de los criterios restantes, seguido del FEMA. Además, el criterio de Dorrigo resulta ser superior al considerar en su definición la protección de personas, viviendas y vehículos, lo cual explica la razón de los criterios de Dorrigo y FEMA son lo más utilizados en la generación de mapas de peligro por inundación en nuestro país.

Tabla 2-4. Comparación de los niveles de peligro propuestos en los criterios Dorrigo, FEMA y OFFE.

Condiciones		Criterio de peligro por inundación		
Tirante en (m)	Velocidad en (m/s)	OFFE	FEMA	Dorrigo
0.7	0.1 a 0.5	Bajo	Bajo	Medio
1	0.3	Medio	Medio	Alto
1	1	Medio	Alto	Alto
2	< 0.25	Alto	Alto	Muy Alto
1	2	Alto	Alto	Muy Alto

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente a los criterios ya mencionados, en nuestro país son utilizados otros dos índices adicionales para la determinación del peligro asociado a las inundaciones: la resistencia al vuelco o volcamiento y el deslizamiento. Estos mapas se obtienen a partir de la combinación de las profundidades (h) y velocidades (v) ocurridas en un evento de inundación, como sigue:

- Índice de volcamiento =  $(v \cdot h)$
- Índice de deslizamiento =  $(v^2 \cdot h)$

Los criterios establecidos para la definición del peligro en cada índice se basaron en los límites definidos en la tabla 2-5. Los cuales tienen su base teórica en las siguientes consideraciones.

Para el caso del índice de volcamiento:

- Un tirante menor a 0.3 m se considera como peligro nulo dado que el nivel de la banqueta promedio no supera esta altura.
- En el rango de 0.3 a 0.5 m el peligro se considera bajo ya que el daño a la estructura de edificaciones y menaje no es significativo.
- Con profundidades entre 0.5 y 1.5 m el nivel de peligro se considera medio dado que el daño en estructuras y el menaje comienza a ser significativo.

Para el caso del índice de deslizamiento:

- Se tomó en cuenta el trabajo de investigación realizado en (Nanía Escobar, 1999), donde se analizó la estabilidad al deslizamiento de personas ante la fuerza de arrastre del flujo de agua cuando estas intentaban cruzar una calle pavimentada. De esta tesis doctoral se obtuvo un valor de  $v^2 \cdot h$   $1.23 \text{ m}^3/\text{s}^2$  como máximo para que una persona de 60 Kg cruzara sin problemas, estableciéndose límites similares al índice de resistencia al vuelco.

*Tabla 2-5. Criterios de volcamiento y deslizamiento para la generación de mapas de peligro por inundación.*

Nivel de peligro	Profundidad (m)	Índice	
		Volcamiento ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Deslizamiento ( $\text{m}^3/\text{s}^2$ )
Nulo	$h < 0.3$	$vh < 0.3$	$v^2h < 0.3$
Bajo	$0.3 \geq h < 0.5$	$0.3 \geq vh < 0.5$	$0.3 \geq v^2h < 0.5$
Medio	$0.5 \geq h < 1.5$	$0.5 \geq vh < 1.5$	$0.5 \geq v^2h < 1.23$
Alto	$h \geq 1.5$	$vh \geq 1.5$	$v^2h \geq 1.23$

*Fuente: (IMTA, 2015)*

Como se describió anteriormente, México es un país que ha tomado en cuenta un extenso número de criterios para evaluación del peligro asociado al desarrollo de una inundación, sin embargo, todos continúan teniendo un enfoque aún muy general en la definición de los niveles de peligro y de las consecuencias que pueden esperarse en las zonas donde se presentan, las cuales se limitan a los daños ocasionados en automóviles, edificaciones y personas de manera combinada y no tan clara.

Investigaciones recientes alrededor del mundo en materia de la determinación del peligro asociado por inundaciones han tomado como patrón la descomposición de sus análisis, es decir, la representación cada vez más realista de los procesos que influyen en la estabilidad o el daño ocasionado en el objeto en estudio que se trate, lo cual repercute directamente en la determinación del peligro y, en consecuencia, en la evaluación del riesgo ocasionado en cualquier evento de inundación. Lo cual, se ha realizado de manera opuesta en nuestro país, donde los criterios que son utilizados tienen su base en consideraciones y formulas empíricas o cuasi-teóricas, determinadas a partir de la combinación de las profundidades y velocidades que se desarrollan en un evento de inundación, sin tomar en cuenta la naturaleza física del fenómeno.

## **CAPÍTULO 3. ZONAS DE ESTUDIO**

En este capítulo se presentará la descripción de las características más importantes de las zonas de estudio de nuestro país que fueron seleccionadas para la aplicación de los criterios de arrastre de personas y su posterior evaluación. Estas corresponden a las ciudades de Río Bravo, en el Estado de Tamaulipas y León, en el Estado de Guanajuato.

Algunas de las consideraciones que fueron tomadas en cuenta para elegir ambas ciudades son las siguientes:

- Ambas zonas urbanas son afectadas de manera recurrente por eventos de inundación, razón por la cual se encuentran comprendidas dentro del conjunto de ciudades que componen la primera etapa del Programa de Estudios de Inundaciones Fluviales para las Ciudades Medias del País del ARN de la CONAGUA.
- Río Bravo y León se encuentran comprendidas dentro de las ciudades medias del país, ocasionando que los resultados de la implementación de las metodologías consideradas sean mucho más representativos y visuales para su comparación, a



diferencia de otras como la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), Guadalajara o Monterrey.

- Otra de las razones principales consiste en que los criterios considerados en este trabajo de investigación se encuentran enfocados en la determinación del peligro de arrastre de personas ante un flujo específico de rápida evolución (flash floods) donde la vida, antes que los valores económicos, puede verse amenazada. Siendo el caso del tipo de inundaciones que comúnmente se desarrollan en las zonas urbanas consideradas.

Con respecto a este punto es preciso aclarar que, aunque el tipo de eventos de inundación que se desarrollan principalmente en sur y sureste del país, no son representativas para los fines de esta tesis, no significa que la aplicación de los criterios que se desarrollaran más adelante no pueda llevarse a cabo en dichos casos.

- En el capítulo 5 serán mencionadas algunas más de las razones por las que fueron elegidas estas zonas urbanas, las cuales tienen su base en aspectos más técnicos, propios de la modelación hidrológico-hidrodinámica y de la evaluación de los criterios de arrastre de personas por eventos de inundación.

### **3.1 Ciudad Río Bravo, Tamaulipas**

La ciudad de Río Bravo Tamaulipas es una zona urbana caracterizada por la frecuencia de inundaciones, consecuencia de su ubicación en una región que es constantemente afectada por la recurrencia de eventos de tormenta de tipo ciclónico que se desarrollan en el Atlántico, así como de tormentas invernales ocasionadas por el desplazamiento hacia el sur de masas de aire frío, aunque estas últimas con mucho menor impacto. Además, los efectos de estos eventos se ven incrementados dado que la ciudad cuenta con una limitada capacidad de drenaje característica de un relieve plano.

#### **3.1.1 Descripción**

El municipio de Río Bravo se encuentra en la llanura de la porción final de la cuenca del río Bravo que se localiza en el noreste del país y del Estado de Tamaulipas, colindando al norte con Estados Unidos a lo largo del cauce del río Bravo; al sur, con los municipios de Méndez y San Fernando; al este, con los municipios de Valle Hermoso y Matamoros y, finalmente al sur, con el municipio de Reynosa. Su territorio posee una superficie total de 1,562.94 km<sup>2</sup>, representando en 2.68% del territorio total de la entidad. Además, cuenta con un relieve que va de los 20 en la parte noreste del municipio hasta una elevación máxima de los 150 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) en su parte suroeste (Ayuntamiento-RíoBravo, 2016).

La cabecera municipal se encuentra conformada por la zona urbana con misma denominación, Río Bravo, la cual se localiza entre los 26° 00' 51" y 25° 57' 42" de latitud norte y los 98° 08' 46" y 98° 02' 31" de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 26.87 km<sup>2</sup> y un relieve relativamente plano con una altura promedio de los 26 m.s.n.m.

Por otra parte, la cuenca hidrológica definida, que constituye la primer zona de estudio de este trabajo de investigación, se encuentra georreferenciada entre los 98° 02' 29.9" y 98° 08' 45.6" de longitud oeste y los 25° 58' 05.4" y 26° 00' 46.8" de latitud norte, se extiende a lo largo 60.5 km del cauce del río Bravo desde la derivación del Canal Anzaldúas del río Bravo hasta el punto de control hidrológico-hidráulico definido aguas abajo de la ciudad de Río Bravo, que incluye parte del territorio municipal de Reynosa y de los Estados Unidos, con una extensión de 617.70 km<sup>2</sup>, ver Figura 3-1.

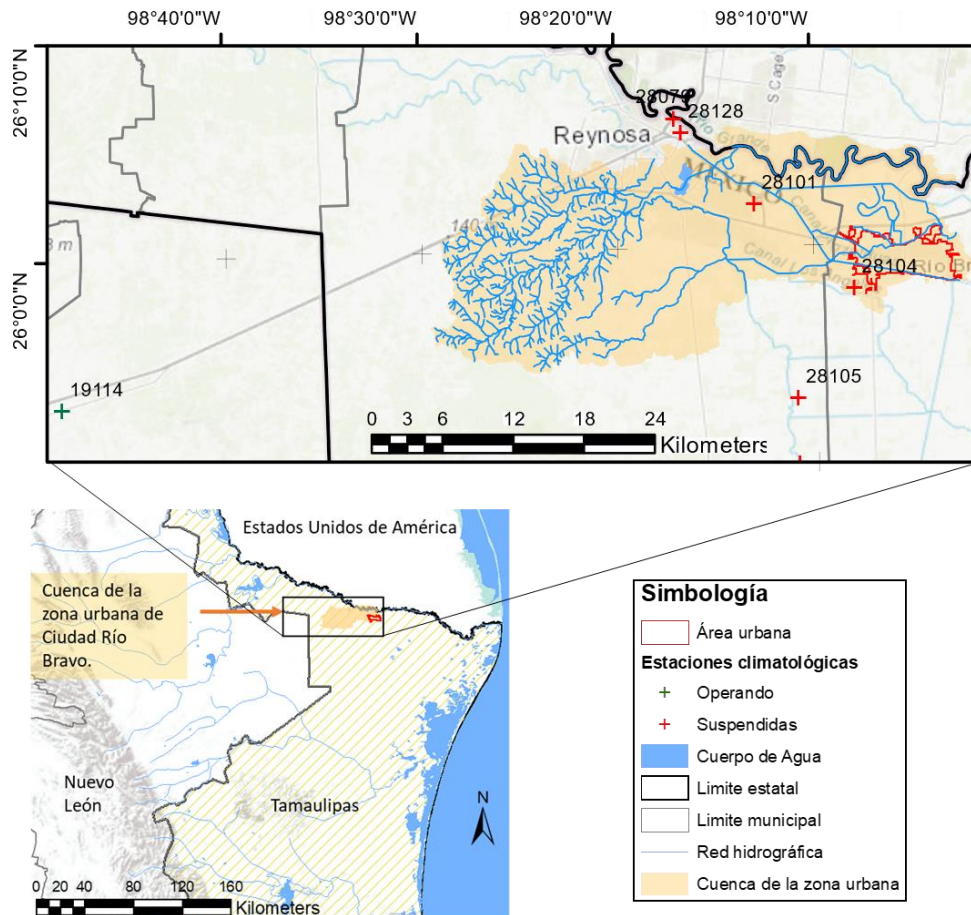


Figura 3-1. Localización de la zona urbana y cuenca de aportación de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.

Fuente: Elaboración propia.

El municipio de Río Bravo cuenta con dos puentes internacionales, que constituyen las infraestructuras que han impulsado el desarrollo de la región, al ser las vías de comunicación con los Estados Unidos y en específico con la entidad vecina más importante, Texas. Además,

cuenta con 4 carreteras importantes que brindan comunicación con los municipios vecinos, así como la carretera Federal, una autopista de cuota y vías férreas que conectan a esta región con la capital de Estado de Nuevo León, Monterrey.

### 3.1.1.1 Geología, orografía y edafología

Según los datos de INEGI, la formación geológica de la zona de estudio se remonta a los inicios de la era Cenozoica. En el poniente, con una extensión de 43.07 km<sup>2</sup> (6.97 %), se destacan formaciones correspondientes al período Neógeno, donde se presentan las elevaciones más altas, así como la presencia de rocas sedimentarias como lutitas y areniscas las cuales, a pesar de su porosidad, son consideradas como impermeables ocasionando el desarrollo de inundaciones rápidas en esta región. En la parte central, con una extensión territorial poco mayor de la mitad de la zona de estudio, con 359.31 km<sup>2</sup> (58.17%), se presentan rocas sedimentarias caliches o toscas del Plioceno, que son características de regiones áridas o semiáridas generadas por la evaporación de aguas subterráneas que ascienden por capilaridad a estratos superiores. Finalmente, en la parte oriente con una extensión de 215.32km<sup>2</sup> (34.86%), se encuentran los suelos más recientes que datan del cuaternario, que consisten en los depósitos aluviales de la cuenca del río Bravo, ver Figura 3-2.

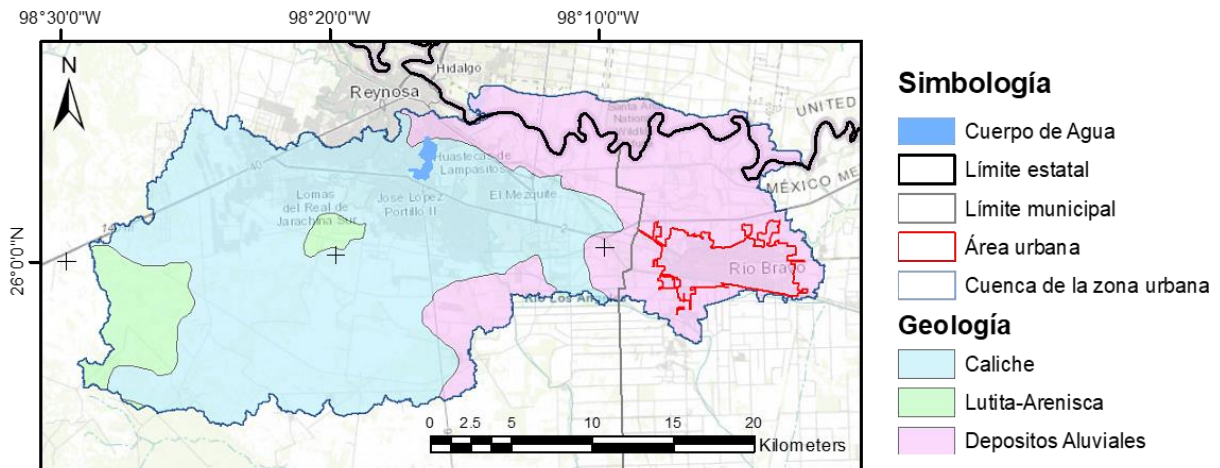


Figura 3-2. Distribución de los diferentes tipos de rocas en la cuenca de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.

Fuente: INEGI, Elaboración propia.

Una de las principales características con las que cuenta esta región y por lo que fue elegida, es su orografía, ya que se compone por la presencia de extensas planicies interrumpidas por algunos lomeríos de pendientes que oscilan entre los 5° y 15° (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2012). De hecho, el municipio casi en su totalidad se encuentra dentro de provincia fisiográfica de la Llanura Costera del Golfo. La Tabla 3-1 se presenta una descripción general de las dos geomorfologías presentes en la zona de estudio.

Tabla 3-1. Geomorfología general de la zona de estudio - Río Bravo.

Geomorfología	Descripción
<b>Llanura aluvial</b>	Superficie relativamente plana con muy pocas variaciones en altura y pendiente. Esta geomorfología es característica de zonas cercanas al cauce de ríos donde inundaciones esporádicas depositan nuevos sedimentos y nutrientes constituyendo suelos fértiles.
<b>Lomerío</b>	Se compone de elevaciones del terreno de poca altura y normalmente de forma redondeada generadas por la erosión, que constituyen el primer grado posterior a la llanura.

Fuente: (Espinosa Rodríguez & Arroyo López, 2011).

Por otra parte, la cuenca hidrográfica considerada cuenta con elevaciones que oscilan desde los 18 m.s.n.m. en la parte noreste y hasta los 158 m.s.n.m. en la parte suroeste de la zona de estudio, con una elevación media de los 56.91 m.s.n.m. La Figura 3-3 muestra un mapa de la zona de estudio de los datos de altimetría provenientes de sistemas aéreos de rayo láser conocidos como *Light Detection And Ranging* (LiDAR) a 5 metros de resolución.

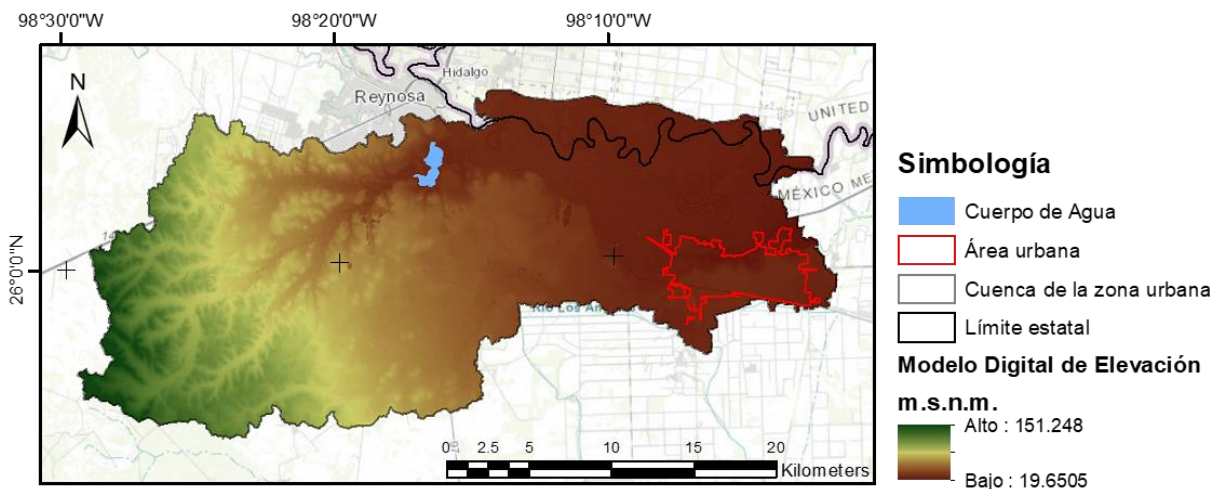


Figura 3-3. Modelo digital de elevaciones LiDAR (5m), en la cuenca de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.

Fuente: INEGI, Elaboración propia

En la cuenca en estudio se presentan 4 tipos de suelo, los cuales son descritos en los siguientes apartados (INEGI, 2004):

- El xerosol o también conocido como suelo seco, es el predominante en la zona de estudio con un 61.34% (378.92 km<sup>2</sup>) de la superficie total analizada, este tipo de suelo se desarrolla en la parte norte y es común de zonas áridas y semiáridas, se caracteriza por tener una baja susceptibilidad a ser erosionado y por presentar vegetación de pastizales y matorrales, a pesar de que posee un contenido bajo de materia orgánica, su rendimiento agrícola está en función de la disponibilidad de agua para riego.

- El vertisol, con el 15.85% (97.90 km<sup>2</sup>), se presenta en el noreste de la zona de estudio. Este tipo de suelo es común de regiones con clima templado y cálido, así como de sitios con una marcada estación seca y lluviosa. Presentan un alto contenido de arcilla expansiva con la humedad, una baja susceptibilidad a la erosión y a pesar de que tienen un alto riesgo de salinización, su uso en la agricultura es muy extenso, variado y productivo.
- El castañozem o tierra castaña, con el 14.02% (86.60 km<sup>2</sup>), se localiza en el suroeste de la zona de estudio. Este suelo se encuentra en la transición de zonas áridas a climas más húmedos. Se caracterizan por presentar una capa superior de color rojizo rica en materia orgánica y nutrientes, por lo que son considerados como suelos alta fertilidad, sin embargo, a diferencia de los anteriores son susceptibles a la erosión. En nuestro país son ampliamente utilizados en la agricultura y en la ganadería intensiva (pastos cultivados) y extensiva (pastoreo).
- Finalmente, la rendzina con una superficie del 8.79% (54.28 km<sup>2</sup>) del total, se ubica en una pequeña parte al oeste de la zona de estudio. Es un suelo arcilloso poco profundo que se encuentra presente en climas semiáridos, tropicales o templados. Se caracteriza por tener una capa superficial abundante en materia orgánica y muy fértil que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal. Pueden ser utilizados en la agricultura y ganadería, aunque son moderadamente susceptibles a la erosión.

La Figura 3-4 muestra un mapa con la edafología presente en la zona de estudio.

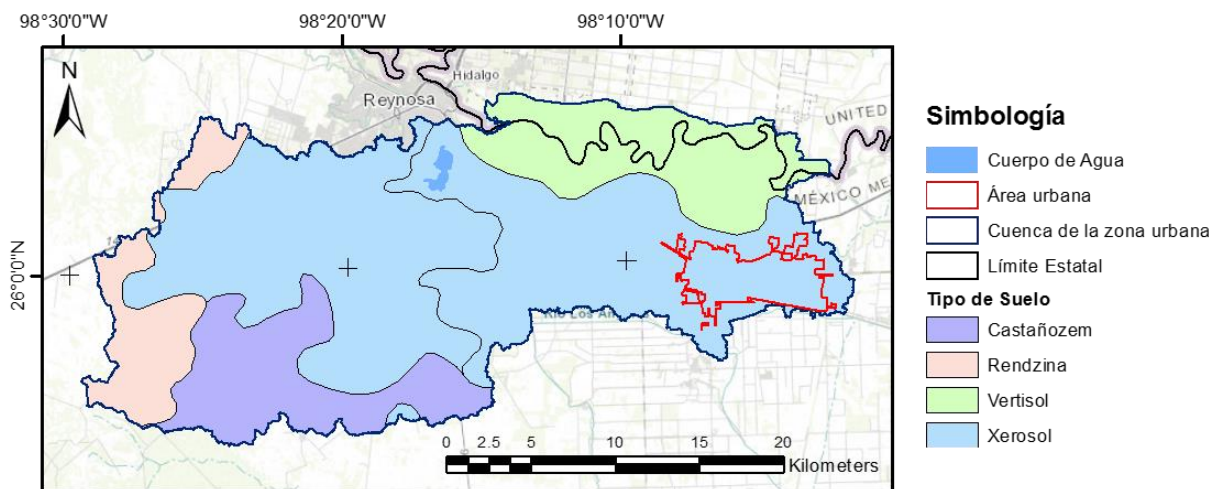


Figura 3-4. Edafología en la cuenca de la zona urbana de Río Bravo, Tamaulipas.

Fuente: INEGI, Elaboración propia.

### 3.1.1.2 Uso de suelo y vegetación

En este apartado se presenta la distribución del uso de suelo y vegetación que presenta la zona de estudio, en donde se toma en cuenta la base de datos del Centro de investigación: "Global Land Cover Facility (GLCF)" de la Agencia Norteamericana de Aeronáutica y Administración del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés), que desde el año 1999 ha dedicado sus esfuerzos en la investigación, desarrollo y distribución de productos que explican aspectos de la cobertura terrestre, así como de los factores que influyen en su dinámica espacio-temporal (Bartholomé & Belward, 2005; Gong et al., 2013; Lindsay et al., 1999).

Aproximadamente el 37.22% (229.91 km<sup>2</sup>) de la extensión territorial de la cuenca en estudio (617.70 km<sup>2</sup>) corresponde a Matorrales, particularmente de tipo de matorral tamaulipeco espinoso característico del bajo río Bravo, que se localiza particularmente en la parte oeste de la cuenca y en pequeñas extensiones entre la ciudad de Reynosa y Río Bravo. En segundo lugar, se encuentra la tierra cultivada con el 29.15% (180.04 km<sup>2</sup>), la cual se localiza en las elevaciones más bajas hacia el noreste de la cuenca, entre los principales cultivos se la región se encuentran el maíz, el sorgo, las hortalizas y el trigo. La zona urbana tiene el tercer lugar en extensión con el 19.48% (120.35 km<sup>2</sup>) la cual se compone por la ciudad de Río Bravo y parte de Reynosa. El porcentaje restante de la zona en estudio se conforma por praderas (6.50%), bosques (4.09%), humedales (2.48%) y cuerpos de agua (1.07%). La Tabla 3-2 y Figura 3-5, muestran los datos obtenidos de la base de datos del GLCF, así como su distribución espacial en la cuenca en estudio.

*Tabla 3-2. Vegetación y uso de suelo en la cuenca de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.*

Tipo de suelo	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Terreno cultivado	180.04	29.15
Bosque	25.29	4.09
Pradera	40.13	6.50
Matorral	229.91	37.22
Humedal	15.35	2.48
Cuerpo de agua	6.63	1.07
Zona urbana	120.35	19.48
<b>Total</b>	<b>617.70</b>	<b>100.00</b>

*Fuente: Elaboración propia con datos del GLCF.*

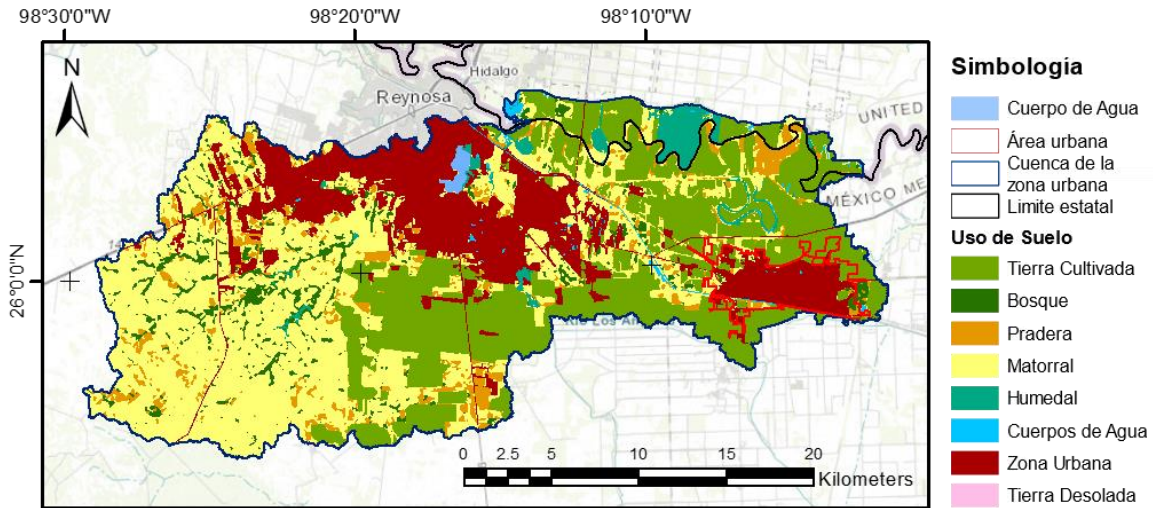


Figura 3-5. Uso de suelo y vegetación en la zona urbana de ciudad Río Bravo, Tamaulipas.  
Fuente: GLCF. Elaboración propia.

### 3.1.1.3 Clima

Siendo el clima el conjunto de los fenómenos meteorológicos que influyen sobre una determinada zona, a saber: temperatura, precipitación y humedad, dirección y fuerza del viento, presión atmosférica, etc. México cuenta con climas variados, presentando en su territorio desde los climas cálidos de las costas del Atlántico y Pacífico; secos, en la parte del altiplano y norte; así como los templados, característicos de las sierras y de la zona centro del país.

Conforme a la clasificación de *Köppen* adaptada por Enriqueta García en el Manual de Características Edafológicas, Fisiográficas, Climáticas e Hidrográficas de México (García, 2008) y según los datos publicados en la página web del INEGI, la cuenca en estudio que incluye la zona urbana de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas, presenta predominantemente un clima seco estepario cálido con lluvias escasas todo el año ( $BS_0(h')hx'$ ), en el 72.3% ( $446.40 \text{ km}^2$ ) de la extensión territorial total de la cuenca. En segundo lugar, en la parte oeste y este de la zona de estudio, con el 26.0% ( $160.89 \text{ km}^2$ ) se tiene un clima semiseco estepario cálido con lluvias escasas todo el año ( $BS_1(h')hx'$ ). Finalmente, en una pequeña porción al sureste con el 1.7% ( $10.41 \text{ km}^2$ ) un clima semicálido subhúmedo con lluvias escasas todo el año ( $(A)Cx'$ ). La Figura 3-6 muestra la distribución climática en la zona de estudio.

Para el análisis de las temperaturas y precipitaciones que se presentan en la zona de estudio, se utilizó la base de datos climatológica Nacional CLimate COMputing Project (CLICOM), el cual es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas.

Para la zona de estudio de ciudad Río Bravo fue utilizada la información de las estaciones climatológicas 28104 y 28101 denominadas Río Bravo y Reynosa, respectivamente, las cuales se encuentran dentro de la cuenca hidrográfica definida. Desafortunadamente, ninguna de ellas continúa operando y cuenta con al menos 30 años de registro continuo, por lo que fue necesario hacer uso de la información de estaciones vecinas a la cuenca para la integración de la climatología en la región. La Tabla 3-3 muestra la información general de las estaciones consideradas, mientras que la Figura 3-6 muestra la ubicación de las estaciones climatológicas consideradas en este análisis, haciendo la distinción entre las estaciones que se encuentran operando y las suspendidas.

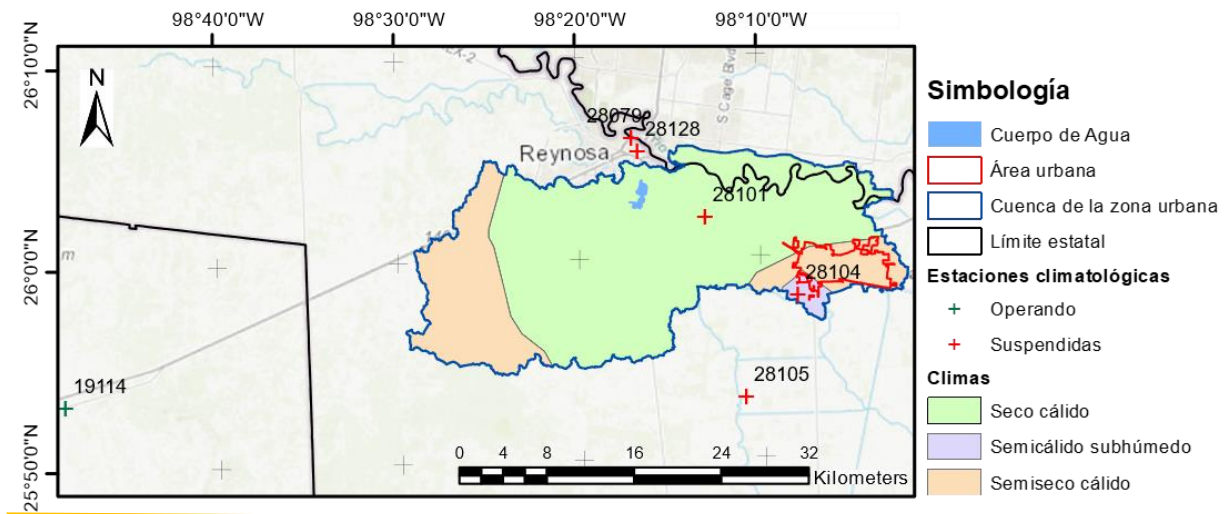


Figura 3-6. Clima en la cuenca de la zona urbana de ciudad Río Bravo, Tamaulipas.

Fuente: INEGI, Elaboración propia.

Tabla 3-3. Características de las estaciones climatológicas en la zona de estudio – ciudad Río Bravo, Tamaulipas.

Número	Clave	Nombre	Período	Años	Estado	Organismo	Cobertura en la cuenca
1	28104	Río Bravo	1/01/1961 - 31/08/1987	26	Suspendida	CONAGUA-DGE	79.82%
2	28101	Reynosa	1/01/1961 - 31/08/1987	26	Suspendida	CONAGUA-DGE	20.18%
3	28079	Reynosa (SMN)	01/01/1961 - 30/04/1970	9	Suspendida	CONAGUA-SMN	NA
4	28128	Reynosa (DGE)	1/03/1980 - 31/12/1997	17	Suspendida	CONAGUA-DGE	NA
5	28105	Reynosa	1/01/1961 - 31/08/1987	26	Suspendida	CONAGUA-DGE	NA
6	19114	El Cuervito	1/01/1980 - 31/12/2015	36	Operando	CONAGUA-DGE	NA

NA: No Aplica.

Fuente: Elaboración propia con datos del CLICOM.



## Temperatura

La temperatura media anual en la región, registrada en la estación climatológica considerada, fue de 23.62 °C. La temperatura máxima promedio se presenta en el mes de agosto con 37.34 °C, mientras que la mínima promedio ocurre en el mes de enero con una temperatura de 8.22°C. Los meses más calurosos son de mayo a septiembre y los meses más fríos son de noviembre a febrero, ver Figura 3-7.

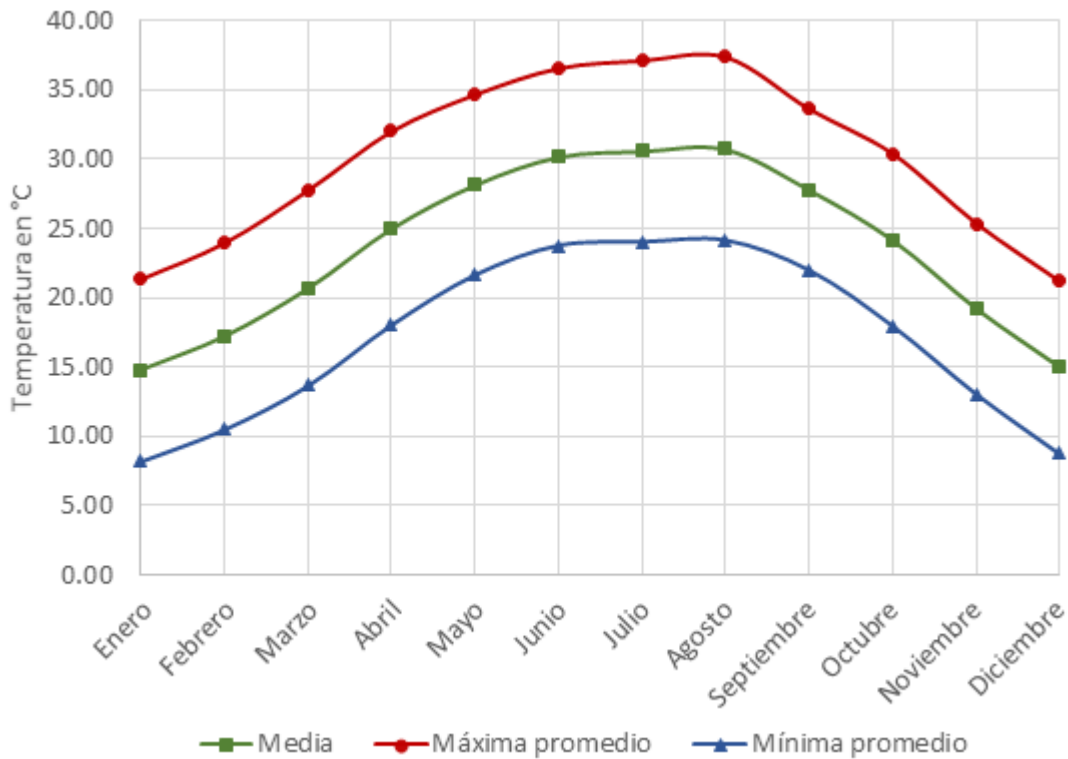


Figura 3-7. Temperaturas: media (verde), máxima promedio (rojo) y mínima promedio (azul) mensuales en la zona de ciudad Río Bravo, Tamaulipas.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de CLICOM.

## Precipitación

La Figura 3-8 muestra la distribución espacial de la precipitación media anual de la cuenca hidrológica considerada, la cual oscila entre los 552.88 y 584.04 mm/año. Es posible observar que esta es menor en la parte central de la cuenca y va aumentando gradualmente hacia el oeste, donde se encuentran los niveles más altos de elevación; así como hacia el este, donde se encuentra la desembocadura del río Bravo.

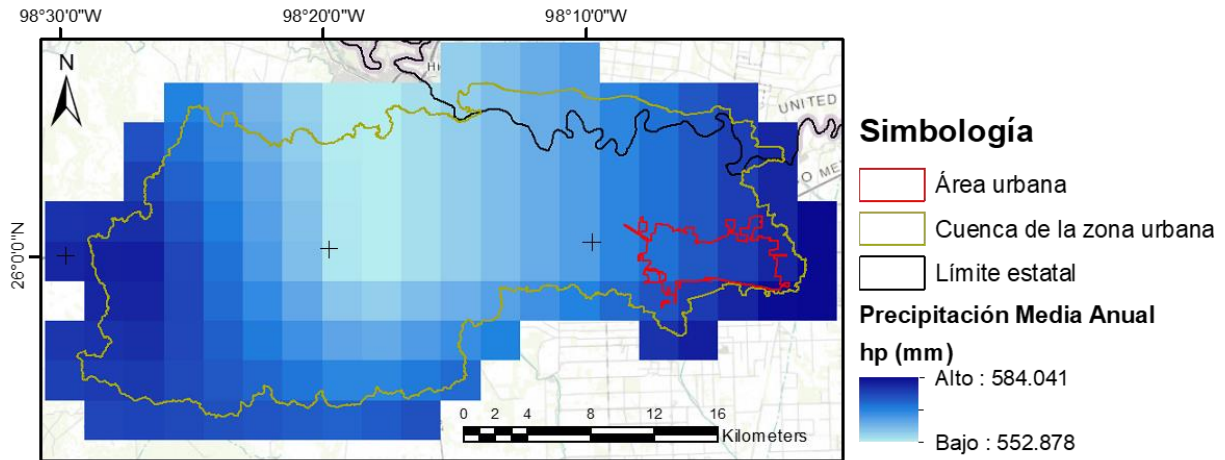


Figura 3-8. Precipitación media anual en la cuenca de la zona urbana de ciudad Río Bravo, Tamaulipas. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de CLICOM en malla.

La precipitación media anual obtenida tras el análisis de las estaciones climatológicas consideradas es de 562.4 mm/año, siendo similar a la obtenida por lo datos en malla del CLICOM. Teniendo en cuenta la distribución temporal de la precipitación en la zona de estudio, se tiene que la mayor parte de ella (65.8%) ocurre en la temporada de lluvias que comprende los meses de mayo a septiembre. En contraste, la temporada seca que presenta el 19.85% de la precipitación media anual, incluye los meses de noviembre a marzo. Abril y octubre son meses de transición entre ambas temporadas. Por otra parte, la precipitación máxima promedio mensual se presenta en el mes de septiembre con 112.94 mm y la mínima ocurre en el mes de febrero con una precipitación en promedio mensual de 18.02 mm, ver Figura 3-9.

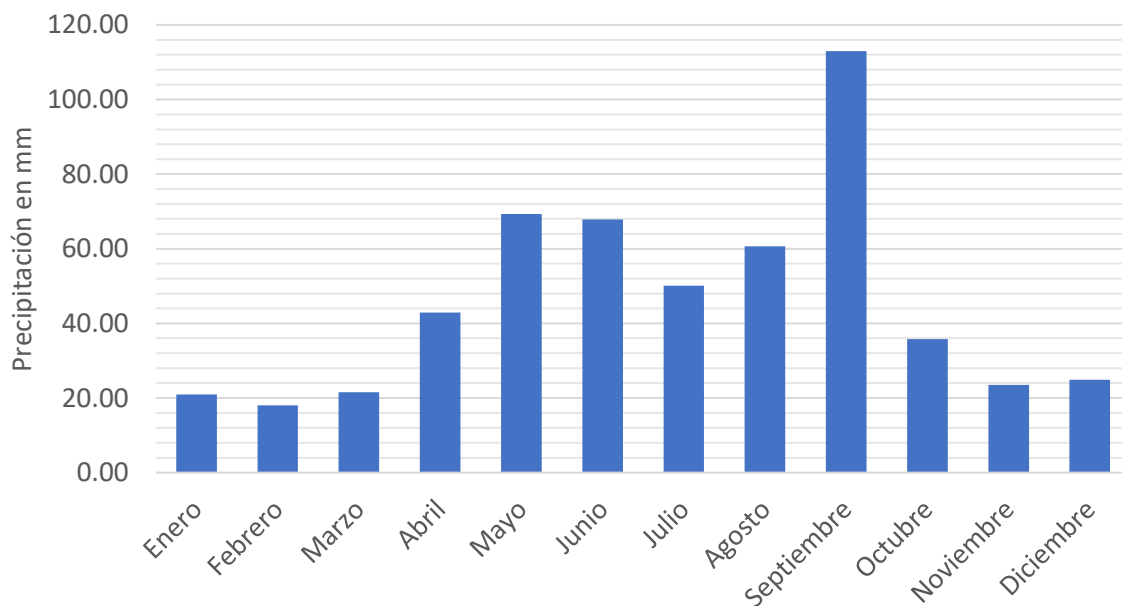


Figura 3-9. Distribución temporal de la precipitación media anual en la zona de ciudad Río Bravo. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del CLICOM.

### 3.1.1.4 Hidrografía

Hidrológicamente, la cuenca en estudio se ubica dentro de la Región Hidrológica (RH) 24, Bravo-Conchos, que se ubica en el noreste del país en la frontera con los Estados Unidos, formando parte en su totalidad del sistema hidrológico de la cuenca del río Bravo, específicamente dentro de la subregión hidrológica: 24-G Bajo Río Bravo, que comprende desde la localidad de Nuevo Laredo, Tamaulipas, y Laredo, Texas, hasta llegar a su desembocadura en el Golfo de México. En este sitio, a causa de la suave pendiente característica de la Llanura Costera del Golfo, el río Bravo presenta un cauce sinuoso a través del cual se generan desbordamientos y en consecuencia inundaciones.

El río Bravo o Grande constituye el escurrimiento superficial más importante de esta región, ya que ocupa el 6° lugar de los ríos más caudalosos de México. Se origina en el Bosque Nacional del Río Grande al sur del Estado de Colorado, Estados Unidos, a partir de la unión de numerosos arroyos que fluyen hacia el sureste a través de Nuevo México y en el extremo occidental de Texas hasta llegar a territorio nacional en la Mesa Norte, donde cambia su dirección hacia el este sirviendo como frontera natural entre México y los Estados Unidos siguiendo su curso en los límites al norte de los Estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas sobre la Llanura Costera del Golfo, hasta su desembocadura en el Golfo de México, teniendo una longitud aproximada de 3,034 km y un escurrimiento medio anual de los 13 mil millones de metros cúbicos (CONAGUA, 2012). Se estima que solo en la parte que corresponde a México se genera un escurrimiento medio anual de los 6.383 Mm<sup>3</sup>, de los cuales la mayor aportación (36.75%) corresponde al río Conchos, seguido del 20.93%, 16.5% correspondientes a los ríos San Juan y Salado, respectivamente (CONAGUA, 2015).

La presa Internacional Falcón constituye la infraestructura hidráulica más importante de la región ubicándose 136 km aguas abajo de la ciudad de Nuevo Laredo sobre el cauce del río Bravo, entre sus funciones se encuentran el aprovechamiento de los escurrimientos superficiales para el riego, generación de energía eléctrica, y principalmente, el control de avenidas extraordinarias. Adicionalmente, se cuenta con las presas derivadoras: Anzaldúas y Retamal que cumplen con la doble función de la regulación de las avenidas del río Bravo y de almacenamiento de agua para su uso en el distrito de riego 025 Bajo Río Bravo.

La cuenca hidrológica definida tiene un área de 617.70 km<sup>2</sup> e incluye un tramo del río Bravo que tiene una longitud de 60.5 km e inicia desde la derivación del canal Anzaldúas, hasta el punto de control hidrológico-hidráulico ubicado aguas debajo de la zona de estudio, ver Figura 3-10. Además, en esta figura se observa que la cuenca se encuentra dentro de la cuenca hidrológica denominada R. Bravo-Matamoros-Reynosa, así como en la subcuenca con clave RH24Ab denominada R. Bravo-Reynosa, según datos de la red hidrográfica nacional del INEGI. Asimismo, es posible notar que la zona de estudio se encuentra irrigada por los canales artificiales: Anzaldúas, Río Bravo y Ramal 2; los cuales fueron construidos para ser utilizados como drenes y canales de riego para distribuir el agua proveniente del río San Juan y Bravo,

hacia zonas agrícolas. Sin embargo, con el aumento poblacional de la ciudad estos canales también han sido usados como medio de drenaje de aguas pluviales y residuales.

Debido a la orografía relativamente plana de la región, la ciudad de Río Bravo presenta una limitada capacidad de drenaje, provista únicamente por el canal Anzaldúas al sur de la zona urbana, así como por los canales Ramal 2 y Río Bravo en el norte, ver Figura 3-10. Esto ha provocado numerosos eventos de inundación de origen fluvial generados por lluvias intensas de origen ciclónico aguas arriba en la cuenca o por la deficiente operación de la Presa Falcón.

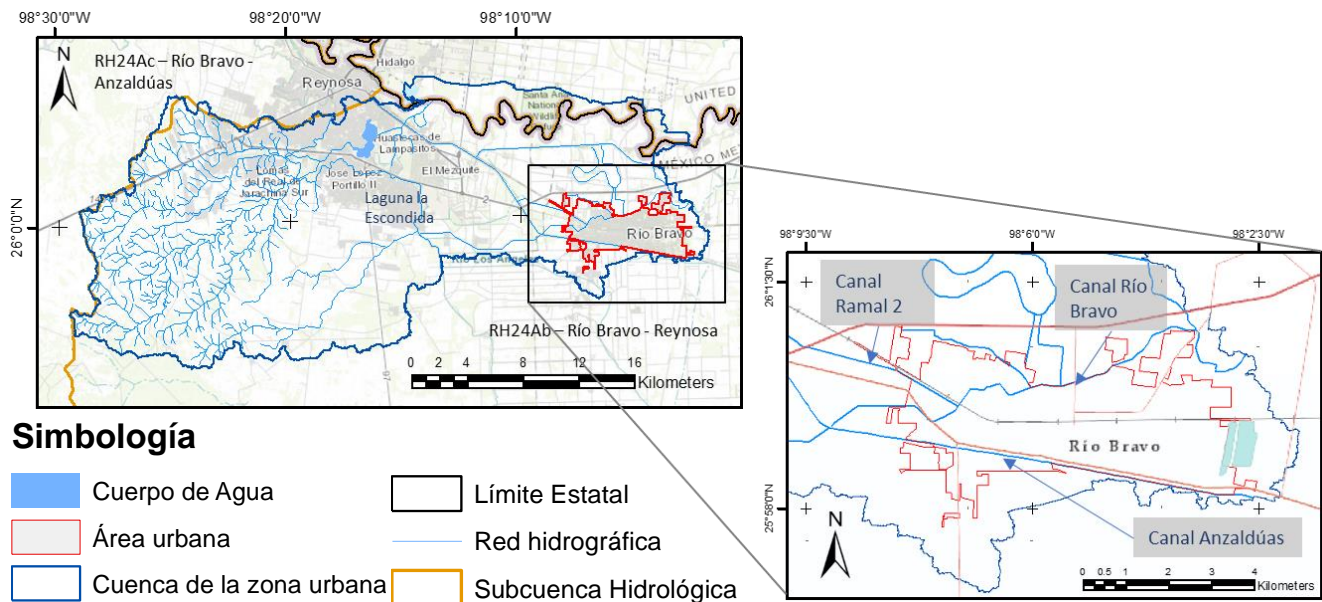


Figura 3-10. Hidrografía en la cuenca de la zona urbana de ciudad Río Bravo, Tamaulipas.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2 Inundaciones históricas

La recopilación de datos históricos sobre inundaciones que han ocurrido en la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas, posee una gran importancia para poder entender los eventos del presente y estar mejor preparados para enfrentar el riesgo provocado por inundaciones en el futuro. Esto puede ser realizado mediante el análisis y comprensión de como el peligro por inundación varía a través de dicha zona e identificando las zonas históricamente afectadas dentro de ella, con el fin de tomar decisiones informadas en la gestión del riesgo por inundación a la propiedad existente (viviendas, automóviles, etc.), pero principalmente a las personas, con el propósito de evitar su presencia en zonas con un alto nivel de peligro dentro de su ciudad.

Por su ubicación geográfica a orillas del río Bravo y en colindancia con los canales mencionados en la sección anterior, la ciudad de Río Bravo es afectada frecuentemente por

inundaciones, aun a pesar del control del flujo de agua provisto por la presa internacional Falcón y la presa de derivación Anzaldúas, la cuales se encuentran ubicadas aguas arriba de la zona urbana en estudio, sobre el cauce principal del río Bravo.

La Tabla 3-4 presenta un resumen de las inundaciones históricas más importantes que se han registrado en la zona urbana de la ciudad de Río Bravo, reportándose la fecha de ocurrencia del fenómeno, el evento meteorológico que lo generó, la lluvia acumulada (si existe información), así como los impactos de mayor relevancia.

Finalmente, la Figura 3-11 muestra imágenes de algunos de los eventos registrados en la Tabla 3-4, demostrando la devastación causada por inundaciones en esta zona en estudio.

*Tabla 3-4. Inundaciones históricas en la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.*

Fecha	Fenómeno meteorológico	Lluvia (mm)	Impactos registrados
<b>20/09/1967</b>	Huracán Beulah		El huracán causo severos daños en la ciudad, lo mismo que en las ciudades de Reynosa, Camargo y Matamoros. La entonces Secretaría de la reforma Agraria (SRA) estimo pérdidas por 900 millones de pesos, más de 100 mil hectáreas inundadas y 50 mil afectados solo en la ciudad de Río bravo. Se destacó la escasez de alimentos y agua potable, así como la interrupción de comunicaciones.
<b>07/10/1996</b>	Inundación fluvial en el bajo río Bravo		Afectaciones en las ciudades de Reynosa, Río Bravo y Matamoros en el Estado de Tamaulipas, causando alrededor de 9,000 afectados.
<b>30/09/2000</b>	Ciclón tropical "Keith"	336 mm	Afectaciones en los Estados de Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Veracruz y Tamaulipas, en este último se registró la muerte de 6 personas y daños por 118 mil pesos.
<b>25/04/2004</b>	Frente frío n°52	70 a 150 mm	Se anegaron 47 colonias en los municipios de Reynosa y Río Bravo, de donde fueron evacuadas mil 500 personas y 192, respectivamente.
<b>21/07/2005</b>	Huracán Emily	50 a 70 mm	60 por ciento de las comunidades del municipio tuvieron fallas en el servicio de electricidad e inundaciones.
<b>19/09/2006</b>	Huracán Lane	70 a 150 mm	En los municipios de Reynosa y Río Bravo, el huracán causó dos muertos y 74 colonias inundadas, donde el agua alcanzó metro y

			medio de altura, y 300 personas fueron llevadas a refugios.
<b>23/07/2008</b>	Tormenta tropical Dolly	150 mm	Fuertes inundaciones en vías de comunicación. Daños a viviendas y miles de afectados.
<b>20/08/2008</b>	Onda tropical No. 23		Afectaciones en los municipios de Nuevo Laredo, Miguel Alemán, Río Bravo, Nuevo Progreso y Reynosa. Daños considerables en por lo menos 60 colonias.
<b>01/07/2010</b>	Huracán Alex	100 mm	Desbordamiento del Río Bravo por el desfogue de presas. Se reportaron unas 60 familias damnificadas en las colonias de Villa de Nuevo Progreso.
<b>10/07/2010</b>	Onda tropical No. 12 y 13	85 mm	Desbordamiento de varios ríos y canales de la región por desfogue de presas.
<b>18/07/2010</b>	Onda tropical No. 13 y 14		Desborde de ríos por desfogue de presas. El agua alcanzó un tirante de hasta 4 metros, afectando cientos de viviendas y cultivos en ejidos. Hubo cientos de damnificados.
<b>25/11/2013</b>	Inundación Fluvial		Se presenta una inundación a orillas del Dren Río Bravo, que deja sus mayores afectaciones en la colonia Agrícola Cándido Aguilar. Se reportó un nivel de más de 1 m en algunos puntos
<b>25/10/2015</b>	Huracán Patricia	193 mm	Los niveles de agua anegaron 10 colonias. A nivel estatal hubo más de 12 mil damnificados.

Fuentes: (Desinventar.org, 2017; EM-DAT, 2017) y compendio de los Impactos socioeconómicos de los principales desastres ocurridos en México, CENAPRED.

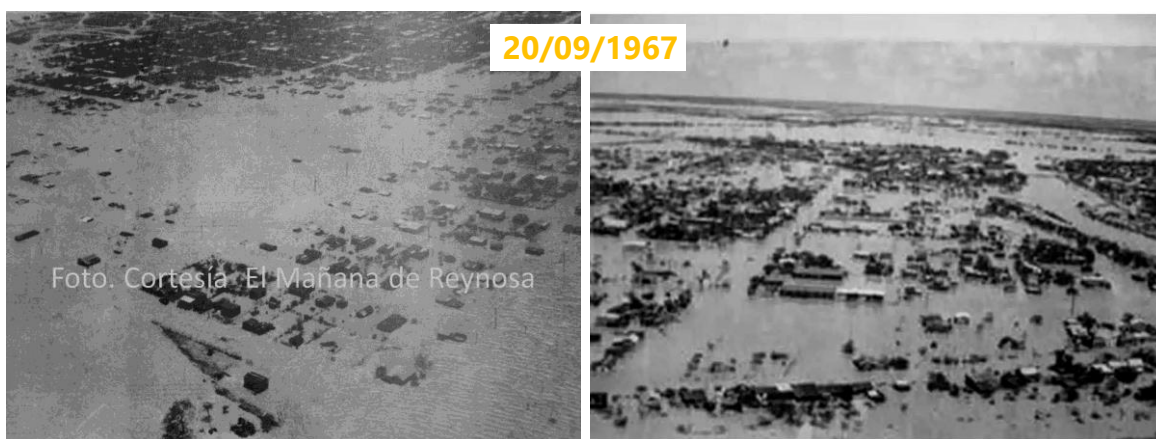


Foto. Cortesía El Mañana de Reynosa

Fuente: <http://historiaderibravo.blogspot.mx/2013/11/>



Fuente: [http://musicas.cc/pt/musica/baixar/huracan-dolly-rio-bravo-tamps-2/ss8uK\\_pRObQ](http://musicas.cc/pt/musica/baixar/huracan-dolly-rio-bravo-tamps-2/ss8uK_pRObQ)



Fuente: <http://archivo.eluniversal.com.mx/notas/694973.html>



Fuente: <http://laprensa.mx/notas.asp?id=243880>

25/10/2015



Fuente: <https://www.elmanana.com/fuertelluviaprovocainundacionesenriobravo-3072326.html>

Figura 3-11. Fotografías de algunos de los eventos de inundación en la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.

### 3.1.3 Población

Según la última Encuesta Intercensal del INEGI en el 2015, el municipio de Río Bravo contaba con una población de 126,887 habitantes, de los cuales el 50.1% (63,589) son mujeres, mientras que el 49.9% (63,298) son hombres. El municipio tiene el 3.7% de la población total de Tamaulipas (3,441,698 habitantes), situándose en el 8° municipio más poblado del Estado.

La Tabla 3-5 muestra el crecimiento poblacional que se ha presentado en la cabecera municipal del municipio de Río Bravo, Tamaulipas, en el período de 1990 a 2015. En ella, se puede observar que la población de esta localidad urbana se ha incrementado en más de la mitad (54.46%) hacia el 2015 (104,839 habitantes), con respecto del número de personas contabilizadas en el año de 1990 (67,875 habitantes), a una tasa de crecimiento promedio anual de 1.75%.

En cuanto a la proporción del género de la población en esta ciudad, en la Tabla 3-5 puede observarse que se ha mantenido constante al paso de los años, de tal manera que desde 1990 al 2015 poco más de la mitad de la población son mujeres, presentándose en el 2015 un porcentaje de 50.14% y 49.86% para la mujeres y hombres, respectivamente.

En la Figura 3-12 se muestra la pirámide poblacional de la ciudad de Río Bravo por rangos quinquenales de edad y género, según los datos de la encuesta intercensal de INEGI del 2015. En su análisis, la población puede ser clasificada en 5 grupos de edades. La población de niños entre los 0 y 14 años que representa el 31% del total, la población joven de entre los 15 y 34 años que representa el 33.04%, la población madura de entre los 35 y 49



años (18.96%), la población adulta de entre 50 y 64 años con el 10.13%, y finalmente, la población de la tercera edad con 65 años o más que conforman el 6.04% de la zona urbana. Cabe destacar que la mayor parte de la población se encuentra entre los 0 y 29 años, ya que representan el 56.34% de la población total y en específico el grupo de los 0 a 5 años con el 10.76 % de la población total en la ciudad de Río Bravo.

Tabla 3-5. Histórico poblacional de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.

Año Censal	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Hombres	33,597	37,125	39,780	41,638	47,631	52,270
Mujeres	34,278	37,788	40,360	42,098	48,016	52,569
Total	67,875	74,913	80,140	83,736	95,647	104,839

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Censos y Conteos de Población y Vivienda.

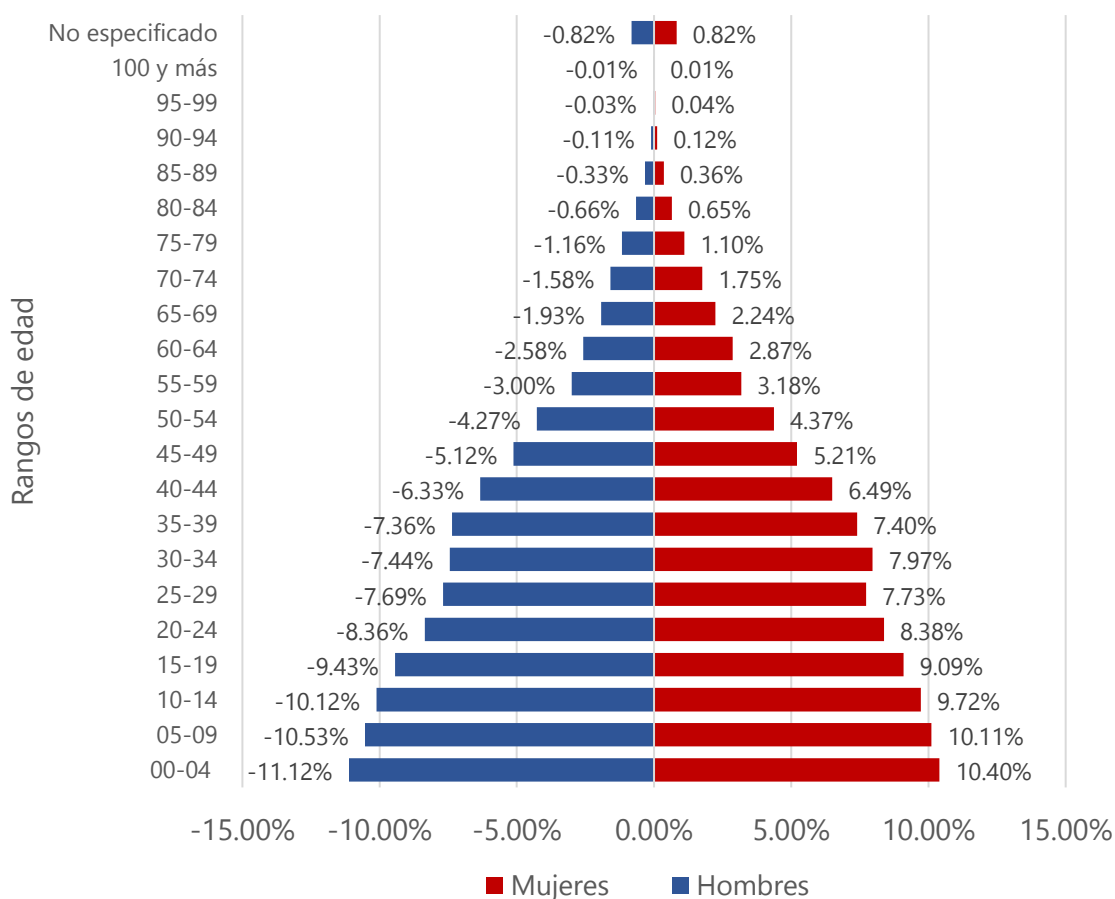


Figura 3-12. Distribución de la población por rangos quinquenales de edad en la ciudad de Río Bravo.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Encuesta Intercensal del INEGI 2015.

Con base en estos resultados es claro que para prevenir el número de lesionados y muertos provocados por un evento de inundación en la ciudad de Río Bravo, los criterios de arrastre de personas deben estar parametrizados en las características físicas que permitan identificar las zonas de peligro en las cuales la seguridad de la población infantil y joven pueda verse amenazada.

Hacia el futuro, según el Consejo Nacional de Población (CONAPO), se espera que la población de la ciudad de Río Bravo aumente en un 19.11% hacia el 2030 (124,876 habitantes), con respecto del número de personas contabilizadas en el 2015 (104,839 habitantes), con una tasa de crecimiento anual promedio de 1.18%, la cual se estima que tenga un comportamiento decreciente y además que la distribución por género se mantenga sin cambios aparentes, ver Figura 3-13.

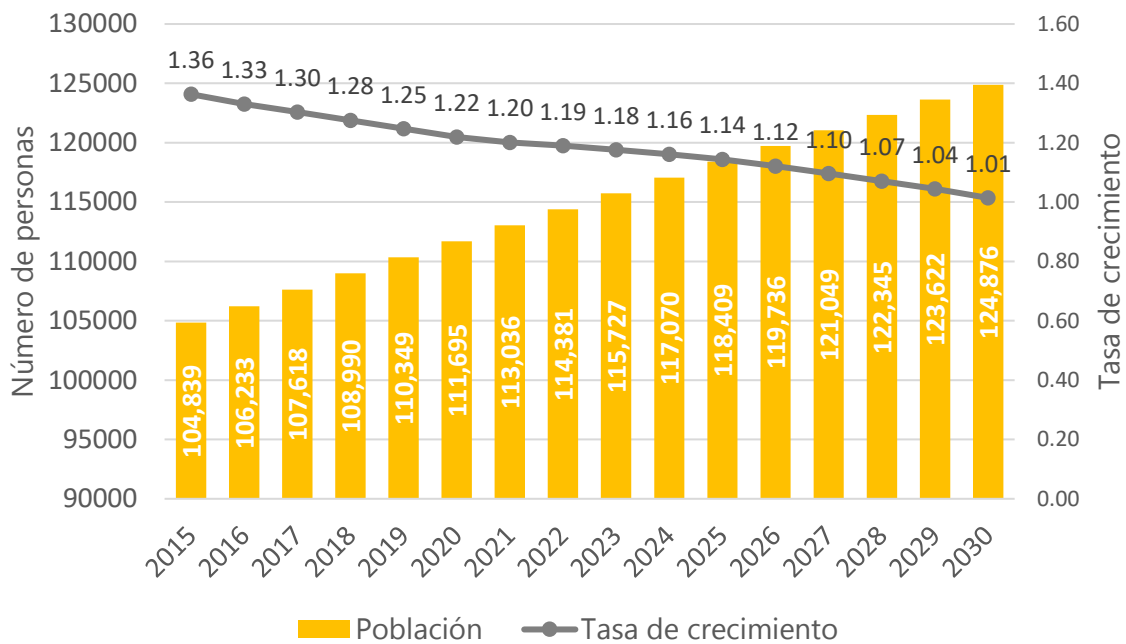


Figura 3-13. Proyección de la población en la ciudad de Río Bravo (2015-2030).

Fuente: (CONAPO, 2017).

### 3.1.3.1 Patrones de la ocupación territorial y desarrollo urbano

La forma en que una ciudad se organiza económicamente, los patrones que adopta la distribución de la población en el territorio, así como las medidas que adopta ante una situación de emergencia, son el resultado de la implementación de modelos adoptados en siglos pasados en nuestro país. De acuerdo con lo dicho, los asentamientos humanos que caracterizaron el siglo XIX en México se debieron principalmente a la explotación de recursos naturales valorados económicamente. En el caso de la región en estudio, comenzó con el poblamiento de la gran extensión de la hacienda "La Sauteña" a principios de este siglo, la cual se convertiría en la compañía comercial y agrícola más importante de la región. Para 1913 el emporio comercial y agrícola que representó La Sauteña llegó a su auge con la toma

de la ciudad de Reynosa y Colombres (antiguamente ciudad Río Bravo) a manos del General Lucio Blanco, sin embargo, no duro mucho, ya que años más tarde con el estallido de la Revolución Mexicana los revolucionarios destruyeron todo a su paso terminando con el centro de atracción turística, comercial e industrial más importante de la zona norte (Herrera Pérez, 2010).

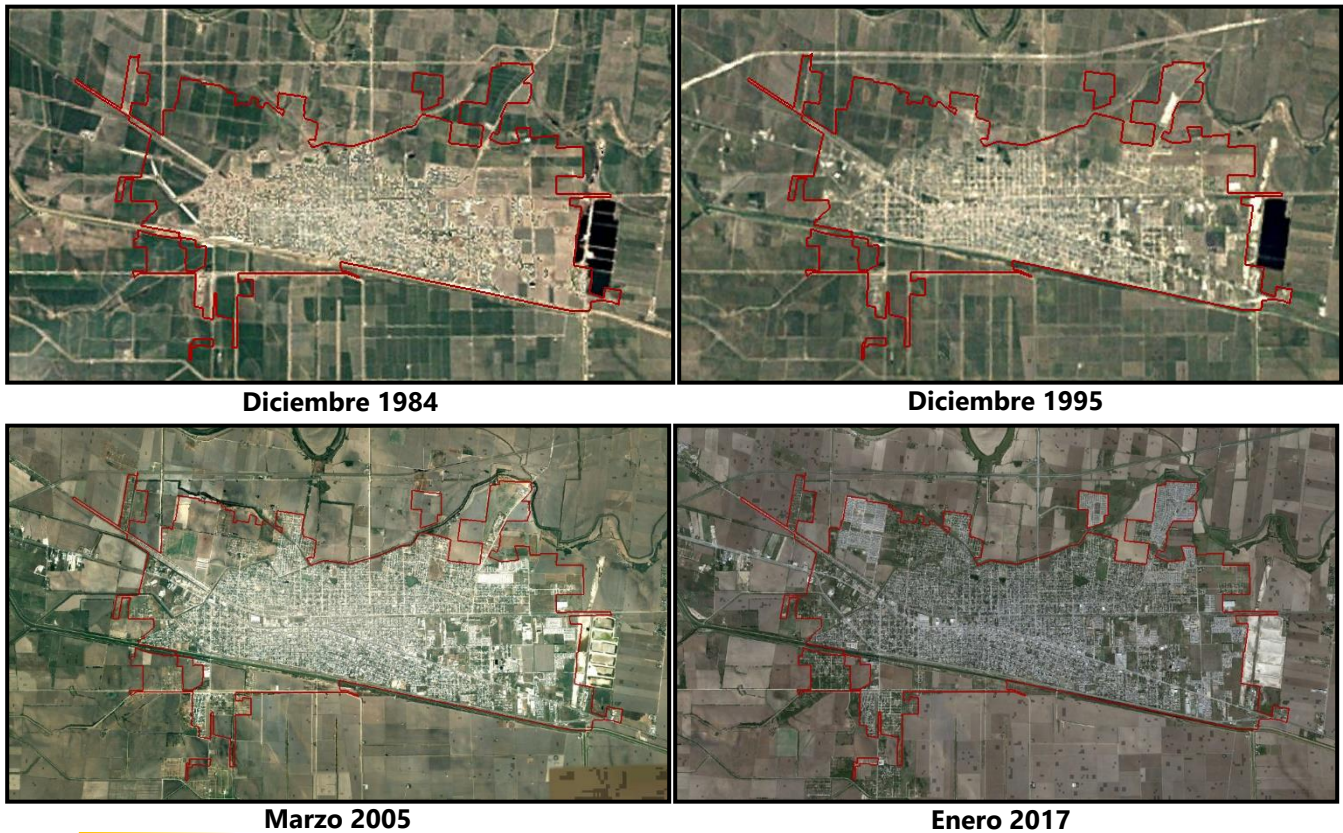
Hacia la mitad del siglo XX con la construcción de los sistemas de riego en el norte del país, la región nuevamente comienza a resurgir y con ello el comienzo de la construcción de las primeras colonias, en los municipios de Río Bravo y Valle Hermoso. Estas colonias se encontraban habitadas por trabajadores de la construcción inmigrantes a consecuencia de la falta de empleo en el resto del país, así como por repatriados de los Estados Unidos. El incremento poblacional que se generó en este tiempo permitió que las comunidades se desarrollaran y alcanzaran el nivel de crecimiento con el que hoy cuentan. El 10 de enero de 1962 el municipio de Río Bravo fue erigido mediante el decreto número 53 del Congreso del Estado de Tamaulipas, con la cabecera municipal denominada con el mismo nombre que corresponde al antiguo poblado de Colombres y que actualmente fue elevado a la categoría de ciudad Río Bravo.

En la actualidad, con las trasformaciones de la economía internacional, así como cambios en los patrones productivos regionales, se observa la decadencia de las ciudades prosperas asociadas al petróleo y la caña de azúcar, y se lleva a cabo el desarrollo de un proceso de trasformación en la distribución de la población, con una tendencia al aumento de la población en aquellas pequeñas y medias ciudades en las que se desarrolla el comercio, el turismo y el desarrollo prospero de cultivos (Rodriguez, 2006), como es el caso de la ciudad de Río Bravo.

La Figura 3-14 muestra la evolución de la mancha urbana en la cabecera municipal de Río Bravo desde diciembre de 1984 a enero de 2017. En cada una de las imágenes se observa el polígono de la zona urbana en color rojo, descargado en formato *shapefile* de la página del INEGI con actualización al mes de junio de 2016. En dichas imágenes es posible apreciar que el crecimiento de la zona urbana se ha desarrollado principalmente hacia el noroeste, suroeste, noreste y este, que constituyen zonas donde se ha llevado a cabo progresivamente la sustitución de los antiguos terrenos de cultivo agrícola por nuevas colonias urbanas y lo que es aún más preocupante, la invasión de llanuras aluviales con viviendas de materiales de baja resistencia a orillas de los principales canales de riego: el Dren Río Bravo, Canal Ramal 2 y Anzaldúas.

Cabe destacar que la urbanización desmedida, es decir, el crecimiento sin control de zonas urbanas en crecimiento, como es el caso de la ciudad de Río Bravo, provoca que los eventos de inundación que se presenten generen mayores afectaciones a consecuencia del desarrollo no planeado, la invasión de llanuras de inundación, el envejecimiento de las infraestructuras de drenaje, el aumento de superficies impermeables y la falta de planes de

prevención y mitigación, lo cual tiene como principal consecuencia la exposición al peligro de arrastre que experimenta la población año con año durante la temporada de lluvias.



*Figura 3-14. Evolución de la mancha urbana en la ciudad de Río Bravo en los últimos 30 años. Elaboración propia con imágenes de Google Earth.*

### 3.2 León, Guanajuato

En mayor medida en comparación con Río Bravo, la ciudad de León, Guanajuato, es una zona urbana marcada por los frecuentes estragos causados por inundaciones y fenómenos climáticos, que han sido constantes a lo largo de su historia. Tan solo desde principios del siglo XVIII la ciudad ha registrado al menos unas 20 inundaciones considerables, de las cuales en tres ocasiones la ciudad fue totalmente devastada y dejada en ruinas (SAPAL, 2014). Esto a consecuencia de su ubicación geográfica, al centro de un bajío por el que confluyen numerosos arroyos que atraviesan la ciudad en diferentes puntos, además del crecimiento desmedido de la ciudad, la construcción de fraccionamientos irregulares en zonas de alto riesgo por inundación, así como por la falta de revisión de numerosos proyectos hidráulicos, que en conjunto provocan que las calles y avenidas de la ciudad se conviertan en verdaderos ríos cada vez que se presentan precipitaciones.

### 3.2.1 Descripción

El municipio de León se ubica en la región conocida como el Bajío Mexicano, que recibe su nombre por la topografía característica de la región, la cual se basa principalmente por valles, llanuras y lomeríos. El municipio de León se ubica en el poniente del Estado de Guanajuato, colindando al norte con los municipios de San Felipe, Lagos de Moreno (Jalisco) y la Sierra de Guanajuato; al sur con los municipios de San Francisco del Rincón y Romita; al este, con los municipios de Guanajuato y Silao; y finalmente al oeste, con los municipios de Purísima del Rincón y Unión de San Antonio (Jalisco). Su territorio posee una extensión de 1,183.20 km<sup>2</sup>, representando en 3.87% de la superficie total de la entidad (30,607 km<sup>2</sup>) (Ayuntamiento-León, 2014). La cabecera municipal se conforma por la zona urbana con la misma denominación, León, la cual se localiza entre los 21° 01' 49" y 21° 12' 49" de latitud norte y los 101° 33' 42" y 101° 46' 13" de longitud oeste. Constituye la ciudad más poblada y extensa del municipio al contar con una población de 1'578,626 habitantes al año 2015, una superficie de 184.88km<sup>2</sup> y un relieve diverso con una altura media de los 1815 m.s.n.m. (Ayuntamiento-León, 2009). En este segundo caso de estudio la cuenca hidrológica definida, que comprende la totalidad de la ciudad, se encuentra georreferenciada entre los 20° 57' 09" y 21° 20' 17" de latitud norte, y los 101° 26' 43" y 101° 48' 47" de longitud oeste. Comprende el sistema de ríos y arroyos que tienen su origen en la sierra de Guanajuato y que conducen el agua producto del escurrimiento superficial hacia el suroeste, atravesando en distintas ubicaciones la zona urbana de León hasta los puntos de control hidrológico-hidráulico definidos aguas abajo de la ciudad, con una extensión territorial de 972.19 km<sup>2</sup>, ver Figura 3-15.

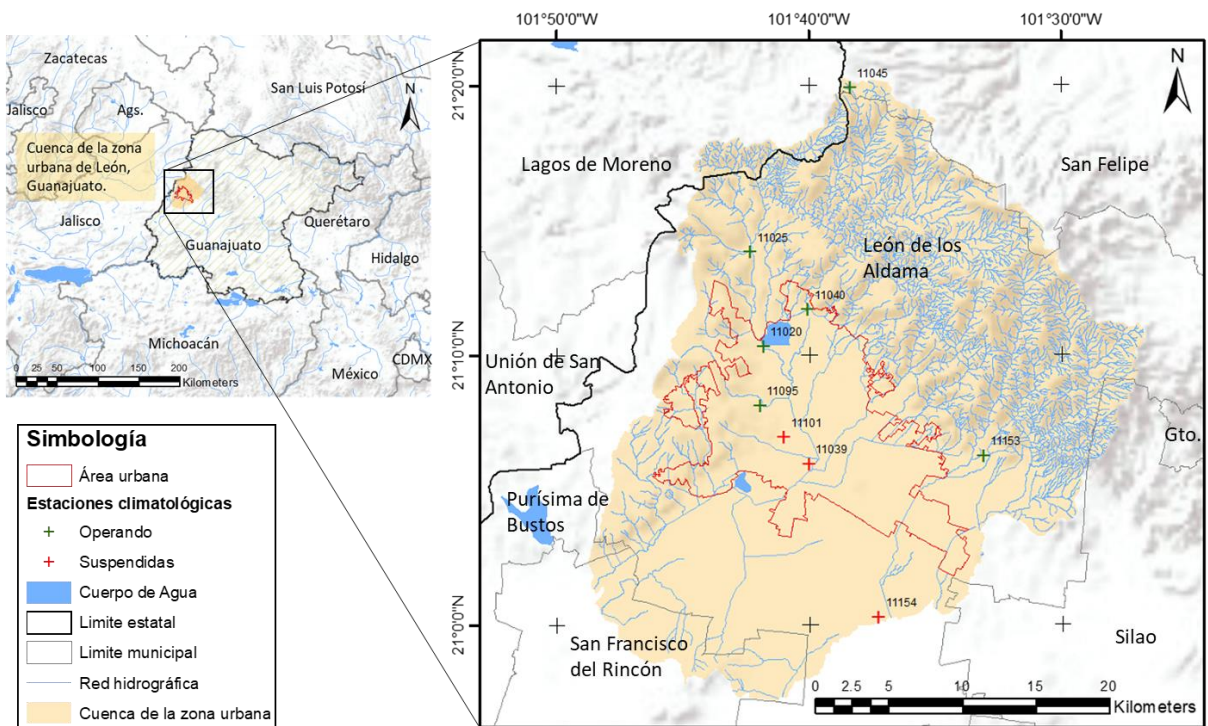


Figura 3-15. Localización de la zona urbana y cuenca de aportación de León, Guanajuato.

La cuenca hidrológica definida para esta zona de estudio se encuentra comprendida dentro de la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago, cuyas aguas fluyen hacia el Océano Pacífico y que conforman el sistema hidrológico de las cuencas de los ríos Guanajuato y Turbio, al oeste del Estado.

El Bajío Mexicano se ha convertido en una región de gran relevancia nacional, puesto que constituye una de las principales rutas comerciales del país. Por lo anterior y gracias a su ubicación geográfica la ciudad de León es considerada como uno de los principales polos urbanos, comerciales y de servicios de la región centro-occidente del país, al formar parte del "Diamante de México" conformado por las ciudades de México, Guadalajara, Aguascalientes, San Luis Potosí, Querétaro y Morelia.

### **3.2.1.1 Geología, orografía y edafología**

Según la información obtenida por el INEGI, la formación geológica de la zona de estudio en general se remonta a hace 20 millones de años dentro del período Neógeno. En la zona norte de la cuenca en estudio, donde se presentan las elevaciones más altas, predominan las rocas ígneas extrusivas ácidas y básicas con una extensión de 427.09 km<sup>2</sup> (43.93 %) correspondientes a formaciones de los períodos Neógeno y Cuaternario, además de rocas ígneas intrusivas ácidas e intermedias (90.67 km<sup>2</sup> – 9.33 %) y Esquisto (74.46 km<sup>2</sup> – 7.66%) de la era mesozoica. Aunque la permeabilidad de este tipo de rocas depende en gran medida de la porosidad y de la presencia de fisuras, se caracterizan por tener una baja permeabilidad, destacándose como un factor determinante de las numerosas inundaciones que ha sufrido la ciudad. Por su parte, en el centro y sur de la cuenca predominan sedimentos recientes del cuaternario con una extensión de 353.54 km<sup>2</sup> (36.36%), los cuales están conformados por depósitos aluviales de arenas, limos y arcillas. Finalmente, de manera distribuida en el suroeste y en una pequeña parte del sureste se encuentran las areniscas-conglomerados con una extensión de 26.43 km<sup>2</sup> (2.72 %), ver Figura 3-16.

A diferencia de la zona de estudio de Río Bravo, la cuenca hidrográfica definida para la ciudad de León posee una diversa orografía caracterizada por cinco unidades de relieve, que muestran la historia geológica del lugar. La mayor parte de ellas se encuentra en el norte de la zona urbana, la cual se compone por la zona serrana de Guanajuato, mesetas, lomeríos, valles, y en mayor extensión hacia el suroeste, llanuras aluviales. La diversidad del relieve queda demostrada en que la cuenca en estudio se encuentra dentro de cuatro subregiones fisiográficas, a saber: la Sierra Cuatralba, la Sierra de Guanajuato, el Bajío Guanajuatense y Los Altos de Jalisco. En la Tabla 3-6 se presenta una descripción general de las geomorfologías características de la zona de estudio (únicamente se excluyen el lomerío y las llanuras aluviales que fueron descritas en la Tabla 3-1).

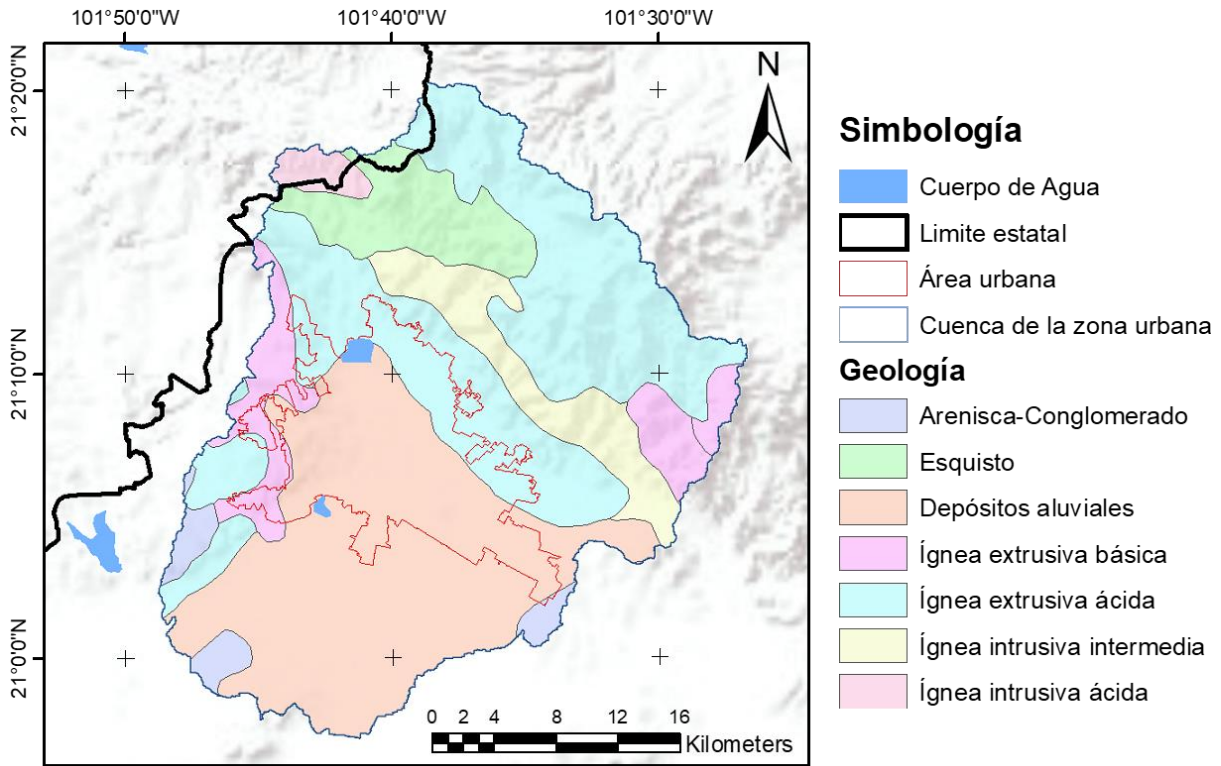


Figura 3-16. Distribución de los diferentes tipos de rocas en la cuenca de la ciudad de León, Guanajuato.

Fuente: INEGI, Elaboración propia.

La cuenca hidrográfica definida cuenta con elevaciones que oscilan desde los 1,753.17 m.s.n.m. en la parte suroeste y hasta los 2,863.13 m.s.n.m. en la parte sureste, con una elevación media de los 2,013.47 m.s.n.m.

La Figura 3-17 muestra un mapa de la zona de estudio de los datos de altimetría provenientes de sistemas aéreos de rayo láser conocidos como *Light Detection And Ranging* (LiDAR) con una resolución modificada a 30 metros por medio de la herramienta de GRASS GIS *r.resamp.stats*, mediante el método de agregación por promedio.

Tabla 3-6. Geomorfología general de la zona de estudio – León.

Geomorfología	Descripción
<b>Sierra</b>	Corresponde al conjunto de montañas pequeñas, dentro de un conjunto de montañas de mayor tamaño denominada "Cordillera". La característica fundamental de esta geomorfología es la forma aserrada de las cumbres, las cuales son generalmente más pronunciadas que anchas.
<b>Meseta</b>	Es una superficie relativamente plana que se encuentra elevada sobre el terreno circundante a consecuencia de la elevación del terreno provocada por fuerzas tectónicas o por la erosión del terreno circundante.

<b>Valle</b>	Se compone por la depresión del terreno que se encuentra entre una o más montañas, la cual es formada a causa de la erosión del flujo del agua o por movimientos tectónicos. Generalmente presentan una forma alargada con cierta inclinación hacia un cuerpo de agua o el mar.
--------------	---

Fuente: (Espinosa Rodríguez & Arroyo López, 2011).

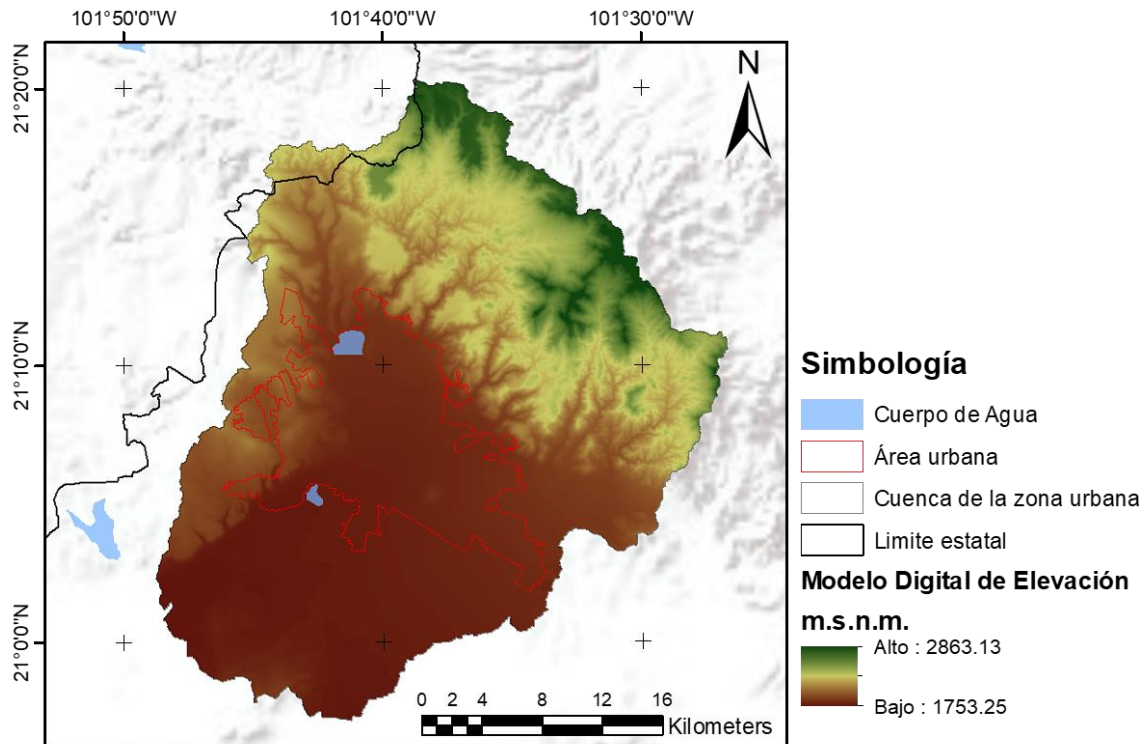


Figura 3-17. Modelo digital de elevaciones LiDAR (15m), en la cuenca de la ciudad de León, Guanajuato.

Fuente: INEGI, Elaboración propia.

En la cuenca en estudio se presentan 4 tipos de suelo de los cuales, únicamente serán descritos aquellos que sean distintos a los ya mencionados en la ciudad de Río Bravo, en los siguientes apartados (INEGI, 2004):

- El feozem con el 54.78% (532.59 km<sup>2</sup>) se localiza en la zona centro y norte de la zona de estudio, es el tipo de suelo predominante en la zona de estudio y el cuarto a nivel nacional, ya que se encuentra presente en cualquier tipo de relieve o clima con excepción de aquellas regiones tropicales lluviosas o muy desértica. Este tipo de suelo se caracteriza por tener una capa superficial rica en materia orgánica y nutrientes, de cuyo espesor depende directamente la producción agrícola de este tipo de suelo. Cuando el feozem es poco profundo generalmente se localiza en laderas o pendientes, como en este caso de estudio, por lo que puede ser fácilmente erosionables.



- El vertisol, con el 26.42% (254.16 km<sup>2</sup>), se presenta predominantemente en el sur y en una pequeña parte al este de la zona en estudio. Las características de este tipo de suelo fueron descritas para el caso de la ciudad de Río Bravo.
- El planosol, con el 15.44% (150.15 km<sup>2</sup>), se localiza al este de la zona de estudio considerada para la ciudad de León y es común en climas templados y áridos del país. Este tipo de suelo se caracteriza por tener un relieve relativamente plano, por lo que es susceptible de inundarse en alguna parte del año, además carecen de profundidad, por lo que son muy propensos a ser erosionados.
- Finalmente, el litosol con una superficie del 3.35% (32.6 km<sup>2</sup>) del total, se ubica en una pequeña región al norte de la zona de estudio. Este tipo de suelo, también conocido como suelo de piedra, es característico de todas las sierras, barrancas y lomeríos del país, se caracteriza por tener poca profundidad (< 10 cm) la cual es limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido.

La Figura 3-18 muestra un mapa con la edafología presente en la zona de estudio.

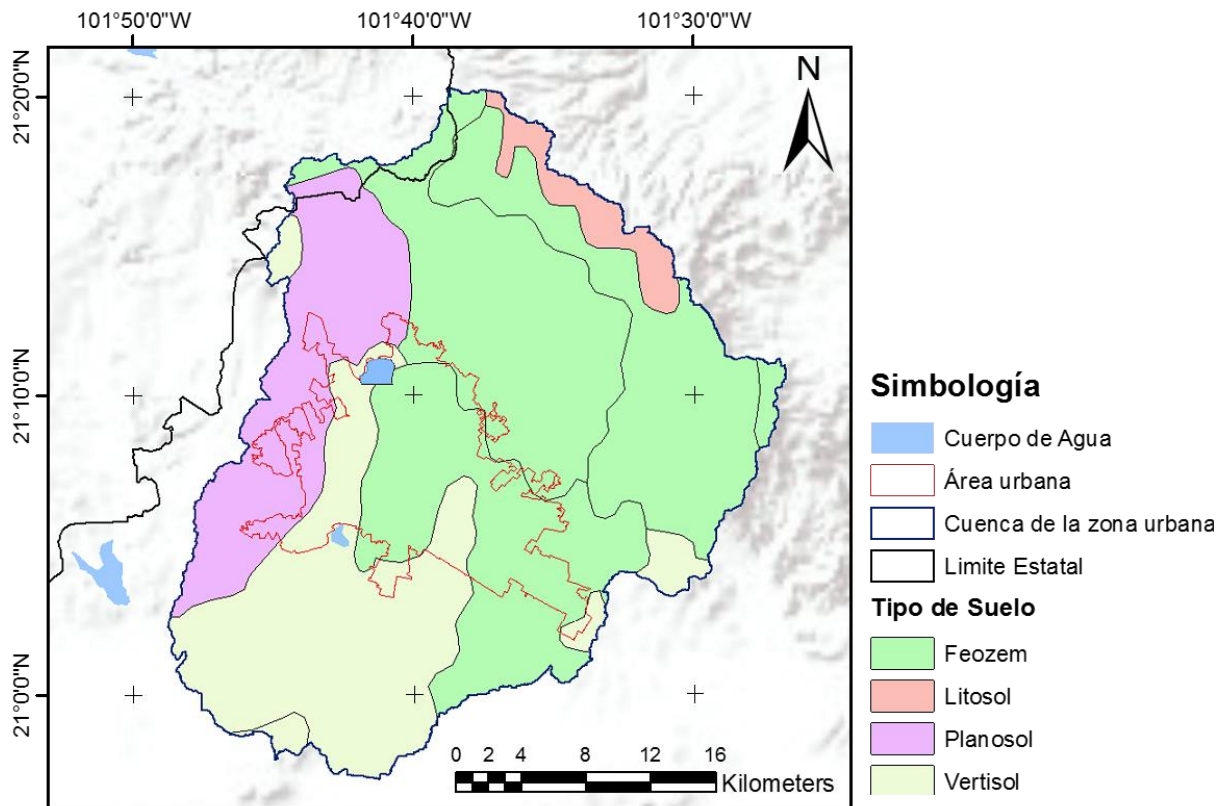


Figura 3-18. Edafología en la cuenca de la zona urbana de León, Guanajuato.

Fuente: INEGI, Elaboración propia

### 3.2.1.2 Uso de suelo y vegetación

De manera similar a como fue considerada la distribución del uso de suelo y vegetación que presenta la cuenca hidrográfica que comprende a la ciudad de Río bravo, para el caso de León fue utilizada la información de la base de datos del Centro de investigación: "Global Land Cover Facility (GLCF)" de la NASA, que ha tenido gran aceptación por medio de las investigaciones publicadas por (Bartholomé & Belward, 2005; Gong et al., 2013; Lindsay et al., 1999).

La información obtenida indica que en el 28.85% (280.44 km<sup>2</sup>) de la extensión territorial de la cuenca hidrológica definida (972.19 km<sup>2</sup>), corresponde a Matorrales que se ubican predominantemente dentro de la reserva ecológica denominada "Sierra de Lobos" en la región norte de la zona de estudio, así como al oeste de la zona urbana y en una pequeña parte al sur. Con una extensión territorial similar, se tiene la tierra cultivada con el 27.64% (268.67 km<sup>2</sup>), la cual se ubica en el sureste de la zona urbana de León donde predominan las elevaciones más bajas, las frutas y hortalizas constituyen los cultivos más representativos de la región entre los que destacan las fresas, el brócoli, coliflor, lechuga, zanahoria, ajo, cebolla y chile. Con el tercer lugar se tienen al bosque con el 20.66% (200.85 km<sup>2</sup>) de la extensión territorial total, el cual se ubica de manera dispersa en el norte, dentro de la Sierra de Guanajuato. La zona urbana ocupa el cuarto lugar en extensión con el 19.26% (187.27 km<sup>2</sup>), la cual se compone únicamente por la ciudad de León y los asentamientos irregulares de la periferia. Finalmente, el porcentaje restante de la zona en estudio se conforma por praderas (2.86%), cuerpos de agua (0.29%), humedales (0.22%) y tierra desolada (0.22%).

La Tabla 3-7 y la Figura 3-19, muestran los datos obtenidos de la base de datos del GLCF, así como su distribución espacial en la cuenca en estudio.

*Tabla 3-7. Vegetación y uso de suelo en la cuenca de la zona urbana de León, Guanajuato.*

Tipo de suelo	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Terreno cultivado	268.67	27.64
Bosque	200.85	20.66
Pradera	27.79	2.86
Matorral	280.44	28.85
Humedal	2.17	0.22
Cuerpo de agua	2.83	0.29
Zona urbana	187.27	19.26
Tierra desolada	2.17	0.22
<b>Total</b>	<b>972.19</b>	<b>100.00</b>

*Fuente: Elaboración propia con datos del GLCF.*

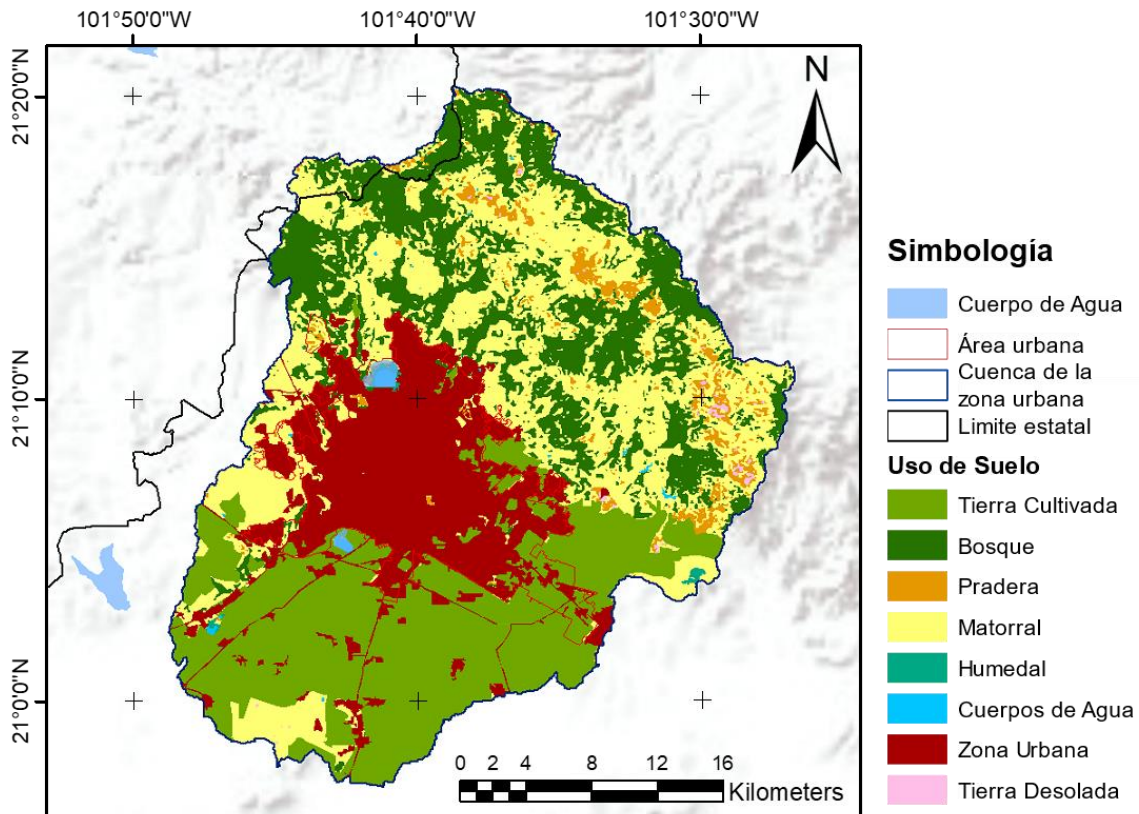


Figura 3-19. Uso de suelo y vegetación en la zona urbana de León, Guanajuato.

Fuente: GLCF. Elaboración propia.

### 3.2.1.3 Clima

Según la clasificación de Köppen adaptada por Enriqueta García en el Manual de Características Edafológicas, Fisiográficas, Climáticas e Hidrográficas de México (García, 2008), así como los datos de publicados en la página web del INEGI. La cuenca en estudio que incluye la zona urbana de León, Guanajuato, presenta predominantemente un clima semiseco semicálido estepario con lluvias en verano (BS1hw(w)), que comprende el 44.97% (437.20 km<sup>2</sup>) de la extensión total de la cuenca en estudio en su parte central. El 15.85% (154.13 km<sup>2</sup>) de la zona de estudio presenta un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano ((A)C(w0)(w)), el cual se localiza en la parte norte de la zona urbana. El resto de la cuenca, 39.18% (380.87 km<sup>2</sup>), presenta un clima templado subhúmedo con diferente intensidad y lluvias de verano. La Figura 3-20 muestra la distribución del clima en la zona de estudio.

Para el análisis de las temperaturas y precipitaciones que se presentan en la zona de estudio, se utilizó la base de datos climatológica Nacional CLImate COMputing Project (CLICOM), el cual es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas.

La cuenca hidrológica considerada en este caso de estudio cuenta con seis estaciones climatológicas que tienen al menos 37 años de información continua entre el período de 01/03/1978 al 31/12/2015. Por su parte, se tienen tres estaciones suspendidas dentro de la cuenca, de las cuales solo una de ellas cuenta con menos de 20 años de registro continuo. La tabla 3-8 muestra la información general de las estaciones consideradas, mientras que la Figura 3-20 muestra la ubicación de las estaciones climatológicas consideradas en este análisis, haciendo la distinción entre las estaciones que se encuentran operando y las suspendidas.

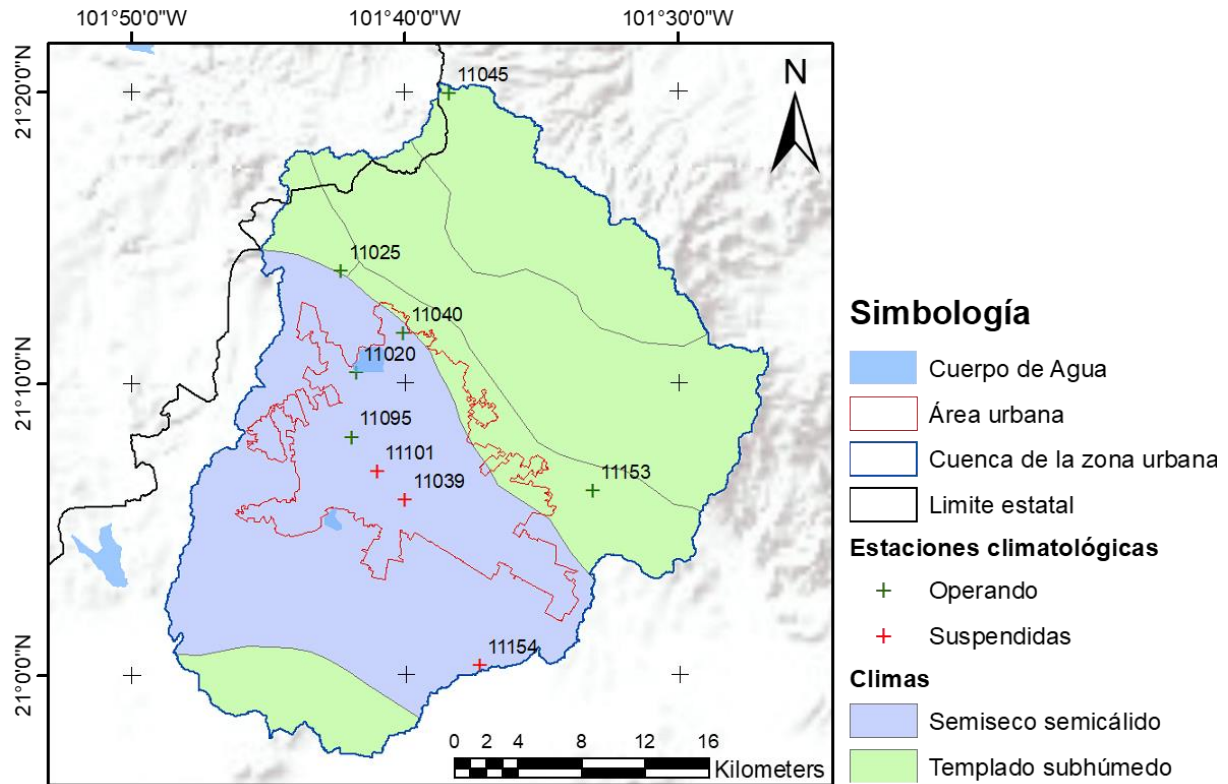


Figura 3-20. Clima en la cuenca de la zona urbana de León, Guanajuato.

Fuente: Datos de INEGI, Elaboración propia.

Tabla 3-8. Características de las estaciones climatológicas en la zona de estudio – León, Guanajuato.

Número	Clave	Nombre	Período	Años	Estado	Organismo	Cobertura en la cuenca
1	11045	Media Luna	1/05/1947 - 30/09/2016	69	Operando	CONAGUA-DGE	8.78%
2	11025	Hacienda de Arriba	1/08/1946 - 30/09/2016	70	Operando	CONAGUA-DGE	8.59%
3	11040	Los Castillos	1/08/1946 - 30/11/2016	70	Operando	CONAGUA-DGE	12.39%
4	11153	La Laborcita	1/03/1978 - 31/12/2015	37	Operando	CONAGUA-DGE	25.01%

5	11020	El Palote	1/01/1961 - 30/11/2016	55	Operando	CONAGUA- DGE	3.97%
6	11095	León (DGE)	1/08/1946 - 31/12/2016	70	Operando	CONAGUA- DGE	8.83%
7	11101	C.A.E. León	1/03/1941 - 30/09/1969	28	Suspendida	CONAGUA- SMN	7.36%
8	11039	León (SMN)	1/01/1971 - 31/12/1985	15	Suspendida	CONAGUA- SMN	11.85%
9	11154	San Francisco de Duran	1/03/1978 - 31/05/2000	22	Suspendida	CONAGUA- DGE	13.22%

Fuente: Elaboración propia con datos del CLICOM.

## Temperatura

La temperatura media anual en la cuenca de la ciudad de León, obtenida con los datos de las estaciones climatológicas consideradas, es de 18.84 °C. La temperatura máxima promedio se presenta en el mes de mayo con 31.81 °C, mientras que la mínima promedio ocurre en el mes de enero con una temperatura de 5.49 °C. Los meses más calurosos son de abril a junio y en contraste los meses más fríos son de noviembre a marzo, ver Figura 3.21.

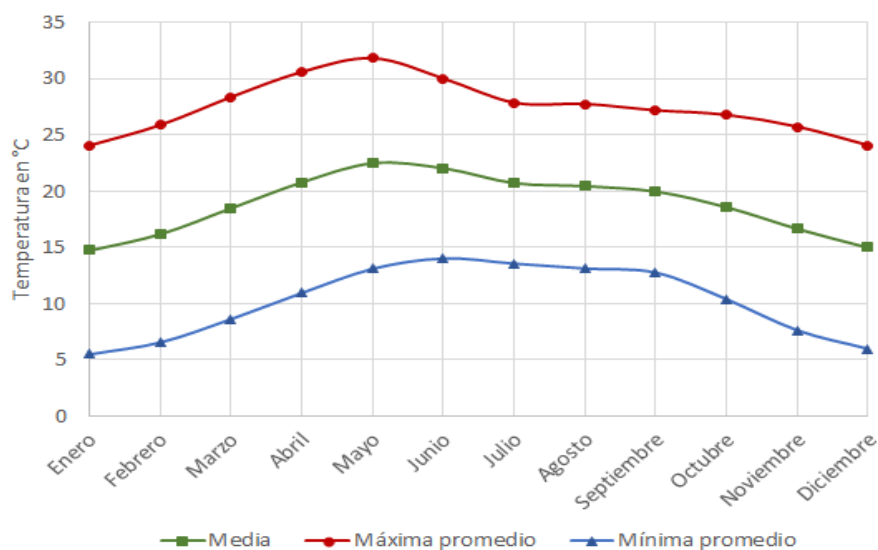


Figura 3-21. Temperaturas: media (verde), máxima promedio (rojo) y mínima promedio (azul) mensuales en la zona de estudio – León, Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de CLICOM.

## Precipitación

La Figura 3.22 muestra la distribución espacial de la precipitación media anual en la zona de estudio, la cual oscila entre los 556.8 y los 700.1 mm/año. En dicha figura es posible observar que, en la parte central donde se ubica la zona urbana de León, se presenta la mayor cantidad de precipitación y que esta, disminuye hacia el suroeste y noreste a medida que se aleja de ella. Cabe hacer notar que el cambio en la precipitación es mucho mayor hacia el

noreste, donde se encuentran las mayores elevaciones que conforman la Sierra de Guanajuato.

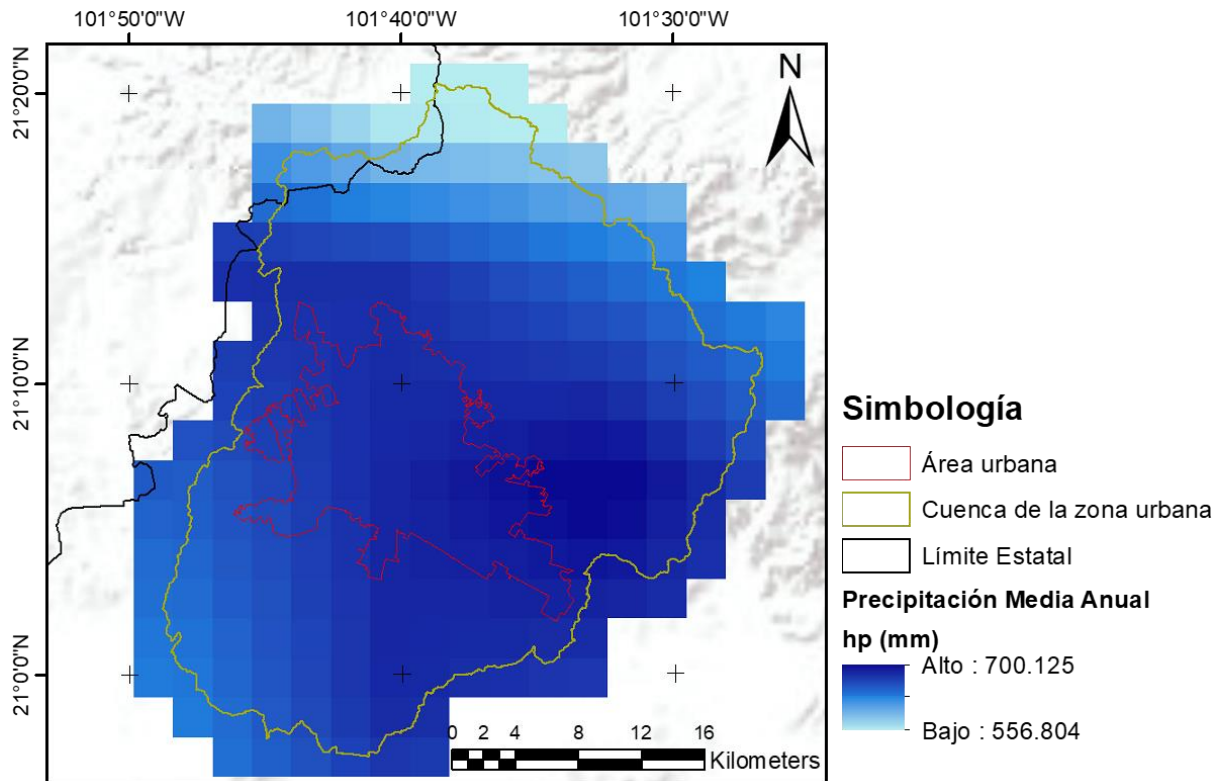


Figura 3-22. Precipitación media anual en la cuenca de la zona urbana de León, Guanajuato.  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de CLICOM en malla.

La precipitación media anual obtenida tras el análisis de las nueve estaciones climatológicas consideradas es de 641.53 mm/año, la cual resulta ser similar a la obtenida por la malla del CLICOM. La distribución temporal de la lluvia en la zona de estudio muestra una distinción muy clara entre la temporada de lluvias y la de secas ya que se puede apreciar que la mayor parte de ella (78.44%) ocurre entre los meses de junio a septiembre, mientras que el restante 21.56 % de la precipitación ocurre entre los meses de octubre a mayo, lo que indica que en este periodo de tiempo la ciudad de León es susceptible de sufrir severas inundaciones. Cabe hacer mención que la precipitación máxima promedio mensual se presenta en el mes de julio con 152.73 mm, mientras que la mínima ocurre en el mes de marzo con una precipitación promedio mensual de 5.99 mm, ver Figura 3-23.

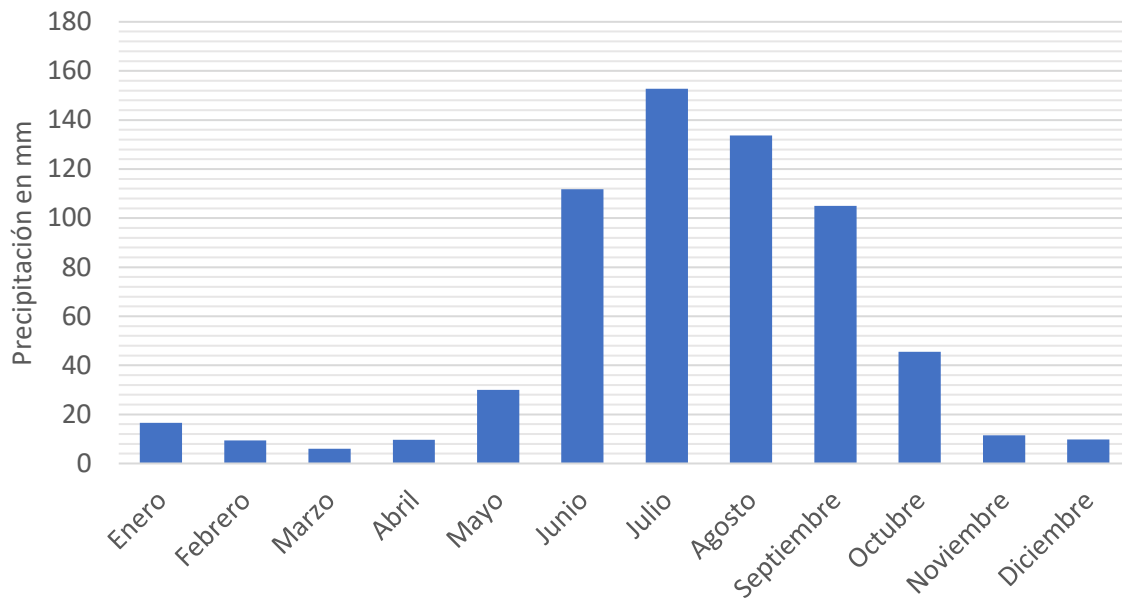


Figura 3-23. Distribución temporal de la precipitación media anual en la ciudad de León.  
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del CLICOM.

### 3.1.1.4 Hidrografía

La cuenca en estudio, que comprende a la ciudad de León, se ubica dentro de la RH12 denominada Lerma-Santiago, la cual se localiza en la parte central y poniente del país. La relevancia de esta región se debe a su extensión (132,916 km<sup>2</sup>) y caudal (13,180 hm<sup>3</sup>/año) al ocupar las posiciones 3° y 10° de entre las regiones hidrológicas del país, respectivamente (CONAGUA, 2016).

El sistema hidrológico tiene su origen en los manantiales del municipio Almoloya del Río, ubicado al poniente del Estado de México, en donde a partir de la unión de numerosos arroyos se forma el cauce del río Lerma que conduce los escurrimientos superficiales hacia el noroeste, pasando por el Valle de Toluca y los Estados de Querétaro, Michoacán y Guanajuato, hasta su derivación en el lago de Chapala en Jalisco, con una trayectoria de 708 km. En el Lago de Chapala el río cambia su nombre a Grande de Santiago y continua su curso hacia el noroeste a un costado de la Zona Metropolitana de Guadalajara, pasando por alrededor de 30 km entre la frontera de los Estados de Jalisco y Nayarit, atravesando este último hasta su desembocadura en el Océano Pacífico cerca de la cabecera municipal de San Blas, Nayarit, con un trayecto de 562 km. El sistema en su totalidad (Lerma-Lago de Chapala-Santiago) es considerado el segundo río más largo de México con un total de 1,281 km (CONAGUA, 2016).

A pesar de que el sistema hidrológico del Río Lerma-Santiago proporciona el agua necesaria para el uso doméstico, la generación de energía y la producción de alimentos agrícolas presentan graves problemas de contaminación, ya que es el receptor de las

descargas sanitarias e industriales de la región más poblada del país. Por otra parte, en época de lluvias, son comunes las inundaciones que suelen presentarse en el Medio Lerma, debido a la falta de capacidad de cauce para contener los escurrimientos propios y de los ríos tributarios que llegan a él, prueba de esto son los numerosos eventos de inundación que se han presentado en la historia de las ciudades de Querétaro, Celaya, Salvatierra, Irapuato, Silao y como se analiza en este caso, la ciudad de León.

La Figura 3.24 muestra la cuenca hidrológica definida para este segundo caso de estudio. Esta tiene un área total de 972.19 km<sup>2</sup> y se conforma por dos grandes ríos tributarios de río Lerma, que son los ríos Turbio y Guanajuato, los cuales tienen su origen en la Sierra de Guanajuato y fueron considerados hasta los puntos de control hidrológico-hidráulico ubicados en aguas abajo de la ciudad de León. En la figura se observa que la mayor parte de la cuenca en estudio se encuentra dentro de la subcuenca denominada R. Turbio – P. Palote con clave RH12Be, mientras que una pequeña parte al oriente corresponde a la subcuenca con clave RH12Bd, denominada R. Guanajuato, según datos de la red hidrográfica nacional del INEGI. Asimismo, es posible notar que la ciudad de León es atravesada por numerosos ríos, arroyos y canales, siendo el río de los Gómez el principal de ellos, ya que este río cruza en su totalidad la ciudad por el centro y es uno de los tributarios más importantes del río Turbio. Por su parte, al poniente destaca el río León; mientras que al oriente el río Tajo de Santa Ana y el Arroyo Grande, que de manera similar atraviesan la ciudad.

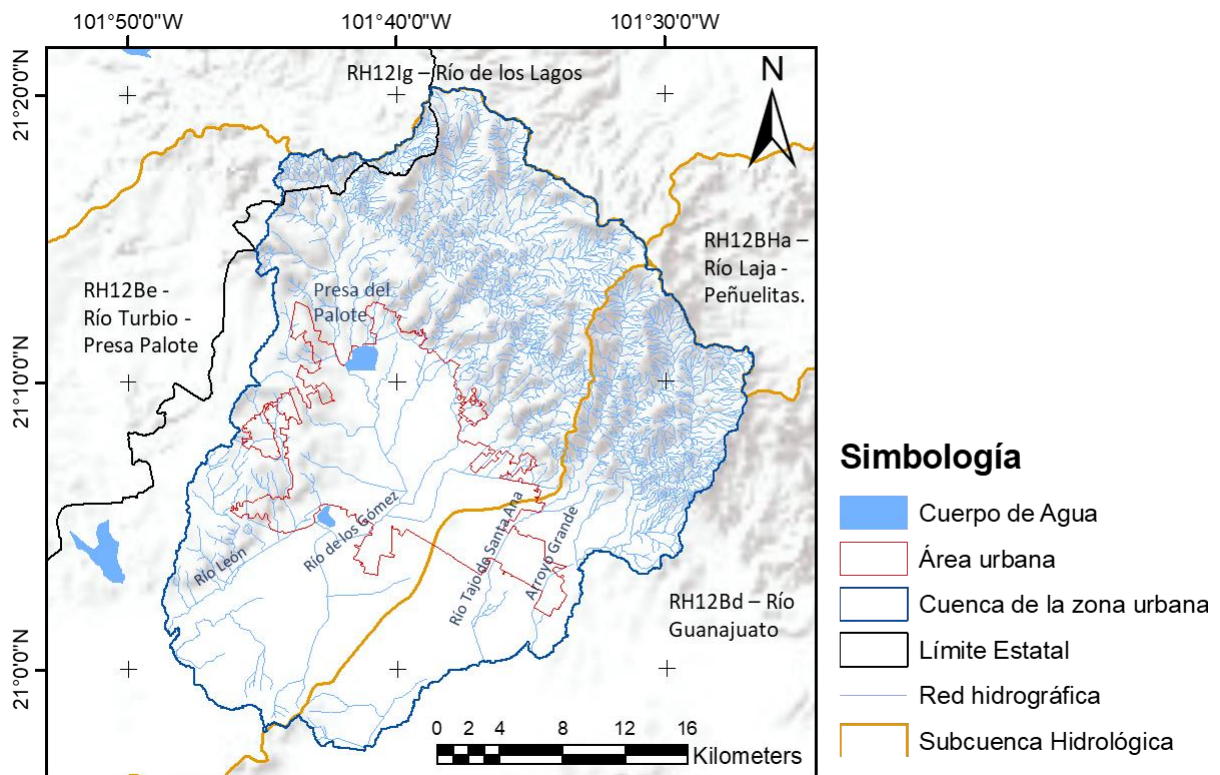


Figura 3-24. Hidrografía en la cuenca de la zona urbana de León, Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia.



La presa "El Palote" constituye la obra hidráulica más importante del municipio, ya que fue construida entre 1953 y 1954 por la extinta Secretaria de Recursos Hidráulicos con el fin de proteger la ciudad contra eventos de inundación, mediante el control de las avenidas provenientes de la Sierra de Guanajuato, asimismo también es utilizada como un medio para el aprovechamiento de agua para el consumo humano y para la adecuación de un parque, que hoy en día es un Área Natural Protegida. De acuerdo con el Sistema de Agua potable y Alcantarillado de León (SAPAL), la localidad cuenta con un sistema regulador de avenidas compuesto por 11 presas (incluida la presa "El Palote") y 7 arroyos principales con el que se ha logrado minimizar los eventos de inundación y, en consecuencia: los daños, lesiones y la pérdida de vidas humanas (Ayuntamiento-León, 2014). Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos, la presencia de fenómenos meteorológicos, la topografía y el constante crecimiento demográfico y urbano de la ciudad, han sido el detonante de severas inundaciones a lo largo de su historia, como se muestra en el siguiente apartado.

### **3.2.2 Inundaciones históricas**

El registro histórico de los eventos de inundación que se han presentado en la ciudad de León, Guanajuato, es de gran importancia para poder entender el desarrollo de este tipo de fenómenos en la actualidad, así como para poder identificar los puntos críticos en lo que se deba de actuar para estar mejor preparados ante eventos de esta naturaleza en el futuro.

Las afectaciones ocasionadas por las inundaciones y los fenómenos climáticos en León ha sido una constante a lo largo de la historia de la ciudad. Una de las principales razones es su ubicación geográfica, ya que se encuentra a 32 kilómetros al oeste del parteaguas natural de las dos vertientes del país, por lo que tiene una alta susceptibilidad de recibir tormentas provenientes de ambos frentes, sin embargo, las lluvias que se presentan en la zona urbana son en su mayoría consecuencia de fenómenos meteorológicos que se forman en el Océano Pacífico durante la temporada de huracanes.

Durante muchos años la ciudad careció de una planeación y el proceso de urbanización se desarrolló sin que se tomara en cuenta el comportamiento natural de los escurrimientos en la zona (ceder espacio a los cauces) o el diseño de las redes de drenaje sanitario o pluvial. Por lo anterior, los eventos de inundación son producidos generalmente por el desborde de arroyos en la ciudad, ocasionados por las intensas precipitaciones que se presentan en la cuenca. Esta situación se ha visto agravada por la escasa infraestructura pluvial con la que se cuenta, así como por los asentamientos irregulares en la historia de la ciudad, los cuales invadieron las llanuras de inundación (Ayuntamiento-León, 2009).

La Tabla 3-9 presenta un resumen de las inundaciones históricas más importantes que se han registrado en la ciudad de León, reportándose la fecha de ocurrencia del fenómeno, el evento meteorológico que lo generó, la lluvia acumulada (si existe información), así como

los impactos de mayor relevancia. Finalmente, la Figura 3-25 muestra imágenes de algunos de los eventos de inundación registrados, mostrando la devastación causada por este tipo de fenómenos en la zona en estudio.

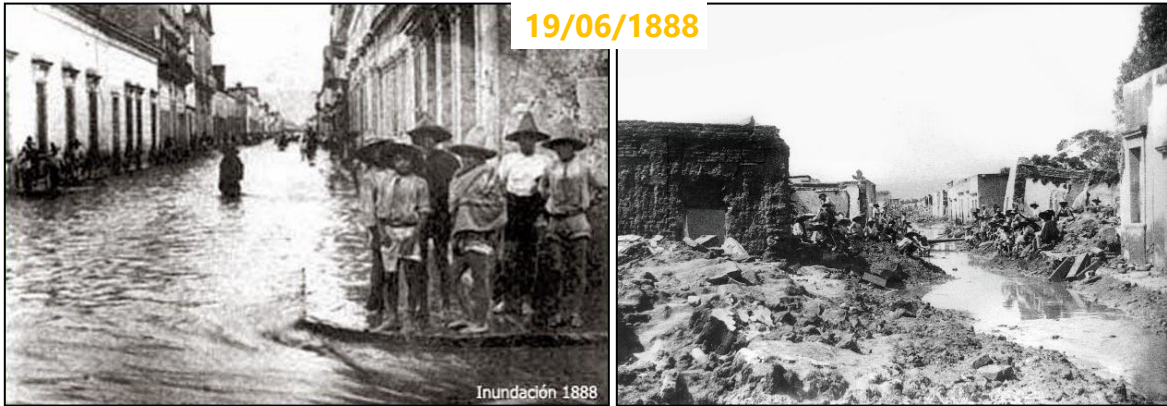
*Tabla 3-9. Inundaciones históricas en la ciudad de León, Guanajuato.*

Fecha	Fenómeno	Precipitación (mm)	Impactos
<b>1608</b>	Fuertes lluvias	Sin datos	En este año se cuenta con el registro de inundación más antiguo de la entonces Villa de León, por lo que se inició la construcción de la primera elevación de las márgenes del río de los Gómez para evitar su desbordamiento.
<b>1637</b>	Fuertes lluvias	Sin datos	La Villa se inunda nuevamente. El Fray Pedro Gutiérrez Gastón documentó daños en el hospital del Espíritu Santo.
<b>1649 / 1762</b>	Fuertes lluvias	Sin datos	En 1649 se registró nuevamente una inundación que cubrió la localidad. En julio de 1762 el río de los Gómez se desborda en la zona urbana a pesar de las obras de contención construidas en las últimas décadas.
<b>19/06/1888</b>	Fuertes lluvias	Sin datos	El dique del Río de los Gómez no resistió la cantidad de lluvia. La inundación dejó en ruinas la ciudad, tras permanecer sumergida durante varios días. En algunas zonas de la ciudad el agua alcanzó los dos metros de altura. Entre los impactos se encuentran al menos 265 muertos, 1,400 desaparecidos y alrededor de 30 mil personas sin hogar.
<b>08/07/1911</b>	Fuertes lluvias	Sin datos	Afectó principalmente la colonia "El Coecillo", la muralla del malecón del río de los Gómez sólo sufrió daños leves en la parte oriente.
<b>23/06/1926</b>	Fuertes lluvias	Sin datos	Las aguas sobrepasaron la capacidad del dique malecón. Derribó un gran número de casas y provocó innumerables pérdidas. Hay relatos de pierdas humanas.
<b>28/06/1971</b>	Fuertes lluvias	73	La zona oriente fue la más afectada, el agua subió hasta 2 m. en 15 colonias populares. El rompimiento de un bordo que se había construido hace pocos días para unir el arroyo Muerto provocó el desbordamiento de las presas Echeveste e Ibarilla.
<b>31/08/1996</b>	Fuertes lluvias	68	Inundación repentina en el centro de la ciudad, debido el desbordamiento del arroyo Marices, dejando 4 personas muertas, cientos de viviendas destruidas y numerosos damnificados.

Evaluación de los criterios de arrastre de personas por inundaciones en zonas urbanas  
ZONAS DE ESTUDIO

<b>06-07/08/1998</b>	Fuertes lluvias	150	Se desbordaron los arroyos Las Liebres, Alfaro y Los Castillos, afectando las colonias, San José de Cementos, Oriental, Guadalupe, Punto Verde y Real de Jerez. Se registraron 950 personas damnificadas.
<b>25/07/2001</b>	Fuertes lluvias	60.8	Se desbordaron tres arroyos que cruzan la ciudad provocando afectaciones en al menos 10 colonias. La tormenta arrastró toneladas de lodo basura y árboles en varias zonas, provocando daños en viviendas, edificaciones y vehículos.
<b>14/06/2004</b>	Fuertes lluvias	124	Desbordamiento de los ríos Las Liebres, La Tinaja y El Salto, ubicados al oriente de la ciudad, lo que causó inundaciones en siete colonias, así como daños en 61 viviendas y el arrastre de toneladas de basura esparcida por la ciudad.
<b>16/07/2008</b>	Onda tropical número 12	177	Siete personas fueron rescatadas después de haber sido arrastrados por corrientes de agua en distintos puntos del municipio.
<b>23/07/2011</b>	Huracán Dora	80	Las intensas lluvias del ciclón tropical arrastraron toneladas de lodo y basura de la Sierra de Guanajuato, la corriente inundó una docena de casas, derribó postes del tendido eléctrico y telefónico, además de arrancar árboles y derribar la barda de una escuela.
<b>21/09/2013</b>	Fuertes lluvias	91	Siete colonias sufrieron inundaciones luego del desbordamiento de los arroyos presentes en la ciudad. Se reportó la afectación de 45 familias por severos estancamientos de agua en sus viviendas, así como el deceso de una persona al ser arrastrada por la corriente de un arroyo.
<b>02/07/2014</b>	Tormenta	47	Provocó enormes encharcamientos e inundaciones en colonias del suroeste de la ciudad. El agua alcanzó más de 20 cm.
<b>23/07/2016</b>	Fuertes lluvias	60.0-69.0	Desbordamiento del Río de los Gómez inundo prácticamente toda la ciudad, atrapando automóviles en su corriente, además de inundar centros comerciales y plazas peatonales. El agua alcanzó casi medio metro de altura en media hora.

Fuentes: (Desinventar.org, 2017; EM-DAT, 2017; SAPAL, 2014) y compendio de los Impactos socioeconómicos de los principales desastres ocurridos en México, CENAPRED.



Fuente: (SAPAL, 2014).



Fuente: (SAPAL, 2014).



Fuentes:

<https://periodicorreio.com.mx/inundaciones-la-historia-repetida-de-leon/>

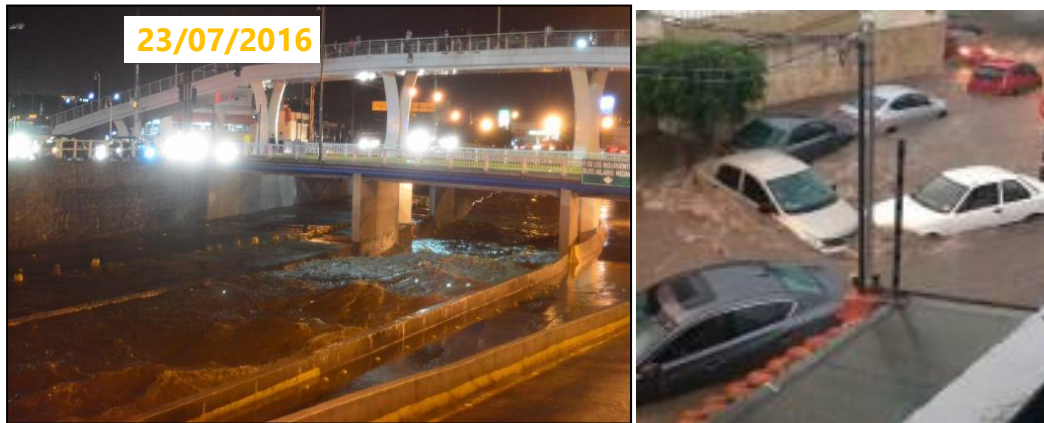
[http://curvetube.com/Inundaci%C3%B3n\\_en\\_Le%C3%B3n\\_Guanajuato/f1PbwPpwl8A.video](http://curvetube.com/Inundaci%C3%B3n_en_Le%C3%B3n_Guanajuato/f1PbwPpwl8A.video)



Fuentes:

<https://www.youtube.com/watch?v=jdFm2G6XuDg>

[http://www.milenio.com/leon/Chubasco-granizada-inundan-zonas-Leon\\_0\\_164384009.html](http://www.milenio.com/leon/Chubasco-granizada-inundan-zonas-Leon_0_164384009.html)



Fuente: <https://periodicocorreo.com.mx/la-inundacion-de-leon-en-imagenes-y-video/>

Figura 3-25. Fotografías de algunos de los eventos de inundación en León, Guanajuato.

### 3.2.3 Población

León es el municipio más poblado del Estado de Guanajuato, ya que cuenta con el 26.97% de la población total de la entidad (5'853,677 habitantes). Según los datos de la última encuesta intercensal del INEGI en el 2015, el municipio de León cuenta con una población de 1'578,626 habitantes de los cuales el 50.88 % (803,219) son mujeres, mientras que el 49.12% (775,407) son hombres.

En cuanto a la distribución de la población, la mayor parte de ella se concentra en la zona urbana donde se tiene aproximadamente el 95% del total. En contraste, la zona serrana cuenta con menos del 1% de la población total de municipio. Finalmente, hacia el sur en pequeñas localidades fuera de la ciudad se concentra el restante 4%.

El rápido crecimiento demográfico que caracterizó a la ciudad de León durante las últimas décadas se debe en gran parte a la inmigración de personas de otros municipios, y localidades rurales por la oferta laboral derivada del desarrollo industrial, comercial y de servicios en León, que es muy conocida como la capital del calzado. La Tabla 3-10 muestra el crecimiento poblacional que se ha presentado en el municipio de León en el período de 1990 a 2015. En ella, se puede observar que la población de esta ciudad casi se ha duplicado hacia el 2015 (1'578,626 habitantes), con respecto del número de personas contabilizadas en el año de 1990 (67,875 habitantes), presentando una tasa de crecimiento promedio anual de 2.42%. Además, la proporción del género en la ciudad de León se ha mantenido constante con paso de los años, de tal manera que desde 1990 al 2015 poco más de la mitad de la población son mujeres y se reporta al 2015 un porcentaje de 50.88% y 49.12% para las mujeres y hombres, respectivamente.

En la Figura 3-26 se muestra la pirámide poblacional de la ciudad de León por rangos quinquenales de edad y género, según los datos de la encuesta intercensal de INEGI del 2015. Para su análisis la población se clasifica en 5 grupos de edades, como sigue: la población de niños entre los 0 y 14 años que representa el 28.58% del total, la población joven de entre los 15 y 34 años que representa el 35.41%, la población madura de entre los 35 y 49 años con el 20.23%, la población adulta de entre 50 y 64 años con el 10.75%, y finalmente, la población de la tercera edad con 65 años o más que conforman el 0.05% del total. Cabe destacar que la mayor parte de la población se encuentra entre los 0 y 29 años, ya que representan el 56.02% de la población total y que en específico el grupo de los 10 a 14 años concentra la mayor cantidad de personas al tener el 9.93 %.

*Tabla 3-10. Histórico poblacional de la ciudad de León, Guanajuato.*

Año Censal	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Hombres	423,912	511,142	554,690	622,226	701,781	775,407
Mujeres	444,008	530,990	580,152	655,861	734,699	803,219
Total	867,920	1'042,132	1'134,842	1'278,087	1'436,480	1'578,626

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Censos y Conteos de Población y Vivienda.*

De manera similar al caso de estudio anterior, es claro que para prevenir el número de lesionados y muertos provocados por un evento de inundación en la ciudad de León, los criterios de arrastre de personas deben estar parametrizados con las características físicas de la población infantil y joven de la región, con el fin de identificar las zonas de peligro en las cuales la seguridad pueda verse amenazada. Por otra parte, según los datos publicados por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), se espera que la población de la ciudad de León aumente en un 29.77% hacia el 2030 (2'048634 habitantes), con respecto del número de personas contabilizadas en el 2015 (1'578,626 habitantes), con una tasa de crecimiento anual promedio de 1.76%, la cual se estima que tenga un comportamiento decreciente, ver Figura 3-27.

Evaluación de los criterios de arrastre de personas por inundaciones en zonas urbanas  
ZONAS DE ESTUDIO

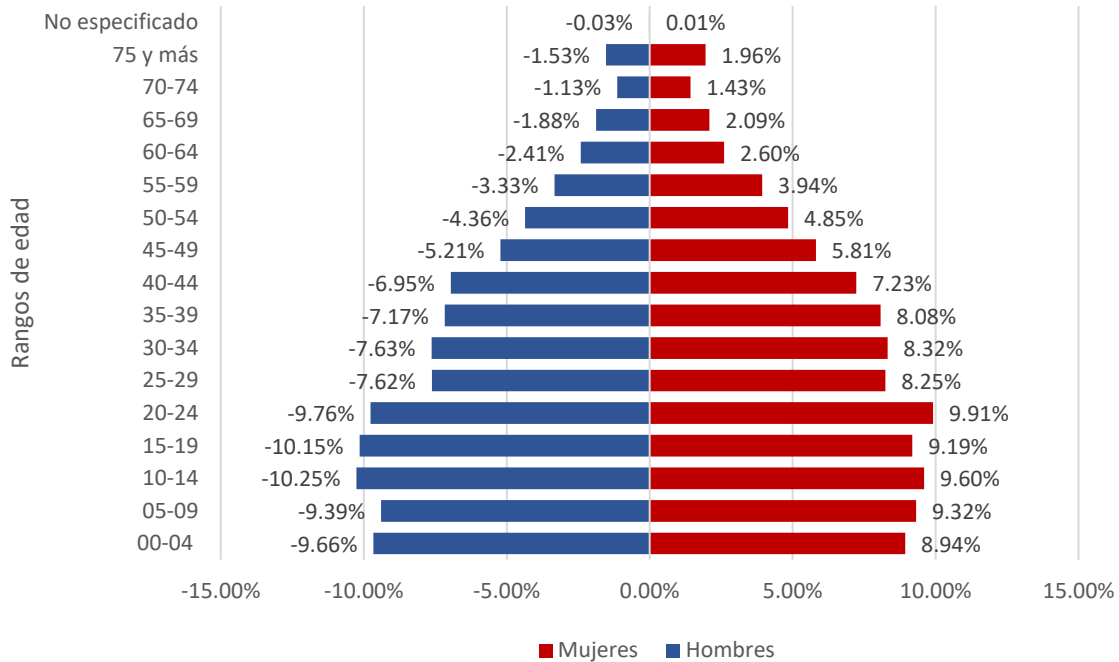


Figura 3-26. Distribución de la población por rangos quinquenales de edad en León, Guanajuato.  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Encuesta Intercensal del INEGI 2015.

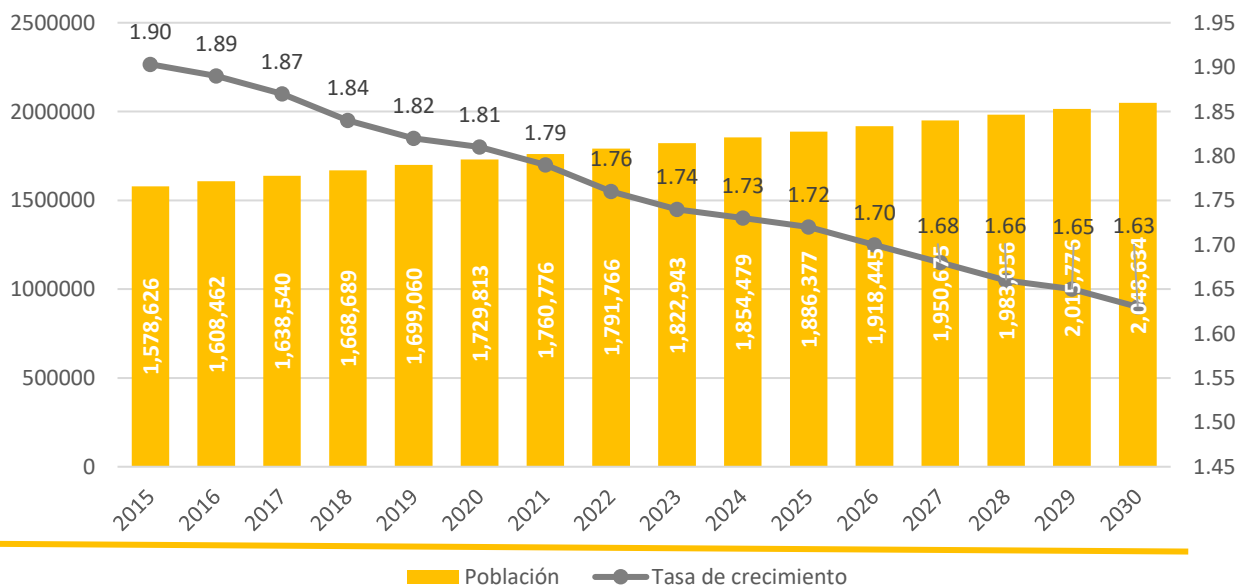


Figura 3-27. Proyección de la población en la ciudad de León (2015-2030).  
Fuente: (CONAPO, 2017).

### **3.2.3.1 Patrones de la ocupación territorial y desarrollo urbano**

En el caso de la ciudad de León se ejemplifican las consecuencias del principal problema de desarrollo demográfico mundial que es, el proceso de urbanización no planeado. En este sentido, la inmigración de localidades rurales conurbadas y el rápido crecimiento poblacional que experimentan este tipo de ciudades, son una de las causas de la intensificación de las afectaciones provocadas por los desastres naturales con el paso del tiempo.

Según lo dicho, los eventos de inundación ocasionan mayores afectaciones donde el desarrollo no planeado ha permitido la invasión de las márgenes de los ríos, el aumento del área de superficies impermeables, así como de otros factores, como la falta de mantenimiento o inexistencia de infraestructura de drenaje pluvial y la falta de planes de prevención y mitigación, lo cual tiene como principal consecuencia la exposición al peligro de arrastre que experimenta la población año con año durante la temporada de lluvias, como ocurre en este caso en estudio.

El proceso de urbanización de la ciudad de León inicio con la configuración de las manzanas ubicadas en las inmediaciones de lo que es hoy la Plaza Fundadores en 1576, así como la configuración de los barrios tradicionales de San Miguel, El Coecillo, De Santiago, San Juan de Dios y el Barrio Arriba en 1880.

A inicios del siglo XX algunos factores regionales provocaron un gran crecimiento demográfico y la urbanización de la ciudad. El conflicto armado en México conocido como la Guerra de los Cristeros provoco que la ciudad fuera un centro de atracción a tal punto de ser conocida como la "ciudad del Refugio". Sin embargo, no fue hasta la segunda mitad de este siglo cuando se registraron los índices más altos de crecimiento y urbanización del territorio, los cuales fueron ocasionados por el aumento en la cobertura de los servicios de salud, pero principalmente por el auge industrial (Ayuntamiento-León, 2009). El rápido crecimiento económico de la región provocó la construcción de nuevas vías de comunicación terrestre, principalmente hacia el oriente para la comunicación con el municipio de Silao y la capital del Estado y en menor medida hacia el occidente con el municipio de Lagos de Moreno, Jalisco.

Actualmente, uno de los principales problemas que enfrenta la ciudad de León es la distribución desigual de la población en el territorio ocasionada por el establecimiento de fraccionamientos irregulares ubicados en las principales vías de acceso a la cabecera municipal que ocasionan el crecimiento urbano desordenado, debido a esto, la dinámica del crecimiento ha provocado la proliferación de vacíos urbanos que ascienden a las 2,300 ha. al 2014 (Ayuntamiento-León, 2014).

Dado que la ciudad de León es mucho más grande que el caso de estudio anterior, la Figura 3-28 muestra la evolución de la mancha urbana en la cabecera municipal de León desde 1580 al 2011. En ella es posible apreciar que el crecimiento de la zona urbana se ha desarrollado principalmente hacia el sureste y noroeste en las inmediaciones de las vías de



acceso, así como la ubicación de los fraccionamientos mencionados en el párrafo anterior. Destaca la sustitución progresiva de terrenos baldíos ubicados al oriente y poniente de la ciudad y en menor medida de los antiguos terrenos de cultivo agrícola localizados al sur. Empero, lo que es aún más importante, la limitada capacidad hidráulica con la que cuentan las canalizaciones de los arroyos que cruzan distintos puntos de la ciudad, ver Figura 3-29.

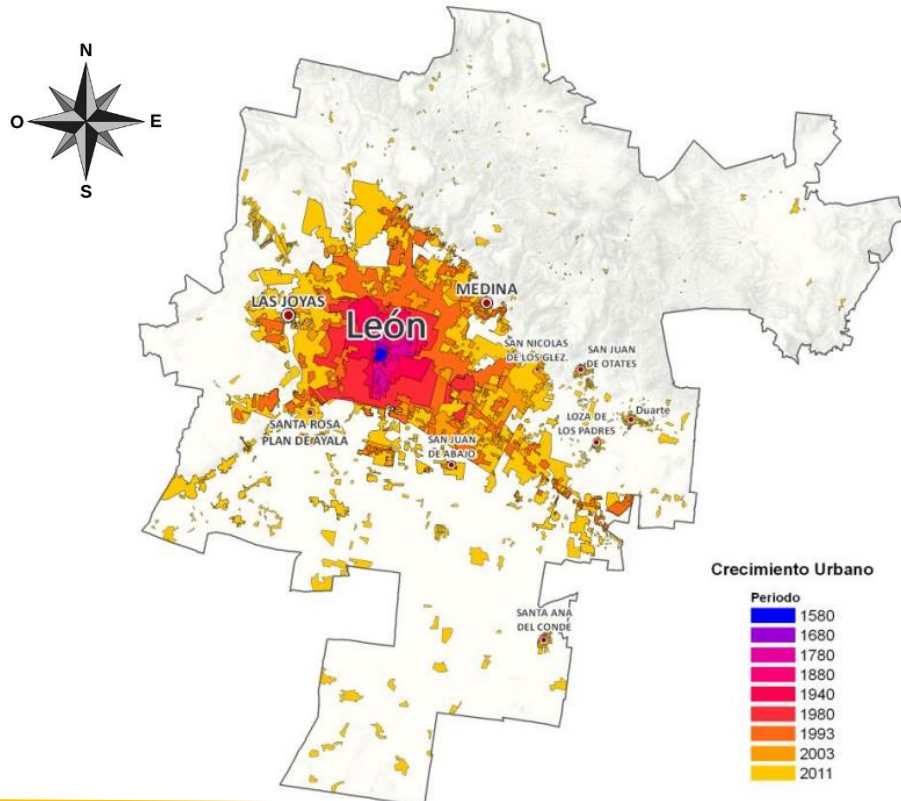
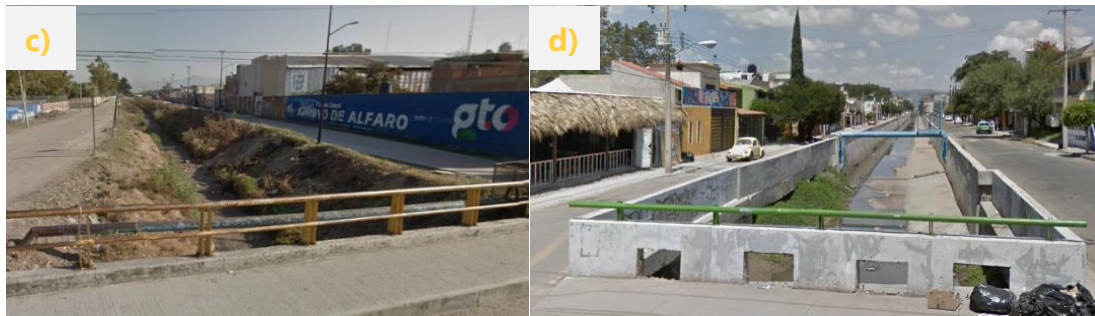


Figura 3-28. Evolución de la mancha urbana en León, Guanajuato.

Fuente: Adaptado de (Ayuntamiento-León, 2014).





*Figura 3-29. Imágenes de la situación actual de los ríos y arroyos en León, Guanajuato. a) Arroyo Los Mariachis al poniente de la ciudad, b) Río de los Gómez al centro de la zona urbana, c) Cauce del arroyo Alfarero y d) Arroyo las liebres, al oriente de la ciudad.*

*Fuente: Elaboración propia con imágenes en campo de Google Maps.*

## **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA**

Para cumplir con el objetivo propuesto en este trabajo de investigación en este capítulo se mostraran la metodología y las consideraciones empleadas para llevar a cabo la evaluación de los tres criterios de arrastre de personas por flujos de inundación seleccionados, a saber: (1) un criterio derivado de pruebas empíricas o cuasi – teóricas; (2) un criterio que considera la definición de umbrales de peligro para niños y adultos a partir de un análisis teórico-conceptual calibrado con los resultados de experimentos de laboratorio con modelos y humanos reales, y finalmente; (3) un criterio que considera la definición de umbrales de peligro combinado para niños y adultos, que tiene su base en el análisis mecánico del cuerpo humano y su interacción con las fuerzas que intervienen en el fenómeno, y que además, considera los efectos de la pendiente en el sitio. Mientras que el primer criterio es completamente generado mediante el ajuste a pruebas experimentales realizadas en seres humanos, los dos últimos se basan en la física del fenómeno, las características físicas del cuerpo humano, según el grupo poblacional al que pertenece, y calibrado con pruebas experimentales realizadas en sujetos humanos y modelos a escala.

Para llevar a cabo lo anterior, fue necesaria la simulación numérica de los procesos hidrológicos e hidrodinámicos a nivel de cuenca mediante una herramienta de modelado hidrológico e hidrodinámico bidimensional rápido, que implementara los últimos avances de hidro-informáticos para la modelización adecuada de inundaciones urbanas. Para este propósito, se destaca el uso de un nuevo modelo numérico de código abierto desarrollado por Laurent Guillaume Courty del Instituto de Ingeniería de la UNAM de nominado “*Itzi*” (que es la denominación del agua en purépecha), en su versión 17.8. El cual, es una herramienta de modelación numérica bidimensional de los procesos de escurrimiento ocasionados por

eventos de precipitación y flujos superficiales, integrado a un software de libre acceso y Sistema de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) denominado como *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS, por sus siglas en inglés). El modelo numérico *Itzi* ha sido utilizado y comparado con éxito en diversos casos de estudio y con otros softwares de modelación hidrodinámica como el LISFLOOD-FP demostrando satisfactorios resultados en numerosos estudios, como se observa en la tabla siguiente:

*Tabla 4-1. Publicaciones del modelo hidrológico e hidrodinámico bidimensional Itzi.*

No.	Presentación o Conferencia	Referencia
2	12th International Conference on Hydroinformatics, HIC. Incheon, Korea 2016. A GRASS GIS module for 2D superficial flow simulations	(Laurent G. Courty & Pedrozo-Acuña, 2016a)
1	XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Lima, Perú. 16 al 30 de septiembre de 2016. Modelo Numérico para la Simulación Dinámica de Inundaciones Urbanas en SIG	(Laurent G. Courty & Pedrozo-Acuña, 2016b)
3	XXIV Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, México 2017. Enfoque Integrado para la Determinación de Mapas de Inundación en Zonas Urbanas de México.	(Rodríguez Rincón, Courty, Soriano Monzalvo, & Pedrozo-Acuña, 2017)
4	XXIV Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, México 2017. Determinación del Peligro por Inundación a Personas en Zonas Urbanas.	(Soriano Monzalvo & Pedrozo-Acuña, 2017)
5	Scientific Journal: Itzi (version 17.1): an open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation.	(Laurent Guillaume Courty, Pedrozo-Acuña, & Bates, 2017)
6	En elaboración: An integrated approach to urban flood mapping.	(Laurent G. Courty, Rodríguez Rincón, Soriano Monzalvo, & Pedrozo-Acuña, 2018)

*Fuente: Elaboración propia.*

Adicionalmente, el modelo ha sido utilizado en la generación de los mapas del Atlas Nacional de Riesgos por Inundación en las ciudades medias del país, desarrollado por un convenio de colaboración entre CONAGUA Y CENAPRED desde 2016. Como se muestra en la Figura 4-1 la metodología implementada en cada uno de los casos de estudio de este trabajo de investigación se compone principalmente de cuatro pasos, los cuales se describen a continuación:

- Datos de entrada: Incluye la recolección de los datos de entrada para el modelo Hidrológico e Hidrodinámico *Itzi* que incluye: El Modelo Digital de Elevaciones, la definición de los coeficientes de rugosidad  $n$  de Manning el establecimiento de los

Parámetros para el cálculo de la infiltración (porosidad, conductividad del agua, presión capilar), el cálculo de los hietogramas de diseño para un periodo de retorno de 2, 5 10 años de periodo de retorno y en su caso los caudales de diseño para cuencas de más de 1,000 km<sup>2</sup> (caso de estudio: cuenca de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas).

- Modelación hidrológico- hidrodinámica (calibración y validación): En este paso se realiza la modelación hidrológico-hidrodinámica de las zonas en estudio, para la determinación de los mapas de máximos tirantes y máximas velocidades asociados con los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años.
- Aplicación de los criterios de arrastre de personas por inundación: Una vez obtenidos los mapas de máximos tirantes y máximas velocidades son utilizados como datos de entrada, junto con las características de la población en su caso, para la implementación de los criterios de arrastre de personas a evaluar. En este aspecto se tomará en cuenta la división en dos grupos poblacionales a saber: niños y adultos.
- Evaluación de los criterios de arrastre de personas: Se lleva a cabo la evaluación de los criterios de arrastre de personas por inundaciones tomando en cuenta como índices la inspección visual de los resultados, el área y número de celdas uno de los niveles de peligro identificados para niños y adultos, con el fin de identificar el más adecuado con forme a sus ventajas y desventajas.

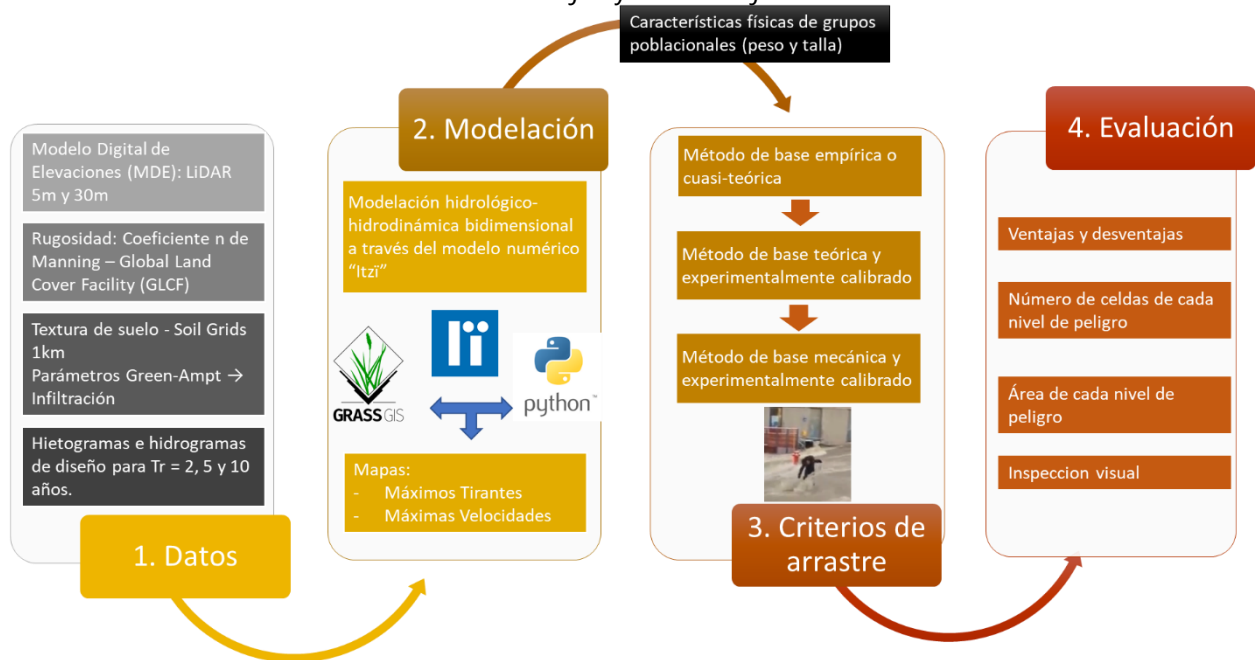


Figura 4-1. Esquema de la metodología aplicada para la evaluación de los criterios de arrastre de personas por inundaciones en zonas urbanas.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.1 Modelo hidrológico e hidrodinámico Itzi

La primera parte de este capítulo se enfoca en la descripción de modelo hidrológico e hidrodinámico *Itzi*, así como de los datos y forzamientos de la modelación numérica, su calibración y validación.

Este trabajo de investigación es el primero en su tipo en utilizar una nueva herramienta de modelación numérica bidimensional de los procesos de lluvia y escurrimiento de código abierto en *Python* denominada *Itzi*, para llevar a cabo la evaluación de los criterios de arrastre por inundación en zonas urbanas, puesto que fue especialmente creada para la simulación de los procesos generadores de un evento de inundación en zonas urbanas.

*Itzi* simula los flujos superficiales en dos dimensiones por medio de la solución de una forma simplificada de las ecuaciones de Saint-Venant o aguas someras bajo un esquema pseudo-2D aplicado en ambas dimensiones, resuelto mediante el método de diferencias finitas. Además, innova en la incorporación de un módulo para resolver los procesos de infiltración mediante la solución de las ecuaciones de Green-Ampt (Laurent G. Courty & Pedrozo-Acuña, 2016a, 2016b).

Una de sus principales ventajas en comparación con otros modelos numéricos es que fue desarrollado sobre la base de un SIG de código abierto conocida como GRASS (Neteler, Bowman, Landa, & Metz, 2012), a través de un código escrito en *Python* que facilita el manejo de las variables de entrada (por ejemplo: precipitaciones, escurrimientos, MDE, etc.) y de salida (por ejemplo, profundidad y velocidad del agua, dirección de flujo, etc.), aun si estas presentan variaciones tanto en espacio y tiempo mediante un archivo en formato *Space Time Raster DataSet* (STRDS, por su siglas en inglés).

La presentación y descripción detallada del modelo "*Itzi*", así como las exitosas comparaciones realizadas en diferentes casos de prueba y otros casos de estudio con otro modelo hidrodinámico bidimensional conocido (LISFLOOD-FP), se encuentran desarrolladas en la Tabla 4-1.

Entre las ventajas y desventajas de la utilización de este modelo se encuentran las siguientes:

### Ventajas

- La capacidad de adaptabilidad espacial y temporal de los datos de entrada provee la reducción en el tiempo de procesamiento y preparación de esta información en comparación con el requerido por otros modelos.
- El punto anterior implica que los forzamientos del modelo pueden ser de diferentes resoluciones espaciales, haciendo que *itzi* maneje la información de manera automática en la resolución definida por la región computacional.

- En cuanto a la variabilidad en el tiempo, el modelo *itzī* puede aceptar archivos en formato STRDS, es decir, *raster* en serie de tiempo permitiendo, por ejemplo: cambios en la precipitación o en los coeficientes de rugosidad a través del tiempo.
- Los modelos numéricos simples basados en un *raster*, como es el caso de Itzī, suelen ser más sencillos de usar y en consecuencia más rápidos, lo que los hace adecuados para la predicción de los riesgos de inundación (Horritt & Bates, 2001).
- Integración de un módulo que permite el cálculo de los procesos de infiltración en el dominio de simulación.
- Integración en un ambiente GIS.
- Posibilidad de manejar una gran cantidad de información y de libre distribución gracias a su código fuente escrito en lenguaje de programación Python.
- Interfaz amigable y fácil de utilizar en pre y postproceso.

### **Desventajas**

- Se sabe que la modelación de inundaciones urbanas tiene un alto coste computacional el cual se incrementa en la medida que aumenta la resolución espacial definida, siendo Itzī acorde a esta premisa.
- Los modelos numéricos basados en *raster* presentan el inconveniente de que para algunos casos se presentan inestabilidades numéricas producidas por los pequeños coeficientes de fricción característicos de las zonas urbanas ( $n < 0.03$ ).
- El modelo no permite la simulación de estructuras de drenaje o internas como es el caso de puentes, compuertas o alcantarillas.
- Para los efectos del arrastre de personas, no toma en cuenta los efectos del arrastre de sedimentos por carga de fondo o en suspensión.

## **4.1.1 Descripción**

### **Esquema numérico**

El modelo utiliza esquema explícito de diferencias finitas para resolver las ecuaciones simplificadas de aguas someras descritas por (de Almeida, Bates, Freer, & Souvignet, 2012) y (de Almeida & Bates, 2013).

En la Figura 4-2 puede observarse las variables utilizadas en el esquema en la dirección X y sus variaciones en el tiempo. Además, se presenta la vista bidimensional completa de la malla, así como de las variables utilizadas en el modelo numérico completo. Tanto la elevación de la superficie del agua y el tirante del agua ( $h$ ) se calculan al centro de la celda, mientras que el flujo ( $q$ ) y la velocidad ( $u$ ) se evalúan en la frontera de la celda.

El cálculo del flujo de agua ( $q$ ) se obtiene resolviendo la ecuación de momento simplificada unidimensional en las fronteras de las celdas. Sin embargo, para brindar una representación bidimensional del flujo, el momento actualiza en las fronteras de las celdas

con una discretización explícita de la ecuación de momento en cada dirección de manera independiente.

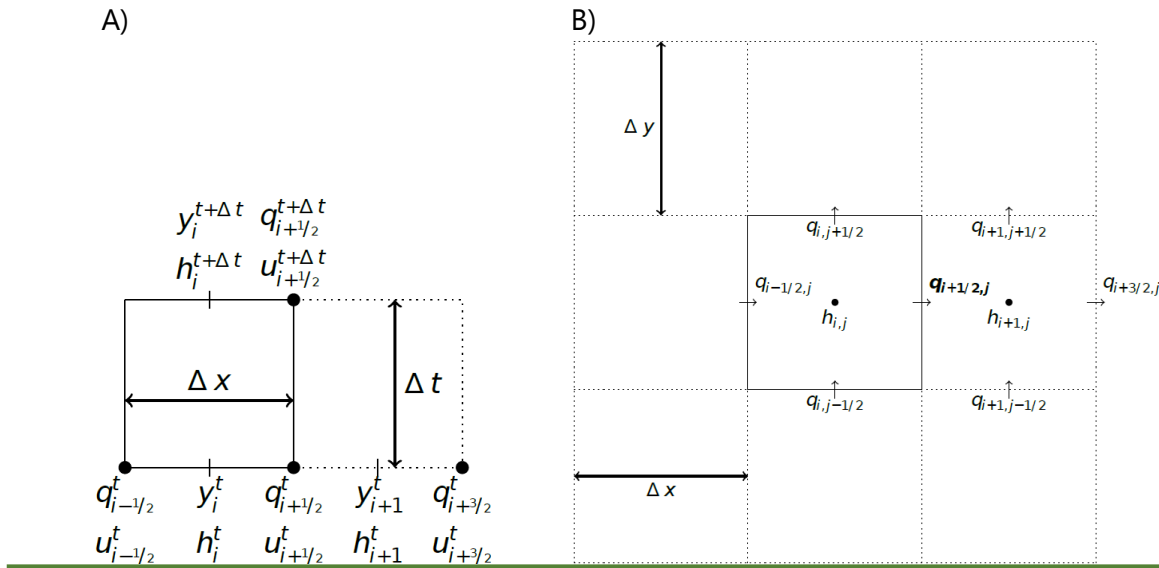


Figura 4-2. A) Variables utilizadas y B) malla utilizado en el esquema numérico del modelo Itzi.  
 Fuente: (Laurent Guillaume Courty et al., 2017).

### Paso de tiempo

Itzi utiliza un método de paso de tiempo adaptativo para estimar el paso de tiempo adecuado basado en la condición de Courant – Friedrichs – Lewy. En cada paso de tiempo se calcula el intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) por medio de la ecuación siguiente:

$$\Delta t = \alpha \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\sqrt{g \cdot h_{\max}}} \quad (4.1)$$

donde:

$h_{\max}$ , es la profundidad máxima del agua en todo el dominio en m.

$g$ , aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ ;

$\alpha$ , coeficiente de la condición Courant – Friedrichs – Lewy, regularmente igual a 0.7 para flujo subcrítico (de Almeida & Bates, 2013).

### Cálculo del flujo

El cálculo del flujo de agua se obtiene resolviendo la ecuación de momento unidimensional simplificada en la frontera de las celdas del dominio (ver ecuación 4.2) en ambas dimensiones de manera independiente.



$$q_{i+1/2}^{t+\Delta t} = \frac{\left( \theta q_{i+1/2}^t + (1-\theta) \frac{q_{i-1/2}^t + q_{i+3/2}^t}{2} \right) + gh_f \Delta t S}{1 + g \Delta t n^2 \|q_{i+1/2}^t\| / h_f^{7/3}} \quad (4.2)$$

Donde los subíndices  $i$  y  $t$  corresponden a los índices de espacio y tiempo, respectivamente;  $h_f$  es la diferencia entre la máxima elevación de la superficie del agua y la máxima elevación del terreno;  $\theta$ , es un coeficiente que define la importancia que tiene el promedio de los flujos ascendentes y descendentes sobre el flujo sobre la celda considerada  $q_{i+1/2}^t$  cuyo valor se establece en 0.9 según la propuesta de (de Almeida et al., 2012);  $S$ , es la pendiente de la superficie del agua evaluada en las fronteras; y  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning calculado con el valor promedio de las celdas vecinas.

Finalmente, el cálculo del valor del flujo se realiza con la evaluación del módulo resultante de las componentes del flujo en ambas direcciones (X, Y), ver ecuación 4.3. Dado que se trata de una malla no centrada, el flujo en la dirección Y no se calcula en el mismo sitio que en la dirección X, sin embargo, el cálculo del módulo se realiza por medio del valor promedio de los cuatro valores de flujo cercanos.

$$\|q_{i+1/2}^t\| = \sqrt{(q_{y,i+1/2,j}^t)^2 + (q_{x,i+1/2,j}^t)^2} \quad (4.3)$$

### Cálculo de tirantes

La ecuación 4.4 permite el cálculo de la profundidad del agua en cada celda del dominio, la cual se obtiene con la suma de la profundidad actual  $h^t$ , los términos de fuentes externas (precipitación, flujo definido por el usuario, etc.)  $h_{ext}^t$  y los flujos que pasan por las cuatro caras de cada celda. En este punto cabe destacar que el modelo numérico se implementa la regla propuesta en (Sampson, Bates, Neal, & Horritt, 2013) para mantener la estabilidad durante eventos con lluvia directa, en ella se propone el establecimiento de una velocidad fija definida por el usuario en aquellas celdas en las que la profundidad del agua se encuentre por debajo de un valor umbral, el cual fue establecido en 5 mm con una velocidad de 0.1 m/s, según los buenos resultados hallados por el desarrollador.

$$h^{t+\Delta t} = h^t + h_{ext}^t + \frac{\sum^4 Q_{i,j}^t}{\Delta x, \Delta y} \cdot \Delta t \quad (4.4)$$

### Infiltración

En el modelo numérico Itzi la infiltración puede definirse de dos formas:

- La primera opción puede realizarse mediante la construcción de un mapa raster que contenga los valores fijos de la tasa de infiltración en el dominio de simulación o

mediante una serie temporal de mapas raster (STRDS) que presente la variación de los valores de la tasa de infiltración (en mm/h) a través del tiempo.

- La segunda forma consiste en el cálculo de la tasa de infiltración mediante el método de Grenn-Ampt (ver ecuación 4.5). A pesar de su antigüedad este método físico, que tiene su base en las leyes de conservación de la masa y de Darcy, continúa siendo utilizado en diversos estudios debido a su practicidad y la confianza que generan sus resultados en comparación a otros modelos de infiltración (I. Idike, L. Larson, C. Slack, & A. Young, 1980; Mishra, Tyagi, & Singh, 2003).

$$f = K \left( 1 + \frac{(\theta_e - \theta) \psi_f}{F} \right) \quad (4.5)$$

Donde:

$f$ , es la tasa de infiltración en

$K$ , es la conductividad hidráulica

$\theta_e$ , la porosidad efectiva

$\theta$ , es el contenido inicial de agua en el suelo

$\psi_f$ , la presión capilar en; y

$F$ , la cantidad de infiltración

La Figura 4-3 muestra los componentes generales de un modelo numérico de lluvia-escurrimiento basado en una capa *raster*, como lo es Itzi.

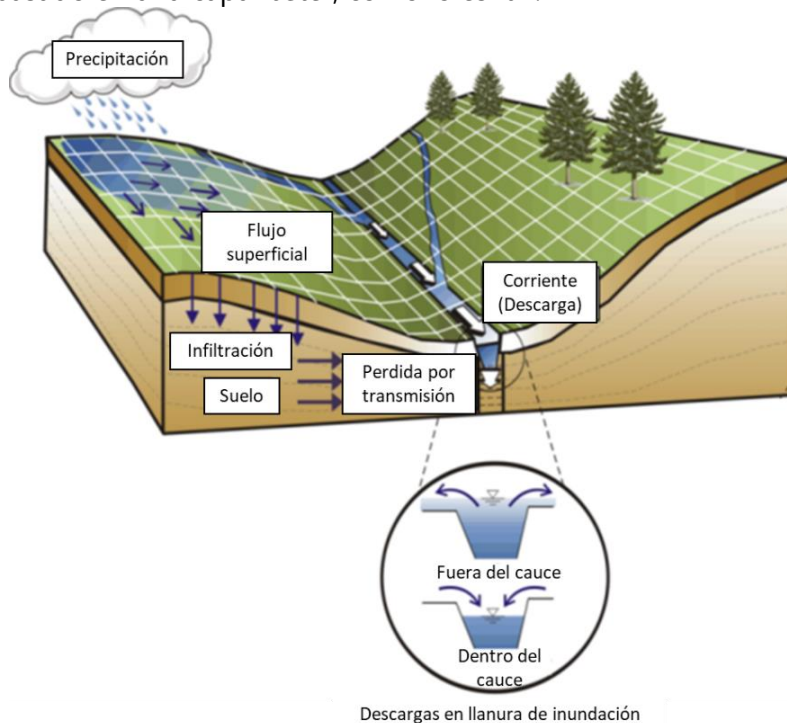


Figura 4-3. Componentes generales de un modelo de lluvia-escurrimiento basado en raster  
Fuente: Modificado de (Wright, 2016).

## 4.1.2 Forzamientos

En los siguientes párrafos se describen los forzamientos o datos de entrada del modelo numérico itzi, los cuales fueron necesarios para llevar a cabo la simulación hidrológico-hidrodinámica en ambos casos de estudio.

### Precipitación

Para la conformación de los mapas raster de altura de precipitación asociados a diferentes periodos de retorno se utilizó la información publicada por la Coordinación Nacional de Protección Civil (CNPC) a través del CENAPRED, que consiste en una base de datos elaborada a partir del análisis de 2,243 de las 5,338 estaciones climatológicas de la base de datos CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), dependiente de la CONAGUA. El hecho de que se haya utilizado menos de la mitad de las estaciones del país se debió a una depuración de aquellas que contaran con al menos 20 años de información válida y continua, ver Figura 4-4. En (Domínguez Mora et al., 2012) se detalla el procedimiento para la corrección de los datos de las estaciones climatológicas.

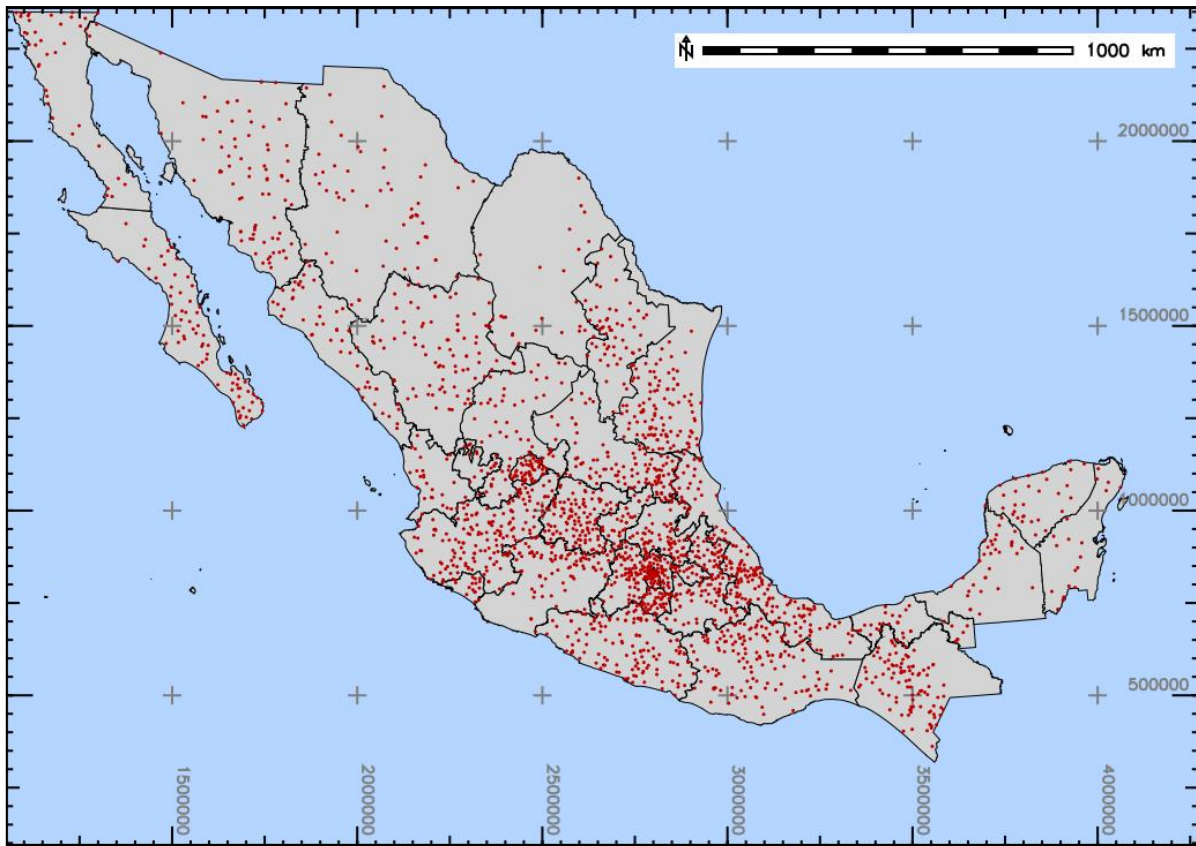


Figura 4-4. Estaciones climatológicas utilizadas en la generación del mapa de precipitación nacional. Elaboración propia con datos del CLICOM. Coordenadas proyectadas: México ITRF2008 / LCC.

El mapa de precipitación nacional generado en esta base de datos considera el análisis regional estadístico y probabilístico del registro histórico validado de cada estación, con lo que se puede calcular la precipitación máxima diaria asociada a diferentes periodos de retorno. Para este trabajo de investigación se requirió la información de los mapas de precipitación asociados a los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años, ver figura 4-5. Esto debido a que el enfoque de los resultados obtenidos busca destacar también la evolución de los niveles de peligro de arrastre de personas con cada evento de diseño, los cuales no son apreciables en periodos de retorno mayores.

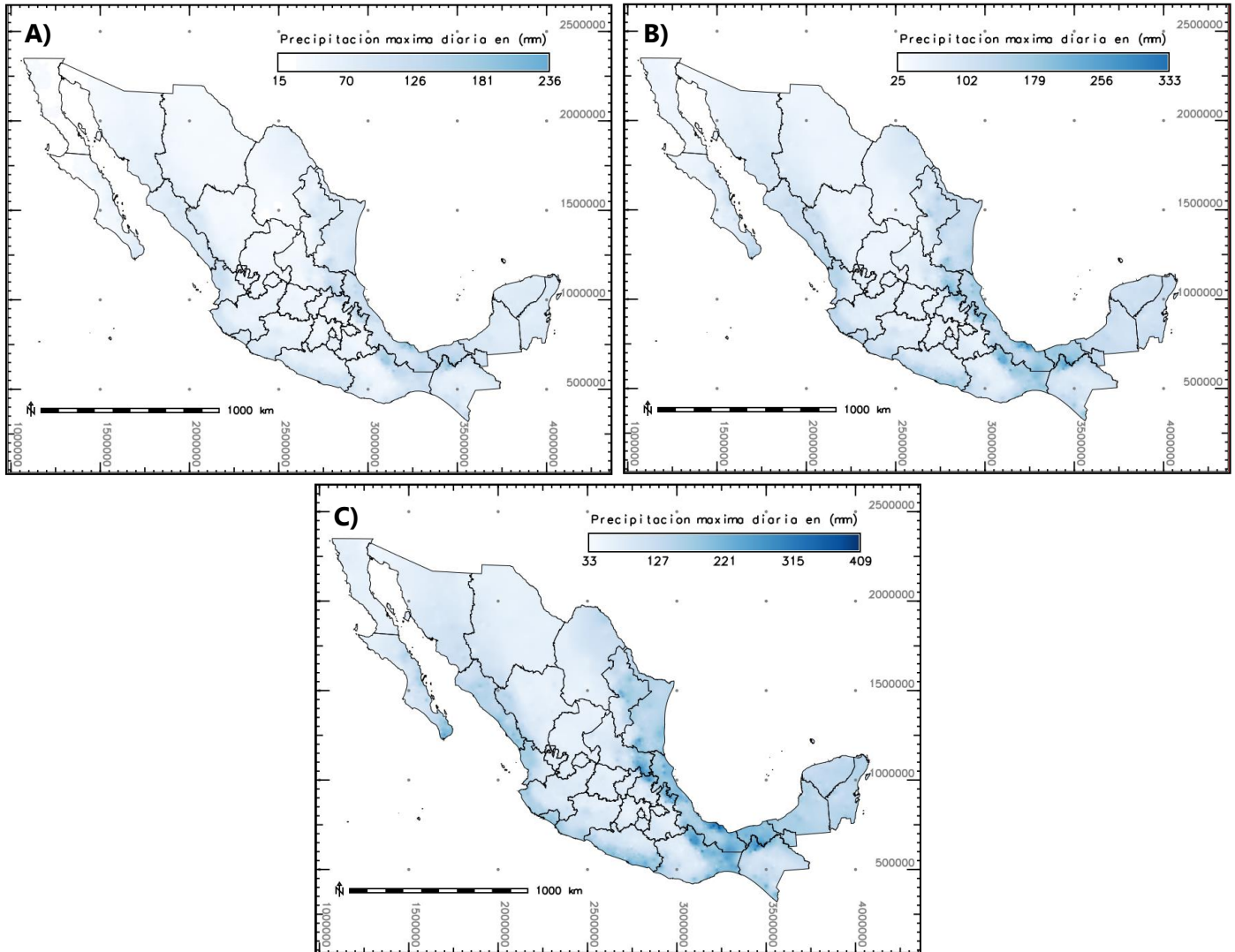


Figura 4-5. Mapas de precipitación máxima diaria para una tormenta de diseño de A)  $Tr=2$  años, B)  $Tr=5$  años y C)  $Tr=10$  años en todo el territorio nacional.

Elaboración propia con datos del CENAPRED. Coordenadas proyectadas: México ITRF2008 / LCC.

Para la determinación de la duración adecuada de la tormenta de diseño se utilizó el concepto de tiempo de concentración ( $T_c$ ), que se define como el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio, es decir, el tiempo que

tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Aparicio Mijares, 2004), que representa el momento en el que el gasto de la cuenca en el punto de análisis es constante. De esta forma el  $T_c$  fue determinado para todos los puntos dentro de las cuencas en estudio, por medio de la ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.02L^{0.77} S^{-0.385} \quad (4.6)$$

Donde:

$T_c$ , es el tiempo de concentración en minutos.

$L$ , es la longitud del cauce principal en m.

$S$ , es la pendiente media del cauce, expresada en decimal.

El resultado de la aplicación de la formula fue de 15.5 y 12.5 horas para las ciudades de Río Bravo y León, respectivamente, ver Figura 4-6. Por lo que se deduce que la duración de la tormenta que se utilizara para la determinación de los hietogramas de diseño para ambos casos es de estudio corresponde a 1 día con intervalos a cada hora.

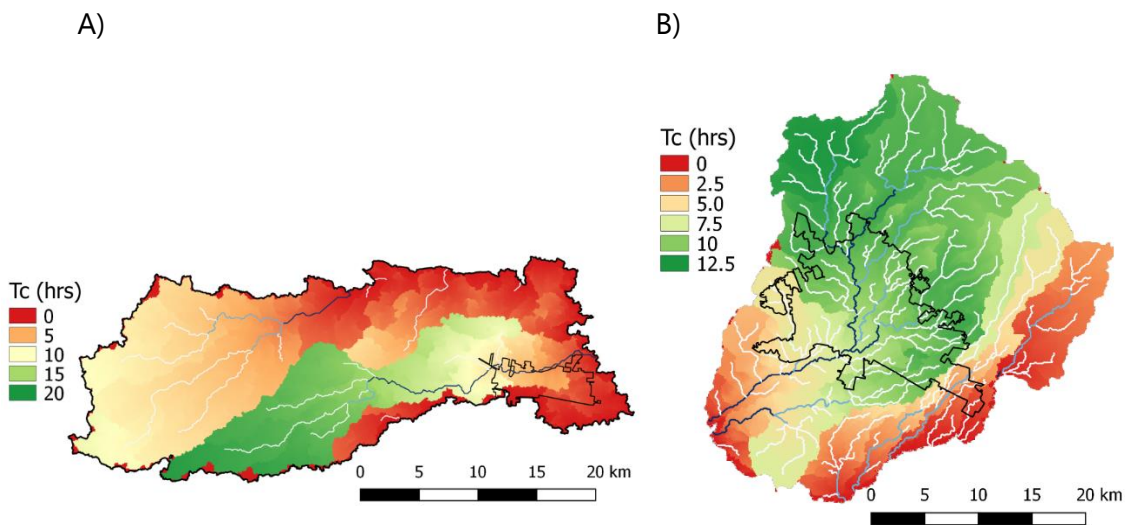


Figura 4-6. Tiempo de concentración para la cuenca de la zona urbana de A) ciudad río Bravo, Tamaulipas Y B) León, Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia.

Los hietogramas de diseño que corresponden a los periodos de retorno considerados en este trabajo de investigación fueron deducidos a partir del análisis regional, estadístico y probabilístico de cada una de las 2,243 estaciones seleccionadas en la base de datos del CLICOM. En donde a cada de ellas se le ajusta una función de distribución de probabilidad a partir de la cual se pueden obtener las precipitaciones máximas diarias asociadas a cualquier periodo de retorno, sin embargo, dado que los casos de estudio analizados requieren de un hietograma de diseño con intervalos de duración menores a un día, se hizo uso de la metodología de (Chen, 1983), pero adaptada a México por (Baeza, 2007) mediante la construcción de un mapa de que define el "factor de convectividad" (R) regionalmente (Ver

Figura 4-7) y que considera la conformación topográfica y climatológica del entorno de cada estación.

De acuerdo con la investigación de Chen, para obtener la precipitación de cualquier duración asociada a un periodo de retorno se requiere obtener la altura de precipitación de una duración de 1 y 24 horas para un período de retorno de 10 años ( $P_1^{10}$ ) y ( $P_{24}^{10}$ ), respectivamente; así como la altura de precipitación de duración de 1 hora para un período de retorno de 100 años ( $P_1^{100}$ ). Con estos datos se pueden obtener los cocientes  $R = P_1^T / P_{24}^T$  para cualquier período de retorno T y  $x = P_d^{100} / P_d^{10}$ , para cualquier duración d.

El factor de convectividad fue valuado en 0.65 y 0.45 para las ciudades de León y Río Bravo, respectivamente, que corresponden a los rangos establecidos en la Figura 4-7.

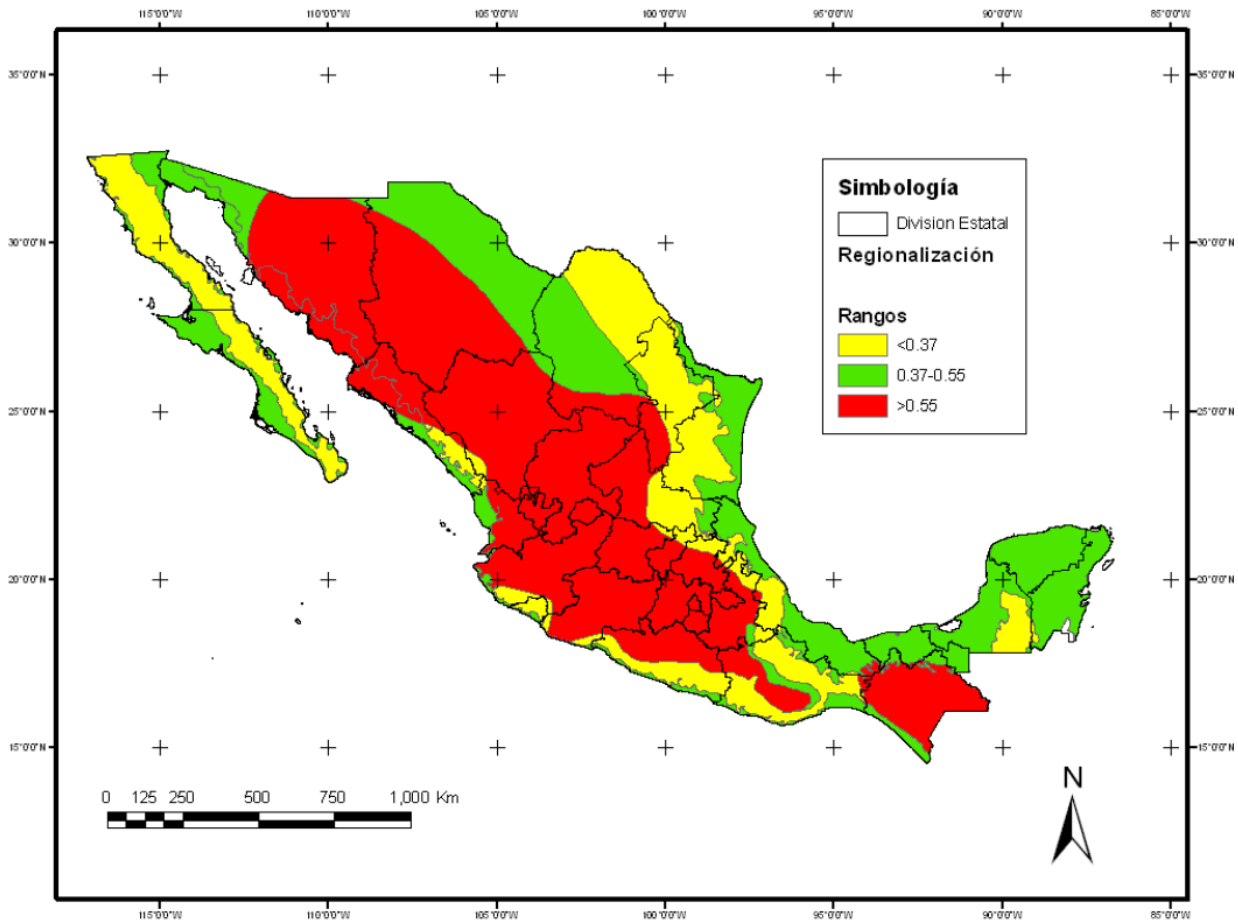


Figura 4-7. Regionalización del factor de convectividad R

Fuente: (Baeza, 2007).

Teniendo en cuenta el tiempo de concentración estimado para ambos casos de estudio, se conformaron los hietogramas de diseño con una duración total de un día con intervalos a

cada hora asociados a 2, 5, y 10 años de periodo de retorno ordenado por bloques alternos (Chow, 1994), ver Figuras 4-8 y 4-9. Finalmente, con ayuda de las herramientas del ambiente GRASS GIS se elaboró un conjunto de datos raster STRDS, que conformo al hietograma de diseño como un archivo de entrada para el modelo numérico Itzi.

Ciudad Río Bravo	
Factor de Convectividad	0.45
Periodo de retorno y duración	hp máx. (mm)
Tr2, d= 1 día	73.81
Tr5, d= 1 día	108.64
Tr10, d= 1 día	133.52
Tr2, d= 1 hr	33.21
Tr5, d= 1 hr	48.89
Tr10, d= 1 hr	60.08

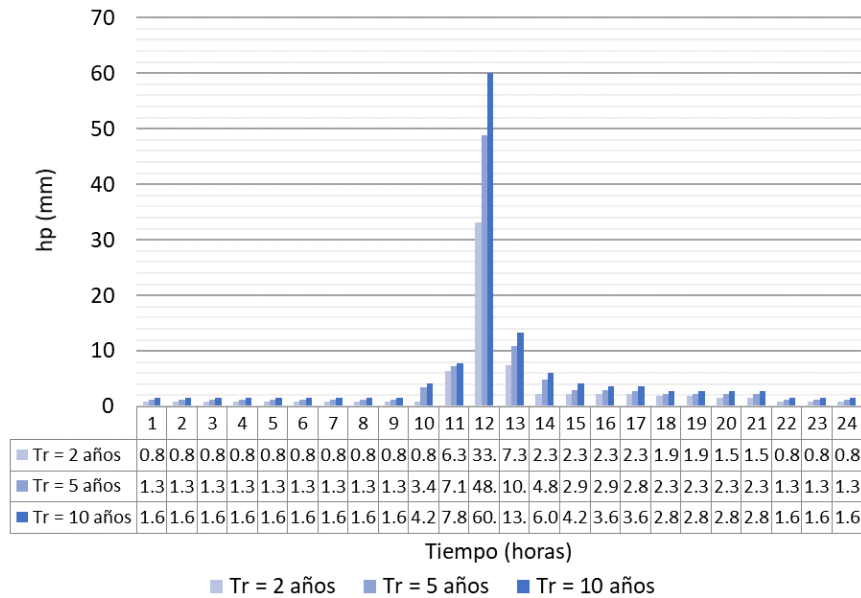


Figura 4-8. Hietogramas de diseño para diferentes periodos de retorno y una tormenta de duración de un día, estimado a partir del mapa de precipitación nacional elaborado por el CENAPRED para la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.

Fuente: Elaboración propia.

Ciudad de León	
Factor de Conectividad	0.65
Periodo de retorno y duración	hp máx. (mm)
Tr2, d= 1 día	49.60
Tr5, d= 1 día	64.22
Tr10, d= 1 día	74.14
Tr2, d= 1 hr	32.24
Tr5, d= 1 hr	41.74
Tr10, d= 1 hr	48.19

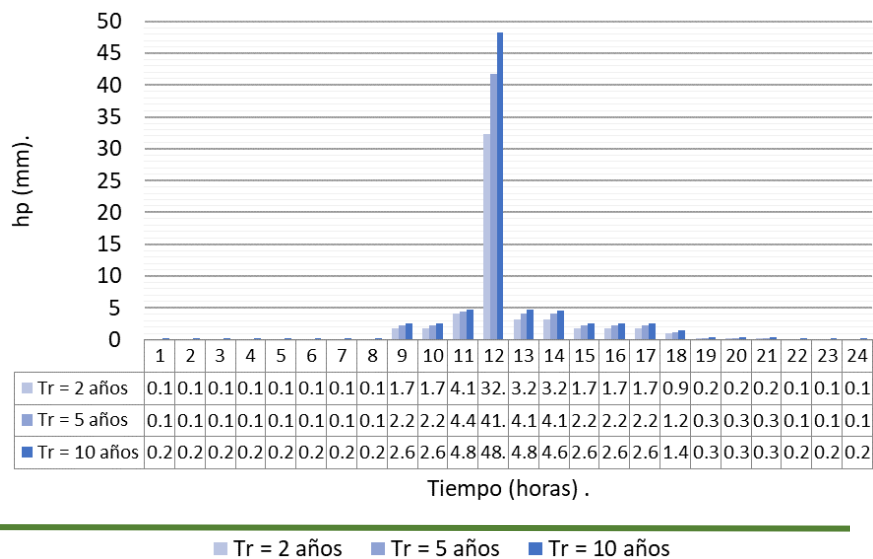


Figura 4-9. Hietogramas de diseño para diferentes periodos de retorno y una tormenta de duración de un día, estimado a partir del mapa de precipitación nacional elaborado por el CENAPRED para la ciudad de León, Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia.

### Escurremientos

Para cuencas mayores a 1000 km<sup>2</sup> es recomendable reducir el área de simulación incorporando la información disponible de los escurremientos en la zona de estudio como se indica en (Rodríguez Rincón et al., 2017).

Para la cuenca de la ciudad de León, no fue necesario utilizar la información de ninguna estación hidrométrica ya que la cuenca tiene un área de 972.19 km<sup>2</sup>, además de que la utilización de esta información no disminuiría el tiempo requerido de la simulación de manera significativa.

En el caso de la ciudad de Río Bravo resulta ineficiente modelar la cuenca del río Bravo en su totalidad, por lo que en este caso se requirió de incorporar al dominio hidrológico el caudal asociado a los períodos de retorno considerados, los cuales fueron determinados a partir del análisis estadístico del registro de la estación hidrométrica 24296 “Salidas Presa Falcón” de la base de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), la cual, se localiza aguas abajo del embalse sobre el río Bravo y presenta una función de distribución General de Valores Extremos (GVE) por momentos L de sus gastos máximos anuales.

La Figura 4-10 muestra una la gráfica de la función de distribución de probabilidad, así como una tabla con los datos de los caudales calculados para 2, 5 y 10 años de periodo de retorno. Por su parte, la Figura 4-11 muestra los hidrogramas de diseño triangulares que serán considerados en la modelación de los procesos hidrodinámicos en la zona de estudio.

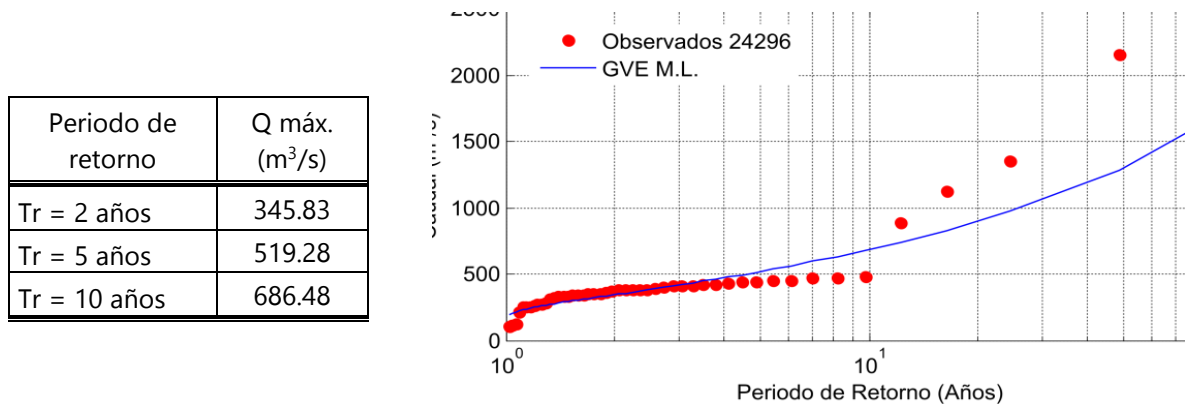


Figura 4-10. Gastos máximos instantáneos de diseño en el río Bravo. Según los datos de la estación hidrométrica 24296 “Salidas Presa Falcón”.

Fuente: Elaboración propia, con datos del BANDAS.



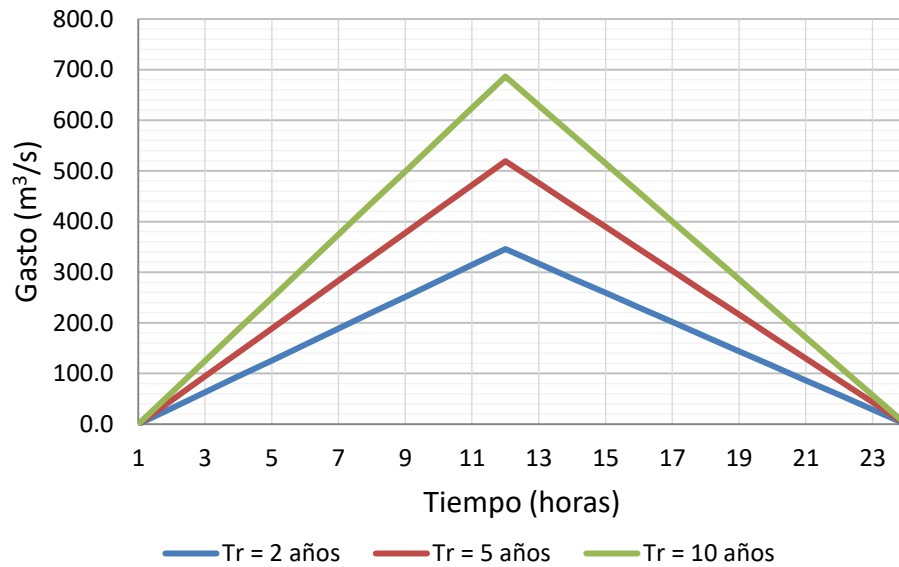


Figura 4-11. Hidrogramas triangulares construidos tras el análisis estadístico de los caudales medidos por la estación hidrométrica 24296 "Salidas Presa Falcón".

Fuente: Elaboración propia.

### Modelo Digital de Elevaciones

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) utilizado en ambos casos de estudio fue obtenido a través de datos de altimetría provenientes de sistemas aéreos equipados con rayo láser conocida como Light Detection And Ranging (LiDAR) disponible en la página Web del INEGI, el cual cuenta con una resolución de 5 metros para el caso de la ciudad de Rio Bravo (ver Figura 3-3) y de 30 metros para la ciudad de León (ver Figura 3-17), por la aplicación de un *resampling* al MDE mediante la herramienta de GRASS GIS *r.resamp.stats*, a través del método de agregación por promedio.

### Parámetros para el cálculo de la infiltración

Como se mencionó anteriormente, el modelo hidrodinámico Itzi posee un módulo para resolver los procesos de infiltración en el suelo, resolviendo la ecuación de infiltración conocida como Green-Ampt (Green, W. H., & Ampt, 1911), esta depende a su vez de 3 parámetros característicos del tipo de suelo en la zona de estudio a saber: conductividad hidráulica, la porosidad y la presión capilar.

En el caso de México, estos parámetros fueron definidos a partir de la información de textura de suelo, horizonte y mineralogía de las arcillas publicada en la base de datos de libre acceso conocida como "SoilGrids1km" del Centro de Información y Referencia Mundial de Suelo (ISRIC, por sus siglas en inglés), el cual, contiene la información de 110,000 sondeos a nivel mundial, en formato ráster 3D, a una resolución de 1 km y con datos a cada 3 metros y

hasta los 18 metros de profundidad (Hengl et al., 2014). La Figura 4-12 muestra textura de suelo que componen las cuencas hidrológicas en estudio, las cuales presentan en su mayoría suelo franco arcilloso (mostrado en color naranja) y algunas extensiones en menor extensión que se caracterizan por suelos arcillosos en café y por suelo arcilloso calcáreo (marga) en color verde. De manera similar, las Figuras 4-13 y 4-14 muestran la variación espacial de los parámetros de conductividad hidráulica, porosidad y presión capilar, que fueron utilizados como entradas en el software de modelación hidrodinámica bidimensional "Itzi" para el cálculo de la infiltración.

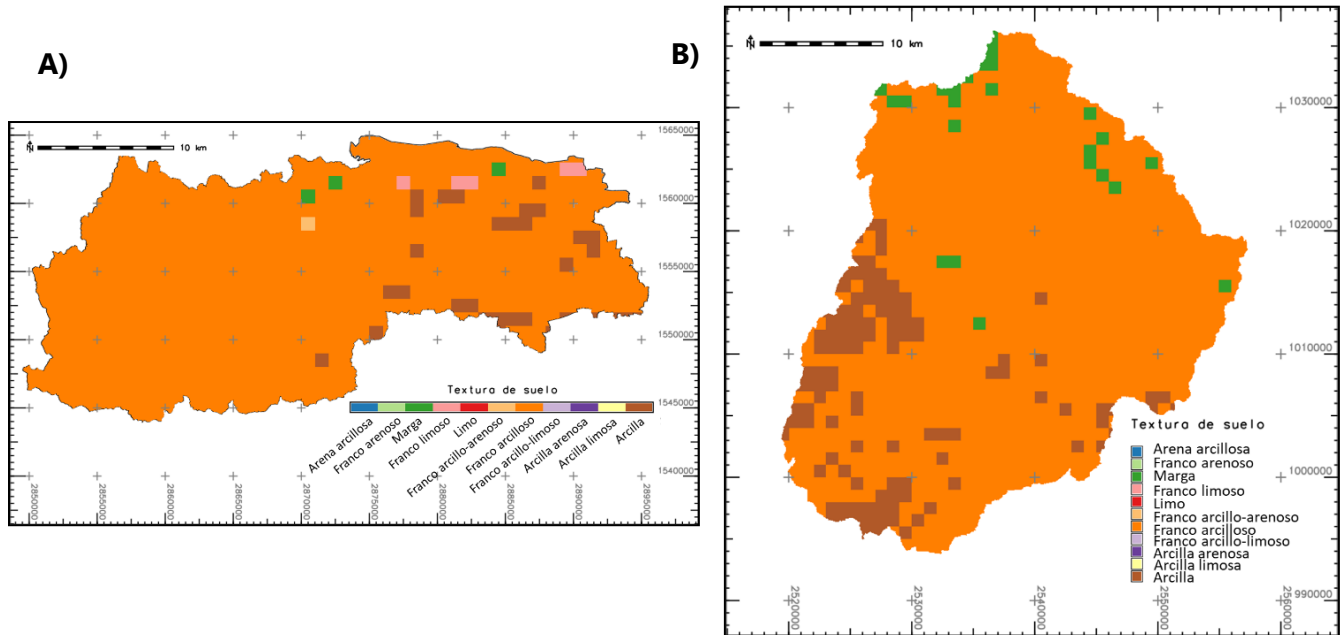
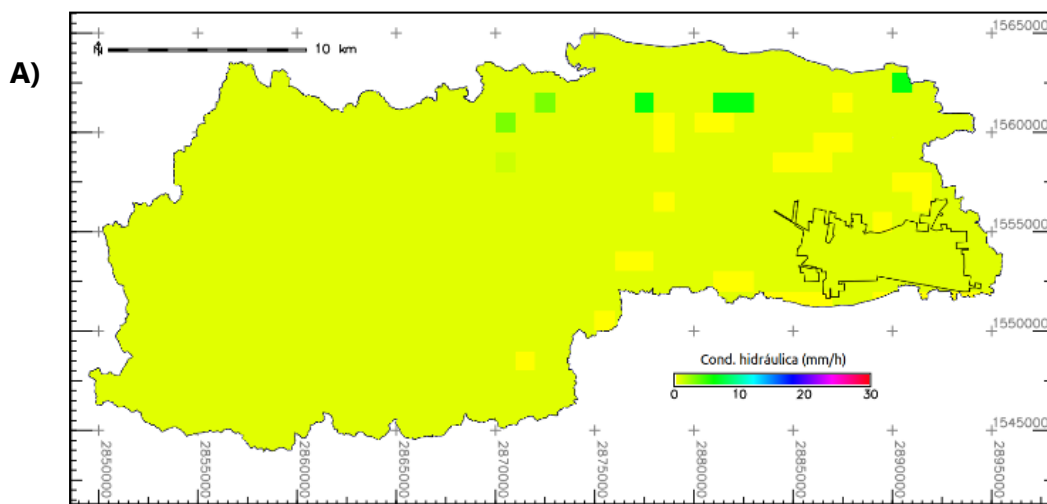


Figura 4-12. Texturas de suelo identificadas en A) Río Bravo, Tamaulipas y B) León, Guanajuato, de acuerdo con la base de datos del SoilGrids1km de ISRIC.

Fuente: Elaboración propia. Coordenadas proyectadas: México ITRF2008 / LCC.



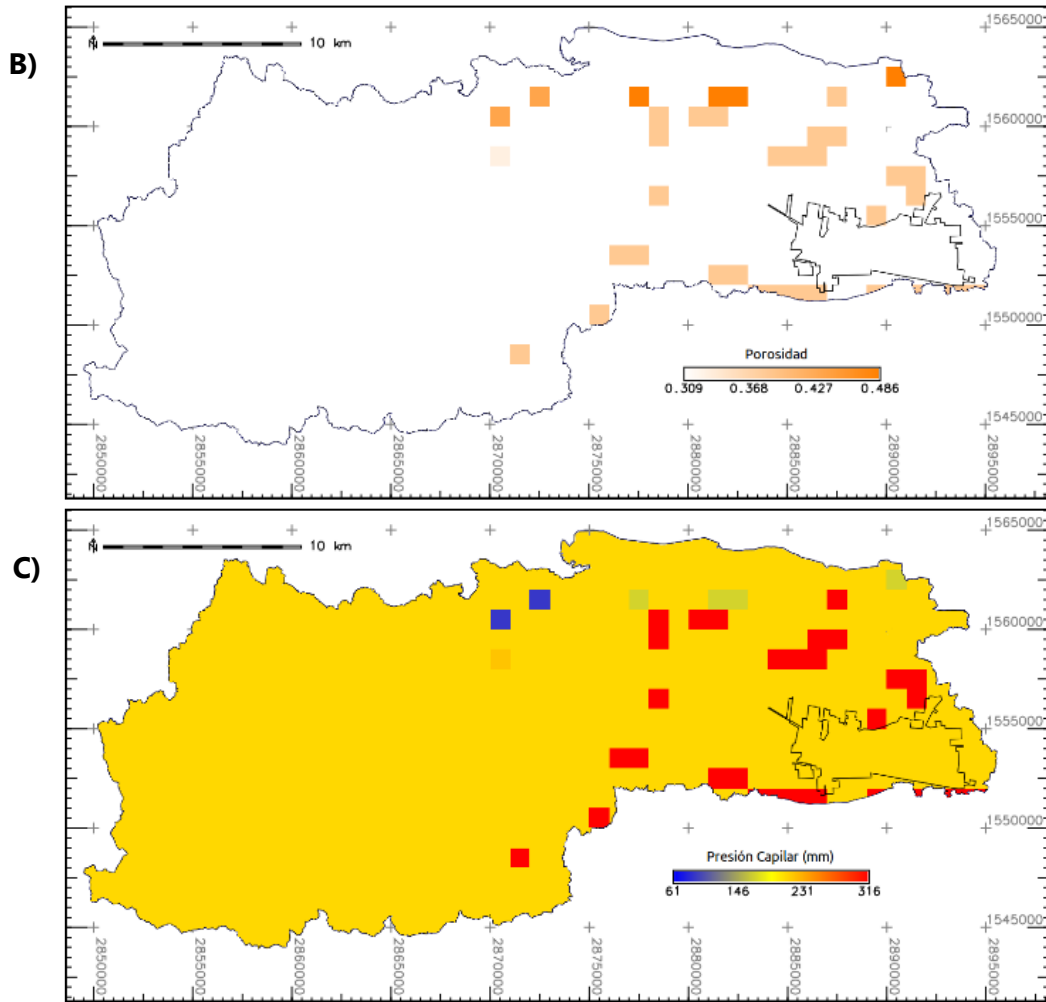


Figura 4-13. Variación espacial de los parámetros de infiltración en la zona de estudio de Río Bravo, Tamaulipas: A) Conductividad hidráulica, B) Porosidad, C) Presión capilar.  
Fuente: Elaboración propia. Coordenadas proyectadas: México ITRF2008 / LCC.

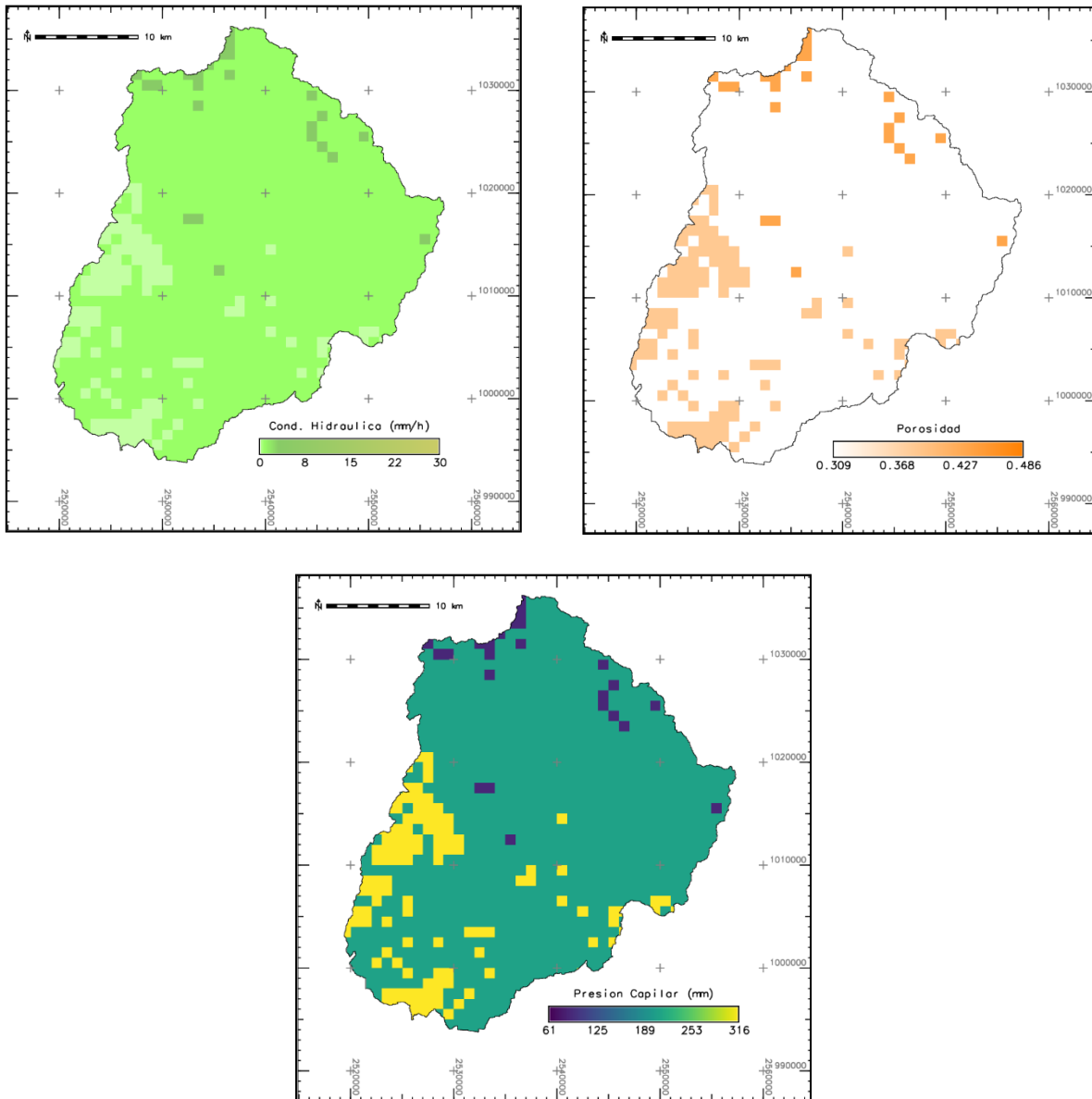


Figura 4-14. Variación espacial de los parámetros de infiltración en la zona de estudio de León, Guanajuato: A) Conductividad hidráulica, B) Porosidad, C) Presión capilar.  
Fuente: Elaboración propia. Coordenadas proyectadas: México ITRF2008 / LCC.

### Uso de Suelo y rugosidad de Manning

El modelo numérico *itzi* toma en cuenta la resistencia hidráulica, es decir, la combinación de una serie de efectos presentes en el flujo de agua como: la fricción, el arrastre y el impacto de la aceleración/desaceleración del flujo, a través de un coeficiente de resistencia al flujo conocido como "coeficiente n de Manning". La definición de este coeficiente generalmente se realiza a partir de datos de campo, sin embargo, su evaluación puede resultar complicada, subjetiva y termina por hacer uso de extensivos recursos

económicos y de tiempo, por lo que en los últimos años se han desarrollado técnicas de percepción remota para su definición.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se utilizó la información de la base de datos de la misión "Global Land Cover Facility" de la Agencia Norteamericana de Aeronáutica y Administración del Espacio (NASA), que desde el año 1999 ha recolectado y actualizado continuamente información de la superficie terrestre con el fin de que esta pueda ser utilizada en diferentes áreas de la ciencia.

Particularmente fue utilizada la información del uso de suelo, en donde a cada categoría se le asignó un rango de los valores de los coeficientes  $n$  de Manning de acuerdo a las recomendaciones establecidas en (Chow, 1994), ver Tabla 4-2.

Finalmente, en la Figura 3-5 y 3-19 se muestran la distribución del uso de suelo para las ciudades de Río Bravo y León, respectivamente.

*Tabla 4-2. Rango de valores asignados al coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning.*

Uso de suelo	Rango coeficiente $n$ de Manning
Tierra cultivada	0.020 - 0.050
Bosque	0.030 - 0.200
Pradera	0.025 - 0.050
Matorral	0.035 - 0.160
Humedal	0.070
Cuerpos de agua	0.030
Tundra	0.030
Zona urbana	0.010 - 0.035
Tierra desolada	0.016 - 0.033
Nieve permanente	0.025

### 4.1.3 Calibración y validación

El objetivo de la calibración y validación del modelo numérico itzi consiste en la reproducción de un evento de climatológico o hidrológico extremo conocido, a partir del cual obtener los parámetros físicos del modelo Itzi, así como de los valores del coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning, dentro de un rango de valores racionalmente adecuados. De esta forma, lograr que el modelo pueda representar con menor incertidumbre un evento de diseño asociado a un periodo de retorno.

Para el caso de la ciudad de Río Bravo fue necesario llevar a cabo la modelación de una avenida extrema que se suscitó en el cauce del río Bravo entre el 9 y 24 de octubre de 2003 provocada por las lluvias de la temporada, las cuales ocasionaron que fuera activada una alerta en el Estado de Tamaulipas por la creciente del río Bravo. Afortunadamente, para los

finde este trabajo de investigación, el evento fue registrado en dos puntos del río Bravo mediante las estaciones del BANDAS, a saber: aguas abajo de la Presa Derivadora Anzaldúas (estación 24364) y en el río Bravo cerca de San Benito, Texas y Ramírez, Tamaulipas (estación 24318), ver puntos verdes en Figura 4-15.

Para llevar a cabo la calibración del modelo hidrológico e hidrodinámico, Itzi, fue necesaria la aplicación de una metodología de ensayo y error, a través de la cual fue posible realizar la comparación de los hidrogramas medido, en la estación 24318 del BANDAS, y el calculado mediante la ejecución del modelo itzi, este último incluyó la simulación del hidrograma medido aguas abajo de la Presa Derivadora Anzaldúas en la estación 24364 del BANDAS, ver Figura 4-16, en conjunto con los demás datos de entrada al modelo que fueron descritos con anterioridad, con excepción de la precipitación.

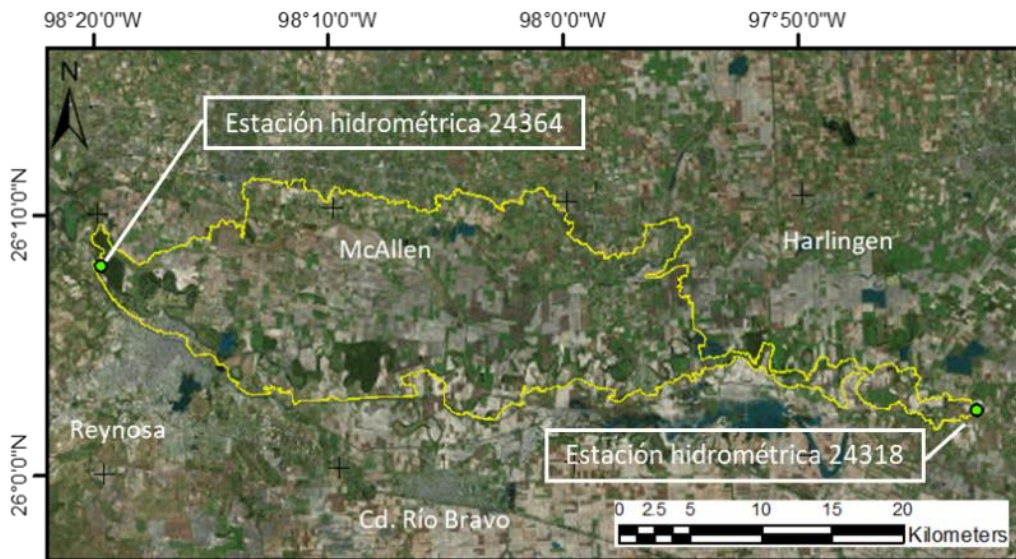


Figura 4-15. Cuenca hidrológica y ubicación de estaciones hidrométricas utilizadas en la calibración y validación del modelo Itzi en el cauce del río Bravo.

Fuente: Elaboración propia.

Es este caso, únicamente fueron realizados ajustes en los parámetros de la rugosidad hasta que fue encontrada una combinación con la que se obtuvo un valor aceptable de la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y se encontraran pequeñas diferencias entre ambos hidrogramas. En la Figura 4-17 puede observarse que tanto el hidrograma medido como el calculado son similares, presentando diferencias que van en un rango de los 3.62 y los -8.77 metros cúbicos por segundo, con un RMSE de 3.66 que, aunque alto, se consideró aceptable para los fines de este trabajo de investigación.

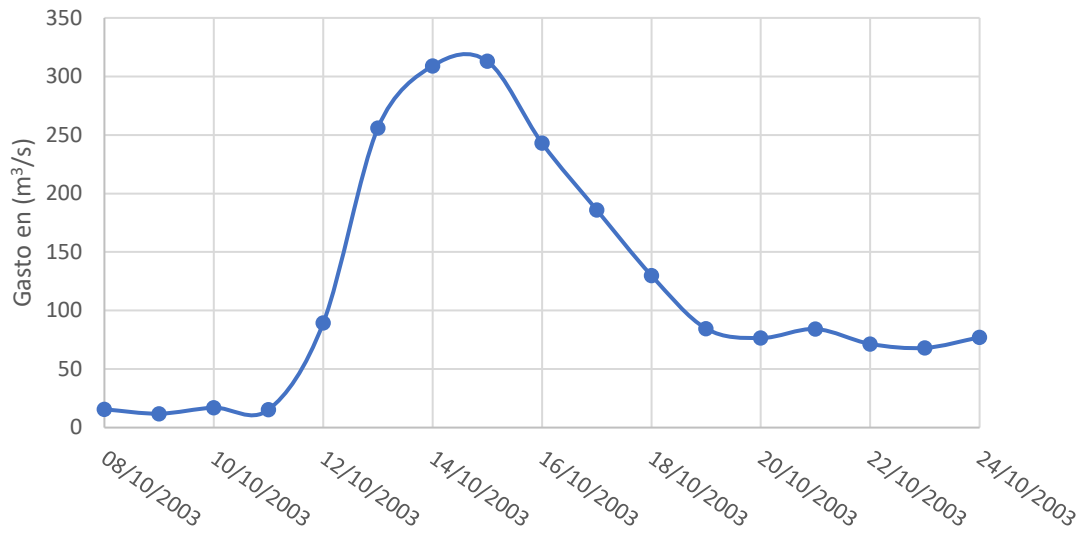


Figura 4-16. Hidrograma de entrada al modelo Itzi, registrado en la estación 24318 del BANDAS.  
 Fuente: Elaboración propia, con datos del BANDAS.

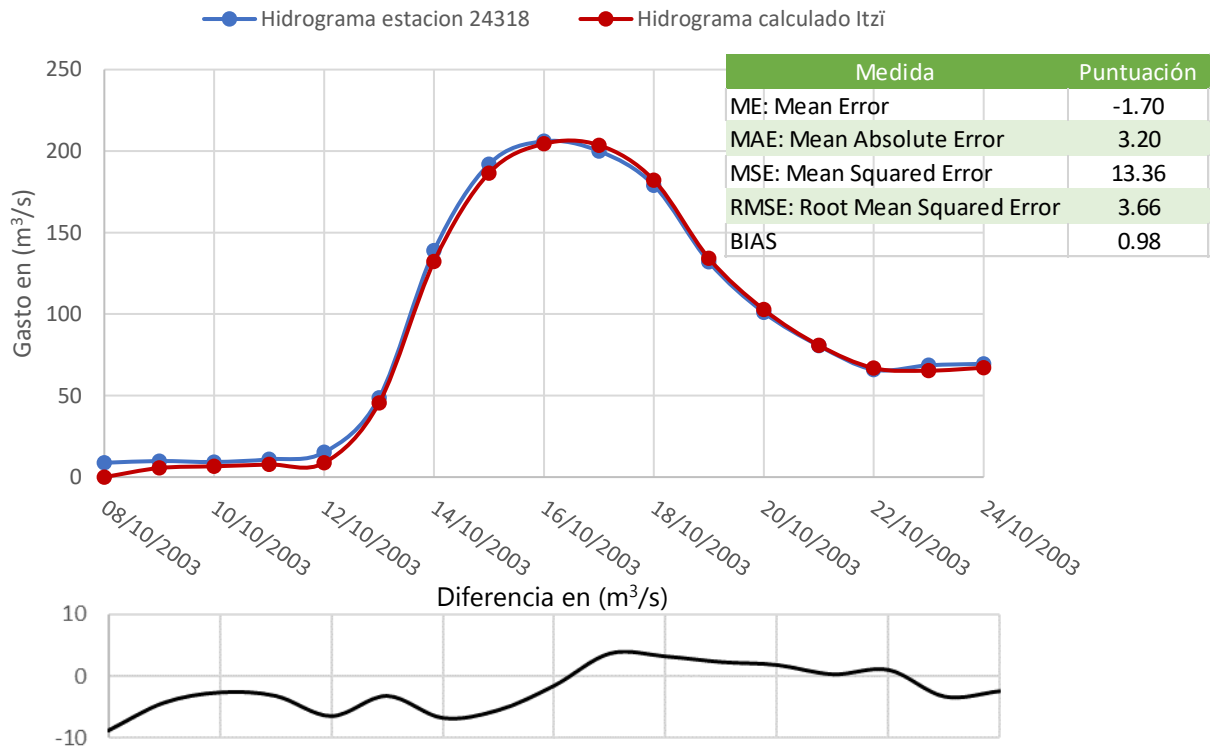


Figura 4-17. Comparación entre los hidrogramas medido (línea azul) y calculado (línea roja) en el río Bravo. La línea negra representa la diferencia entre ambos.  
 Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4-3 muestra los valores de los coeficientes de rugosidad  $n$  de Manning que resultaron óptimos para el sitio en estudio, los cuales se encuentran relacionados con el tipo

de suelo. Adicionalmente, se muestra el valor de los parámetros del modelo Itzi con los que fueron realizadas todas las modelaciones de las pruebas y las asociadas a los periodos de retorno considerados.

Tabla 4-3. Parámetros del modelo Itzi

Parámetros de rugosidad		Parámetros del modelo Itzi	
Uso de suelo	Rango coeficiente n de Manning	Parámetro	Valor
Tierra cultivada	0.020 - 0.050	$\Delta t_{\max}$	5 s.
Bosque	0.030 - 0.200	$\alpha$	0.7
Pradera	0.025 - 0.050	$\theta$	0.7
Matorral	0.035 - 0.160	$u_r$	0.1 m/s
Humedal	0.07	$h_{f_{\min}}$	0.005 m
Cuerpos de agua	0.03		
Tundra	0.03		
Zona urbana	0.010 - 0.035		
Tierra desolada	0.016 - 0.033		
Nieve permanente	0.025		

De forma similar, en el caso de la ciudad de León se realizó la calibración modelo mediante la comparación de los hidrogramas medido y calculado de un evento de precipitación extrema ocurrido entre los días 16 y 23 de agosto de 2008, el cual fue generado por la onda tropical No. 12 y que se destaca, por haber ocasionado una severa inundación en la ciudad que dejó la saturación de las principales vialidades, fallas eléctricas, daños a vehículos y viviendas, así como el reporte de al menos siete personas arrastradas por corrientes de agua en diversos puntos del municipio. Este evento fue registrado en la estación hidrométrica 12418 "Los Castillos" del BANDAS, ubicada sobre el arroyo Los Castillos 40 metros aguas arriba de donde se derivan los canales de Los Castillos e Ibarilla, al noroeste de la ciudad de León, ver Figura 4-18.

A diferencia del sitio anterior, se utilizó el hietograma de lluvia media generado con la información de aron los datos de lluvia media de dos estaciones climatológicas contenidas en la subcuenca como forzamientos de entrada, a saber: las estaciones 11040 "Los Castillos" y 11045 "Media Luna", ver Figura 4-19. Además, se observó que los parámetros del Itzi cobraban aún más relevancia que los de rugosidad, esto debido a que la topografía accidentada, característica de la Sierra de Guanajuato, ocasionaba que se produjeran inestabilidades numéricas en la modelación, por lo que fue necesario llevar a cabo su modificación.



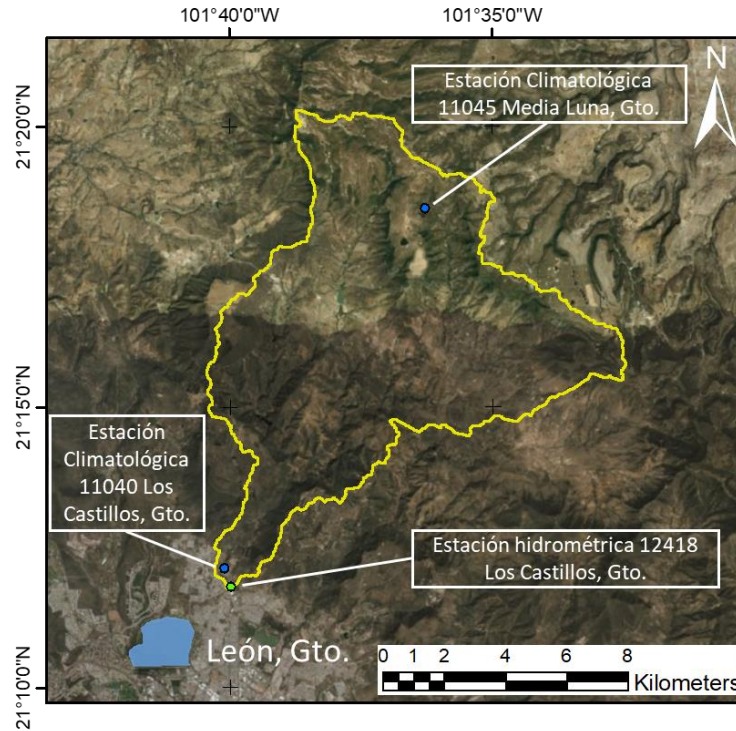


Figura 4-18. Cuenca hidrológica y ubicación de estaciones climatológicas e hidrométrica utilizadas en la calibración y validación del modelo Itzi en el cauce del arroyo Los Castillos, León, Guanajuato. Fuente: Elaboración propia.

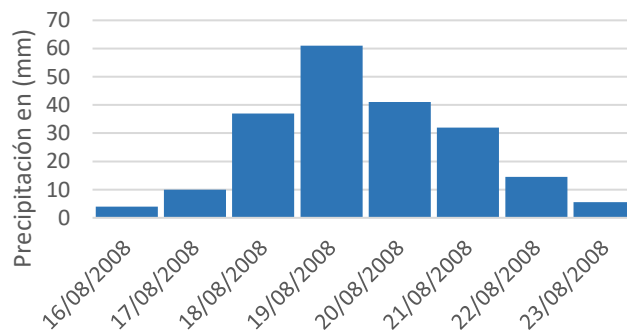


Figura 4-19. Hietograma medio de entrada al modelo Itzi en la ciudad de León, Guanajuato. Fuente: Elaboración propia con datos del CLICOM.

Las modificaciones realizadas a los parámetros del modelo Itzi, así como a los parámetros de rugosidad, se llevaron a cabo de modo que el hidrograma de salida fuese similar al registrado en la estación hidrométrica 12418 “Los Castillos”, ver Figura 4-20. Las diferencias entre ambos hidrogramas se cuantificaron entre los -0.2 a 1.54 metros cúbicos por segundo, con un RMSE de 0.73, Aunque las diferencias resultaron ser menores a las del caso de estudio anterior, estas pueden deberse a la utilización de mapas de lluvia uniforme en dominio de simulación.

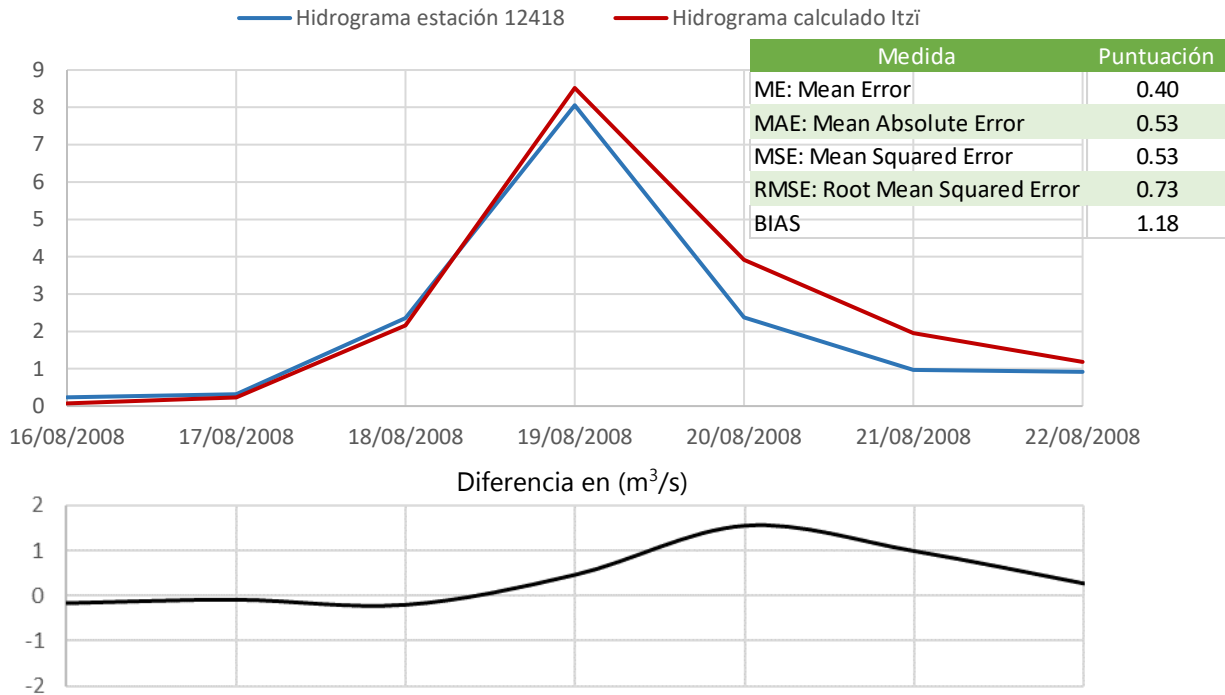


Figura 4-20. Comparación entre los hidrogramas medido (línea azul) y calculado (línea roja) en el arroyo Los Castillos, Guanajuato. La línea negra representa la diferencia entre ambos.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la Tabla 4-4 muestra los valores de los coeficientes de rugosidad  $n$  de Manning y el valor de los parámetros del modelo Itzi que resultaron óptimos para el sitio en estudio y con los que fueron realizadas todas modelaciones en el sitio de estudio.

Tabla 4-4. Parámetros calibrados de rugosidad y del modelo Itzi, para el caso de la ciudad de León.

Parámetros de rugosidad		Parámetros del modelo Itzi	
Uso de suelo	Rango coeficiente $n$ de Manning	Parámetro	Valor
Tierra cultivada	0.040	$\Delta t_{\max}$	1 s.
Bosque	0.150	$\alpha$	0.7
Pradera	0.035	$\theta$	0.7
Matorral	0.040	$u_r$	0.3 m/s
Humedal	0.070	$hf_{\min}$	0.005 m
Cuerpos de agua	0.055		
Tundra	0.030		
Zona urbana	0.017		
Tierra desolada	0.022		
Nieve permanente	0.025		

## 4.2 Criterios de arrastre de personas por inundaciones en zonas urbanas

En este subcapítulo se realizará la descripción de los criterios de arrastre de personas por inundaciones, sus consideraciones, ventajas y desventajas, así como la forma en que se llevó a cabo la evaluación de estos.

Como se mencionó anteriormente, la seguridad de una persona que se encuentre en el paso de una corriente de agua puede verse comprometida cuando la fuerza del agua excede su capacidad para permanecer en pie o en movimiento, es decir su estabilidad. En este sentido. De acuerdo con esto, las personas sometidas a una corriente de agua pierden la estabilidad principalmente mediante dos mecanismos:

- Inestabilidad por deslizamiento o fricción, cuando la fuerza de la resistencia inducida por el flujo entrante ( $F_D$ ) supera la fuerza de fricción entre los pies y la superficie del suelo ( $F_R$ ); y
- Inestabilidad por derribe o momento, cuando el momento de la fuerza de arrastre causado por el flujo de entrada excede el momento resistente del peso corporal efectivo (Cox et al., 2010; S. N. Jonkman & Penning-Rowse, 2008; Xia et al., 2014), ver Figura 4-21.

Adicionalmente, en (Milanesi et al., 2015) se define un tercer mecanismo denominado de ahogamiento, sin embargo, este se encuentra relacionado con la definición de un umbral máximo de profundidad en el cual la vida de una persona pueda estar en peligro y no propiamente como un mecanismo de inestabilidad.

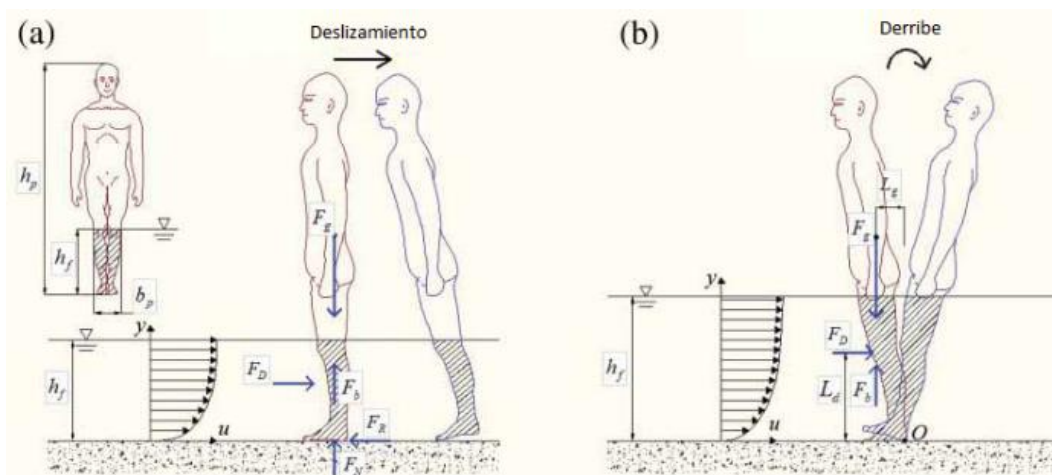


Figura 4-21. Fuerzas que actúan sobre el cuerpo humano en un flujo de agua mostrando los mecanismos de inestabilidad para (a) deslizamiento o fricción y (b) derribe o momento.  
Fuente: Adecuado de (Xia et al., 2014).

Por otra parte, se reconocen dos tipos de criterios que definen el peligro de arrastre de personas por inundaciones, los cuales son:

- Formulas basadas en estudios empíricos o cuasi – teóricos, como los estudios desarrollados en (Sebastiaan N Jonkman, 2005; Keller & Mitsch, 1993; Lind et al., 2004; Ramsbottom et al., 2003; Ramsbottom, Floyd, & Penning-Rowell, 2006b).
- Formulas basadas en un análisis teórico-conceptual y calibrado de experimentos de laboratorio con modelos y/o humanos reales, que se muestran en las investigaciones de (Abt et al., 1989; Foster & Cox, 1973; S. N. Jonkman & Penning-Rowell, 2008; Karvonen et al., 2000; Milanese et al., 2015; Russo et al., 2013; Takahashi et al., 1992; Xia et al., 2014; Yee, 2003).

Los criterios evaluados en este trabajo se enfocan en la determinación de la estabilidad humana en un flujo de agua de rápida evolución, donde la vida antes que los valores económicos, podría verse amenazada. Por lo anterior, el tipo de inundaciones que se desarrollan principalmente en la parte sur y sureste del país no son representativas para los efectos de la evaluación mostrada. No obstante, no significa que la aplicación de los criterios demostrados aquí no pueda llevarse a cabo en dichos casos.

Para el logro del objetivo propuesto se evaluaron los siguientes criterios: (1) un criterio de arrastre de personas por inundaciones frecuentemente utilizado a nivel mundial, que tiene su base en estudios empíricos, en su versión final presentada en (Ramsbottom et al., 2006b); y los dos últimos criterios de arrastre de personas por inundación desarrollados sobre la base de un análisis teórico-conceptual y calibrado con experimentos de laboratorio en modelos humanos a escala, (2) el criterio teórico desarrollado en (Xia et al., 2014) y; (3) el más reciente criterio teórico de base mecánica presentado por (Milanese et al., 2015).

#### **4.2.1 Criterio de DEFRA (de base empírica o cuasi – teórica)**

Este criterio fue presentado por primera vez en (Ramsbottom et al., 2003), donde se desarrolló una metodología para evaluar el peligro para las personas causado por inundaciones para el Departamento del Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (DEFRA, por sus siglas en ingles) de la Agencia de Medio Ambiente (EA, por sus siglas en inglés) del Reino Unido.

Este criterio fue creado y modificado a partir de la prueba de numerosas formulas empíricas mediante su comparación con los conjuntos de datos experimentales obtenidos a partir de estudios de laboratorio y sobre el entorno natural realizadas por (Abt et al., 1989; Foster & Cox, 1973; Karvonen et al., 2000; Ramsbottom et al., 2003; Takahashi et al., 1992; Yee, 2003).

En el 2003 Floyd Ramsbottom propuso una fórmula empírica para determinar el nivel de peligro de arrastre de personas por inundaciones para la DEFRA:

$$HR = d(v + 1.5) + DF \quad (4.7)$$

donde:

*HR*, es la clasificación del peligro por inundación en m<sup>2</sup>/s.

*d*, es la profundidad del agua en m

*v*, es la velocidad del flujo de agua en m/s

*DF*, es un factor de escombros en m<sup>2</sup>/s, el cual puede tener un valor de 0, 1 y 2 dependiendo de las características flujo y del uso de suelo dominante.

Tres años más tarde se llevó a cabo una revisión del estudio original y fue realizada una modificación a la fórmula propuesta inicialmente (ecuación 4.8), donde el coeficiente de aumento de la velocidad se redujo de 1.5 a 0.5, mientras que los factores de escombros también disminuyeron de los valores iniciales 0, 1 y 2 a 0, 0.5 y 1 (ver Tabla 4-5), respectivamente.

$$HR = d(v + 0.5) + DF \quad (4.8)$$

Tabla 4-5. Factores de escombros para diferentes profundidades, velocidades y usos de suelo

Umbral	Uso de suelo		
	Pastizal	Bosque	Urbano
0 < d ≤ 0.25 (m)	0	0	0
0.25 < d ≤ 0.75 (m)	0	0.5	1
d > 0.75 (m) o V ≥ 2.0 (m/s)	0.5	1	1

La Tabla 4-6 muestra la clasificación para la determinación del peligro de arrastre de personas por inundaciones de acuerdo con los valores resultantes de la ecuación 4.8.

Tabla 4-6. Umbrales de peligro por inundación a personas (criterio DEFRA).

Peligro por inundación a personas	
Valor (HR)	Clasificación – Descripción
HR = 0	Seguro (seco)
0 < HR ≤ 0.75	Peligro muy bajo – Se debe tener precaución.
0.75 < HR ≤ 1.50	Peligro para algunos - Incluye niños, ancianos y discapacitados.
1.50 < HR ≤ 2.5	Peligro para la mayoría - incluye a la mayoría.
HR ≥ 2.5	Peligro para todos - incluye al público en general.

Los umbrales de peligro por inundación a personas fueron definidos al realizar una comparación con los datos experimentales disponibles en ese momento, teniendo en cuenta que el factor de escombros DF fue valuado en cero (ver Figura 4-22). De esta comparación se obtuvieron importantes conclusiones de entre las que destacan las siguientes:

- Casi todos los infantes, pruebas experimentales realizadas en (Foster & Cox, 1973; Yee, 2003), son incapaces de tolerar flujos de agua que se clasifiquen dentro de la zona de peligro bajo.
- Casi todos los valores experimentales se encuentran comprendidos dentro de las zonas clasificadas como peligrosas para algunos y para la mayoría, mientras que la definición del umbral de peligro para todos fue realizada con la envolvente de todos los datos experimentales que incluyen a los sujetos "sujetos entrenados" de las pruebas de (Abt et al., 1989), es decir, personas que adquirieron experiencia para mantenerse en pie con el flujo del agua, conforme aumento el número de pruebas realizadas en ellas.
- Teniendo en cuenta la profundidad del agua, la mayoría de los adultos no pueden ponerse en pie en zonas donde esta excede los 1.5 m de profundidad (ver Tabla 4-7), sin embargo, en flujos de agua esta profundidad es mucho menor, siendo dependiente de la altura de cada persona.
- Algunos adultos no podrán mantenerse en pie en un flujo de agua con una velocidad mayor o igual a los 2 m/s en un tirante de tan solo 0.4 m y la mayoría no podrán sostenerse cuando la profundidad del agua aumenta a 0.6 m (ver Tabla 4-7).

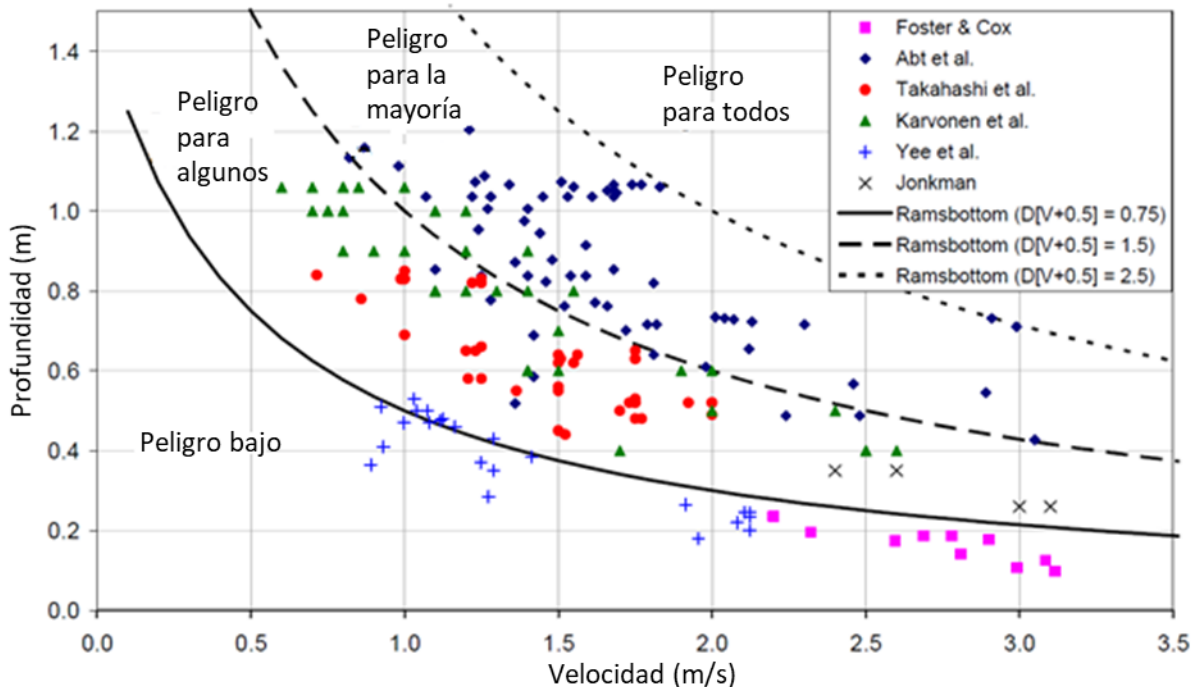


Figura 4-22. Comparación de los umbrales de estabilidad de (Ramsbottom et al., 2006b) con datos experimentales.

Fuente: Modificado de (Cox et al., 2010).

Tabla 4-7. Matriz de peligro de arrastre por inundación.

HR = d (v + 0.5) + DF		Profundidades en m									
		0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
Velocidades en m/s	0	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88	1.00	1.13	1.25
	0.5	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
	1.0	0.38	0.75	1.13	1.50	1.88	2.25	2.63	3.00	3.38	3.75
	1.5	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
	2.0	0.63	1.25	1.88	2.50	3.13	3.75	4.38	5.00	5.63	6.25
	2.5	0.75	1.50	2.25	3.00	3.75	4.50	5.25	6.00	6.75	7.50
	3.0	0.88	1.75	2.63	3.50	4.38	5.25	6.13	7.00	7.88	8.75
	3.5	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
	4.0	1.13	2.25	3.38	4.50	5.63	6.75	7.88	9.00	10.13	11.25
	4.5	1.25	2.50	3.75	5.00	6.25	7.50	8.75	10.00	11.25	12.50
5.0	1.38	2.75	4.13	5.50	6.88	8.25	9.63	11.00	12.38	13.75	

Fuente: Modificado de (Wallingford, 2006).

El uso que tiene esta metodología en la generación de mapas de peligro por inundación no solo destaca en Reino Unido, sino en el ámbito mundial ver (Foudi, Osés-Eraso, & Tamayo, 2015; Kaźmierczak & Cavan, 2011; Penning-Rowell, Floyd, Ramsbottom, & Surendran, 2005; Purwandari, Hadi, & Kingma, 2011). Esto debido a que es considerado como un criterio preciso y práctico para la identificación de zonas potencialmente peligrosas para las personas por inundaciones urbanas. Sin embargo, supone que el grado de estabilidad del cuerpo humano se relaciona únicamente con las condiciones hidrodinámicas y por ello, es independiente de los atributos físicos de una persona tales como la altura y el peso corporal. La incertidumbre en los resultados obtenidos tras aplicar esta metodología es alta debido a la gran cantidad de factores específicos que se encuentran presentes en el sitio donde se presente un evento de inundación, por lo que se sugiere que sea aplicada con el propósito de realizar una evaluación preliminar del nivel de peligro al que una persona pueda estar expuesta, sobre todo en aquellos casos donde no se conozcan las características físicas del lugar o la población.

Como se mencionó anteriormente, las principales ventajas de este criterio son la precisión y la practicidad que esta metodología presenta para evaluar el nivel de peligro por inundación al que una persona pueda estar expuesta en su ciudad, en especial si se compara con otros similares, específicamente con aquellos que tienen su base en fundamentos teóricos y que requieren de una mayor cantidad de datos para su implementación. En contraste, la expresión empírica generada en 2006, evaluada en este trabajo de investigación, presenta graves desventajas: (1) se promediaron los valores del régimen de flujo de los conjuntos de datos experimentales y, por tanto, se tomó en cuenta el entrenamiento de los sujetos de prueba, es decir, la capacidad de adaptación de estos para mantenerse en pie con el flujo del agua a través del tiempo, cuando en un evento real las personas no cuentan con la experiencia brindada por las pruebas en laboratorio; (2) los valores correspondientes al

factor de escombros no se encuentran sustentados en ningún estudio o prueba experimental; y finalmente (3) la expresión empírica propuesta no tiene un límite superior en la profundidad del agua, por lo que flujos de agua con velocidades bajas y grandes profundidades no necesariamente son clasificados con un nivel de peligro alto.

#### 4.2.2 Criterio de Xia (base teórica y experimentalmente calibrado).

El segundo criterio para determinar el nivel de peligro de arrastre de personas por inundaciones, que fue evaluado en este trabajo de investigación corresponde a la metodología publicada en (Xia et al., 2014) donde se desarrolló un nuevo método de base física para evaluar la estabilidad del cuerpo humano en un flujo de agua, que tiene su base tanto en estudios teóricos como experimentales y que toma en cuenta los dos mecanismos de inestabilidad mencionados al comienzo de este subcapítulo, a saber: Inestabilidad por deslizamiento o fricción e Inestabilidad por derribe o momento.

La formulas desarrolladas en este criterio para cada mecanismo de inestabilidad, se derivan del análisis físico de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo humano sometido a una corriente de agua, de manera similar a como se calcularía la velocidad de una partícula de sedimento grueso o la velocidad de arrastre de un vehículo inundado.

Si un cuerpo humano se encuentra en una corriente de agua experimentara cinco fuerzas diferentes: una fuerza de arrastre (FD), ocasionada por el flujo del agua; una fuerza de fricción (FR), entre los pies y la superficie del suelo generada en oposición a la anterior en la dirección horizontal. Por su parte en la dirección vertical el cuerpo humano experimentara su propio peso o fuerza gravitacional (FG); una fuerza de flotación (FB), por encontrarse sumergido en el agua; y finalmente, una fuerza de reacción normal (FN), ejercida por el suelo.

##### Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre que ejerce el agua en un cuerpo humano inundado puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$F_D = 0.5A_d C_d \rho_f u_b^2 \quad (4.9)$$

donde:

$u_b$ , es la velocidad del flujo en m/s

$C_d$ , es un coeficiente de arrastre que se encuentra relacionado con las propiedades del

flujo, particularmente del número de Reynolds  $Re = \frac{U b_p}{\nu}$  y la forma del cuerpo

humano, el cual es valuado en el intervalo de 1.1 a 2.0 considerando que la velocidad del agua en zonas urbanas se encuentra en el intervalo de 0.5 a 3.0 m/s



y que el número de Reynolds por tanto se estima entre  $1.5 \times 10^5$  a  $9.0 \times 10^5$  con un ancho del cuerpo humano constante de 0.30 m. Sin embargo, diversas investigaciones realizadas con pruebas experimentales para evaluar este coeficiente, por ejemplo: (Blevins, 1984; S. N. Jonkman & Penning-Rowell, 2008; Lind et al., 2004) sugieren que el valor de  $C_d$  puede variar entre 0.9 y 1.2 ajustándose a valores menores debido al efecto de la rugosidad de la superficie, por lo que fue utilizado un coeficiente de 1.0.

$A_d$ , es el área mojada perpendicular al flujo en  $m^2$ , calculada como  $A_d = a_d (b_p h_f)$

donde  $a_d$  es un coeficiente empírico que toma en cuenta el efecto de la ropa de una persona;  $h_f$  es la profundidad del agua y  $b_p$ , es el ancho medio del cuerpo humano que puede ser expresada en términos de la altura del cuerpo como  $b_p = a_p h_p$  donde  $a_p$  es un coeficiente relacionado con la estructura del cuerpo humano.

$\rho_f$ , es la densidad del agua en  $kg/m^3$ .

### Fuerza de flotación

La fuerza de flotabilidad obedece al Principio de Arquímedes, el cual indica que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical ascendente igual al peso del volumen del fluido desalojado, que puede calcularse con la siguiente ecuación.

$$F_B = \rho_f g V_b \quad (4.10)$$

donde:

$g$ , es la aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ , y

$V_b$ , es el volumen de agua desplazada por el cuerpo humano en  $m^3$ .

Como puede observarse, la fuerza de flotación es difícil de calcular debido a la forma irregular del cuerpo humano, particularmente por la estimación del volumen de agua desplazado por una persona en el agua. Al respecto, en las investigaciones de (Drillis, Contini, & Bluestein, 1966; Sendroy Jr & Collison, 1966) fueron construidas diversas relaciones, donde la altura y la masa de una persona fueron utilizados como parámetros en una función para estimar el tercer término del cálculo de la fuerza de flotación. De esta forma, fue construida una función cuadrática que involucra esta variable con la relación del tirante de agua y la altura de una persona, como sigue:

$$\frac{V_b}{v_p} = a_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^2 + b_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right) \quad (4.11)$$

Donde:

$v_p$ , es el volumen de una persona en  $m^3$ .

$h_f$ , es la profundidad del agua en m.

$h_p$ , es la altura de una persona en m, y

$a_1$  y  $b_1$ , son coeficientes adimensionales basados en las características del cuerpo humano, los cuales fueron calculados por (Drillis et al., 1966) para una persona típica americana en 0.737 y 0.263, respectivamente.

Además, se descubrió que existe una relación aproximadamente lineal entre el volumen de una persona y la masa de una persona, la cual queda definida por la expresión:

$$v_p = a_2 m_p + b_2 \quad (4.12)$$

donde:

$m_p$  es la masa de un apersona en kg, y

$a_2$  y  $b_2$  son coeficientes adimensionales basados en las características del cuerpo humano, los cuales fueron calculados a partir de los datos promediados obtenidos de (Cherem, 2012), el cual es un estudio realizado por la Cámara Nacional de la Industria del Vestido (CANAIVE) donde se recopiló la información general promediada de las medidas corporales de las personas en distintas regiones del país. Los valores considerados de estos coeficientes para cada sitio de estudio pueden observarse en la Tabla 4-8.

Finalmente, la fuerza de flotación puede ser representada en función del tirante de agua, la altura y la masa de un cuerpo humano, como se observa en la ecuación 4.13.

Tabla 4-8. Valor de los coeficientes adimensionales  $a_2$  y  $b_2$  para los sitios en estudio.

Ciudad	$a_2$	$b_2$
Río Bravo	$9.16 \times 10^{-04}$	$-1.39 \times 10^{-17}$
León	$8.40 \times 10^{-04}$	$6.11 \times 10^{-03}$

Fuente: Elaboración propia con datos de la CANAIVE.

$$F_B = \rho_f g (a_2 m_p + b_2) \left( a_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^2 + b_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right) \right) \quad (4.13)$$

### Fuerza gravitacional

El peso propio del cuerpo humano ( $W_p$ ) puede ser calculado al conocer su masa por medio de la ecuación 4.14. Sin embargo, es necesario conocer la fuerza gravitacional o el

peso efectivo del cuerpo humano, dado que se encuentra sumergido en el agua, en consecuencia, la ecuación 4.15 toma en cuenta la acción de la fuerza de flotación y el peso propio del cuerpo humano cuyas líneas de acción son paralelas y opuestas conformando la fuerza gravitacional.

$$W_p = gm_p \quad (4.14)$$

$$F_G = gm_p - F_B = g \left[ m_p - \rho_f (a_2 m_p + b_2) \left( a_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^2 + b_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right) \right) \right] \quad (4.15)$$

### Fuerza normal

La fuerza de reacción normal que ejerce la superficie del terreno, sobre la que reposa un cuerpo, es equivalente al peso propio del cuerpo que se trate. En este caso, dado que trata de un cuerpo humano que se encuentra en el agua, esta fuerza es equivalente al peso efectivo de cuerpo humano como sigue:

$$F_N = F_G = gm_p - F_B = g \left[ m_p - \rho_f (a_2 m_p + b_2) \left( a_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^2 + b_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right) \right) \right] \quad (4.16)$$

### Fuerza de fricción

La fuerza de fricción se presenta en el contacto de los pies del cuerpo humano y la superficie del suelo en la que se encuentre, esta se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_R = \mu F_N \quad (4.17)$$

Donde  $F_N$  es la fuerza de reacción normal ejercida por la superficie del terreno vista en párrafos anteriores y  $\mu$  es el coeficiente de fricción entre las superficies de contacto de la planta de los zapatos y el pavimento húmedo, este coeficiente generalmente tiene un valor estimado de entre 0.3 y 1.0 según los experimentos realizados por (S. N. Jonkman et al., 2008; Keller & Mitsch, 1993; Takahashi et al., 1992) con diferentes materiales de suelas de zapatos. Con lo anterior, puede definirse la fuerza de fricción como sigue:

$$F_R = \mu F_N = \mu g \left[ m_p - \rho_f (a_2 m_p + b_2) \left( a_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^2 + b_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right) \right) \right] \quad (4.18)$$

Considerando la interacción las fuerzas antes mencionadas, fueron desarrolladas las ecuaciones que definen los dos mecanismos de inestabilidad considerados como sigue:

### **Mecanismo de inestabilidad por deslizamiento o fricción**

Para estar dentro de los niveles de seguridad en este mecanismo, debe cumplirse que la fuerza resistente de fricción sea mayor que la fuerza arrastre del flujo de agua, siendo la condición crítica que ambas sea iguales (ver Figura 4-21). De acuerdo con lo dicho se puede hacer la sustitución de las ecuaciones 4.9 y 4.18 para la definición de un umbral de velocidad.

$$F_D = F_R \quad (4.19)$$

$$0.5A_d C_d \rho_f u_b^2 = \mu g \left[ m_p - \rho_f (a_2 m_p + b_2) \left( a_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^2 + b_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right) \right) \right] \quad (4.20)$$

$$u_b^2 = \frac{2\mu g}{(a_d a_p h_p h_f) C_d \rho_f} \left[ m_p - \rho_f (a_2 m_p + b_2) \left( a_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^2 + b_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right) \right) \right] \quad (4.21)$$

Dado que no es fácil determinar el perfil de velocidades en un entorno urbano por su no uniformidad, se utiliza por simplicidad la velocidad media del flujo ( $U$ ). La relación entre ambas queda expresada en la distribución de la velocidad definida en (Xia et al., 2014), como sigue:

$$u = (1 + \beta) U (y/h_f)^\beta \quad (4.22)$$

donde:

$\beta$ , es un coeficiente empírico adimensional valuado con el resultado de pruebas experimentales,

$y$ , la distancia vertical desde el piso, según las consideraciones de este criterio la altura representativa para  $u_b$  es  $y = a_b h_p$ , donde  $a_b$  es un coeficiente relacionado con la talla de una persona y es generalmente pequeño para satisfacer la condición de que  $a_b h_p < h_f$ .

$u$ , la velocidad de la corriente en la elevación  $y$ .

Finalmente, sustituyendo la variable  $u$  de la ecuación 4.22 en la ecuación 4.21 y reacomodando los términos se obtuvo la velocidad en la que un cuerpo humano pierde la estabilidad por deslizamiento o fricción en un flujo de agua.

$$U_{c_{des}} = \alpha \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^\beta \sqrt{\frac{m_p}{\rho_f h_p h_f} - \left( a_1 \frac{h_f}{h_p} + b_1 \right) \frac{(a_2 m_p + b_2)}{(h_p)^2}} \quad (4.23)$$

$$\text{Donde } \alpha = \frac{\sqrt{2\mu g / C_d a_d a_p}}{(1 + \beta)(a_b)^\beta} \quad (4.24)$$

Como se observa, la ecuación queda en función del tirante y densidad del agua, así como de la altura y masa de una persona. Por su parte,  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes relacionados con la forma del cuerpo humano y los materiales de la vestimenta, los cuales son definidos a partir de pruebas experimentales. Los coeficientes adimensionales  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$  y  $b_2$  se basan en las características del cuerpo humano y fueron evaluados como se mencionó anteriormente.

### Mecanismo de inestabilidad por derribe o momento

Para estar dentro de los niveles de seguridad en el mecanismo de inestabilidad por derribe o momento debe cumplirse que el momento de la fuerza de arrastre del flujo del agua no sea mayor al momento resistente del peso corporal efectivo de una persona alrededor de un punto de giro o derribe O, que se ubica en el borde de aguas debajo de la suela, ver Figura 4-21, en este aspecto las pruebas experimentales realizadas en (Xia et al., 2014) fueron utilizadas como prueba para establecer que la orientación de la persona respecto al flujo no es un factor determinante en cálculo de la velocidad crítica en la que se desarrolla la inestabilidad. En consecuencia, este mecanismo puede expresarse matemáticamente mediante la implementación de las ecuaciones 4.9 y 4.15 para la definición de un umbral de velocidad como sigue:

$$F_D L_d - F_G L_g = 0 \quad (4.25)$$

Donde  $L_d$  es el brazo de palanca de la fuerza de arrastre que se define como:  $L_d = a_h h_f$  donde  $a_h$  es un coeficiente de corrección de la distancia entre el centro de acción de la fuerza de arrastre y el suelo. Por su parte,  $L_g$  es el brazo de palanca del peso efectivo definido como:  $L_g = a_g h_p$  donde  $a_g$ , de manera similar, es un coeficiente de corrección de la distancia del centro de gravedad del cuerpo al punto de giro o derribe. En las ecuaciones 4.26 y 4.27 se presenta el desarrollo de esta ecuación.

$$\left[ 0.5 C_d (a_d a_p h_p h_f) \rho_f u_b^2 \right] \left[ a_h h_f \right] - g \left[ m_p - \rho_f (a_2 m_p + b_2) \left( a_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^2 + b_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right) \right) \right] (a_g h_p) = 0 \quad (4.26)$$

$$u_b^2 = \frac{2ga_g}{C_d a_d a_p a_h} \bullet \frac{1}{h_f^2} \left[ \frac{m_p}{\rho_f} - (a_2 m_p + b_2) \left( a_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^2 + b_1 \left( \frac{h_f}{h_p} \right) \right) \right] \quad (4.27)$$

De forma análoga, se utilizó la velocidad media del flujo (U) expresada por medio de la distribución de velocidad mostrada en la ecuación 4.22, sustituyendo está en la ecuación 4.27 y reacomodando los términos se obtuvo la velocidad en la que un cuerpo humano pierda la estabilidad por derribe o momento.

$$U_{c_{der}} = \alpha \left( \frac{h_f}{h_p} \right)^\beta \sqrt{\frac{m_p}{\rho_f (h_f)^2} - \left( \frac{a_1}{(h_p)^2} + \frac{b_1}{h_p h_f} \right) (a_2 m_p + b_2)} \quad (4.28)$$

$$\text{Donde } \alpha = \sqrt{\frac{2ga_g}{C_d a_d a_p a_h a_b^{2\beta} (1 + \beta)^2}} \quad (4.29)$$

Esta ecuación que define la velocidad crítica que pone en peligro la estabilidad de una persona por deslizamiento o fricción, la ecuación que define la velocidad crítica para el mecanismo de derribe o momento queda en función del tirante y densidad del agua, así como de la altura y masa de una persona. Siendo  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$  y  $b_2$  los coeficientes experimentales dependientes de las características del cuerpo humano a evaluar, de los cuales  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$  y  $b_2$  fueron ya evaluados en párrafos anteriores.

A falta de datos experimentales propios, se recurrió a la base de datos experimentales en seres humanos reales generada en los estudios de (Abt et al., 1989; Foster & Cox, 1973; S. N. Jonkman & Penning-Rowsell, 2008; Karvonen et al., 2000; Yee, 2003), así como por los resultados de los experimentos realizados en modelos humanos a escala de (Xia et al., 2014) para calibrar los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  de las ecuaciones 4.23 y 4.28, que definen la velocidad crítica en la cual se presenta la inestabilidad en los mecanismos mencionados.

Tabla 4-9. Valor de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  en relación con el tipo de pruebas experimentales consideradas en su determinación.

Parámetro	Pruebas experimentales con un modelo humano a escala		Pruebas experimentales con seres humanos reales	
	Inestabilidad por deslizamiento (ec. 4.23)	Inestabilidad por derribe (ec. 4.28)	Inestabilidad por deslizamiento (ec. 4.23)	Inestabilidad por derribe (ec. 4.28)
$\alpha$ [ $m^{0.5} s^{-1}$ ]	7.975	3.472	10.253	7.867
$\beta$ [-]	0.018	0.188	0.139	0.462

Fuente: (Xia et al., 2014).

Puede observarse que existe una diferencia significativa entre los coeficientes obtenidos en ambos tipos de pruebas, donde los coeficientes obtenidos a partir de pruebas experimentales en seres humanos reales tienden a ser mayores que los obtenidos con pruebas en modelos humanos, en consecuencia, el umbral de velocidad crítico definido para cada mecanismo de velocidad también sea mayor si se utilizan los coeficientes derivados de pruebas experimentales realizadas en seres humanos reales, en comparación. Estas diferencias según (Kvočka et al., 2016; Xia et al., 2014) se deben a la capacidad de los sujetos de prueba utilizados para ajustar su postura de acuerdo con la intensidad del flujo del agua, lo que conduciría a obtener resultados potencialmente peligrosos en su implementación práctica en la evaluación del peligro por inundación a personas. Según lo dicho, en este trabajo de investigación se consideró utilizar los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  calibrados con datos experimentales realizados en modelos humanos por ser más conservadores.

Una vez obtenidos los resultados de la modelación hidrodinámica (mapas de profundidad y velocidad del agua), el procedimiento consistió en el uso de las herramientas de post-procesamiento de GRASS GIS, para realizar el cálculo correspondiente de las velocidades en las que se presenta inestabilidad por deslizamiento o derribe. De acuerdo con lo expresado en el desarrollo de las fórmulas de los mecanismos de inestabilidad, se requirió la densidad de cuerpo humano valuada en  $1091.7 \text{ kg/m}^3$  por (Drillis et al., 1966), además de las medias regionales del peso y talla de los diferentes grupos poblacionales, las cuales fueron obtenidas gracias a el estudio denominado "¿Cuánto mide México? El tamaño sí importa" realizado por la CANAIVE de donde se obtuvieron los datos mostrados en la Tabla 4-10 para cada sitio de estudio, cabe mencionar que tanto para la ciudad de Río Bravo como para León se tomó en cuenta el promedio de las medidas corporales de adultos entre 18 y 25 años (que corresponden a la mayoría según lo mostrado en el subcapítulo 3.1.3 y 3.2.3 de este trabajo), así como las medidas para un niño de 10 años según la tabla de la Academia Mexicana de Pediatría (AMP).

Tabla 4-10. Promedios de pesos y tallas de los principales grupos poblacionales en las zonas de estudio.

Ambas ciudades		Río Bravo		León	
Niños (10 años)		Adultos (18-25 años)		Adultos (18-25 años)	
Talla	Peso	Talla	Peso	Talla	Peso
[m]	[kg]	[m]	[kg]	[m]	[kg]
1.33	30.2	1.64	66.65	1.66	68.15

Fuente: Elaboración propia con datos de (Cherem, 2012) y la AMP.

### Método de comparación con el criterio de base empírica

Finalmente, con el fin de realizar una comparación con el criterio de base empírica, fue definido un índice de peligro por inundación a personas valuado entre 0 y 1, que se define

como la relación entre las **velocidades obtenidas en la simulación hidrológico-hidrodinámica y la mínima de las velocidades críticas resultantes de las ecuaciones 4.23 y 4.28 como sigue:**

$$HR = \min \left( 1, \frac{U}{\min(Uc_{der}, Uc_{des})} \right) \quad (4.30)$$

Donde:

HR, es el índice de peligro por inundación a personas;

$Uc_{des}$  y  $Uc_{der}$ , son las velocidades críticas para la inestabilidad por fricción y momento en (m/s), respectivamente, y

U es la velocidad del flujo en (m/s) obtenido tras la simulación hidrológico-hidrodinámica.

La Tabla 4-11 muestra la clasificación de los niveles de peligro de acuerdo con los valores obtenidos de la ecuación 4.30.

Tabla 4-11. Umbrales de peligro por inundación a personas (criterio de Xia).

Peligro por inundación a personas	
Valor (HR)	Clasificación – Descripción
HR = 0	Seguro (seco)
$0 \leq HR < 0.30$	Peligro muy bajo – Se debe tener precaución.
$0.30 \leq HR < 0.60$	Peligro bajo - Incluye personas con discapacidad.
$0.60 \leq HR < 1.0$	Peligro medio – incluye a la mayoría.
$HR \geq 1.0$	Peligro alto – incluye a todos.

Fuente: Elaboración propia.

Este criterio de arrastre de personas por inundaciones tiene grandes ventajas en comparación al método derivado empíricamente, entre ellas se encuentran:

- Este criterio toma en cuenta las diferentes fuerzas que actúan en el fenómeno de una persona que se expone a una corriente de agua.
- El criterio considera la flotabilidad del cuerpo humano, la cual varía rápidamente en función de tirante de agua.
- La fuerza de arrastre es proporcional con la velocidad al cuadrado, en consecuencia, este método es susceptible a cambios bruscos de régimen y velocidades altas, lo cual ocurre en inundaciones extremas.



- Este método puede ajustarse a cualquier tipo de cuerpo, por lo que puede ajustarse para evaluar el peligro de arrastre por inundaciones de acuerdo con el grupo poblacional que se desee proteger.
- El método es relativamente rápido de implementar, ya que a partir de las propiedades hidrodinámicas del flujo del agua (tirantes, velocidades y densidad), así como las características físicas de las personas en la región (peso y talla) pueden obtenerse resultados rápidos y precisos.

En contraste, el primer criterio de base teórica y experimentalmente calibrado presenta algunas desventajas:

- La distribución de la velocidad que llega a formarse alrededor de un cuerpo humano en el agua es compleja, por tanto este criterio simplifica esta distribución con la velocidad media del flujo mediante la función distribución del campo de velocidades definida en (Xia et al., 2014).
- Se carece de la información actualizada de los pesos y tallas de las personas en diversas regiones del país.
- Este criterio toma en cuenta algunos coeficientes experimentales que tienen en cuenta rasgos definidos de manera general por algunos autores, sin embargo, estos aún no han sido evaluados en la población de nuestro país.
- Este criterio no toma en cuenta el efecto de la pendiente en la estabilidad del cuerpo humano, por lo que sus resultados únicamente serán válidos en llanuras de inundación.

#### **4.2.3 Criterio de Milanesi (de base teórica y experimentalmente calibrado).**

El último criterio que define el nivel de peligro de arrastre de personas por inundaciones evaluado en este trabajo de investigación, corresponde a la metodología publicada en (Milanesi et al., 2015) donde se desarrolló una variante del método de Xia para evaluar la estabilidad del cuerpo humano en un flujo de agua, el cual tiene su base en un análisis exhaustivo de la estabilidad de cuerpo humano a través de la definición de las fuerzas que actúan en el fenómeno, la adición de la simplificación geométrica del cuerpo humano para determinar el comportamiento del cuerpo humano por la acción de estas fuerzas y la incorporación del efecto de la pendiente local en la estabilidad de las personas.

De manera similar, este método establece una ecuación para cada mecanismo de inestabilidad (Inestabilidad por deslizamiento o fricción e Inestabilidad por derribe o momento), las cuales se derivan del análisis físico de todas las fuerzas que actúan en el fenómeno físico. En este criterio, adicionalmente se incorpora un tercer mecanismo de inestabilidad, aunque propiamente en él se establece un umbral de profundidad del agua en el que puede ocurrir el ahogamiento y por ende se ponga en riesgo la vida.

Una de las aportaciones más importantes de este criterio fue la implementación de una representación geométrica del cuerpo humano, donde se describiera la interacción entre el campo de flujo y una persona, dado que el área frontal, el volumen y el centro de masa de la parte de cuerpo que se encuentra sumergida en el agua (variables en constante cambio) son necesarias para el cálculo de las fuerzas y la definición de los criterios de estabilidad.

En (Milanesi et al., 2015) se conceptualizó al cuerpo humano sobre una pendiente inclinada  $\theta$  grados con respecto de la horizontal, con una posición inclinada en un ángulo de  $\alpha = \pi/2 - \theta$  con respecto al terreno e impactado por el flujo de manera frontal. El sistema se conforma por un conjunto de tres cilindros verticales (dos para cada pierna y uno para el cuerpo principal), cada pierna tiene un diámetro  $d$ , espaciada  $d/2$  de la otra, mientras que el torso tiene un diámetro  $D=2d$ , la altura de ambos tipos de cilindros es la misma y está representada por  $h_p/2$ , siendo  $h_p$  la altura del cuerpo.

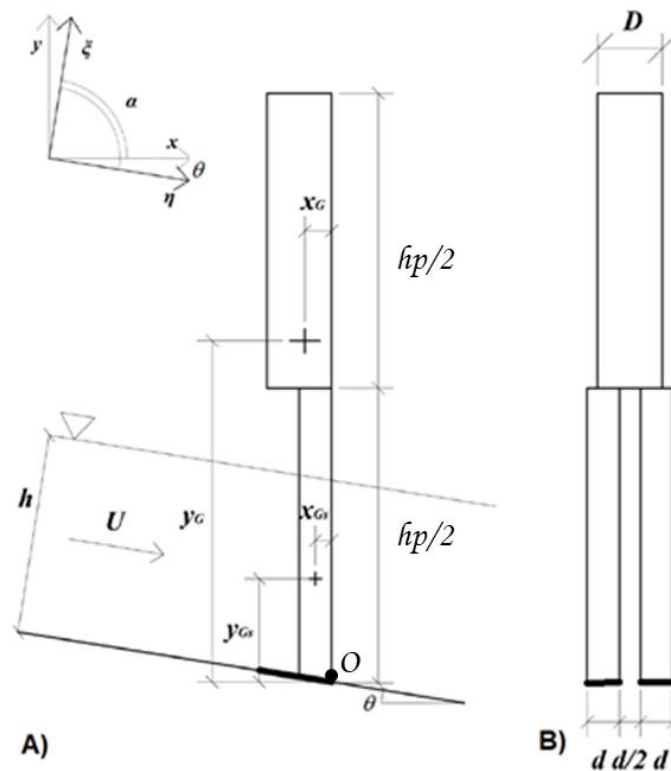


Figura 4-23. Esquema de un cuerpo humano que se encuentra en una corriente de agua implementado en (Milanesi et al., 2015).

Fuente: Modificado de (Milanesi et al., 2015).

Suponiendo una distribución uniforme del peso el centro de gravedad del esquema del cuerpo humano considerado en este criterio puede ubicarse en las coordenadas  $(x_G, y_G)$  respecto del punto O (ver Figura 4-23), donde  $x_G$  se evalúa a  $5/6d$  desde el talón del pie y  $y_G$  a  $7/12h_p$  sobre la vertical desde el suelo, asimismo, al considerar el sistema de referencia

inclinado  $\theta$  grados respecto de la horizontal y el punto O, este mismo punto se ubica en las coordenadas  $(\eta_G, \xi_G)$  que pueden evaluarse como sigue:

$$\eta_G = \frac{x_G}{\cos \theta} + y_G \operatorname{sen} \theta \quad (4.31)$$

$$\xi_G = y_G \cos \theta \quad (4.32)$$

Al considerar al cuerpo humano en una corriente de agua, el volumen sumergido del cuerpo ( $V_s$ ) y su área frontal mojada ( $A_s$ ) pueden evaluarse como:

$$V_s = \begin{cases} 2 \frac{h_f}{\cos \theta} \pi \frac{d^2}{4} & \text{si } \rightarrow \frac{h_f}{\cos \theta} \leq \frac{h_p}{2} \\ 2 \frac{h_p}{2} d + \left( \frac{h_f}{\cos \theta} - \frac{h_p}{2} \right) D & \text{si } \rightarrow \frac{h_f}{\cos \theta} > \frac{h_p}{2} \end{cases} \quad (4.33)$$

$$A_s = \begin{cases} 2 \frac{h_f}{\cos \theta} d & \text{si } \rightarrow \frac{h_f}{\cos \theta} \leq \frac{h_p}{2} \\ 2 \frac{h_p}{2} d + \left( \frac{h_f}{\cos \theta} - \frac{h_p}{2} \right) D & \text{si } \rightarrow \frac{h_f}{\cos \theta} > \frac{h_p}{2} \end{cases} \quad (4.34)$$

Por otra parte, el centro de gravedad del volumen sumergido puede hallarse en las coordenadas  $(x_{Gs}, y_{Gs})$  donde cada componente se calcula con las ecuaciones 4.35 y 4.36 dependiendo de la profundidad del agua y considerando la geometría propuesta.

$$x_{Gs} = \begin{cases} \frac{d}{2} & \text{si } \rightarrow \frac{h_f}{\cos \theta} \leq \frac{h_p}{2} \\ \frac{2a \frac{h_p}{2} \frac{d}{2} + A \left( \frac{h_f}{\cos \theta} - \frac{h_p}{2} \right) \frac{D}{2}}{2a \frac{h_p}{2} + A \left( \frac{h_f}{\cos \theta} - \frac{h_p}{2} \right)} & \text{si } \rightarrow \frac{h_f}{\cos \theta} > \frac{h_p}{2} \end{cases} \quad (4.35)$$

$$y_{Gs} = \begin{cases} \frac{h_f}{2 \cos \theta} & \text{si } \rightarrow \frac{h_f}{\cos \theta} \leq \frac{h_p}{2} \\ \frac{2a \frac{h_p^2}{8} + A \left( \frac{h_f}{\cos \theta} - \frac{h_p}{2} \right) \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{h_f}{\cos \theta} - \frac{h_p}{2} \right) + \frac{h_p}{2} \right]}{2a \frac{h_p}{2} + A \left( \frac{h_f}{\cos \theta} - \frac{h_p}{2} \right)} & \text{si } \rightarrow \frac{h_f}{\cos \theta} > \frac{h_p}{2} \end{cases} \quad (4.36)$$

Donde  $A = \pi D^2/4$  y  $a = \pi d^2/4$  son las áreas transversales de los cilindros del torso y piernas, respectivamente.

Ídem, considerando el sistema de referencia inclinado  $\theta$  grados con respecto de la horizontal, las coordenadas del centro de gravedad del volumen sumergido  $(\eta_{Gs}, \xi_{Gs})$  pueden ser evaluadas como sigue:

$$\eta_{Gs} = \frac{x_{Gs}}{\cos \theta} + y_{Gs} \text{sen} \theta \quad (4.37)$$

$$\xi_{Gs} = y_{Gs} \cos \theta \quad (4.38)$$

De igual modo como fue mostrado en el método de Xia, en el método de Milanesi fueron complementadas las ecuaciones de las fuerzas que intervienen en el fenómeno, para que incluyeran el efecto de la pendiente local. En este sentido, este criterio considera que el flujo de agua es constante y uniforme. Las fuerzas que intervienen en el fenómeno son las siguientes:

### Fuerza de arrastre ( $F_D$ )

La fuerza de arrastre que ejerce una corriente de agua a un cuerpo humano sumergido en ella puede que no sea paralela a la velocidad del flujo, debido a la asimetría del campo de flujo alrededor del cuerpo. Sin embargo, como en este criterio fue considerado el cuerpo humano como elementos cilíndricos largos inclinados contra un flujo en un ángulo de  $\theta$  grados con respecto de la horizontal, la fricción es insignificante, de modo que la fuerza de arrastre es normal al área frontal del cuerpo y se evalúa en función de la componente horizontal de la velocidad media,  $u = U \text{sen} \alpha = U \cos \theta$ , como sigue:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_f C_d u^2 A_s = \frac{1}{2} \rho_f C_d U^2 (\cos \theta)^2 A_s \quad (4.39)$$

Considerando el sistema de referencia inclinado, la fuerza de arrastre del agua puede descomponerse en dos direcciones perpendicular ( $F_{DN}$ , fuerza de arrastre ascendente o empuje ascendente) y paralela a la pendiente ( $F_{DT}$ , fuerza de arrastre).

$$F_{DT} = F_D \sin \alpha = F_D \cos \theta = \frac{1}{2} \rho_f C_d U^2 (\cos \theta)^3 A_s \quad (4.40)$$

$$F_{DN} = F_D \cos \alpha = F_D \sin \theta = \frac{1}{2} \rho_f C_d U^2 (\cos \theta)^2 \sin \theta A_s \quad (4.41)$$

Donde:

$U$ , es la velocidad media del flujo en m/s

$C_d$ , es un coeficiente de arrastre que se encuentra relacionado con las propiedades del flujo, particularmente del número de Reynolds (Re) y la forma del cuerpo humano, el cual es valuado en 1.0 como se describió anteriormente,

$A_s$ , es el área mojada perpendicular al flujo en  $m^2$ ,

$\rho_f$ , es la densidad del agua en  $kg/m^3$ .

Esta fuerza actúa en una distancia de  $\xi_{O,D}$  con respecto de la superficie del suelo y a una distancia de  $\eta_{O,D}$  desde el punto de referencia O ubicado en el talón de los pies, con respecto del sistema de referencia inclinado, ver Figura 4-24B.

$$\eta_{O,D} = \frac{x_{GS}}{\cos \theta} + \frac{h_f}{2} \tan \theta \quad (4.42)$$

$$\xi_{O,D} = \frac{h_f}{2} \quad (4.43)$$

### Fuerza de flotación ( $F_B$ )

La fuerza de flotación en un cuerpo sumergido en el agua actúa en dirección normal al fondo (ver Figura 4-24C), de modo que, bajo un sistema de referencia inclinado, la fuerza de flotación puede definirse en función de volumen sumergido ( $V_s$ ). De acuerdo con la representación del cuerpo humano empleada en este criterio, el volumen del cuerpo humano que se encuentra sumergido en el agua puede ser calculado con la ecuación 4.33, consideración que tiene su base teórica en contraste a las relaciones y coeficientes empíricos utilizados en el método de Xia.

$$F_B = \rho_f g V_s \cos \theta \quad (4.44)$$

donde:

$g$ , es la aceleración de la gravedad en  $m/s^2$ , y

$V_b$ , es el volumen de cuerpo humano que se encuentra sumergido en el agua en  $m^3$ .  
 $\rho_f$ , es la densidad del agua en  $kg/m^3$ .

Esta fuerza actúa en las coordenadas  $(\eta_{Gs}, \xi_{Gs})$  que corresponden al centro de gravedad de la parte del cuerpo que se encuentra sumergido en el agua bajo el sistema de referencia inclinado, ver Figura 4-24C.

### Fuerza gravitacional ( $W_N$ , $W_T$ )

A diferencia del criterio de Xia, en este criterio conviene considerar la fuerza gravitacional únicamente como el peso propio del cuerpo humano ( $W$ ) descompuesto en sus componentes normal ( $W_N$ ) y tangencial ( $W_T$ ) a la pendiente de la superficie como sigue:

$$W_N = W \cos \theta = gm_p \cos \theta \quad (4.45)$$

$$W_T = W \sen \theta = gm_p \sen \theta \quad (4.46)$$

Esta fuerza actúa en las coordenadas  $(\eta_G, \xi_G)$  que corresponden al centro de gravedad de la representación de cuerpo humano considerada, bajo el sistema de referencia inclinado, ver Figura 4-24A.

### Fuerza normal ( $F_N$ )

La fuerza de reacción normal que ejerce la superficie del terreno, sobre la que reposa un cuerpo, es equivalente a la suma algebraica de las fuerzas que actúan en dirección normal a la pendiente. Siendo en este caso, definida por la ecuación 4.47.

$$\begin{aligned} F_N &= W_N - F_B - F_{DN} = gm_p \cos \theta - \rho_f g V_s \cos \theta - \frac{1}{2} \rho_f C_d U^2 (\cos \theta)^2 \sen \theta A_s \\ &= g \rho_f \cos \theta \left( \frac{m_p}{\rho_f} - V_s - \frac{1}{2g} C_d U^2 \cos \theta \sen \theta A_s \right) \end{aligned} \quad (4.47)$$

### Fuerza de fricción ( $F_R$ )

La fuerza de fricción que se presenta en el contacto de los pies del cuerpo humano y la superficie del suelo en la que se encuentra y es calculada con la siguiente ecuación

$$F_R = \mu F_N = \mu (W_N - F_B - F_{DN})$$

$$= \mu \left[ g \rho_f \cos \theta \left( \frac{m_p}{\rho_f} - V_s - \frac{1}{2g} C_d U^2 \cos \theta \sin \theta A_s \right) \right] \quad (4.48)$$

Donde  $F_N$  es la fuerza de reacción normal ejercida por la superficie del terreno vista en párrafos anteriores y  $\mu$  es el coeficiente de fricción entre las superficies de contacto de la planta de los zapatos y el pavimento húmedo, el cual se encuentra valuado en entre 0.3 y 1.0, como se vio anteriormente. La calibración de este parámetro fue realizada en (Milanesi et al., 2015) con los datos experimentales de (Abt et al., 1989; Foster & Cox, 1973; S. N. Jonkman & Penning-Rowsell, 2008; Karvonen et al., 2000; Takahashi et al., 1992; Yee, 2003) donde se encontró que el mejor ajuste se tenía con un coeficiente de fricción de 0.46.

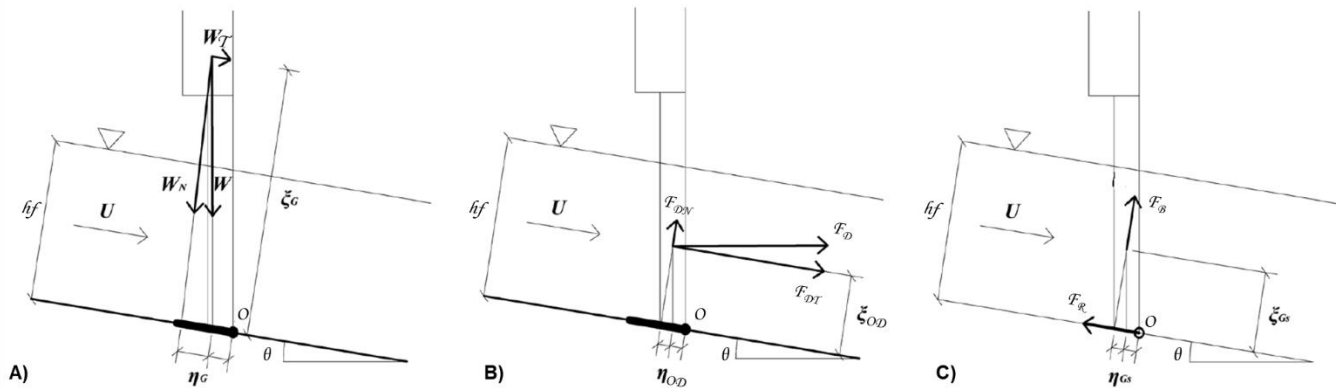


Figura 4-24. Esquemas de las fuerzas involucradas en los fenómenos y sus puntos de aplicación.  
 Fuente: Modificado de (Milanesi et al., 2015).

De manera análoga, fue considerada la interacción las fuerzas antes mencionadas, para desarrollar las ecuaciones que definen la velocidad crítica en la que se presentan los mecanismos de inestabilidad considerados en este método.

### Mecanismo de inestabilidad por deslizamiento o fricción

En el criterio de Milanesi fue incorporado el efecto de la pendiente local. En este sentido, el peligro de arrastre por fricción es dependiente del equilibrio de las fuerzas que actúan en dirección paralela a la pendiente de la superficie. La estabilidad será satisfecha si la fuerza de fricción entre el suelo y los pies de una persona es capaz de resistir el empuje de las fuerzas de arrastre (ocasionada por el flujo) y la componente del peso propio del cuerpo que actúa en esa dirección, desarrollándose la condición crítica cuando estas son iguales. De acuerdo con lo dicho, se puede hacer la sustitución de las ecuaciones 4.40, 4.46 y 4.48 para la definición de un umbral de velocidad, como sigue.

$$F_{DT} + W_T = F_R \quad (4.49)$$

Sustituyendo las fórmulas de cada fuerza se tiene:

$$F_D \cos \theta + W \operatorname{sen} \theta = \mu \left[ W \cos \theta - g \rho_f V_s \cos \theta - F_D \operatorname{sen} \theta \right] \quad (4.50)$$

Agrupando términos y despejando la velocidad se llega a:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_f C_d U^2 (\cos \theta)^2 A_s = \frac{\cos \theta \left[ \mu W - \mu g \rho_f V_s - W \tan \theta \right]}{\cos \theta + \mu \operatorname{sen} \theta} \quad (4.51)$$

$$U_{des} = \sqrt{\frac{2 \left[ \mu W - \mu g \rho_f V_s - W \tan \theta \right]}{\rho_f C_d A_s \left( \cos^2 \theta + \frac{1}{2} \mu \operatorname{sen} 2\theta \right)}} \quad (4.52)$$

Como se aprecia, la ecuación queda en función del ángulo de inclinación del terreno con respecto de la horizontal, la densidad del agua, la masa de una persona, así como el área y volumen sumergido, que a su vez son dependientes de las características del flujo y del modelo de persona que se trate. Adicionalmente, los valores del coeficiente de arrastre  $C_d$  y del coeficiente de fricción  $\mu$ , que fueron valuados en 1.0 y 0.46, respectivamente, como fue determinado anteriormente.

### Mecanismo de inestabilidad por derribe o momento

Teniendo en cuenta el efecto de la pendiente local, algunas de las fuerzas actúan sobre el cuerpo humano sumergido en una corriente de agua toman relevancia en comparación con el criterio de Xia, entre ellas la fuerza de flotación y la fuerza de empuje ascendente provocada por el flujo del agua. En el mecanismo de inestabilidad por derribe, la estabilidad del cuerpo humano será asegurada, si el momento resistente de la componente normal del peso de cuerpo ( $W_N$ ) es capaz de soportar los momentos de desestabilización de las fuerzas de arrastre ( $F_{DT}$ ), levantamiento ( $F_{DN}$ ), la fuerza de flotación ( $F_B$ ) y la componente tangencial del cuerpo ( $W_T$ ), calculados alrededor del punto de referencia O, ubicado en el talón del modelo de representación del cuerpo humano. Al sustituir las ecuaciones de las fuerzas antes mencionadas y de las distancias de los puntos de aplicación al punto O se puede construir la expresión matemática que representa al mecanismo de inestabilidad.

$$F_{DT} \xi_{O,D} + W_T \xi_G + F_B \eta_{Gs} + F_{DN} \eta_{O,D} = W_T \eta_G \quad (4.53)$$

Sustituyendo las fórmulas de cada fuerza se tiene:



$$F_D \cos \theta \left( \frac{h_f}{2} \right) + W \sin \theta (y_G \cos \theta) + (\rho_f g V_s \cos \theta) \left( \frac{x_{G_s}}{\cos \theta} + y_{G_s} \sin \theta \right) + F_D \sin \theta \left( \frac{x_{G_s}}{\cos \theta} + \frac{h_f}{2} \tan \theta \right) = W \cos \theta \left( \frac{x_G}{\cos \theta} + y_G \sin \theta \right) \quad (4.54)$$

Agrupando términos y despejando la velocidad critica se llega a:

$$F_D \left[ \cos \theta \left( \frac{h_f}{2} \right) + \tan \theta \left( x_{G_s} + \frac{h_f}{2} \sin \theta \right) \right] = W \left[ (x_G + y_G \sin \theta \cos \theta) - (y_G \sin \theta \cos \theta) \right] - (\rho_f g V_s) (x_{G_s} + y_{G_s} \sin \theta \cos \theta) \quad (4.55)$$

$$\frac{1}{2} \rho_f C_d U^2 \cos^2 \theta A_s = \frac{W x_G - \rho_f g V_s (x_{G_s} + y_{G_s} \sin \theta \cos \theta)}{\cos \theta \left( \frac{h_f}{2} \right) [1 + \tan^2 \theta] + x_{G_s} (\tan \theta)} \quad (4.56)$$

$$U_{der} = \sqrt{\frac{4 \left[ W x_G - \rho_f g V_s \left( x_{G_s} + \frac{1}{2} y_{G_s} \sin 2\theta \right) \right]}{\rho_f C_d A_s (h_f \cos \theta + x_{G_s} \sin 2\theta)}} \quad (4.57)$$

La ecuación 4.57 define la velocidad critica en la cual puede presentarse la inestabilidad por derribe o momento, la cual queda en función de los mismos parámetros que en su similar para el mecanismo de inestabilidad por deslizamiento, incorporándose adicionalmente el cálculo de las coordenadas  $(x_{G_s}, y_{G_s})$  que corresponden a la ubicación del centro de gravedad del volumen sumergido con respecto del sistema de referencia inclinado.

A diferencia del criterio de Xia, en este criterio la posición de la representación geométrica del cuerpo humano respecto del flujo, es decir, si este se encuentra de frente o a espaldas de la corriente, es determinante para realizar el cálculo de la velocidad critica en la cual ocurre la inestabilidad por derribe, debido a que los brazos de palanca de las fuerzas involucradas serían diferentes en ambas configuraciones. Según lo expresado, el esquema en el que el cuerpo humano se encuentra de frente a la corriente del flujo de agua es conservador en comparación, ya que el brazo de palanca de la componente transversal del peso ( $W_T$ ) con respecto del punto O ( $\eta_G$ ) es menor, haciéndolo más vulnerable que al encontrarse de espaldas a la corriente.

## Ahogamiento

El criterio de Milanesi incorpora el ahogamiento como una tercera condición a determinar en el peligro por inundación a personas, esto mediante la definición de un umbral de profundidad de agua ( $h_d$ ), en la que se podría en riesgo la vida de una persona. Este umbral de profundidad del agua puede establecerse en función de la altura de una persona, de modo que en una inundación la cabeza de una persona se encuentre completamente sobre la superficie del agua.

Según los datos de la proporción en distintas partes de cuerpo realizada por (Drillis et al., 1966), la medida de la cabeza humana se puede considerar como  $1/8$  de la altura total del cuerpo ( $h_p$ ). En consecuencia, el umbral de la profundidad del agua en la que puede provocarse el ahogamiento se determina mediante la siguiente expresión:

$$h_d = \frac{7}{8} h_p \quad (4.58)$$

De manera análoga como fue realizado en el criterio de Xia, los resultados de la modelación hidrodinámica (mapas de profundidad y velocidad del agua) fueron procesados mediante las herramientas de post-procesamiento de GRASS GIS, con el fin de calcular la velocidad crítica en la que se presentan las inestabilidades por fricción y derribe, así como identificar aquellas zonas donde el tirante sobrepasara el umbral de ahogamiento, de acuerdo con la altura promedio de las personas en cada sitio de estudio analizado, ver Tabla 4-12.

Tabla 4-12. Umbrales de profundidad del agua en la que se puede presentar el ahogamiento en los principales grupos poblacionales de las zonas de estudio.

Ambas ciudades		Río Bravo		León	
Niños (10 años)		Adultos (18-25 años)		Adultos (18-25 años)	
Talla	$h_d$	Talla	$h_d$	Talla	$h_d$
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1.33	1.16	1.64	1.44	1.66	1.45

Fuente: Elaboración propia.

## Método de comparación con los dos criterios anteriores

Finalmente, con el fin de realizar una comparación con los métodos anteriores, fue utilizado un índice de peligro por inundación a personas valuado entre 0 y 1, que se define como la relación entre las velocidades obtenidas en la simulación hidrológico-hidrodinámica y la mínima de las velocidades críticas resultantes de las ecuaciones 4.52 y 4.57, ver ecuación 4.30, además se incorpora en el último nivel de peligro la determinación del umbral de ahogamiento. La Tabla 4-13 muestra la clasificación de los niveles de peligro del criterio de Milanesi de acuerdo con sus consideraciones.

Tabla 4-13. Umbrales de peligro por inundación a personas (criterio de Milanesi).

Peligro por inundación a personas	
Valor (HR)	Clasificación – Descripción
HR = 0	Seguro (seco)
$0 \leq HR < 0.30$	Peligro muy bajo – Se debe tener precaución.
$0.30 \leq HR < 0.60$	Peligro bajo - Incluye personas con discapacidad.
$0.60 \leq HR < 1.0$	Peligro medio - incluye a la mayoría.
$HR \geq 1.0$ o $hf \geq hd$	Peligro alto – incluye a todos.

Fuente: Elaboración propia.

Entre las ventajas con las que cuenta este criterio en su comparación con los que anteriormente fueron descritos destacan las siguientes:

- Este criterio considera los efectos de la pendiente local sobre la estabilidad del cuerpo humano, por lo que sus resultados serán válidos para cualquier tipo de relieve, desde llanuras de inundación hasta sistemas montañosos, lo cual representa una gran ventaja en comparación a los criterios antes mencionados.
- El criterio es relativamente simple, preciso y solo requirió de la calibración de dos parámetros, a saber: el coeficiente de arrastre  $C_d$  y del coeficiente de fricción  $\mu$ , los cuales fueron valuados en 1.0 y 0.46, respectivamente, a partir del conjunto de datos experimentales. En contraste de los cuatro requeridos para cada uno de los mecanismos de inestabilidad del criterio de Xia.
- El criterio de Milanesi incorpora la representación geométrica del cuerpo humano a través de variables generales, lo cual permite realizar la adaptación de su metodología al grupo poblacional de cualquier lugar.
- Este criterio tiene en cuenta las distancias exactas de los puntos de acción de las fuerzas que intervienen en el fenómeno, referenciadas a la representación geométrica considerada, a diferencia del criterio de base física de Xia, donde las distancias de aplicación de las fuerzas eran afectadas por un coeficiente empírico de ajuste.

En cuanto a las desventajas del criterio de Milanesi, caben destacar las siguientes:

- De manera similar al criterio de Xia, en este criterio la distribución de la velocidad que llega a formarse alrededor del cuerpo sumergido en el agua es compleja, por tanto, se simplifica al utilizar la velocidad media del flujo.
- La información actualizada de los pesos y tallas en diversas regiones de país es limitada.
- Este criterio requiere de un mayor número de variables y consideraciones, en consecuencia, las ecuaciones derivadas para cada mecanismo de inestabilidad son

aún más complejas que las definidas por Xia, lo cual conduce a que este criterio no sea fácil de implementar de manera rápida en comparación a los demás.

- A pesar de que este criterio es superior a los demás tomados en cuenta en este trabajo de investigación, por considerar características específicas del fenómeno, existen algunas condiciones que aún faltan por analizar, como: la presencia de desechos en el flujo, factores psicológicos de las personas ante una situación de peligro, la presencia de cargas suplementarias (mochilas, equipaje, etc.), entre otros. Deficiencia que se prevé que sea resuelta en futuros trabajos de investigación.

## **CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

En este capítulo se muestran los resultados de las modelaciones hidrológico-hidrodinámicas realizadas en los sitios de estudio del país, donde se llevó a cabo la implementación de la metodología propuesta en este trabajo de investigación, las cuales comprenden la presentación de los mapas de máximos tirantes y máximas velocidades asociadas a los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años. Con una duración de simulación de un día compuesta por un total de 144 pasos de tiempo a cada 10 minutos.

Por otra parte, se muestran los resultados obtenidos en la implementación de los tres criterios de arrastre de personas aplicados conforme las características morfológicas del modelo de niño y adulto característicos de cada uno de los sitios de estudio, así como de la metodología empleada para evaluarlos, que incluye, la inspección visual y la comparación del número de celdas o área de cada uno de los niveles de peligro identificados.

Como se mencionó anteriormente, los sitios de estudio considerados en este trabajo de investigación fueron elegidos por las razones que se describen en el inicio del capítulo anterior, sin embargo, en este capítulo cabe mencionar aquellas razones que destacaron en relación con la obtención de los resultados obtenidos, por ejemplo:

- Ambas zonas de estudio cuentan con un Modelo Digital de Elevaciones tipo LiDAR de 5 metros de resolución. En este aspecto, esto se optó por ver las diferencias de los resultados obtenidos con una resolución ajustada a 30 metros en el caso de León y respetando la resolución de 5 metros para el caso de Río Bravo, buscando

evaluar el comportamiento de los criterios de arrastre de personas bajo un esquema de alta resolución.

- A pesar de las importantes diferencias topográficas, dentro de la zona urbana los tirantes de agua no superan los 3 metros de altura, mientras que las velocidades medias del flujo no son superiores a los 4 m/s. Estos resultados permitieron obtener una variación en los niveles de peligro identificados en la aplicación de los criterios de arrastre, lo cual facilitó su evaluación.
- La información de pesos, tallas y medidas corporales se encontraba disponible en la CANAIVE tanto para la zona norte (Río Bravo), como para la zona del bajío (León).
- Los criterios de arrastre de personas fueron aplicados considerando niños de una edad de 10 años y, por otra parte, adultos de entre 18 y 25 años característicos de la región, conforme a los datos mostrados en el capítulo 3. Esto debido a que la separación de los adultos en relación con su sexo (masculino y femenino) a pesar de presentar diferencias visibles, estas no eran significativas. Según lo esperado, el género masculino mostró un nivel de peligro de arrastre menos a comparación de las mujeres.

## **5.1 Resultados de la modelación hidrológico-hidrodinámica**

Dado que el objetivo principal de esta investigación consiste en llevar a cabo la aplicación y evaluación de los criterios de arrastre de personas a un nivel de calle dentro de las zonas urbanas en estudio, se necesitó la modelación hidrológica hidrodinámica de eventos de diseño con un periodo de retorno de 2, 5, y 10 años, esto con el fin de realizar la aplicación de la metodología propuesta con eventos comunes que permitieran obtener la diversidad de los resultados, ya que al aplicarla en eventos con un periodo de retorno mayor estas diferencias no se observaron. Según lo dicho, los resultados de las modelaciones realizadas considerando eventos de diseño con periodos de retorno de 20, 50 y 100 años conducen a una mancha de inundación clasificada casi en su totalidad en un nivel de peligro muy alto.

### **5.1.1. Escenario de inundación asociado a un Tr de 2 años**

El escenario de inundación asociado a un periodo de retorno de 2 años puede observarse en las Figuras 5-1 y 5-2 para las ciudades de Río Bravo y León, respectivamente. En ellas, se muestra la envolvente de máximos tirantes y máximas velocidades obtenidos tras la simulación hidrológico-hidrodinámica realizada en el modelo Itzi.

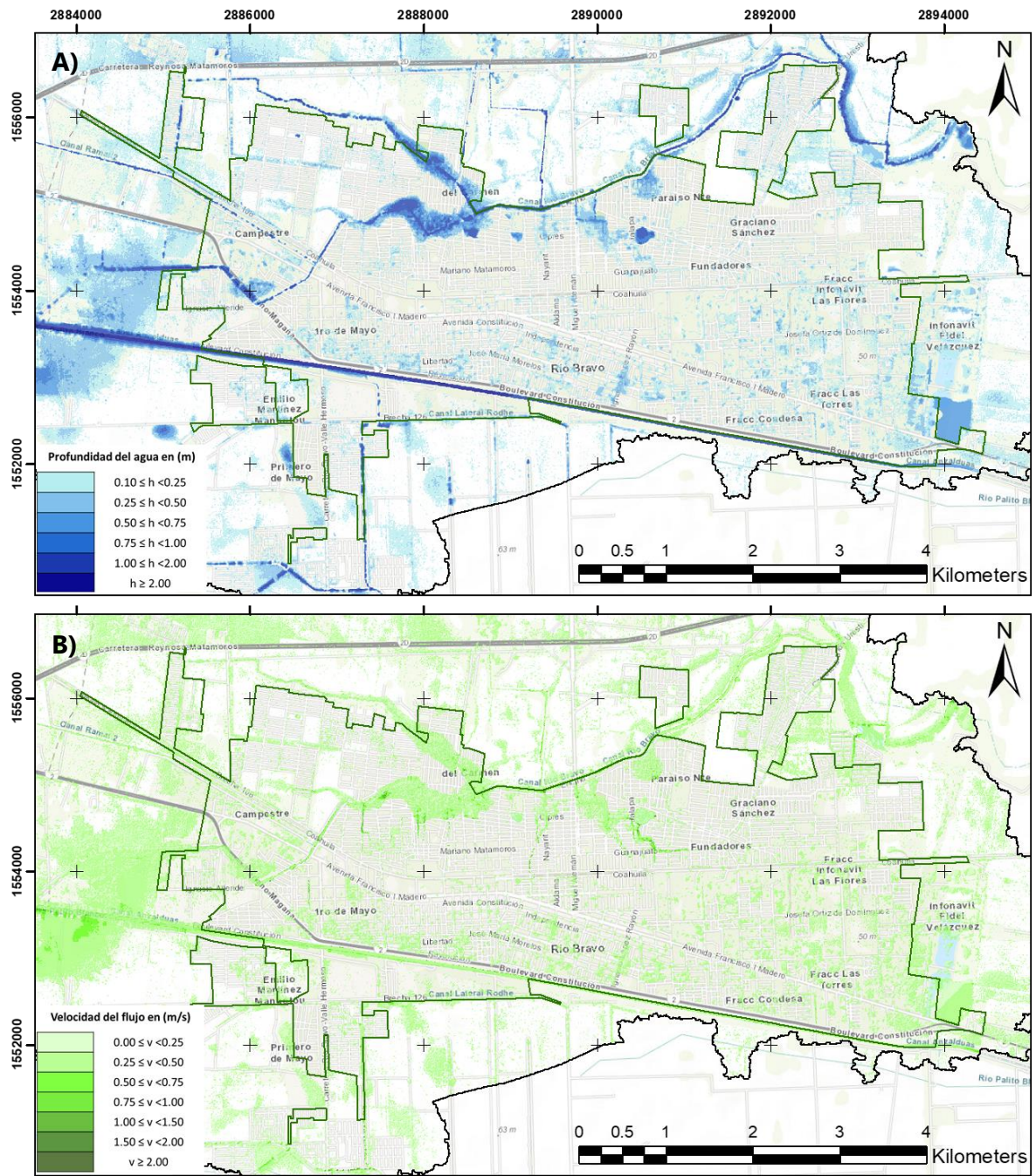


Figura 5-1. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 2 años para la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.

Fuente: Elaboración propia.

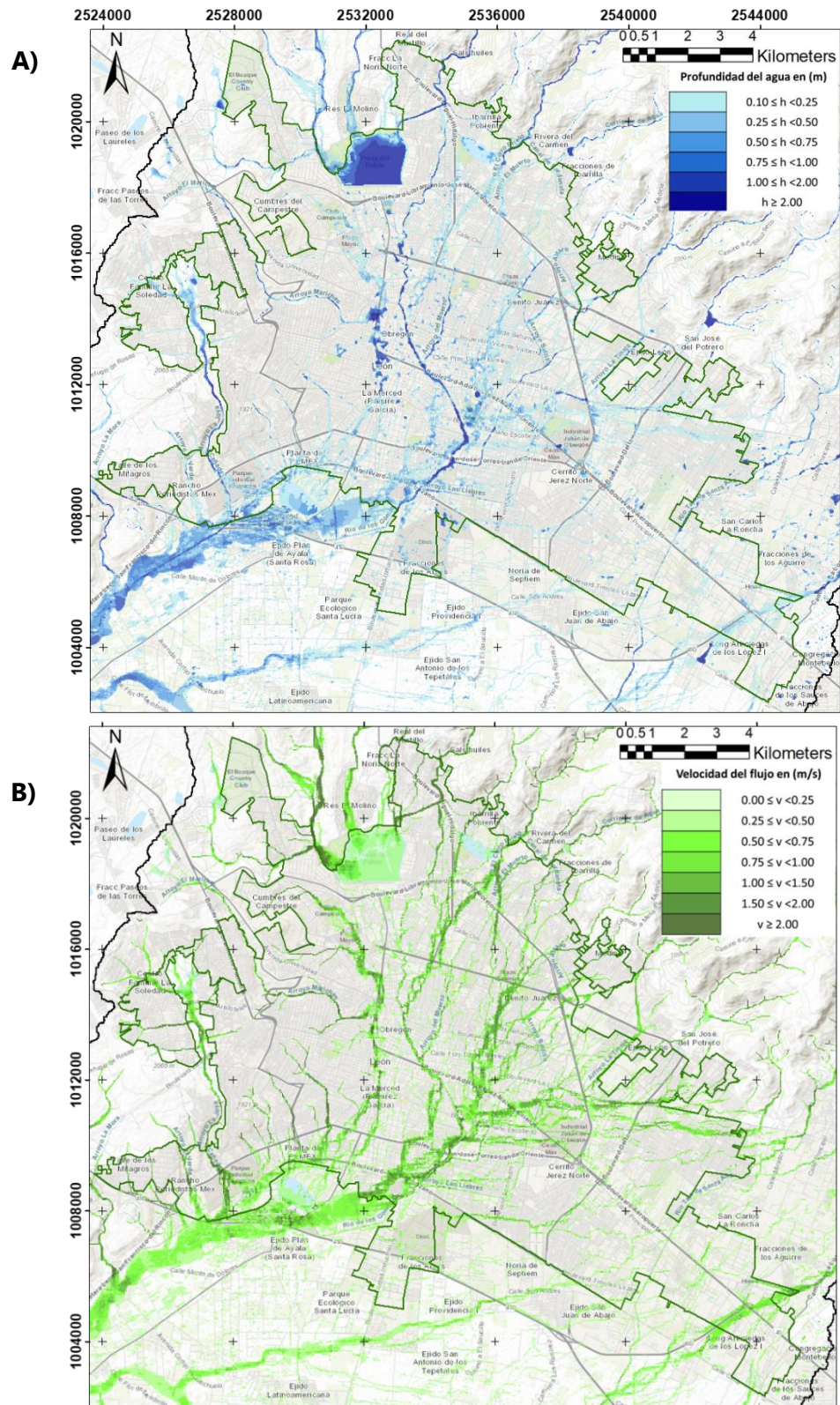


Figura 5-2. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 2 años para la ciudad de León, Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia.

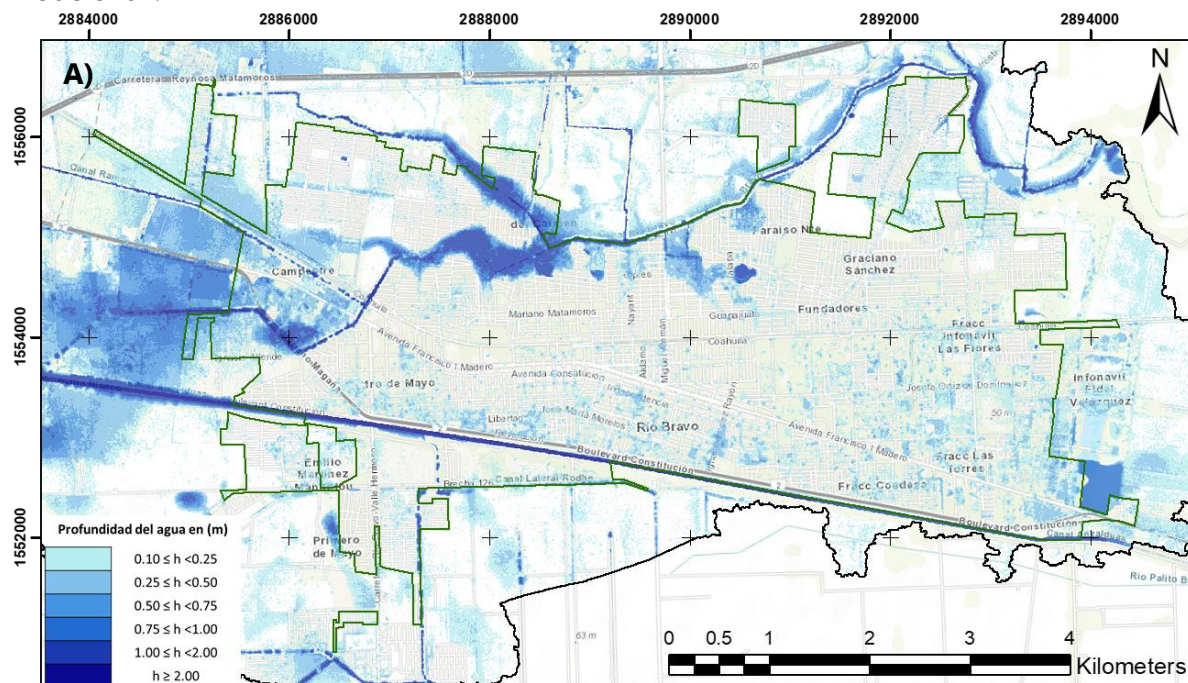


En la ciudad de Río Bravo, se observa que las afectaciones comienzan a presentarse en zonas aledañas a los canales Ramal 2, Río Bravo y al oeste de la zona urbana donde se ubica el ingreso del escurrimiento conducido por el canal Anzaldúas. Los desbordamientos de dichos canales afectan las colonias de Benito Juárez, Ampliación Benito Juárez, Colonia del Carmen, Miguel Hidalgo, Ampliación Miguel Hidalgo, Estero, Ampliación Estero, Las Cumbres, Manuel Cavazos Lerma (todas ubicadas al oeste de la ciudad) y finalmente La Sauteña (ubicada al centro-norte de la zona urbana), donde fueron identificadas profundidades y velocidades máximas de 2.55 m y 3.43 m/s, respectivamente.

Para la ciudad de León los daños comienzan a presentarse en zonas aledañas al Arroyo Grande ubicado al este de la ciudad, particularmente en las colonias de Arboledas de los López II, Valle de San Carlos y Fracciones de los Aguirre. Por otra parte, las más importantes afectaciones en la zona urbana se presentan en su centro, principalmente en sitios cercanos al Río de los Gómez y sus afluentes que cruzan a la ciudad de noroeste a sureste, entre las colonias más dañadas se encuentran el Fraccionamiento Jardines del Moral, Conjunto Habitacional del Rocío, Hidalgo, Obrera, Centro, Bellavista, las Fuentes, Oriental, Las Arboledas, Fracc. Santa Clara, Jardines de San Miguelito, entre otras. La mancha de inundación generada por un evento de 2 años de periodo de retorno generó profundidades máximas de 3.64 m. y velocidades de hasta 3.62 m/s.

### 5.1.2 Escenario de inundación asociado a un Tr de 5 años

De manera similar se muestra en las figuras 5-3 y 5-4 el escenario de inundación asociado a un evento con periodo de retorno de 5 años para ambas ciudades, que corresponden a la envolvente de máximos tirantes y máximas velocidades obtenidas del modelo Itzi.



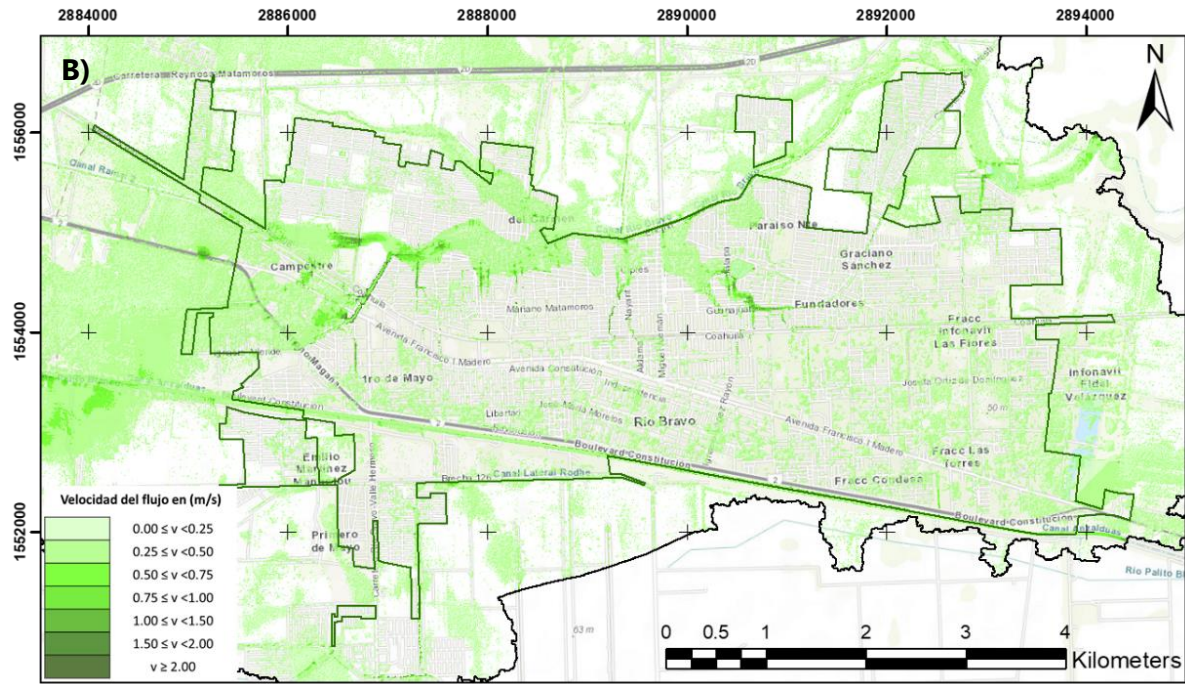


Figura 5-3. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 5 años para la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.

Fuente: Elaboración propia.

Con un evento con periodo de retorno de 5 años, aumenta el número de colonias afectadas por los efectos de una inundación para ambas ciudades.

Para la ciudad de Río Bravo se observa que las afectaciones se intensifican al norte de la zona urbana en las colindancias con el Canal Río Bravo, así como al oeste donde se ubican los campos de cultivo y la entrada a la ciudad de los escurrimientos provenientes del Canal Ramal 2. Al respecto, se adicionan a la relación de colonias afectadas: Hijos de Ejidatarios y Morelos, ubicadas al centro-norte, así como Campestre y Conalep, localizadas al oeste de la ciudad. En la mancha de inundación mostrada en la figura 5-3, se observa que se alcanzaron profundidades máximas de 3.30 m en el Canal Anzaldúas y velocidades de hasta 4.55 m/s en las calles de la colonia Satélite.

De manera similar, las afectaciones en la ciudad de León se intensificaron de manera importante, particularmente en las inmediaciones del Club Campestre, la Colonia Residencial del Moral I y II, Conjunto Hab. del Roció, Hidalgo, Obrera, Bellavista, León Centro y la Unidad Médica de Alta Especialidad (UMAE) No. 1 del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS); esto provocado por el desbordamiento de la Presa El Palote (considerado el funcionamiento del vertedor libre tipo cimacio cuya cresta se encuentra en la elevación 1836.15 m.s.n.m., CONAGUA), que ocasiono la generación de un escurrimiento superficial por los Bulevares Manuel J. Clouthier y Adolfo López Mateos donde se presentaron tirantes de hasta 2.80 metros. Por otra parte, se aprecia un aumento significativo de las velocidades del flujo que se desarrollan al norte de la ciudad en zonas cercanas al Río de los Gómez y sus afluentes

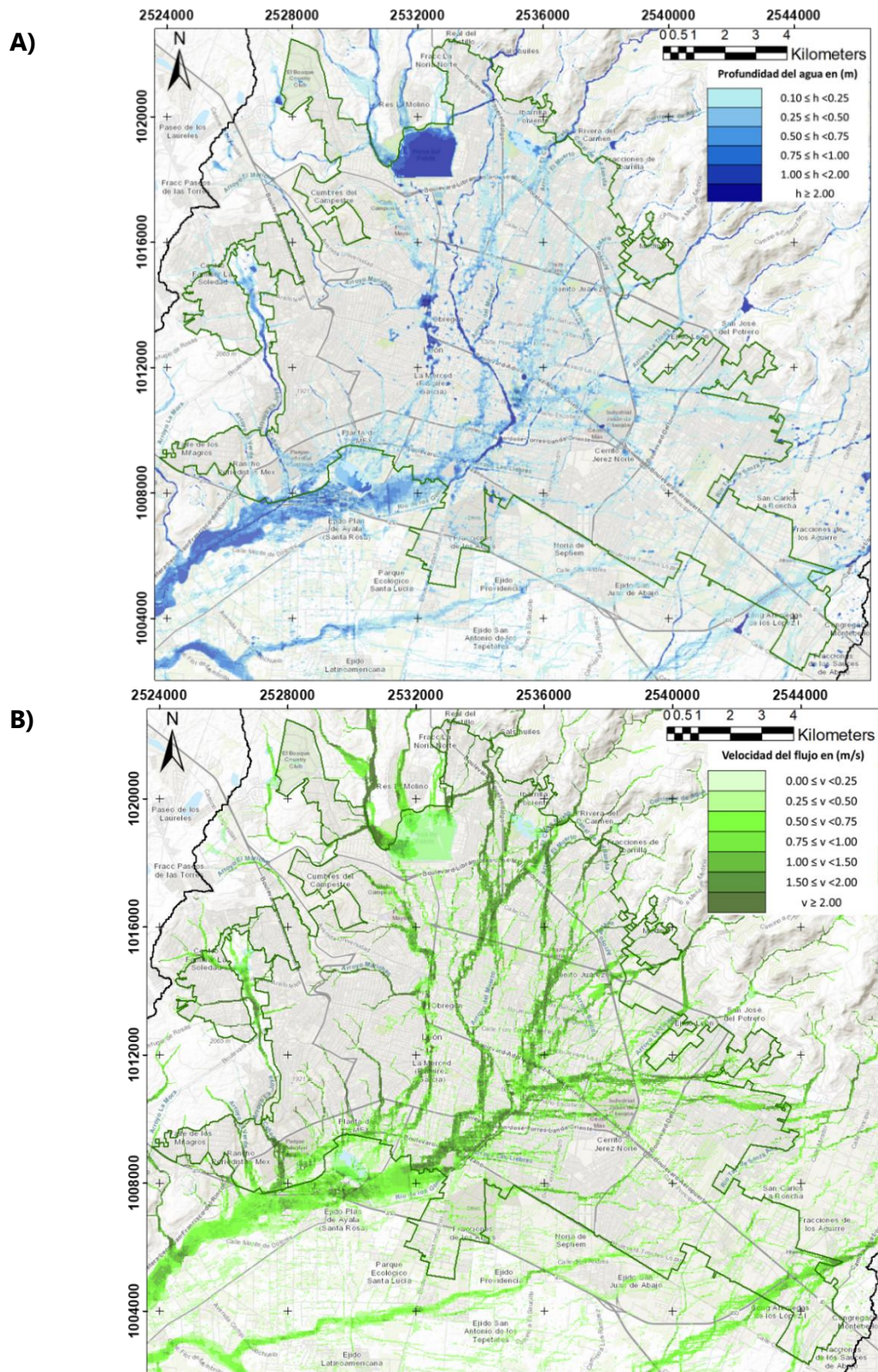


Figura 5-4. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 5 años para la ciudad de León, Guanajuato.

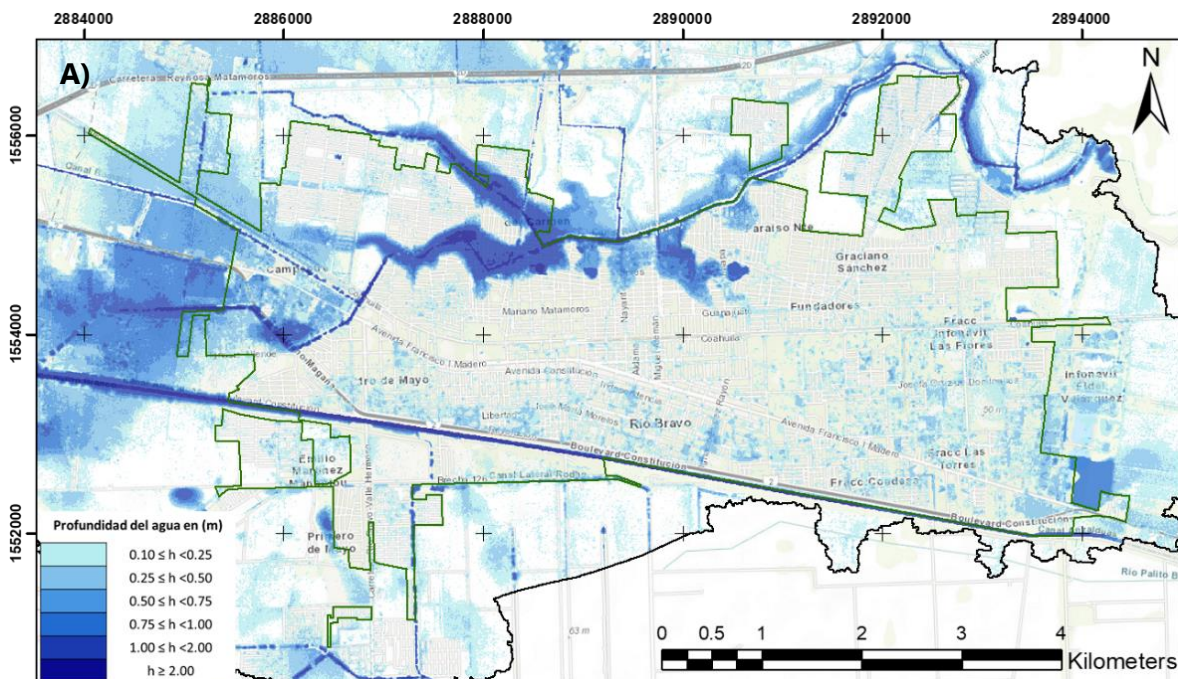
Fuente: Elaboración propia.

donde se presentan velocidades de hasta 2 m/s. Finalmente, en la Figura 5-4 puede observarse que un evento de 5 años de periodo de retorno ocasionó profundidades y velocidades máximas de hasta 4.15 metros y 4.80 m/s, respectivamente.

### 5.1.3 Escenario de inundación asociado a un Tr de 10 años

Finalmente, en las Figuras 5-5 y 5-6 se pueden observar los resultados del escenario de inundación asociado a un evento con periodo de retorno de 10 años para las ciudades de Río bravo y León, respectivamente. En ellas se muestra la envolvente de máximos tirantes y máximas velocidades resultantes de la modelación hidrológico-hidrodinámica bidimensional.

En la ciudad de Río Bravo se aprecia nuevamente un aumento en la extensión, así como de la intensidad de los efectos provocados en comparación a los anteriores, pues fueron identificadas profundidades máximas de 3.56 m y velocidades de hasta 5.26 m/s dentro de la zona urbana, ver Figura 5-5. En un evento de tal magnitud se identificaron afectaciones en al menos 21 colonias ubicadas en la periferia de los principales sistemas hidrológicos de la ciudad (Canal Río Bravo y Canal Ramal 2). Entre ellas se adicionan las colonias: Del Bosque, Guerrero, Satélite, Lomas y Popular del Norte (ubicadas al oeste de la ciudad) y Lázaro Cárdenas e Independencia (ubicadas al centro-norte) a las ya mencionadas en los subcapítulos anteriores.



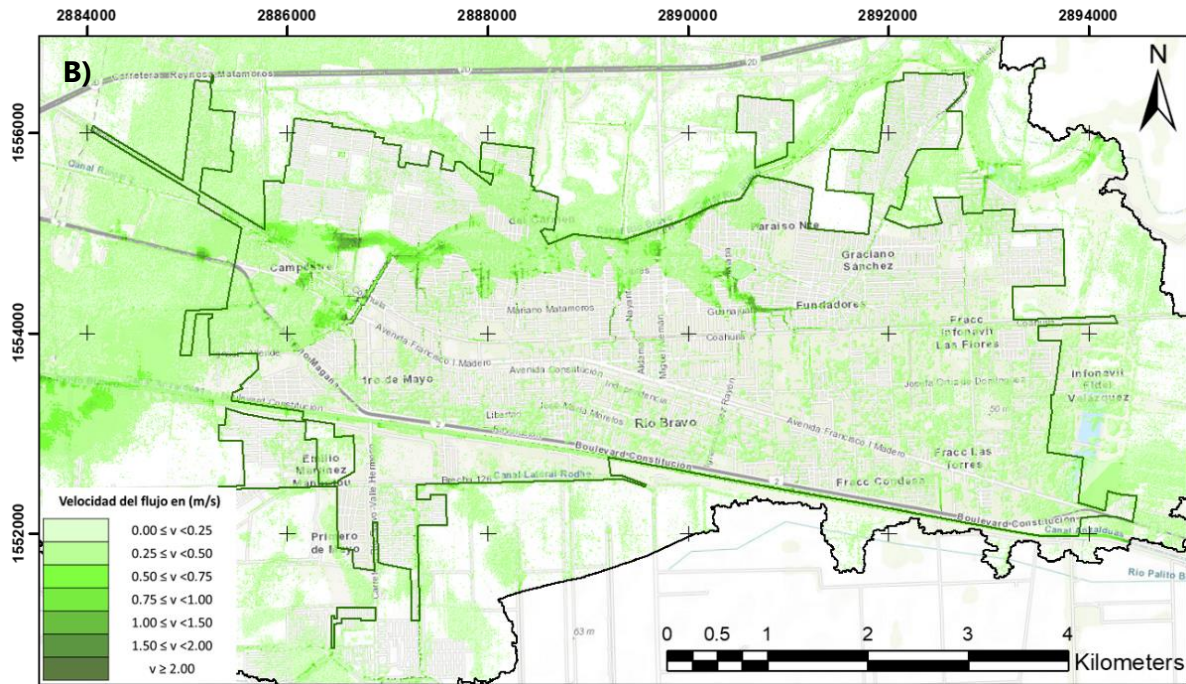


Figura 5-5. Mapa de máximas tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 10 años para la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-6 se muestran los resultados de las envolventes de máximas tirantes y máximas velocidades obtenidos para un evento de 10 años de periodo de retorno en la ciudad de León, en ella se observa nuevamente un incremento en las variables características del flujo con respecto de los mapas anteriores. Se observa que la franja central de la zona urbana es la que resulta ser la más afectada por un evento de esta magnitud, pues en ella confluyen todos los escurrimientos provenientes de la Sierra de Guanajuato. Entre las colonias más afectadas se encuentran: el centro de León, la colonia Obrera, Industrial, Obregón, Los Paraísos y Las Arboledas, Echeveste, Unidad Obrera Infonavit, Los Cedros, San Jerónimo, Presidentes de México, Benito Juárez, Las Fuentes, Bellavista, Andrade, Oriental, Las Américas, Santa Clara y Jardines de San Miguelito, por mencionar algunas de las más de 200 colonias en las que se presentaron tirantes y velocidades superiores a la unidad. Todos los sitios mencionados con anterioridad se encuentran ubicados en la colindancia con un canal natural o revestido que constituye principalmente algún afluente del Río de los Gómez o los vertidos excedentes de la presa El Palote, conforme a las características del vertedor libre tipo cimacio con el que cuenta.

Finalmente, es preciso mencionar que, dentro de los límites de la zona urbana para un evento de esta magnitud, se presentaron profundidades máximas de 4.45 metros y velocidades de hasta 5.49 m/s en las calles de la ciudad.

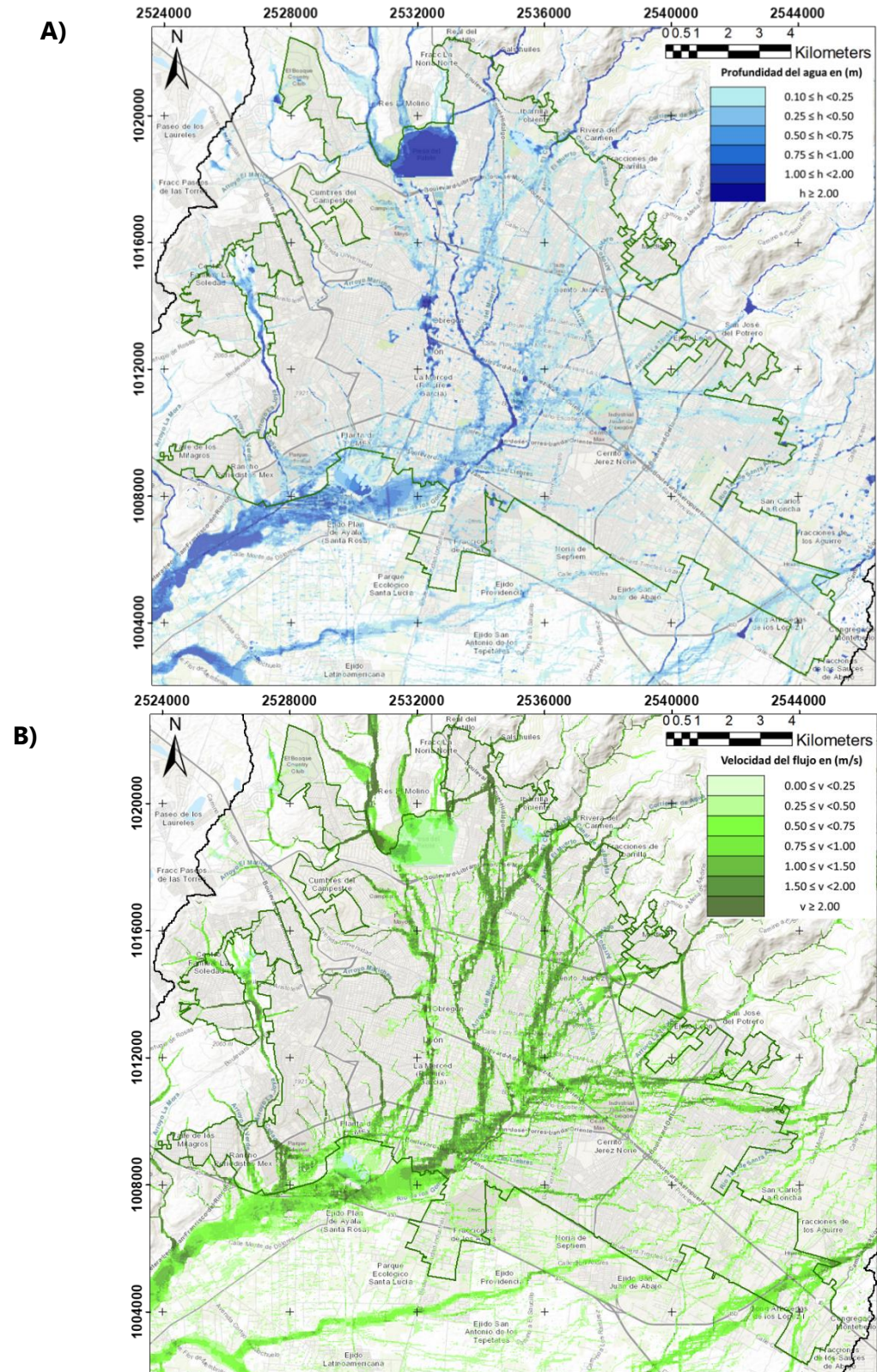


Figura 5-6. Mapa de máximos tirantes (A) y máximas velocidades (B) asociados un periodo de retorno de 10 años para la ciudad de León, Guanajuato.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.2 Resultados de la aplicación de los criterios de arrastre de personas

Los mapas de arrastre de personas mostrados más adelante en este subcapítulo corresponden a los resultados de la implementación de las metodologías asociadas a cada uno de los criterios que fueron evaluados en este trabajo de investigación. Para poder llevar a cabo el cumplimiento de objetivo planteado, fue construido un índice que se define a partir de las máximas velocidades resultantes, así como de las velocidades en las que se presentó la inestabilidad por deslizamiento o derribe, de acuerdo con las características hidrodinámicas del flujo de agua y de las características físicas de la persona considerada en el análisis. Con el valor de este índice fue posible clasificar el peligro de arrastre de personas por inundación en cada punto de las zonas urbanas estudiadas, de acuerdo con la simbología mostrada en la Tabla 5-1.

*Tabla 5-1. Simbología de los mapas de arrastre de personas por inundaciones.*

Peligro de arrastre de personas por inundaciones	
Valor (HR)	Clasificación – Descripción
Sin color	Seguro (seco)
	Peligro muy bajo - Se debe tener precaución.
	Peligro bajo - Incluye personas con discapacidad.
	Peligro medio - incluye a la mayoría.
	Peligro alto – incluye a todos

*Fuente: Elaboración propia.*

### 5.2.1 Ciudad Río Bravo, Tamaulipas

La Figura 5-7 muestra los resultados de la implementación de los criterios de arrastre de personas por inundaciones en la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas, resultado de la simulación hidrodinámica de las tormentas de diseño con periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, considerando las características físicas de infantes de aproximadamente 10 años con una talla de 1.33 m y 30.2 kg. En ella las columnas muestran los resultados de los criterios de DEFRA, Xia y Milanesi de izquierda a derecha, respectivamente, mientras que las filas corresponden a los periodos de retorno analizados aumentando de arriba hacia abajo. De forma similar, la Figura 5-8 se muestran los resultados de la aplicación de los criterios en la misma ciudad, sin embargo, tomando en cuenta las características físicas de una persona adulta con una talla de 1.64 m y 66.65 kg de peso.

Como se esperaba, en una primera inspección de los resultados, se observa que los mapas definidos para niños presentan niveles de peligro más altos en comparación con

aquellos en los que se consideraron adultos. Esto debido a que las características físicas de los infantes no permiten que sean capaz de resistir las acciones del flujo del agua, que para una persona adulta representan un nivel de peligro bajo o de precaución, lo cual puede ser un punto que considerar por la autoridad responsable de protección civil de cada ciudad en el momento de publicar esta información.

De manera general en todos los mapas que se presentan de esta ciudad, se observa que los menores niveles de peligro a personas (niños y adultos) se presentan tanto en la parte sur, así como en la parte este de la zona urbana, es decir, en las inmediaciones del canal Anzaldúas. El caso contrario se presenta principalmente en la parte norte y oeste, en las colonias cercanas a los canales Río Bravo y Ramal 2, región donde se presentaron tirantes máximos de 3.56 m y velocidades de hasta 5.26 m/s para un periodo de retorno de 100 años, lo que repercute en el aumento del nivel de peligro de arrastre de personas por inundaciones, esto puede incluso observarse en las zonas marcadas en rojo en los resultados en los que se consideró a niños desde una tormenta con un periodo de retorno de 2 años, ver figura 5-8.

De acuerdo con los resultados obtenidos, una tormenta con periodo de retorno de 2 años ocasiona un nivel de peligro medio para los adultos, sin embargo, para los niños comienzan a mostrarse calles con un nivel de peligro alto principalmente en la periferia de las dos corrientes que conforman el Canal Río Bravo y el Canal Ramal 2. Al pasar a los resultados definidos para una tormenta de 5 años de periodo de retorno, se muestra un aumento significativo de los niveles de peligro definidos en ambos casos y destaca la aparición de una zona de nivel de peligro medio en la parte oeste de la ciudad. Finalmente, los resultados de la ejecución de los criterios de peligro para una tormenta de diseño de 10 años de periodo de retorno muestran nuevamente un aumento de los niveles de peligro, con la aparición de calles con un nivel de peligro medio y alto en la parte centro-norte de la zona urbana.

De los mapas de peligro mostrados, se pueden identificar las colonias que tienen un nivel de peligro alto de arrastre de personas por inundación, la cuales en su mayoría se encuentran en la colindancia de Canal Río Bravo y que corresponden a asentamientos humanos localizados en llanuras de inundación. Entre las colonias que presentan un nivel de peligro por inundación a personas alto se encuentran: Colonia del Carmen, Miguel Hidalgo, Ampliación Miguel Hidalgo, Estero, Ampliación Estero, Benito Juárez, Ampliación Benito Juárez, Las Cumbres, La Sauteña e Hijos de Ejidatarios.

En la comparación visual de los resultados obtenidos por la ejecución de los criterios de arrastre de personas en este sitio en estudio se observa que el criterio de DEFRA es el más conservador para un periodo de retorno pequeño (2 años), sin embargo, la situación se invierte a medida que aumenta. Por su parte, el criterio de Xia resulto ser el más conservador



de los tres, puesto que para un periodo de retorno de 5 y 10 años los resultados identificaron un mayor número de zonas dentro de la ciudad con niveles de peligro de arrastre altos. Debido a que el criterio de Milanesi incorpora los efectos de la pendiente local y cuenta con una menor incertidumbre al no requerir de la calibración de numerosos parámetros, se esperaba que el método fuese aún más conservador en comparación a los demás, en contraste, se aprecia que los resultados de este criterio se mantuvieron en un punto intermedio para la definición de los niveles de peligro.

Finalmente, la Figura 5-9 muestra un acercamiento a los mapas de peligro de arrastre de personas, considerando las características de infantes de 10 años, obtenidos por los tres criterios implementados y al considerar un evento de inundación de 5 años de periodo de retorno en la zona centro de la ciudad de Río Bravo, se observa que el criterio de Xia y Milanesi son más conservadores al identificar calles en las que existe un peligro medio y alto de arrastre, las cuales no son identificadas en el criterio de DEFRA, por ejemplo: las calles Álamo y Vicente Guerrero, ver rectángulos rojos. Según lo dicho se aprecia que este último identifica una mayor área con un peligro medio (área en color naranja) en comparación a los criterios de Xia y Milanesi, situándolo como un criterio conservador; sin embargo, existen áreas en las que los criterios de Xia y Milanesi identifican un nivel de peligro de arrastre alto, las cuales son subestimadas por el criterio de DEFRA, por lo que este criterio presenta una clara desventaja frente a los otros dos, destacándose la importancia de utilizar criterios basados en un análisis teórico-conceptual y calibrado, ver elipse azul.

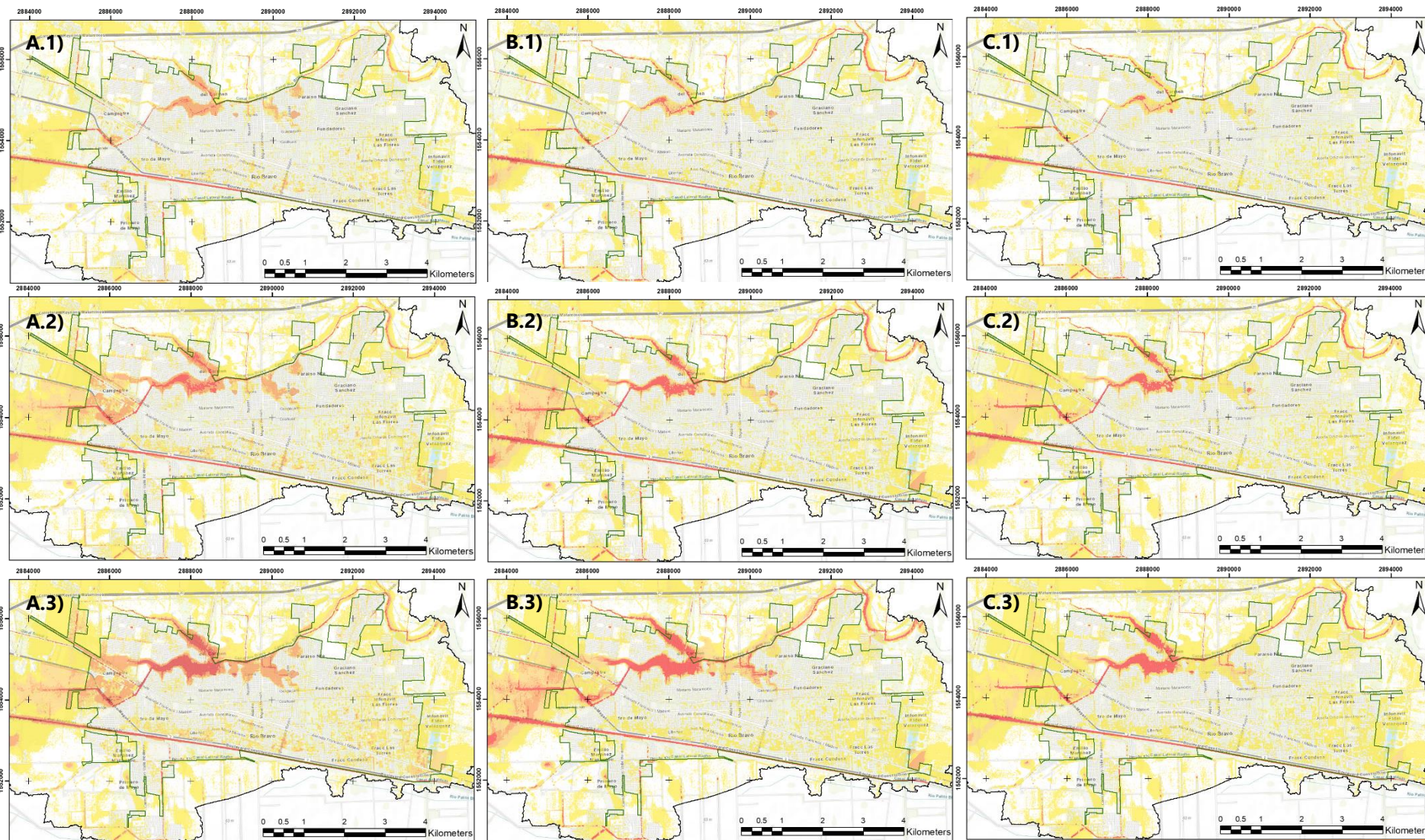


Figura 5-7. Mapas de peligro de arrastre de niños en la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas. Los mapas de la columna (A) corresponden al criterio de DEFRA, (B) al criterio de Xia, y (C) al criterio de Milanesi. Por su parte los mapas de la primera fila (1), segunda fila (2), y tercera fila (3), corresponden a los resultados de la simulación de un evento de inundación con un periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, respectivamente.

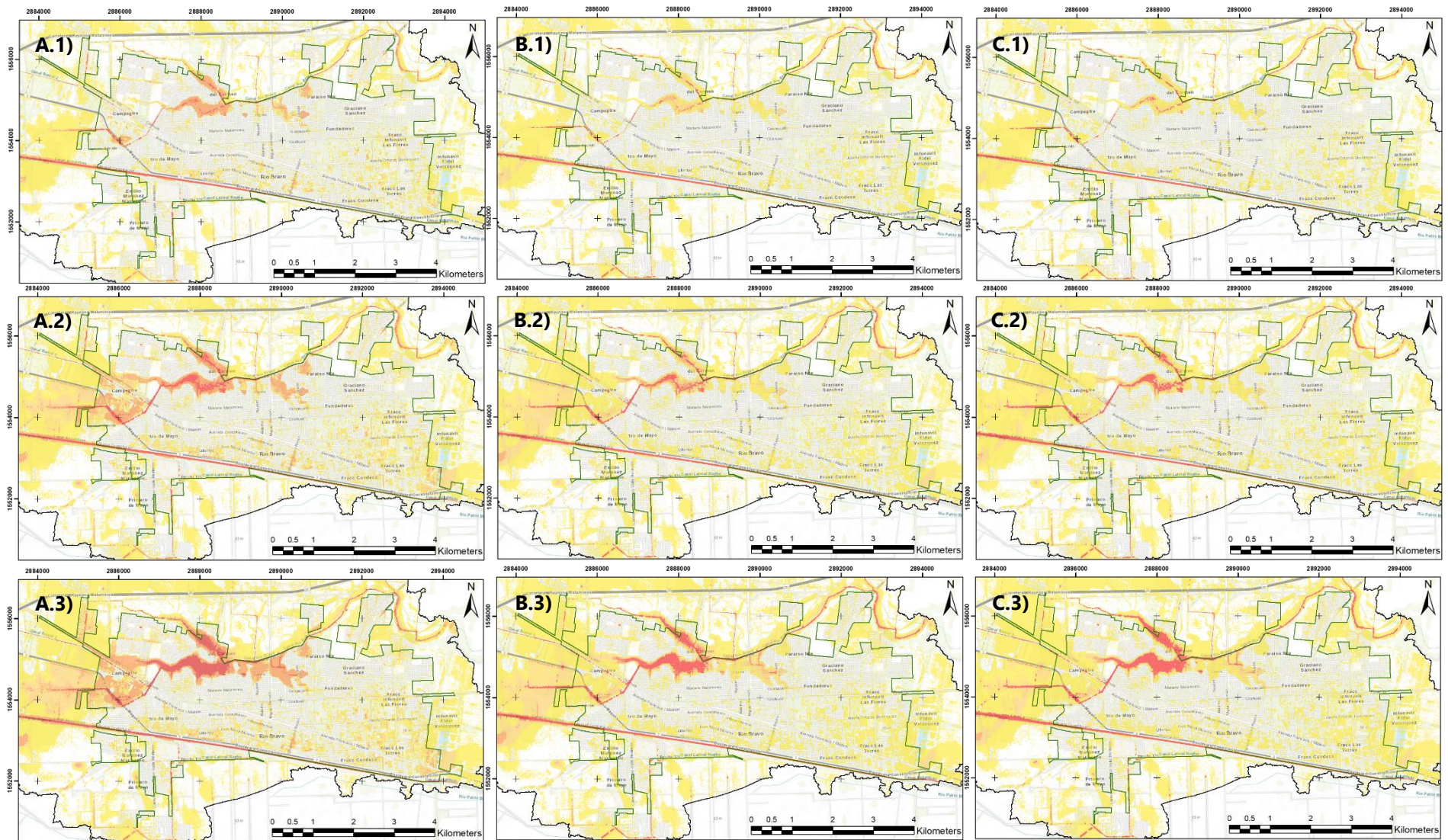


Figura 5-8. Mapas de peligro de arrastre de adultos en la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas. Los mapas de la columna (A) corresponden al criterio de DEFRA, (B) al criterio de Xia, y (C) al criterio de Milanesi. Por su parte los mapas de la primera fila (1), segunda fila (2), y tercera fila (3), corresponden a los resultados de la simulación de un evento de inundación con un periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, respectivamente.

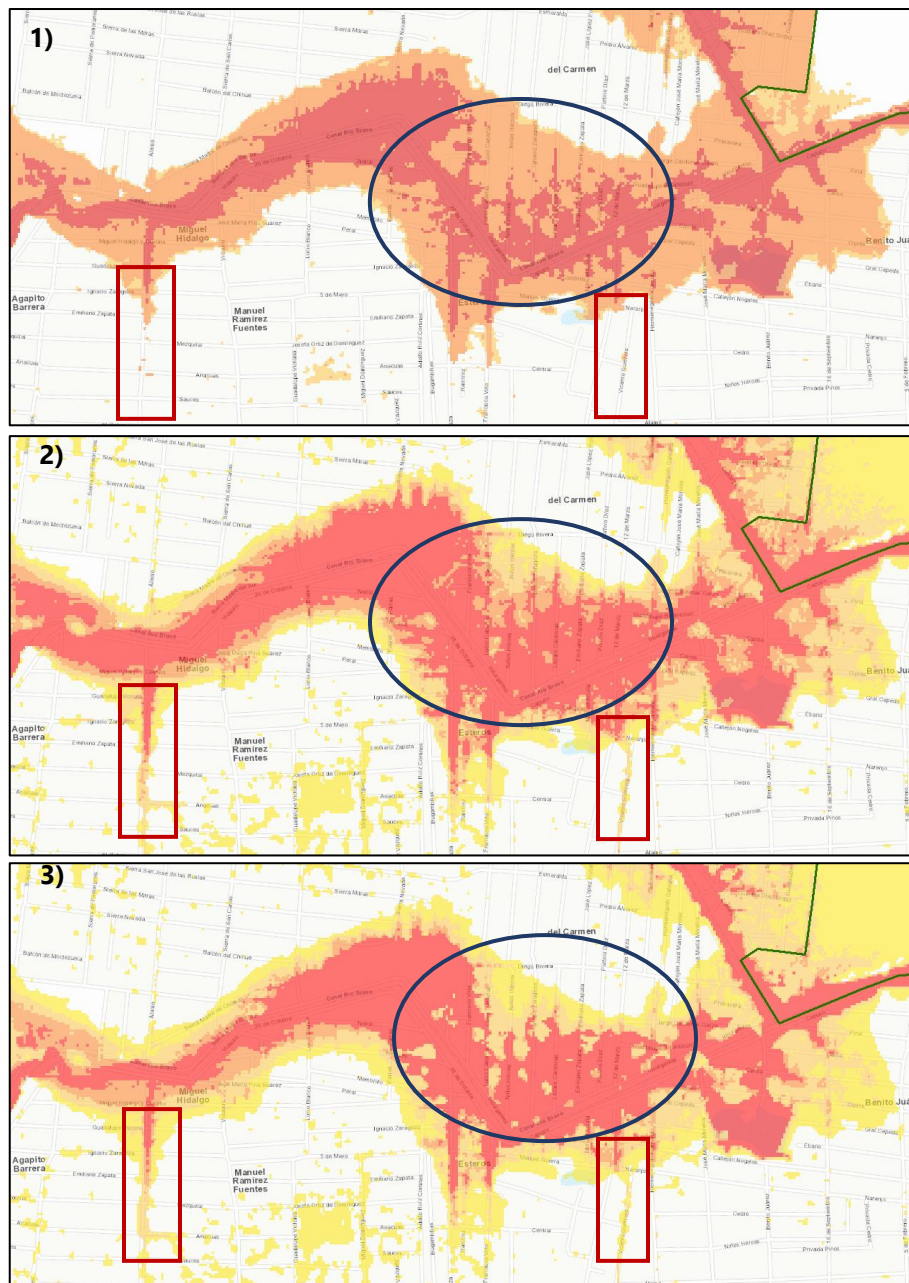


Figura 5-9. Comparación de los mapas de peligro de arrastre de infantes para un evento de inundación de 5 años de periodo de retorno en la zona urbana de Río Bravo: 1) Criterio de DEFRA, 2) Criterio de Xia y 3) Criterio de Milanesi.

## 5.2.2 Ciudad de León, Guanajuato

De forma similar, las figuras 5-10 y 5-11 presentan los resultados de los criterios de arrastre de personas por inundaciones en la ciudad de León, Guanajuato. La primera de ellas considerando como modelos humanos: un infante con características físicas iguales a las consideradas en la ciudad de Río Bravo y un adulto con una talla de 1.66 m y 68.15 kg de peso para los tres criterios evaluados en este trabajo de investigación, respectivamente.

Nuevamente, en la comparación de los resultados obtenidos para niños y adultos se observa una gran diferencia, que se debe a la identificación de más sitios en la ciudad con un nivel de peligro alto en todos los periodos de retorno analizados, y de manera general, de un nivel de peligro igual o mayor en niños que para el análisis realizado en adultos. Por lo que se hace énfasis en la preferencia de la ejecución y presentación de los resultados del análisis en niños.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, tanto en niños y adultos, se observa que los mayores niveles de peligro siempre se presentan en las inmediaciones al río de los Gómez y sus afluentes, así como los escurrimientos superficiales ocasionados por el derrame de la presa "El Palote", ocasionando que toda la parte central de la ciudad sea considerada como peligrosa para el tránsito de peatones durante una avenida proveniente de la Sierra de Guanajuato o evento de precipitación extrema, dado que se presentaron tirantes máximos de 3.64 m y velocidades de hasta 3.62 m/s para un evento de incluso 2 años de periodo de retorno. Como se observa en las Figuras 5-10 y 5-11, desde un evento de diseño con periodo de retorno de 2 años se identifica un nivel de peligro alto de arrastre tanto para niños y adultos en todos los criterios, el cual se localiza en las calles cercanas al cauce principal del río de los Gómez en la parte central de zona urbana, el cual se ve intensificado de manera significativa a medida que aumenta el periodo de retorno analizado. Por otra parte, destaca la zona afectada por el derrame de la presa "El Palote", que incluye a las colonias: Los Paraísos, Industrial, Obrera, Bellavista y particularmente las inmediaciones de la UMAE No. 1 del IMSS siendo un edificio esencial en caso de una emergencia.

En la comparación visual de los resultados obtenidos en la ciudad de León, tras la aplicación de los criterios de arrastre de personas, se observa que el criterio de Xia es el más conservador al presentar una mancha más grande correspondiente al nivel más alto de peligro de arrastre de niños como de adultos para todos los periodos de retorno considerados. En contraste, el criterio de DEFRA resultó ser para este sitio el más laxo para establecer niveles de peligro de arrastre altos dejando en una condición intermedia al criterio de Milanesi, sin embargo, bastante similar a los resultados obtenidos con el criterio de Xia con pequeñas diferencias.

Evaluación de los criterios de arrastre de personas por inundaciones en zonas urbanas  
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

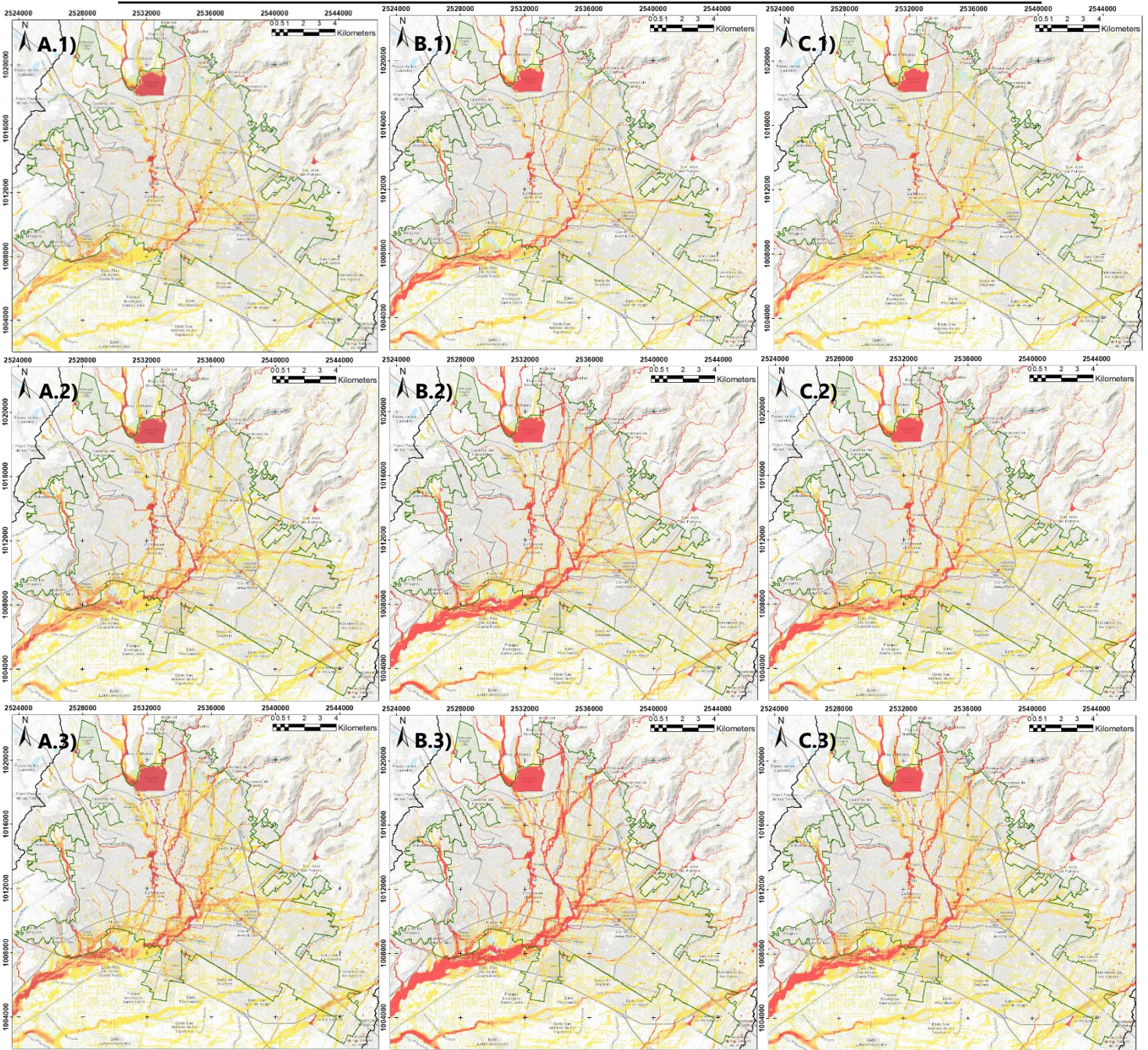


Figura 5-10. Mapas de peligro de arrastre de niños en la ciudad de León Guanajuato. Los mapas de la columna (A) corresponden al criterio de DEFRA, (B) al criterio de Xia, y (C) al criterio de Milanesi. Por su parte los mapas de la primera fila (1), segunda fila (2), y tercera fila (3), corresponden a los resultados de la simulación de un evento de inundación con un periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, respectivamente.

Evaluación de los criterios de arrastre de personas por inundaciones en zonas urbanas  
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

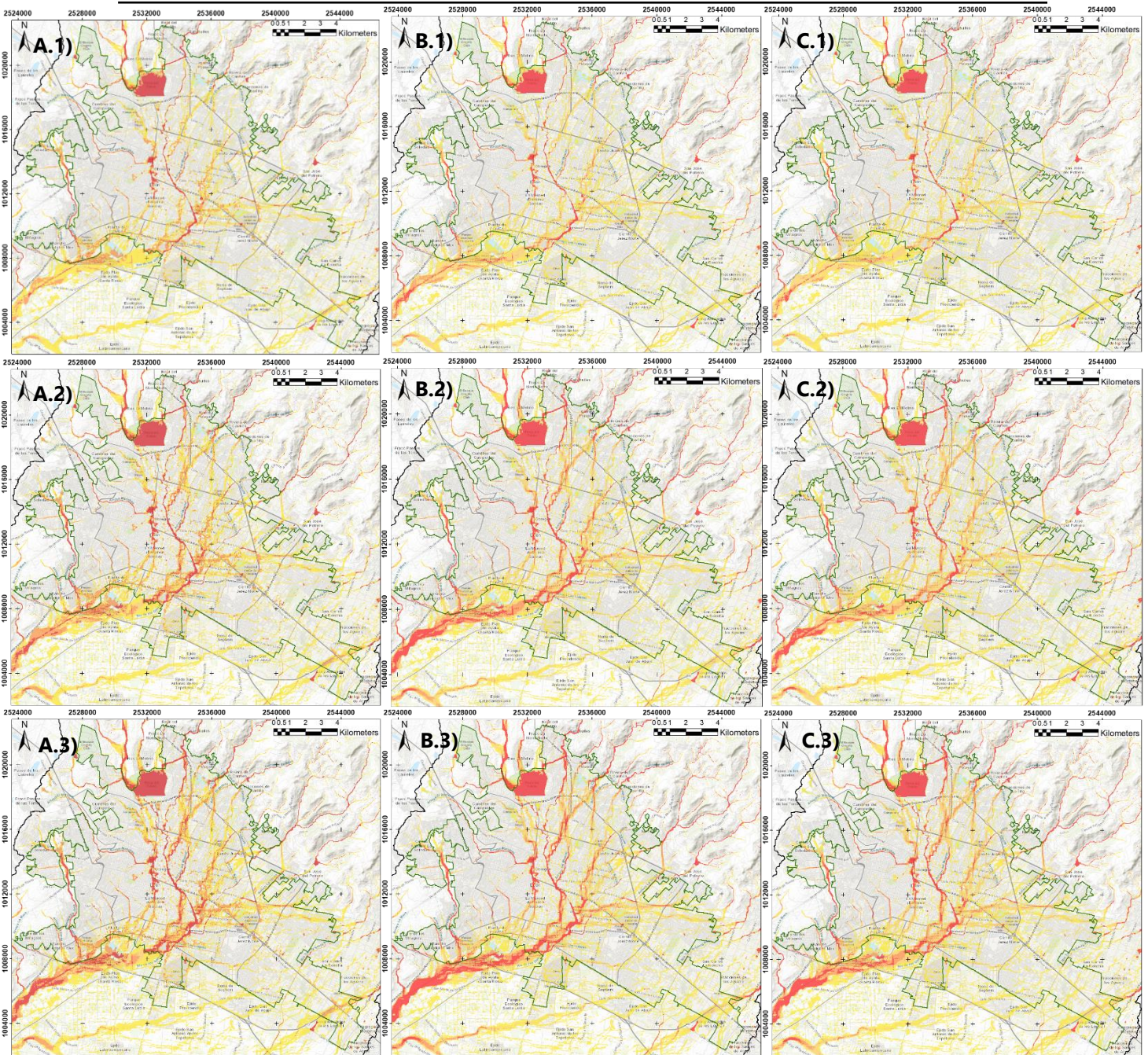


Figura 5-11. Mapas de peligro de arrastre de adultos en la ciudad de León, Guanajuato. Los mapas de la columna (A) corresponden al criterio de DEFRA, (B) al criterio de Xia, y (C) al criterio de Milanesi. Por su parte los mapas de la primera fila (1), segunda fila (2), y tercera fila (3), corresponden a los resultados de la simulación de un evento de inundación con un periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, respectivamente.

Adicionalmente, la Figura 5-12 muestra el acercamiento a los mapas de peligro de arrastre de personas, considerando las características de infantes de 10 años, obtenidos por los tres criterios implementados y al considerar un evento de inundación de 5 años de

periodo de retorno en la zona centro de la ciudad de León, en similitud a los resultados obtenidos en la ciudad de Río bravo, los criterios de Milanesi y Xia son los más conservadores al identificar zonas en las que se presenta un nivel de peligro medio y alto de arrastre, las cuales no son identificadas en el criterio de DEFRA, ver rectángulos rojos. Adicionalmente, las elipses azules muestran zonas en las que el criterio de Milanesi y principalmente el de DEFRA subestiman el nivel de peligro de arrastre en su comparación con el criterio de Xia. De acuerdo con lo antes mencionado, y para fines del caso de estudio analizado el criterio de Xia se posiciona como el más conservador al identificar un mayor número de zonas en un nivel de peligro de arrastre alto en su comparación con los otros dos criterios.

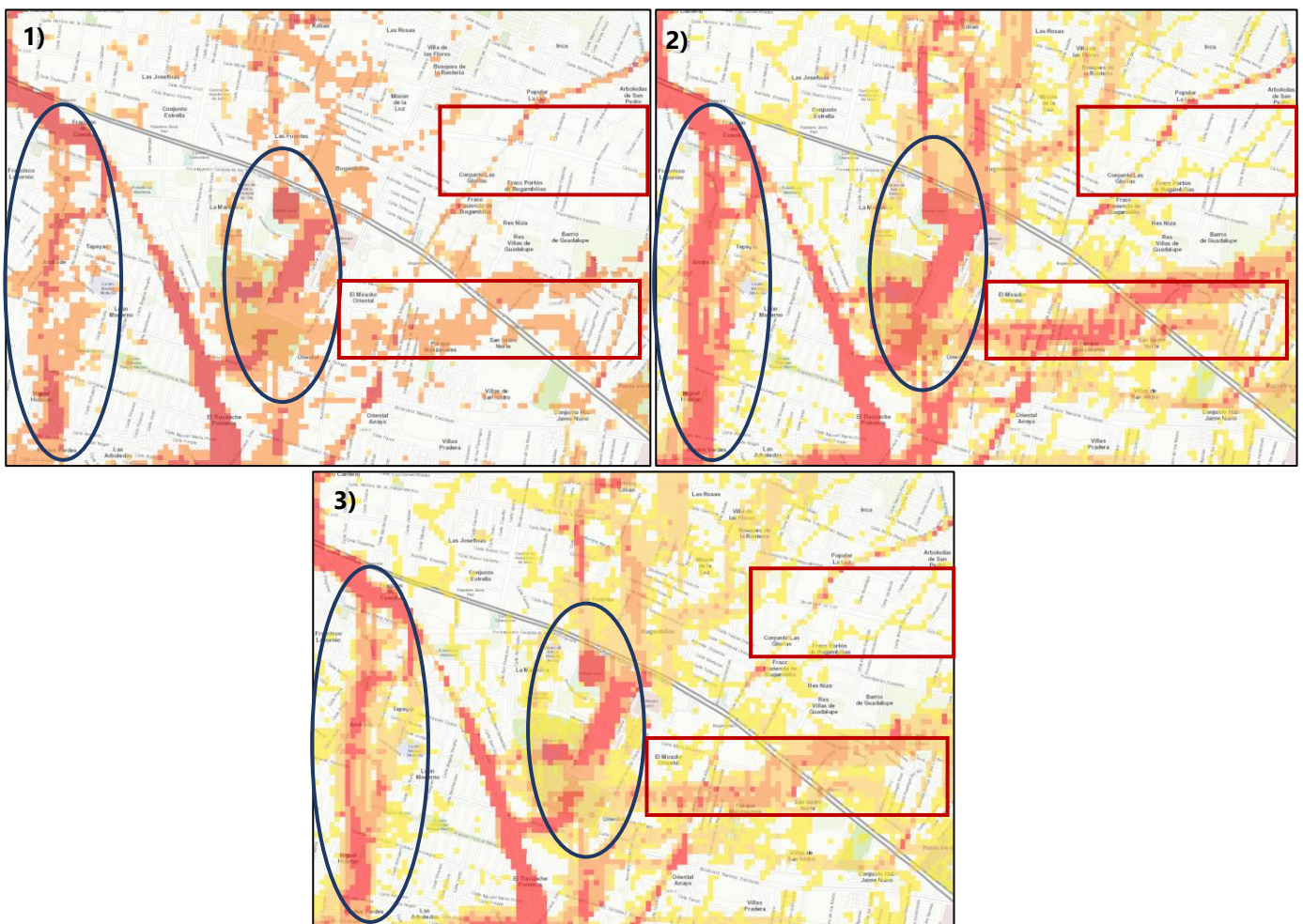


Figura 5-12. Comparación de los mapas de peligro de arrastre de infantes para un evento de inundación de 5 años de periodo de retorno en la zona urbana de León: 1) Criterio de DEFRA, 2) Criterio de Xia y 3) Criterio de Milanesi.



### 5.3 Comparación numérica de los resultados

Con la finalidad de tener una mayor certidumbre en la comparación de los resultados obtenidos, la cual no se basará únicamente en la inspección visual de los resultados, se hizo uso de las herramientas de geoprocésamiento de *GRASS GIS* para obtener el área correspondiente a cada uno de los niveles de peligro que fueron identificados por cada uno de los criterios, periodos de retorno y modelos humanos considerados en este trabajo de investigación.

La Figura 5-13 muestra la comparación de las áreas correspondientes a cada nivel de peligro identificado en los mapas resultantes de la implementación de los criterios de arrastre de personas por inundaciones en la ciudad de Río Bravo para adultos y niños. Se confirma que el área identificada en la mayoría de los niveles de peligro es mayor para los casos en los que se consideró un niño como modelo humano con excepción del nivel muy bajo, lo cual puede deberse a la capacidad de resistencia al deslizamiento o derribe de una persona adulta ante el flujo del agua en comparación a un niño. Además, puede notarse que el criterio de Xia tiene un comportamiento similar al criterio de Milanesi, esto debido a que en la zona de estudio los efectos de la pendiente local no representan un factor determinante que provoque diferencias significativas, sin embargo, el primero es aún más conservador al determinar una mayor área en los diferentes niveles de peligro de arrastre de personas en la zona urbana. Por otra parte, para determinar un nivel de peligro muy bajo el criterio de DEFRA es el más conservador en comparación a los demás, situación que se invierte cuando se determinan niveles de peligro más altos, lo cual indica que este criterio tiende a subestimar el grado de peligro de arrastre de una persona que se somete al flujo del agua.

Teniendo en cuenta la Figura 5-14, donde se muestran los resultados de la comparación de la extensión superficial identificada para cada nivel de peligro de arrastre de personas en la ciudad de León, se puede concluir nuevamente que la decisión de utilizar de niños como modelos humanos en la ejecución de los criterios mostrados en este trabajo es más conservadora que utilizar las medidas de adultos, dado que en casi todos los niveles de peligro con excepción del nivel muy bajo y bajo las zona identificadas como peligrosas son mayores en comparación. Asimismo, nuevamente el criterio de Milanesi presenta un comportamiento muy similar al de Xia, siendo este último el más conservador de todos al determinar una mayor extensión dentro de la mayoría de los niveles de peligro considerados con excepción de los niveles de peligro bajo, donde para los adultos fue el criterio de Milanesi; y en el muy bajo, donde destacó el Criterio de DEFRA.

A diferencia de la ciudad de Río Bravo en León la presencia de pendientes más pronunciadas en su topografía provocó que tanto para adultos y niños fueran determinadas más zonas con un nivel de peligro bajo o muy bajo con respecto de las que se identificaron con el criterio de Xia. Por otra parte, el criterio de DEFRA de nuevo demuestra subestimar la identificación de zonas con un nivel de peligro muy alto, lo cual puede repercutir en la seguridad de las personas si se implementa.

Finalmente, cabe hacer mención de algunos comentarios generales en relación con los resultados obtenidos tras la ejecución de los criterios de arrastre de personas por inundaciones considerados en este trabajo:

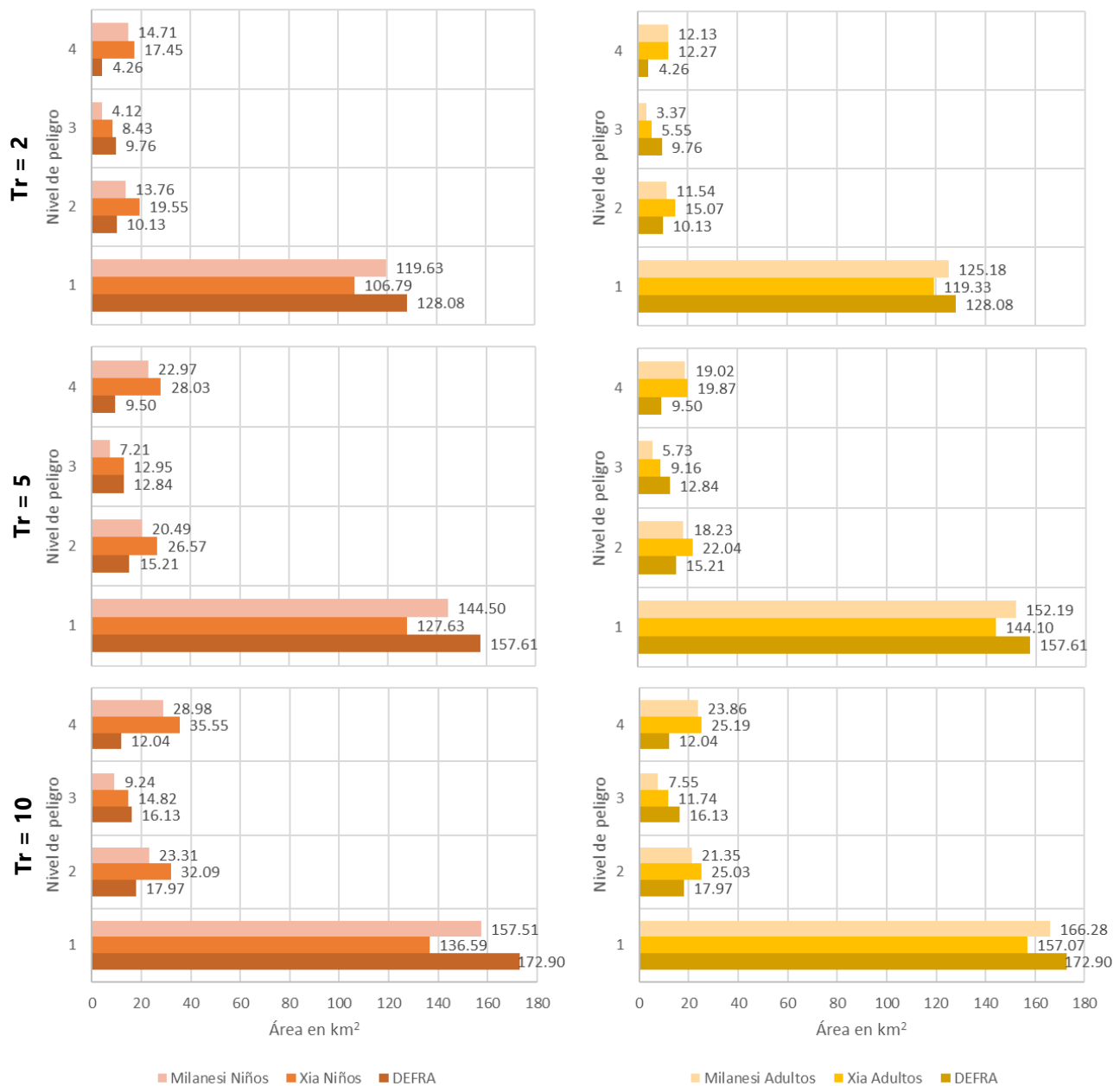


Figura 5-13. Comparación de las áreas correspondientes a los diferentes niveles de peligro identificados por cada criterio, periodo de retorno y modelos humanos considerados en el análisis de la ciudad de Río Bravo, Tamaulipas.

Nota: El nivel de peligro 1, 2 3 y 4 hace referencia a un peligro muy bajo, bajo, medio y alto, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

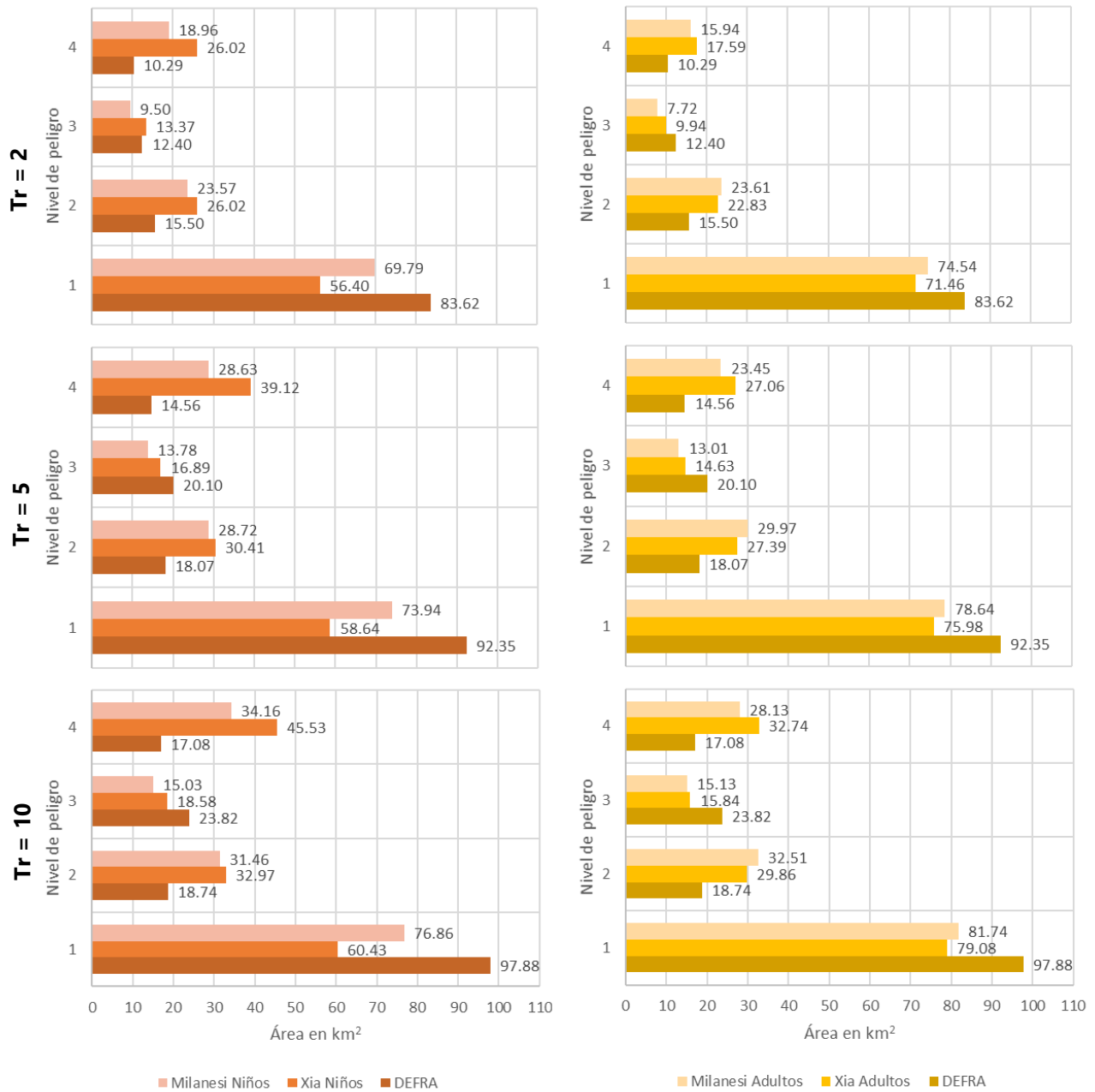


Figura 5-14. Comparación de las áreas correspondientes a los diferentes niveles de peligro identificados por cada criterio, periodo de retorno y modelos humanos considerados en el análisis de la ciudad de León, Guanajuato.

Nota: El nivel de peligro 1, 2, 3 y 4 hace referencia a un peligro muy bajo, bajo, medio y alto, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

- Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación demostraron la supremacía de los criterios de base teórica y experimentalmente calibrados (criterios de Xia y Milanesi) en su comparación con los obtenidos con el criterio de base empírica probado (criterio de DEFRA), dado que estos consideran todas las fuerzas físicas que intervienen en la estabilidad de una persona expuesta a una corriente de agua, con lo cual quedo demostrado la importancia de la interpretación física y de la representación realista de dichos procesos.
- El criterio de DEFRA es conveniente para realizar una revisión rápida de los sitios en peligro de arrastre de personas por inundaciones en zonas urbanas inundables, sin embargo, como se muestra en los resultados obtenidos, no es el indicado para definir correctamente un nivel de peligro alto en comparación a los otros dos métodos ya que tiende a subestimarlos y clasificarlos en un nivel de peligro menor al que realmente le corresponde. Lo anterior, puede deberse a que es un criterio empírico construido a través del promedio de numerosas pruebas experimentales, donde no fue considerada la capacidad de los sujetos de prueba para aprender a maniobrar en el flujo de agua con el tiempo, lo cual no ocurre en una situación de peligro real donde la población no tiene la experiencia necesaria para mantenerse en pie cuando se expone a una corriente. Por otra parte, la expresión empírica del criterio de DEFRA no tiene límite superior de profundidad, por tanto, un flujo con un tirante grande y una baja velocidad no necesariamente se considera peligroso, lo cual queda demostrado con los resultados obtenidos.
- Los criterios de base teórica y experimentalmente calibrados (criterios de Xia y Milanesi) resultaron ser los más adecuados para determinar las zonas más peligrosas dentro de una ciudad en la que se presente un evento de inundación, ya que ambos pueden ser ajustados a un tipo de persona en particular o a una subpoblación específica como hombres, mujeres o niños por medio de sus características físicas, asimismo son más sensibles a cambios en las propiedades del flujo (profundidad y velocidad) lo que generalmente ocurre durante inundaciones repentinas (flash floods). A pesar de que ambos son similares y que los resultados obtenidos en este trabajo también resultaron serlo, el criterio de Milanesi se postula como el más preciso al no depender de numerosos de coeficientes en su calibración, al incorporar los efectos de la pendiente local, así como por la definición y aplicación de una profundidad de ahogamiento. Sin embargo, cabe mencionar que esto ocasionó que no fuese fácil de ejecutar y programar en comparación al criterio de Xia y que este último resultó ser más conservador a la hora de determinar el peligro de arrastre de personas de acuerdo con los resultados obtenidos.

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**

Como quedó descrito en los capítulos iniciales de este trabajo de investigación, en los últimos años se ha presentado un aumento en la frecuencia, intensidad de las inundaciones, debido a la ocurrencia de lluvias intensas y la modificación de los patrones climatológicos a consecuencia del cambio climático. Las inundaciones representan la mitad de la frecuencia y de las afectaciones de entre los desastres naturales a nivel mundial, así como de alrededor de un 12% de las muertes ocasionadas por todos ellos según los datos reportados en la base de datos EM-DAT en (OFDA/CREED, 2016). En adición a lo anterior, por el aumento del crecimiento poblacional urbano y la competencia por la ocupación del suelo en grandes ciudades, la posibilidad de que ocurran daños y víctimas mortales provocados por este tipo de fenómenos será cada vez mayor.

En nuestro país existen otros aspectos que agravan esta situación, como la violación de la Ley, motivo de la invasión de zonas federales de cauces, cuerpos de agua y llanuras de inundación con asentamientos humanos irregulares, la deforestación ilegal de los bosques y selvas de nuestro territorio, así como la falta de planes de prevención y mitigación repercuten en la generación de condiciones de vulnerabilidad en múltiples poblaciones y en las medidas que adopta una ciudad ante una situación de emergencia de este tipo, teniendo como consecuencia las afectaciones que experimenta año con año las zonas urbanas de nuestro país durante la temporada de lluvias.

Actualmente, la problemática asociada al peligro de arrastre de personas por inundaciones en nuestro país, se debe a la desactualización de las metodologías utilizadas

---

---

en su evaluación, la inadecuada planeación en el ordenamiento territorial y de las estrategias implementadas para su reducción, la deficiente aplicación de la normatividad municipal, estatal y federal, la escasa operación de sistemas de alerta temprana, la falta de regulaciones en materia de autorizaciones para los asentamientos humanos, y la inexistente cultura de prevención y mitigación que, sumando a la falta de comunicación entre los investigadores en materia, los responsables de la seguridad ciudadana, prevención de desastres y la población en general, así como la ausencia de infraestructura de protección y de sistemas de prevención, agravan la situación.

Por otra parte, los mapas de peligro por inundación son herramientas fundamentales para la mitigación de riesgos, sin embargo, en las últimas décadas su construcción se basa en las afectaciones económicas que un fenómeno extremo de esta naturaleza, dejando de lado la valoración del peligro que corre una persona expuesta a sus efectos. Siendo que la preservación de la vida humana es el objetivo fundamental de cualquier método o criterio de análisis en la gestión integrada del riesgo por inundaciones.

Según lo expuesto anteriormente, existe la necesidad de mejorar nuestro conocimiento sobre este tipo de fenómenos, sus procesos y las metodologías de evaluación del peligro. En ese aspecto, entre las acciones que pueden conducir a la solución de los problemas antes planteados se encuentran:

- La organización de las instancias federales, estatales y municipales involucradas en el ordenamiento ecológico, territorial, estatal y municipal.
- El inicio de tareas de reforestación en las zonas altas de las cuencas, lo que permitirá una disminución en el gasto pico de los hidrogramas desarrollados en ellos.
- El claro establecimiento, delimitación y clasificación de regiones dentro de las cuencas hidrográficas del país, en las que se pueda identificar con precisión las áreas de peligro, principalmente en zonas urbanas del país (Atlas de Riesgos por inundaciones nacional). Así como el desarrollo y construcción de infraestructura de prevención y mitigación en zonas inundables.
- Una estrecha comunicación y cooperación la investigación, las autoridades de gestión de riesgos y el público en general en el proceso de prevención y mitigación de riesgos asociados a las inundaciones.

Como un primer esfuerzo por revertir esta situación, el presente trabajo de investigación sentó las bases para la implementación de tres criterios que permiten el mapeo y determinación del peligro de arrastre de personas por inundaciones en zonas

urbanas a un nivel de calle, de los cuales uno tiene base empírica o cuasi - teórica derivado de pruebas experimentales realizadas en sujetos de prueba reales (criterio de DEFRA); y dos basados en un análisis teórico – conceptual, que representan de manera realista los procesos que intervienen en la estabilidad del cuerpo humano en el agua, calibrados con pruebas experimentales realizadas en modelos humanos a escala y que no solo toman en cuenta las características hidrodinámicas del flujo del agua, sino que además son específicas en su ajuste a las características físicas del cuerpo humano de una región y al considerar diferentes grupos poblacionales: adultos y niños (criterios de Xia y Milanesi). Esto con el fin de obtener información que ayude en la implementación de acciones de prevención y mitigación del número de víctimas mortales ocasionadas por estos eventos, cumpliendo con el objetivo planteado de esta tesis.

De los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se pueden llegar a las siguientes conclusiones generales:

- En esta tesis se presentaron y evaluaron los resultados de tres criterios para la determinación del peligro de arrastre de personas por inundaciones en zonas urbanas, haciendo uso de nuevos métodos y herramientas numéricas en su ejecución.
- Los estudios destinados a determinar el peligro de arrastre de personas por inundaciones deberán optar por realizar sus análisis mediante la implementación de criterios basados en las fuerzas que rigen la estabilidad del cuerpo humano en una corriente de agua, en lugar de aquellos basados en estudios empíricos, dado que el criterio de base empírica evaluado en esta tesis demostró subestimar los niveles de peligro altos en comparación a los demás, para todos los periodos de retorno y los dos sitios de estudio analizados.
- A pesar de que el criterio de Xia y el de Milanesi son similares, en la comparación de sus resultados quedo demostrado que el criterio de Xia es el más conservador de ambos, debido a que en la mayoría de los resultados presentados este criterio identifico una mayor cantidad de sitios con un nivel alto de peligro de arrastre de personas. Sin embargo, no debe olvidarse que a pesar de ser un criterio práctico de ejecutar gracias a las simplificaciones que presenta, no toma en cuenta los efectos de la pendiente local o de la definición de un umbral de profundidad de ahogamiento como el criterio de Milanesi.
- Se concluye que ninguno de los criterios evaluados es malo, simplemente deben ser utilizados con cautela, ya que su implementación dependerá de diversos factores como: las características topográficas de la zona, el tiempo requerido para obtener información, las características físicas de la población e hidrodinámicas

---

del flujo, etc. para poder elegir el criterio que mejor se ajuste, por ejemplo: el criterio de DEFRA puede ser utilizado cuando el tiempo requerido para obtener resultados sea escaso, dado que se requiera de un dictamen por la ocurrencia de un evento hidrometeorológico extremo, ya que es su principal ventaja; por su parte, el criterio de Xia debe implementarse cuando los efectos de la pendiente local no sean significativos en el sitio de estudio; y el criterio de Milanesi en el caso contrario.

- Las personas carecen de la capacidad de dimensionar los efectos de la fuerza de empuje del agua en una corriente, en especial cuando esta se presenta en las calles de una ciudad. Por ello, el contar con este tipo de información de manera clara, oportuna y expedita puede hacer la diferencia en el aumento de la conciencia y la preparación, que son elementos fundamentales para hacer efectiva cualquier medida de protección no estructural contra inundaciones y en consecuencia lograr la disminución del número de víctimas asociado a este tipo de fenómenos. Por tanto, queda demostrada la importancia de los resultados obtenidos en esta tesis.
- Los criterios evaluados en este trabajo complementan la información generada y recopilada a la fecha en el "Atlas Nacional de Riesgos" del CENAPRED con datos georreferenciados enfocados hacia la seguridad de las personas, los cuales pueden ser utilizados dentro de los planes de protección civil para la definición de los planes de gestión urbana de las ciudades o en la implementación de acciones de prevención que no requieran de una inversión económica significativa, pero que impacten en la disminución del número de víctimas a través de la difusión de la información.
- Dadas las conclusiones anteriores, se destaca la importancia del fortalecimiento de la comunicación entre investigadores en materia, los encargados de protección civil en las diferentes ciudades y la población en general, ya que sin estos vínculos ninguno de los esfuerzos encaminados a la mitigación de las consecuencias de las inundaciones tendría sentido.

Cabe destacar que en esta tesis se mostró la eficacia de un nuevo modelo numérico bidimensional para la simulación de inundaciones, denominado Itzi (Laurent Guillaume Courty et al., 2017), el cual fue desarrollado recientemente por el M. en I. Laurent Guillaume Courty en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Itzi tiene su base en los últimos avances hidro-informáticos para la modelización precisa de inundaciones urbanas. Esta característica destaca con el fin de determinar el peligro de arrastre de personas por inundaciones, ya que el análisis no debe basarse exclusivamente en la selección de un método adecuado, sino que debe tener en cuenta la complejidad del área de modelación y de la naturaleza del flujo que se presente (Kvočka et al., 2016).



A pesar de que las inundaciones extremas no se pueden prevenir en su totalidad, se puede hacer más en el futuro para limitar las consecuencias de las inundaciones, en este sentido se identifican dos líneas de trabajo a seguir en relación con el tema de esta tesis: el primero de ellos tiene que ver con un factor clave que tiene más importancia que la capacidad física de las personas para mantener su estabilidad en el agua, es decir, la inclusión de los factores psicológicos o demográficos que intervienen en la respuesta de un individuo que se encuentra expuesto a los efectos de una corriente, ya que estos pueden tener un impacto significativo en el tiempo de respuesta y por tanto, en su capacidad para reaccionar adecuadamente al peligro ocasionado por una inundación. El segundo tiene que ver con la ejecución y puesta en marcha de un sistema de monitoreo que permita realizar acciones de alerta temprana a la población, la planeación y ejecución de operaciones de rescate más eficientes en una ciudad, a partir del aprovechamiento conjunto de los avances tecnológicos y de investigación en materia de gestión de riesgos por inundaciones como son: los sistemas de medición de precipitación en tiempo real, las herramientas numéricas de modelación hidrodinámica como itzi y los criterios teórico – conceptuales mostrados en el desarrollo de esta tesis.

---

## REFERENCIAS

- Abt, S. R., Wittier, R. J., Taylor, A., & Love, D. J. (1989). Human stability in a high flood hazard zone. *JAWRA, Journal of the American Water Resources Association*, 25(4), 881–890. <http://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1989.tb05404.x>
- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 7(5), 33–35. <http://doi.org/ISSN: 01878336>
- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., & Forzieri, G. (2015). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2247–2260. <http://doi.org/10.5194/hess-19-2247-2015>
- Alonso, L. M. (2007). Desarrollo Sustentable. Retrieved June 5, 2017, from <http://desarrolloosustentable.blogspot.mx/2012/02/inundacion-en-tabascomexico-2007.html>
- Aparicio Mijares, F. J. (2004). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Aragón-Durand, F. (2014). *Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina*. Lima: Soluciones Prácticas. Perú.
- Arganis Juárez, M. L., Dominguez Mora, R., Jiménez Espinosa, M., & Guichard Romero, D. (2010). Eventos Extremos. In B. Jiménez Cisneros, M. L. Torregrosa y Armenta, & L. Aboites Aguilar (Eds.), *El agua en México: Cauces y encauces* (Primera ed, pp. 563–594). México: Academia Mexicana de Ciencias, Comisión Nacional del Agua. Retrieved from [www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf)
- Ayuntamiento-León. (2009). *Plan de Ordenamiento Territorial y Ecológico (POTE) para el Municipio de León*. León, Guanajuato, México. Retrieved from [http://seieg.iplaneg.net/seieg/doc/POTE\\_LEON.pdf](http://seieg.iplaneg.net/seieg/doc/POTE_LEON.pdf)
- Ayuntamiento-León. (2014). *Plan Municipal de Desarrollo León hacia el futuro. Visión 2040*. León, Guanajuato, México. Retrieved from <http://implan.gob.mx/1/admin/PMD2040.pdf>
- Ayuntamiento-RíoBravo. (2016). *Plan Municipal de Desarrollo 2016-2018*. Tamaulipas, México. Retrieved from <http://www.riobravo.gob.mx/wp-content/uploads/2017/01/Plan-MunicipalRB.pdf>

- 
- Baeza, R. C. (2007). Estimación Regional de Factores de Convectividad para el Cálculo de las Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Bartholomé, E., & Belward, A. S. (2005). GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9), 1959–1977.
- Blevins, R. D. (1984). *Applied fluid dynamics handbook*. New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1984, 568 P.
- Bruwier, M., Ercicum, S., Piroton, M., Archambeau, P., & Dewals, B. J. (2015). Assessing the operation rules of a reservoir system based on a detailed modelling chain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 365–379. <http://doi.org/10.5194/nhess-15-365-2015>
- CEMDA, FEA, & PCM. (2006). *El agua en México: lo que todas y todos debemos saber* (Primera ed). México: CEMDA, FEA, PCM/ Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C., Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C., Presencia Ciudadana Mexicana, A.C. Retrieved from [https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2011/12/agua-mexico\\_001.pdf](https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2011/12/agua-mexico_001.pdf)
- CENAPRED. (2015). *Desastres en México. Impacto social y económico*. México. Retrieved from <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/318-INFOGRAFADESASTRESENMEXICO-IMPACTOSOCIALYECONMICO.PDF>
- Chen, C. L. (1983). Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (12), 1603–1621.
- Cherem, E. M. (2012). ¿Cuánto mide México? El tamaño sí importa. México. Retrieved from [http://www.canaive.org.mx/detalleNoticias.php?id\\_nota=832](http://www.canaive.org.mx/detalleNoticias.php?id_nota=832)
- Chow, V. Te. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. (M. E. Suárez R., Ed.). Colombia: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- CONABIO. (2006). *Capital Natural y Bienestar Social*. México. Retrieved from [http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatBienestar/capital\\_natural\\_2EP.pdf](http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatBienestar/capital_natural_2EP.pdf)
- CONAGUA. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. CONAGUA/SEMARNAT: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://doi.org/978-968-817-880-5>
- CONAGUA. (2012). *Programa Hídrico Regional Vision 2030, Región Hidrológico - Administrativa VI Río Bravo*. México. Retrieved from <http://www.pronacose.gob.mx/pronacose14/contenido/documentos/VI PHOICRB.pdf>
- CONAGUA. (2013). *Programa Nacional de Prevención Contra Contingencias Hidráulicas (PRONACCH)*.
-

- 
- CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Bajo Río Bravo (2801), Estado Tamaulipas. México. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104419/DR\\_2801.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104419/DR_2801.pdf)
- CONAGUA. (2016). Atlas de agua en México 2016. México. Retrieved from [http://201.116.60.25/publicaciones/AAM\\_2016.pdf](http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf)
- CONAPO. (2017). Datos de Proyecciones de la población 2010-2050. Retrieved July 20, 2005, from [http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones\\_Datos](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones_Datos)
- Courty, L. G., & Pedrozo-Acuña, A. (2016a). A GRASS GIS module for 2D superficial flow simulations. In 12th International Conference on Hydroinformatics (p. 6). México, Cd.Mx. <http://doi.org/10.5281/zenodo.159617>
- Courty, L. G., & Pedrozo-Acuña, A. (2016b). Modelo Numérico para la simulación dinámica de inundaciones urbanas en SIG. In XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Lima, Perú. (p. 10). México, Cd.Mx. <http://doi.org/10.5281/zenodo.159619>
- Courty, L. G., Pedrozo-Acuña, A., & Bates, P. D. (2017). Itzi (version 17.1): An open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation. *Geoscientific Model Development*, 10(4), 1835–1847. <http://doi.org/10.5194/gmd-10-1835-2017>
- Courty, L. G., Rodríguez Rincón, J. P., Soriano Monzalvo, J. C., & Pedrozo-Acuña, A. (2018). An integrated approach to urban flood mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*.
- Cox, R. J., Shand, T. D., & Blacka, M. J. (2010). Australian Rainfall and Runoff revision project 10: appropriate safety criteria for people. *Water Research*, 978, 85825–89454.
- de Almeida, G. A. M., & Bates, P. (2013). Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling. *Water Resources Research*, 49(8), 4833–4844. <http://doi.org/10.1002/wrcr.20366>
- de Almeida, G. A. M., Bates, P., Freer, J. E., & Souvignet, M. (2012). Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling. *Water Resources Research*, 48(5). <http://doi.org/10.1029/2011WR011570>
- Desinventar.org. (2017). Sistema de inventario de efectos de desastres. Retrieved June 25, 2017, from <http://www.desinventar.org/es/database>
- Domínguez Mora, R., Carrisoza Elizondo, E., Fuentes Mariles, G. E., Galván Torres, A. E., Salas Salinas, M. A., Robles Montero, T., ... González Ortigoza, S. (2012). Mapas de precipitaciones para diferentes periodos de retorno y duraciones. XXII Congreso Nacional de Hidráulica, AMH/Asociación Mexicana de Hidráulica, 5. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/353028458/Mapas-de-Precipitacion-Para-Diferentes-Periodos-de-Retorno-y-Duracion>
-

- 
- Drillis, R., Contini, R., & Bluestein, M. (1966). Body segment parameters; A survey of measurement techniques. *Artificial Limbs*, 8, 44–66.
- Durán, G. (2017). Fuertes lluvias azotan a la Ciudad de México en los últimos días de mayo. Retrieved June 15, 2017, from <http://noticieros.televisa.com/historia/cdmx/2017-05-30/fuertes-lluvias-ciudad-mexico-cerrar-mayo/>
- Economía Hoy. (2016). Salida a autopista México- Puebla totalmente detenida por inundaciones. Retrieved June 15, 2017, from <http://www.economiahoy.mx/nacional-eAm-mx/noticias/7856946/09/16/Afecta-lluvia-a-14-demarcaciones-de-la-Ciudad-de-Mexico.html>
- EM-DAT. (2017). EM-DAT: The Emergency Events Database. Université catholique de Louvain (UCL) – CRED, D. Guha-Sapir. Brussels, Belgium. Retrieved from [www.emdat.be](http://www.emdat.be)
- Escuder Bueno, I., Morales Torres, A., Castillo Rodríguez, J. T., & Perales Momparler, S. (2010). *Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management (Primera)*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente.
- Espinosa Rodríguez, L. M., & Arroyo López, K. (2011). *Geomorfología en México. Una visión histórica, metodológica y aplicada: Modelos, fundamentos, historia, métodos, técnicas y aplicaciones*. Editorial Académica Española. Retrieved from [https://books.google.com.mx/books?id=\\_IGLMAEACAAJ](https://books.google.com.mx/books?id=_IGLMAEACAAJ)
- FEMA. (2009). *Risk Mapping, Assessment, and Planning (Risk MAP) Multi-Year Plan: Fiscal Years 2010-2014. Fiscal Year 2009 Report to Congress*. United States of America. Retrieved from <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=3587>
- Fernandez, R., & Sanahuja, H. (2012). *Linkages between population dynamics, urbanization processes and disaster risks: a regional vision of Latin America*. Panama.
- Ferradas, P. (2013). *Riesgos de desastres y desarrollo*. Perú: Soluciones Prácticas.
- Folch I. Guillen, R. (1993). *Biosfera (Vol. 5): Mediterráneas*. Barcelona: Enciclopedia Catalana.
- Foster, D. N., & Cox, R. J. (1973). *Stability of children on roads used as floodways*. Laboratory Technical Report (Vol. 73). Australia.
- Foudi, S., Osés-Eraso, N., & Tamayo, I. (2015). Integrated spatial flood risk assessment: The case of Zaragoza. *Land Use Policy*, 42, 278–292.
- García, E. (2008). *Características edofológicas, fisiográficas, climáticas e hidrográficas de México*. México. Retrieved from [http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/1-geografiademexico/manual\\_carac\\_ed\\_fis\\_vs\\_enero\\_29\\_2008.pdf](http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/1-geografiademexico/manual_carac_ed_fis_vs_enero_29_2008.pdf)
-

- 
- Gobierno del Estado de Tamaulipas. (2012). Atlas de riesgo de los municipios de Reynosa y Río Bravo del Estado de Tamaulipas. Tamaulipas, México. Retrieved from <http://proteccioncivil.tamaulipas.gob.mx/wp-content/uploads/2011/12/ATLAS-DE-RIESGO-MUNICIPIO-DE-REYNOSA-Y-RIO-BRAVO.pdf>
- Golding, B., Clark, P., & May, B. (2005). The Boscastle flood: Meteorological analysis of the conditions leading to flooding on 16 August 2004. *Weather*, 60(8), 230–235.
- Gong, P., Wang, J., Yu, L., Zhao, Y., Zhao, Y., Liang, L., ... Liu, S. (2013). Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7), 2607–2654.
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(01), 1–24.
- Guha-Sapir, D. (2015a). 2015 disasters in numbers. Brussels, Belgium.
- Guha-Sapir, D. (2015b). The Human cost of Natural Disasters 2015, A global perspective. (C. for R. on the E. of D. (CRED), Ed.). Brussels, Belgium: Center for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED).
- Haraguchi, M., & Lall, U. (2015). Flood risks and impacts: A case study of Thailand's floods in 2011 and research questions for supply chain decision making. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14(January 2012), 256–272. <http://doi.org/10.1016/j.ijdr.2014.09.005>
- Hengl, T., de Jesus, J. M., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Ribeiro, E., ... Walsh, M. G. (2014). SoilGrids1km—global soil information based on automated mapping. *PLoS One*, 9(8), e105992.
- Herrera Pérez, O. (2010). Visión histórica de Reynosa. Republicano Ayuntamiento de Reynosa, Instituto Reynosense para la Cultura y las Artes, Comisión Municipal Organizadora del Bicentenario de la Independencia Nacional y del Centenario de la Revolución Mexicana 2010.
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2001). Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes*, 15(5), 825–842. <http://doi.org/10.1002/hyp.188>
- I. Idike, F., L. Larson, C., C. Slack, D., & A. Young, R. (1980). Experimental Evaluation of Two Infiltration Models. *Transactions of the ASAE*, 23(6), 1428. <http://doi.org/https://doi.org/10.13031/2013.34793>
- INEGI. (2004). Guía para la Interpretación de cartografía Edafología. México. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EDAFI.pdf>
-

- 
- IPCC. (2014). Cambio Climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R. K. Pachauri y L. A. Meyer]. Ginebra, Suiza. Retrieved from [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf)
- Ishigaki, T., Baba, Y., Toda, K., & Inoue, K. (2005). Experimental study on evacuation from underground space in urban flood. In 31st IAHR Congress, Seoul (pp. 1116–1123). Seoul, Korea.
- Ishigaki, T., Onishi, Y., Asai, Y., Toda, K., & Shimada, H. (2008). Evacuation criteria during urban flooding in underground space. In 11th International Conference on Urban Drainage (pp. 1–7). Edinburgh, Scotland, U.K.
- Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for 21st Century. Nature (Vol. 8). Washington, DC: World Bank. <http://doi.org/10.1596/978-0-8213-8866-2>
- Jonkman, S. N. (2005). Global perspectives on loss of human life caused by floods. *Natural Hazards*, 34(2), 151–175.
- Jonkman, S. N., Bočkarjova, M., Kok, M., & Bernardini, P. (2008). Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands. *Ecological Economics*, 66(1), 77–90. <http://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.12.022>
- Jonkman, S. N., & Penning-Rowsell, E. (2008). Human instability in flood flows. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(5), 1208–1218. <http://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x>
- Karvonen, R. A., Hepojoki, H. K., Huhta, H. K., & Louhio, A. (2000). The Use Of Physical Models In Dam-Break Flood Analysis, Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis (RESCDAM). Final report of Helsinki University of Technology. Finnish Environment Institute. Melbourne, Australia.
- Kaźmierczak, A., & Cavan, G. (2011). Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 185–197.
- Keller, R. J., & Mitsch, B. (1993). Safety aspects of the design of roadways as floodways. Melbourne, Australia: Urban Water Research Association of Australia.
- König, A., Sægrov, S., & Schilling, W. (2002). Damage Assessment for Urban Flooding. 9th International Conference on Urban Drainage (9ICUD), (7465), 11.
- Kvočka, D., Falconer, R. A., & Bray, M. (2016). Flood hazard assessment for extreme flood events. *Natural Hazards*. <http://doi.org/10.1007/s11069-016-2501-z>
-

- 
- Lenderink, G., & Meijgaard, E. V. A. N. (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes, 511–514. <http://doi.org/10.1038/ngeo262>
- LGPC. (2017). Ley General de Protección Civil. México: Camara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Retrieved from [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPC\\_070417.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPC_070417.pdf)
- Lind, N., Hartford, D., & Assaf, H. (2004). Hydrodynamic models of human stability in a flood. *JAWRA, Journal of the American Water Resources Association.*, 40(1), 89–96. <http://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01012.x>
- Lindsay, F. E., Townshend, J. R. G., Jaja, J., Humphries, J., Plaisant, C., & Shneiderman, B. (1999). Developing the next generation of Earth Science data systems: the Global Land Cover Facility. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS'99 Proceedings. IEEE 1999 International (Vol. 1, pp. 616–618)*. IEEE.
- Loat, R., & Petrascheck, A. (1997). *Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Recommandations, Dangers Naturels*. Office Fédéral de L'économie Des Eaux, Office Fédéral de L'aménagement Du Territoire, Office Fédéral de L'environnement, Des Forêts et Du Paysage.
- Love, D. J., McGuire, J. S., Taylor, A., & Birch, D. (1988). Analysis of a High-hazard Flood Zone. *Floodplain Harmony. The Natural Hazards Research and Applications Information Center Institute of Behavioral Science*, (6).
- Mansilla, E. (1993). Desastres y desarrollo en México. *Revista Semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Desastres Y Sociedad , Consejo Mexicano de Ciencias Sociales*, 4–15.
- Mansilla, E. (2008). Marco general de riesgo en México. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction, 2009*, 37.
- Mansilla, E. (2010). Riesgo urbano y políticas públicas en América Latina: la irregularidad y el acceso al suelo. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. ISDR, UNDP, Corporación OSSO. ISSN, 0717-5051.*, 717–5051.
- Maza Álvarez, J. A., & Franco, V. (1997). Obras de protección para el control de inundaciones. In *Manual de Ingeniería de Rios*. México: CONAGUA, Subdirección General de Administración del Agua, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos.
- Mejía, I. (2013, September 17). Lluvias ocasionan inundaciones en Zacatecas. *El Universal*, p. 1. Zacatecas, México. Retrieved from <http://archivo.eluniversal.com.mx/estados/2013/zacatecas-lluvias-inundaciones-951225.html>
-



- 
- Merriam-Webster. (2017). Webster's Third New International Dictionary, Unabridged. Merriam-Webster. Retrieved June 12, 2017, from <http://unabridged.merriam-webster.com/>
- Milanesi, L., Pilotti, M., & Ranzi, R. (2015). A conceptual model of people's vulnerability to floods. *Water Resources Research*, 51(1), 182–197. <http://doi.org/10.1002/2014WR016172>
- Min, S., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Hegerl, G. C. (2011). Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470(7334), 378–381. <http://doi.org/10.1038/nature09763>
- Mishra, S. K., Tyagi, J. V., & Singh, V. P. (2003). Comparison of infiltration models. *Hydrological Processes*, 17(13), 2629–2652. <http://doi.org/10.1002/hyp.1257>
- Moel, H. de, Alphen, J. van, & Aerts, J. (2009). Flood maps in Europe-methods, availability and use.
- Mostert, E & Junier, S. J. (2009). The European flood risk directive : challenges for research. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 6, 4961–4988. Retrieved from [www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/6/4961/2009/](http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/6/4961/2009/)
- Nanía Escobar, L. S. (1999). Metodología numérico-experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Neteler, M., Bowman, M. H., Landa, M., & Metz, M. (2012). GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 31, 124–130. <http://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2011.11.014>
- OFDA/CREED. (2016). EM-DAT. Retrieved May 1, 2017, from <http://www.cred.be/emdat>
- OMM, & UNESCO. (2012). Glosario Hidrológico Internacional. Ginebra, Suiza: OMM, UNESCO/ Organización Meteorológica Mundial, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Retrieved from <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf>
- ONU. (2014). World Urbanizations prospects: the 2014 revision. New York. Retrieved from <https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-highlights.Pdf>
- ONU. (2015). World population prospects: the 2015 revision. New York. Retrieved from [https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key\\_findings\\_wpp\\_2015.pdf](https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key_findings_wpp_2015.pdf)
- Pacheco Contreras, C. A. (2009). Identificación de riesgos por inundación en Tlapa, Guerrero. Universidad Nacional Autónoma de México.
-

- 
- Penning-Rowsell, E., Floyd, P., Ramsbottom, D., & Surendran, S. (2005). Estimating injury and loss of life in floods: a deterministic framework. *Natural Hazards*, 36(1–2), 43–64.
- Purwandari, T., Hadi, M. P., & Kingma, N. C. (2011). A GIS modelling approach for flood hazard assessment in part of Surakarta city, Indonesia. *Indones J Geogr*, 43, 63–80.
- Ramsbottom, D., Floyd, P., & Penning-Rowsell, E. (2003). *Flood risks to people: Phase 1*. London: DEFRA.
- Ramsbottom, D., Floyd, P., & Penning-Rowsell, E. (2006a). *Flood risks to people. Phase*.
- Ramsbottom, D., Floyd, P., & Penning-Rowsell, E. (2006b). *Flood risks to people; phase 2: project record*. FD.
- Rodríguez-Rincón, J. P. (2016). Estimación probabilística de mapas de inundación: Una metodología basada en ensambles.
- Rodríguez-Rincón, J. P., Pedrozo-Acuña, A., & Breña-Naranjo, J. A. (2015). Propagation of hydro-meteorological uncertainty in a model cascade framework to inundation prediction. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 2981–2998.
- Rodriguez, H. (2006). Desarrollo humano y desastres en Veracruz. In *Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz* (Primera ed, pp. 173–189). Universidad Veracruzana. Retrieved from <https://www.uv.mx/eventos/inundaciones2005/>
- Rodríguez Rincón, J. P., Courty, L. G., Soriano Monzalvo, J. C., & Pedrozo-Acuña, A. (2017). Enfoque Integrado para la Determinación de Mapas de Inundación en Zonas Urbanas de México. In *XXIV Congreso Nacional de Hidráulica*. Acapulco, Guerrero, México. México, Cd.Mx.: Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Rodríguez Varela, J. M., Alcocer Yamanaka, V. H., Albornoz Góngora, P. M., Llaguno Guilberto, O. J., & Maldonado Silvestre, J. (2014). Problemática de inundaciones en zonas urbanas y propuestas de solución desde un enfoque matemático. México.
- Rodríguez Vázquez, H. G. (2013). *Inundaciones en zonas urbanas. Medidas preventivas y correctivas, acciones estructurales y no estructurales*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rojas, R., Feyen, L., & Watkiss, P. (2013). Climate change and river floods in the European Union: Socio-economic consequences and the costs and benefits of adaptation. *Global Environmental Change*, 23(6), 1737–1751. <http://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.08.006>
- Russo, B., Gómez, M., & Macchione, F. (2013). Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas. *Natural Hazards*, 69(1), 251–265. <http://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-013-0702-2>
-

- 
- Rusu, C., Gavrioloaie, C., & Giurgiu, E. (2011). Managementul inundațiilor în județul bistrița - năsăud. *Ecoterra*, 28, 155–162.
- Salas, M. A., & Jiménez, M. (2014). Serie de Fascículos: Inundaciones. México: CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Retrieved from [http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/183201446\\_FASCICULO\\_INUNDACIONES.pdf](http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/183201446_FASCICULO_INUNDACIONES.pdf)
- Salas Salinas, M. A. (2014). Cuadernos de investigación No. 49: Obras de protección contra inundaciones. (V. Ramos Radilla, Ed.) (Versión el). México: CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Retrieved from [www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/127-CUADERNOCUADERNODEINVESTIGACINOBRASDEPROTECCINCONTRAINUNDACIONES.PDF](http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/127-CUADERNOCUADERNODEINVESTIGACINOBRASDEPROTECCINCONTRAINUNDACIONES.PDF)
- Sampson, C. C., Bates, P. D., Neal, J. C., & Horritt, M. S. (2013). An automated routing methodology to enable direct rainfall in high resolution shallow water models. *Hydrological Processes*, 27(3), 467–476. <http://doi.org/10.1002/hyp.9515>
- SAPAL. (2014). Memoria del agua. León y sus inundaciones. León, Guanajuato, México.
- Sendroy Jr, J., & Collison, H. A. (1966). Determination of human body volume from height and weight. *Journal of Applied Physiology*, 21(1), 167–172.
- Soriano Monzalvo, J. C., & Pedrozo-Acuña, A. (2017). Determinación del Peligro por Inundación a Personas en Zonas Urbanas. In XXIV Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México. (p. 7). México, Cd.Mx.: Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Takahashi, S., Endoh, K., & Muro, Z. I. (1992). Experimental study on people's safety against overtopping waves on breakwaters. *Report on the Port and Harbour Institute*, 34(4), 4–31.
- Thieken, A. H., Müller, M., Kreibich, H., & Merz, B. (2005). Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. *Water Resources Research*, 41(12).
- Torres, M. A., Jaimes, M. A., Reinoso, E., Ordaz, M., Torres, M. A., Jaimes, M. A., ... Ordaz, M. (2013). Event-based approach for probabilistic flood risk assessment. *International Journal of River Basin Management* ISSN:, 12(4), 1–13. <http://doi.org/10.1080/15715124.2013.847844>
- UN-HABITAT. (2012). Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. Retrieved June 8, 2017, from <https://unhabitat.org/>
-

- 
- Vergara, M. del C., Ellis, E. A., Cruz, J. A., Alarcón, L. del C., & Galván del Moral, U. (2011). La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. *Política Y Cultura*, Otoño 2011, 45–69.
- Vilchis Gil de Arévalo, R. (2010, February 17). Intensifica el GEM Labores de Limpieza, en Zonas Afectadas. *Noticias Estado de México*, p. 1. Edo. México, México. Retrieved from <https://noticiastoluca.wordpress.com/2010/02/17/intensifica-el-gem-labores-de-limpieza-en-zonas-afectadas/>
- Walder, J. S., Watts, P., & Waythomas, C. F. (2006). Case study: mapping tsunami hazards associated with debris flow into a reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering.*, 132(1), 1–11. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:1\(1\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:1(1))
- Wallingford, H. R. (2006). Flood risks to people, Phase 2. Project record. Project Record. DEFRA, Department for Environment, Food and Rural Affairs/ Environment Agency. Report n.FD 2321/PR. London, U.K.
- Wright, D. B. (2016). Methods in Flood Hazard and Risk Assessment, Technical Notes. Washington, DC: Technical Notes developed under the World Bank LCR Probabilistic Risk Assessment Program (CAPRA). Retrieved from [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)
- Xia, J., Falconer, R. a., Wang, Y., & Xiao, X. (2014). New criterion for the stability of a human body in floodwaters. *Journal of Hydraulic Research*, 52(1), 93–104. <http://doi.org/10.1080/00221686.2013.875073>
- Xia, J., Guo, P., Falconer, R. A., & Chen, Q. (2016). Modelling of Flood Risks to People and Property in a Flood Diversion Zone. 12th International Conference on Hydroinformatics, 86(0), 1–8.
- Yee, M. (2003). Human stability in floodways. Undergraduate Honours Thesis, School of Civil and Environmental Engineering. University of New South Wales.